

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

**Les techniques d'aquaculture alternatives comme réponse à la
surexploitation des milieux aquatiques : problématique globale et
application au cas particulier de la Belgique**

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par
FETIE, Tiberius
en vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement
Finalité Gestion de l'Environnement Ma 120 ECTS ENVI5G-T
Année Académique : 2015-2016

Directeur : Prof. GYPENS Nathalie

Résumé :

Les milieux aquatiques sont soumis à de nombreuses pressions et se trouvent parfois en situation environnementale critique. La pêche et l'aquaculture participent à cette situation. Parallèlement à ce phénomène, la consommation humaine de produits halieutiques a connu une augmentation constante, bien que les prélèvements dans les milieux aquatiques semblent avoir atteint la limite de productivité de ces milieux. Il en ressort que l'augmentation de la production halieutique mondiale a été largement soutenue par l'aquaculture. Pourtant, celle-ci dépend également souvent de la pêche. Pour éviter une aggravation des dégradations des milieux aquatiques (notamment marins) mais aussi une rupture d'approvisionnement, une réponse adéquate est nécessaire. Partant de ce constat, ce travail se propose d'explorer différentes alternatives d'approvisionnement existantes (RAS, IMTA, Aquaponie) et de mettre en évidence leurs avantages/différences avec l'aquaculture "classique". Sur base de ces approches alternatives, il cherche à fournir des éléments de réponse concernant la viabilité, en termes de ressources nécessaires (eau, surface et énergie), d'une telle production aquacole au niveau de la Belgique, capable de fournir un auto-approvisionnement en produits halieutiques à hauteur de la consommation (~300 000 tonnes/an). Le travail conclut à une certaine faisabilité tant de la production aquacole seule (mais nécessitant un effort énergétique) que de la production des aliments nécessaires à cette aquaculture, mais dans ce dernier cas un effort important en termes d'espace de culture est nécessaire (la proximité d'un grand pays agricole, à savoir la France, pourrait constituer une voie de résolution du problème). En outre la continuité des habitudes de consommation alimentaire est également questionnée et indique le besoin d'un changement partiel (vers des espèces herbivores/omnivores), au risque d'augmenter les impacts sur l'environnement. Outre ces aspects techniques, le travail s'accompagne de considérations socio-économiques, légales et environnementales systémiques (dépassant le cadre des milieux marins). Par exemple, il promeut le double intérêt environnemental, direct (réduction des prises) et indirect (fonds reversés dans le développement /maintien des prix des produits de l'aquaculture alternative) d'une taxe sur les produits halieutiques sauvages (ou nourris à partir d'espèces sauvage).

Remerciements :

*Je tiens à remercier ma directrice de mémoire,
le professeur Nathalie Gypens, pour le suivi et
pour la disponibilité dont elle a fait preuve,
durant la réalisation de ce mémoire.*

*Je tiens également à remercier toutes les
personnes qui m'ont soutenu et aidé
tout au long de mes études à l'IGEAT.*

Table des matières

1. Introduction.....	7
2. État des lieux des milieux aquatiques.....	9
2.1 Menaces principales.....	9
2.2 Bilan des dégradations et mesures de protection.....	9
I) Indices et indicateurs :.....	9
II) État de la biodiversité marine :.....	12
III) Impacts dus à la (sur)pêche de capture.....	13
IV) Effets sur les communautés humaines.....	14
V) Protection des océans.....	15
3. Production et consommation de produits halieutiques.....	17
3.1 La situation dans le Monde.....	17
3.2 La situation en Europe.....	23
3.3 La situation en Belgique.....	25
4. L'aquaculture.....	27
4.1 Introduction.....	27
I) Historique :.....	27
II) Données socio-économiques.....	28
4.2 Techniques de production et espèces exploitées.....	30
I) Systèmes de production.....	30
II) Espèces aquacoles.....	33
III) Problèmes environnementaux, de santé et solutions envisageables.....	36
4.3 L'aquaculture continentale alternative.....	42
I) Les systèmes en eau recirculée (RAS).....	43
A) Fonctionnement.....	44
B) Caractéristiques techniques de production.....	49
C) Espèces exploitables en RAS.....	56
D) Déterminants de la viabilité économique d'une exploitation RAS.....	57
E) Principaux avantages et inconvénients.....	58
F) Orientations du développement.....	59
II) Aquaculture multi-trophique intégrée (IMTA / AMTI).....	59
A) Introduction.....	59
B) Application de l'approche IMTA aux RAS.....	62
C) Principaux avantages et inconvénients.....	64
5. Application et contexte belge.....	65
5.1 Besoins et disponibilité des ressources.....	65
I) Énergie.....	65
II) Surface.....	66
III) Eau.....	66
5.2 Réflexions concernant les besoins.....	66
I) Énergie.....	66
II) Espace.....	67
III) Espèces.....	67
IV) Économie.....	68
5.3 Situation des RAS en Belgique.....	69
5.4 Législation.....	69
6. Conclusions.....	71
7. Bibliographie.....	73

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Production pêche de capture (en millions de tonnes).

Tableau 2 : Production aquaculture (en millions de tonnes).

Tableau 3 : Production mondiale de l'aquaculture continentale et de la mariculture en 2012, par groupes d'espèces.

Tableau 4 : Production de plantes aquatiques cultivées dans le monde (en tonnes).

Tableau 5 : Total mondial de la pêche de capture et de l'aquaculture (en millions de tonnes).

Tableau 6 : Utilisation pêche de capture et aquaculture (en millions de tonnes).

Tableau 7 : Production mondiale en l'aquaculture de poissons, crustacés, mollusques, etc. (en tonnes), par producteurs principaux en 2013. Top 10 décroissant.

Tableau 8 : Production de la pêche de capture par espèces principales (en tonnes) et statut UICN.

Tableau 9 : Captures dans toutes les régions de pêche par les flottes de l'UE des 28, par an, exprimées en tonnes poids vif.

Tableau 10 : Consommation/approvisionnement dans l'Union Européenne

Tableau 11 : Les données concernant l'UE des 27 et portant sur l'année 2011.

Tableau 12 : Production halieutique belge, par capture et aquaculture (en tonnes).

Tableau 13 : Food balance sheet of fish and fishery products in live weight and fish contribution to protein supply. Belgium.

Tableau 14 : Principales espèces animales élevées en 2013, en eau salé/saumâtre avec quantités.

Tableau 15 : Principales espèces animales élevées en 2013, en eau douce avec quantités.

Tableau 16 : Principales espèces de plantes aquacoles produites en aquaculture en 2013

Tableau 17. Différentes modalités de mesure de l'intensité de la recirculation de l'eau dans les systèmes RAS, et les valeurs correspondant à ces intensités.

Tableau 18 : Transformations chimiques dans le bio-filtre. Étapes de la dégradation des déchets azotés.

Tableau 19 : Caractéristiques techniques de production des systèmes RAS comparées à un système classique.

Tableau 20 : Consommation, d'énergie, d'espace et productivité du travail par espèce de poisson produite en RAS, pour une exploitation de 100 tonnes/an.

Tableau 21 : Exemple de composition d'ingrédients d'une gamme de produits (BioMar) destinées à l'alimentation des truites élevées en systèmes recirculés.

Tableau 22 : Besoins en énergie, eau et terre pour la production d'une unité d'aliments (kg ou tonne) comprenant entre 10 et 30% d'huiles et farines de poissons, destiné à l'élevage piscicole de truites ou saumons.

Tableau 23 : Estimation des besoins en énergie, eau et surface pour satisfaire la demande en produits halieutiques belge, estimée à 300 000 tonnes par an.

Tableau 24 : Espèces exploitables en RAS, classées en trois catégories selon le degré de viabilité de la production sur base de critères techniques et économiques

Tableau 25. Principaux textes législatifs susceptibles de s'appliquer aux exploitations aquacoles en région wallonne.

Liste des figures :

Figure 1 : Indice Planète Vivante eau douce. Évolution de la biodiversité des espèces d'eau douce entre 1970 et 2010. Indice et intervalle de confiance.

Figure 2 : Indice Planète Vivante marin. Évolution de la biodiversité des espèces marines entre 1970 et 2012. Indice et intervalle de confiance.

Figure 3 : Indice Planète Vivante "poissons consommés". Évolution de la biodiversité des espèces de poissons marins exploités entre 1970 et 2010. Indice et intervalle de confiance.

Figure 4: Exemple de classification des systèmes de production aquacoles

Figure 5. Schéma détaillé d'un système en eau recirculée (RAS)

Figure 6 : Répartition (en %) de la consommation annuelle d'énergie dans une exploitation aquacole d'esturgeon en Roumanie avec système RAS super-intensif (80 à 100 kg/m³).

Figure 7 : Comparaison, en pourcent de l'impact le plus important, des impacts environnementaux d'un système en eau recirculé (SR) et deux systèmes ouverts (SO).

Figure 8 : Répartition des coûts de fonctionnement d'une exploitation RAS d'une production annuelle de 2000 tonnes de poissons.

Figure 9. Possibilités de conversion des aliments en biomasse valorisable dans une approche IMTA.

Figure 10. Exemple schématisé d'intégration multi-trophique élaborée de systèmes agricoles et aquacoles.

Acronymes :

AMP : Aire marine protégée

AST : Activated Suspension Technology

DHA : Acide docosahexaénoïque

BFT : Biofloc technology

EPA : Acide eicosapentaénoïque

ETP : Équivalent temps plein

FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations

FCR : Food conversion ratio

GES : Gaz à effet de serre

IMTA/AMTI : Integrated Multi-Trophic Aquaculture / Aquaculture multi-trophique intégrée

IPV : Indice planète vivante

IUCN/UICN : Union internationale pour la conservation de la nature

PCB : polychlorobiphényles

SC : Systeme compartimenté

SNC : Système non compartimenté

RAS/SAR : Recirculating aquaculture system / Système en eau recirculée

UE : Union européenne

UV : Ultra violet

ZORAS : zero-output recirculation system for aquaculture

ZSL : Zoological society of london

WWF : World Wide Fund

1. Introduction

Depuis longtemps, l'humanité se base majoritairement sur l'agriculture pour subvenir à ses besoins alimentaires (Mazoyer M. and Roudart L., 2002). Les milieux agricoles fortement anthropisés sont colonisés par des espèces domestiquées dont le rendement productifs, par rapport aux espèces sauvages, est amélioré. Bien que l'espace où cette activité est conduite ait été arraché à la nature au détriment des espèces sauvages, ce mouvement s'est fait de façon relativement progressive et a permis une certaine continuité de la vie sauvage, du moins jusqu'à récemment où ces milieux ont connu une dégradation de leurs conditions environnementales sous le poids des pressions démographiques et économiques. Le travail agricole qui y est effectué est, dans la majorité des cas, adapté à ce niveau de rendement (élevé) (Mazoyer M. and Roudart L., 2002).

Il en est tout autrement quand ce sont les milieux aquatiques (notamment marins) qui sont exploités. Dans ce cas, l'être humain se comporte toujours en chasseur-cueilleur, mais ses moyens de prélèvement se sont améliorés considérablement au fil du temps (~90 millions de tonnes/an : chapitre 3) tandis que la capacité de production des milieux aquatiques, longtemps perçue comme étant hors de portée des pêcheurs, s'est maintenue à un niveau relativement stable avec un déclin récent. Du fait du décalage entre prélèvements et productivité des milieux aquatiques, la pêche est devenue une des principales activités affectant ces milieux, notamment en termes de dégradations biologiques (chapitre 2), ce qui rend la consommation humaine de produits halieutiques non viable (chapitre 3). Les réponses qui ont été apportées à ce problème, à savoir l'aquaculture "classique" (sans réduction des impacts environnementaux), sont loin d'apporter une réponse satisfaisante et participent même à son aggravation (chapitre 4), alors même que d'autres problèmes (changements climatiques) risquant d'affecter tant les écosystèmes que leurs capacités de production (pêche et aquaculture), se profilent à l'horizon.

Actuellement, la production aquacole (chapitre 3) animale, sous l'impulsion de l'Asie et notamment de la Chine, talonne (~70 millions de tonnes/an) la "pêche de capture" (~90 millions de tonnes/an) (appelée ainsi par la FAO pour la différencier de la pêche sportive ou effectuée dans des milieux empoisonnés avec des poissons d'élevage) et est appelée selon divers scénarios que nous verrons, à la dépasser. Cependant ces scénarios ne tiennent pas compte de certaines informations essentielles qui risquent bien d'invalider leurs prévisions tant pour la pêche que pour l'aquaculture. Afin d'éviter une situation de pénurie aiguë de ressources alimentaires et de réduire la dégradation massive et irréversible des milieux aquatiques, l'emploi de techniques d'aquaculture "alternatives" (réduisant sensiblement les impacts environnementaux) compatibles avec une production intensive, semblent constituer une solution viable. Pour évaluer leur pertinence, nous analyserons les principaux effets de l'aquaculture sur l'environnement et les avantages que l'aquaculture alternative est susceptible d'apporter. Lorsque c'est possible, et pour des choses comparables, nous ferons appel à des analyses de cycle de vie. Deux approches d'aquaculture alternative seront détaillées. Comme celles-ci ont un vaste spectre d'applications, une limite a été définie (production sur le continent et en circuit fermé), en accord avec la réalité géographique de la Belgique (espace côtier relativement restreint).

Pour faciliter la compréhension du sujet, une classification des techniques aquacoles sera proposée.

Le présent travail est motivé par la volonté de répondre à une situation problématique environnementale (mais aussi stratégique et économique) actuelle. Son objectif principal est d'apporter des éléments de réponse concernant les possibilités techniques qu'a notre pays, la Belgique, de produire les aliments d'origine aquatique à hauteur de ce qui y est consommé (à savoir, environ 300 000 tonnes de produits halieutiques par an), tout en réduisant sensiblement les impacts environnementaux qui en découleraient s'ils étaient pêchés ou obtenus (ici ou ailleurs) par des techniques d'aquaculture classique. Nous chercherons à estimer les besoins en eau, surface et énergie nécessaires à une telle production, et ce dans deux cas : celui où la phase d'élevage seule est prise en compte, mais aussi celui où la production des aliments pour l'élevage est considérée. Nous chercherons également à déterminer si des changements de consommations alimentaires (espèces consommées) seront nécessaires. Bien que ce travail se focalise sur l'aspect technique et environnemental, des considérations économiques accompagneront et encadreront notre réflexion.

Plusieurs choix ont été faits dans ce mémoire. Le premier est de s'être intéressé au cas de la Belgique. Il s'explique, outre la volonté légitime de participer aux réponses sociétales locales concernant les préoccupations environnementales, par la densité importante de population qui y existe. De cette façon, les résultats obtenus seront plus facilement extrapolables à des régions moins densément peuplées. Un second choix a été de concentrer la recherche des dégradations des milieux aquatiques (chapitre 2) sur les milieux marins. Il s'explique par l'importance qu'occupe cette source d'approvisionnement (neuf dixièmes de la pêche de capture). Un troisième choix découle d'un compromis nécessaire. En effet, bien que cette étude se veut principalement focalisée sur la production de poissons, les systèmes aquacoles alternatifs (notamment l'IMTA et l'aquaponie) ainsi que la réalité de la consommation de produits halieutiques en Belgique (consommation importante de crustacés et mollusques), obligent de s'intéresser également aux autres espèces produites (plantes y compris). Enfin, la faible production belge par rapport à sa consommation (23 000 tonnes / 300 000 tonnes : chapitre 3, Tableau 13) explique le choix fait dans la première partie de ce mémoire, d'aborder la problématique de la dégradation des milieux aquatiques imputable à la surpêche et l'aquaculture classique, ainsi que ses effets sur l'environnement et les hommes, au niveau global plutôt qu'au niveau local. On peut observer que l'apport protéique issu du poisson représente 6 à 9 % de l'apport protéique total en Belgique entre 2007 et 2011 (chapitre 3, Tableau 13) alors qu'il est considéré comme principal au niveau mondial. On pourrait penser que la question des productions aquacoles alternatives n'a pas lieu de se poser en Belgique, mais ce serait ignorer la pression globale sur les ressources, que génère cette consommation nationale, et qui participe à l'impact général sur les milieux aquatiques.

2. État des lieux des milieux aquatiques

2.1 Menaces principales

Les milieux aquatiques tant marins que continentaux sont soumis à de nombreuses pressions (Amara R., 2010) qui affectent leur fonctionnement et réduisent leur diversité biologique (FAO, 2014a ; WWF, 2015), voir menacent leur existence en tant que milieu vivant (Burke L. et al., 2011 ; Hoegh-Guldberg O. et al., 2015 ; WWF, 2015). Ces pressions sont notamment : la pêche de capture (Nellemann C. et al., 2008), l'aquaculture (chapitre 4), la perte/dégradation des habitats (Amara R., 2010), le changement climatique et l'acidification des océans (Fabry V. et al., 2008 ; Hoegh-Guldberg O. et al., 2007 ; FAO, 2009b), les espèces invasives (Streftaris N. et Zenetos A., 2006), les industries extractives (Rochette J., 2014), l'accroissement du trafic maritime et/ou fluvial (Tournadre J., 2014), le tourisme (Copeland C., 2008), la pollution terrestre [eaux usées, déchets, fertilisants agricoles, déchets plastiques (Eriksen M. et al., 2014), particules de plastique (Cole M., 2013 ; Lusher A. et al., 2013), déchets chimiques (Dorneles P. et al., 2013), et des métaux-lourds (Garcia-Hernandez J. et al., 2007)].

Les interactions entre ces pressions ainsi que leur superposition donnent lieu à des effets combinés qui amplifient leurs effets néfastes. En effet, un type de pression peut rendre un milieu aquatique vulnérable à un autre type de pressions, auquel il était initialement insensible. La diversité des pressions s'exerçant de façon concomitante submerge les capacités adaptatives du milieu et des espèces qui le composent. De même, l'expression globale d'une grande somme de pressions locales peut être de nature et d'amplitude différente que celles de ces dernières.

2.2 Bilan des dégradations et mesures de protection

La dégradation des milieux aquatique peut revêtir différents aspects. Elle peut être d'ordre climatique (réchauffement des océans), physique (quasi-assèchement de la mer d'Aral), chimique (pollutions aux métaux lourds et aux pesticides) et biologique (perte de biodiversité, perte de la productivité halieutique). C'est à ce dernier aspect que nous allons nous intéresser, évoluant sous l'effet de la (sur)pêche. Ce type de dégradation est estimé à l'aide d'indices et indicateurs.

I) Indices et indicateurs :

Il existe de nombreux indices et indicateurs pour évaluer la situation ainsi que l'évolution de la biodiversité (Butchart et al. 2010; Levrel H. et al., 2010). Les plus importants pour notre étude

sont :

- Certaines catégories de l'indice planète vivante (IPV) :
 - L'IPV des populations d'eau douce (Figure 1) : indice construit sur base de l'observation de populations (3 066) de différentes espèces (757) de mammifères, d'oiseaux, de reptiles et de poissons d'eau douce, et vise à quantifier les changements temporels de la biodiversité. Sur un laps de temps de 40 ans (1970 à 2010) cet indice a connu une diminution de 76% correspondant à une réduction de la biodiversité (WWF, 2014).

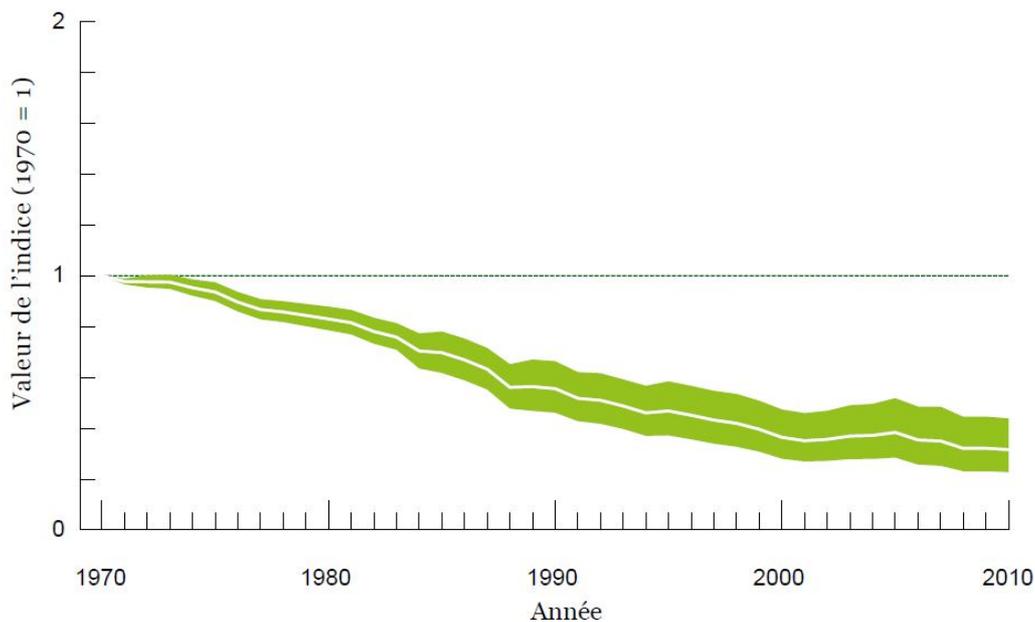


Figure 1 : Indice Planète Vivante eau douce. Évolution de la biodiversité des espèces d'eau douce entre 1970 et 2010. Indice et intervalle de confiance. (Source : WWF, 2014)

- L'IPV des populations marines (Figure 2) : indice construit sur base de l'observation de l'évolution de populations (5 829) de différentes espèces (1 234) de mammifères, d'oiseaux, de reptiles et de poissons marins, et vise à quantifier les changements temporels de la biodiversité. Sur un laps de temps de 42 ans (1970 à 2012) cet indice a connu une diminution de 49% correspondant à une réduction de la biodiversité (WWF, 2015).

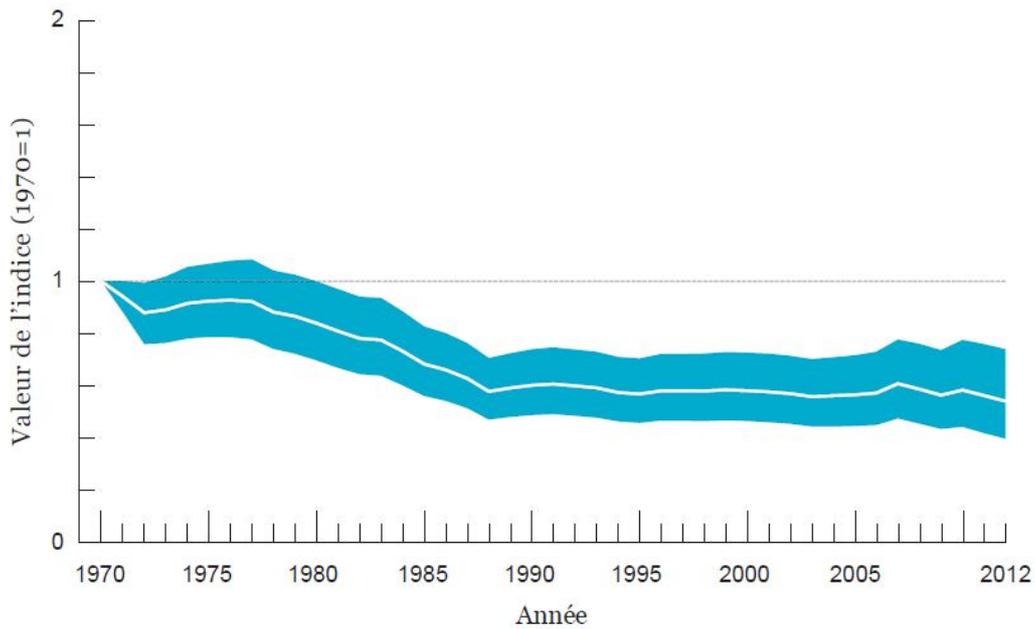


Figure 2 : Indice Planète Vivante marin. Évolution de la biodiversité des espèces marines entre 1970 et 2012. Indice et intervalle de confiance. (Source : WWF, 2015)

- L'IPV "espèces de poissons consommés" (Figure 3) : permet d'illustrer l'état des ressources halieutiques et plus particulièrement des stocks de poissons, et représente également une approche de la biodiversité intéressante pour notre étude (WWF, 2015).

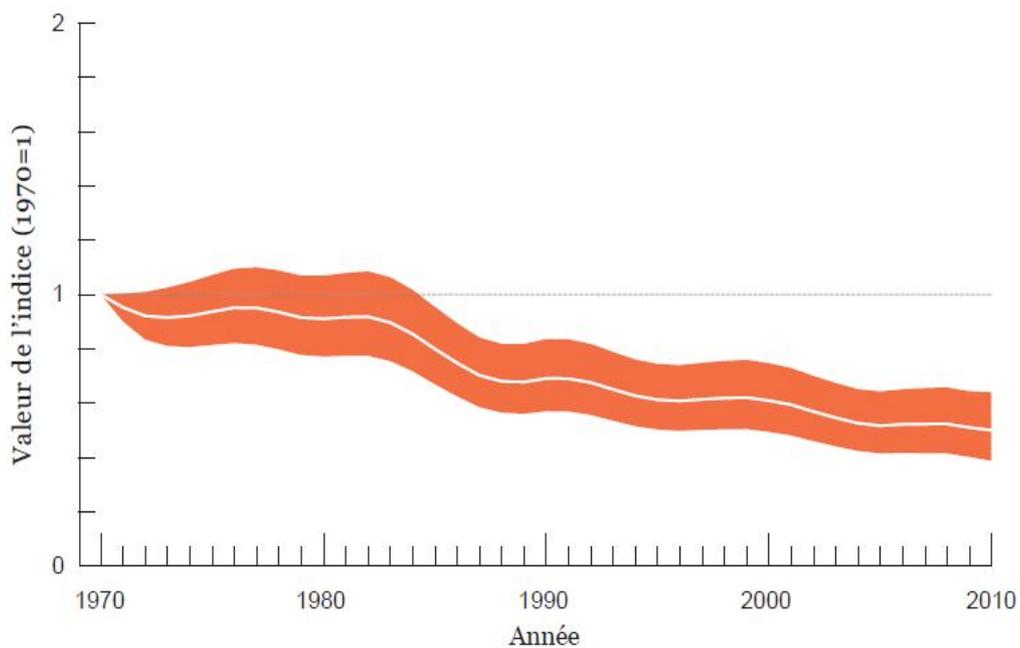


Figure 3 : Indice Planète Vivante "poissons consommés". Évolution de la biodiversité des espèces de poissons marins exploités entre 1970 et 2010. Indice et intervalle de confiance. (Source : WWF, 2015)

Sous cette forme agrégée (évolution de différentes populations et espèces illustrée par un seul pourcentage), l'indice représente une évolution moyenne, et masque ainsi des réalités différentes. Par exemple, à l'échelle mondiale, les effectifs augmentent sous les latitudes élevées (par rapport à un niveau lui-même en net retrait), alors qu'ils déclinent dans les zones tropicales et subtropicales (WWF, 2014 ; WWF, 2015).

- La réponse biologique dans les aires marines protégées (AMP) comme l'évolution de la densité, de la biomasse ou de la taille des animaux est un autre indicateur important fréquemment employé dans les études et rapports. Il dispose d'une importante assise empirique (FAO, 2012b).
- L'indice liste rouge (Statut des espèces marines dans le monde) de l'IUCN (International Union for Conservation of Nature). Cet indice de référence permet d'identifier les espèces les plus menacées d'extinction, ainsi que les types de danger auxquels elles sont soumises (Hoffmann M. et al. 2008 ; Polidoro B. et al., 2008). Il permet notamment de définir des priorités d'action dans l'établissement de zones marines protégées (Edgar G. et al. 2008 cité dans Polidoro B. et al., 2008). Toutefois, en ce qui concerne les espèces marines l'indice n'est pas fort étoffé et concerne seulement 1500 espèces (Polidoro B.A. et al., 2008).

II) État de la biodiversité marine :

La dégradation biologique des milieux marins recouvre plusieurs aspects. Il peut notamment s'agir de la diminution générale de la diversité biologique, de la diminution générale de la biomasse océanique, de la diminution d'espèces clés de voûte dont la présence est nécessaire au maintien d'autres espèces au sein d'un même écosystème, du dérèglement des chaînes trophiques, de la diminution de la quantité d'oxygène dissout accompagnant la création de zones mortes, ou encore de la perte d'habitats naturels. De nombreuses données et observations attestent de ces dégradations : l'IPV par exemple, met en lumière le déclin de différentes populations de poissons ainsi que celui d'autres espèces marines (voir point I et III), or l'océan étant formé d'écosystèmes en interaction cette tendance à la baisse est susceptible de se transmettre à de nombreux réseaux trophiques marins et d'altérer le fonctionnement de l'ensemble de l'écosystème océanique (McCauley D. et al., 2015). L'accroissement du nombre d'espèces sur la liste rouge de l'IUCN fait également écho à cette situation, accroissement susceptible d'être en réalité beaucoup plus important car seul un petit nombre d'espèces marines sont évaluées par cet indice. Certaines espèces clés de voûte ont également connu par endroits une diminution très importante de leurs effectifs (holothuries, krill) pouvant représenter jusqu'à 98% des effectifs initiaux (Shepherd S. et al., 2004 ; Lawrence A. et al., 2005 ; Purcell S. et al., 2012 ; Purcell S. et al., 2013). De nombreuses autres espèces, tant animales que végétales, importantes pour le fonctionnement des écosystèmes ont connu un sort similaire. Citons le cas des raies et requins (Cortés E., 2000 ; Dulvy N. et al., 2014 ; Site5), de certaines tortues marines (WWF, 2015 ; liste rouge de l'IUCN), des récifs coralliens (Hoegh-Guldberg O. et al., 2015 ; GBRMPA, 2014), des herbiers marins (Waycott M. et al., 2009), des mangroves (WWF, 2015). Des espèces rares et/ou très spécialisées, comme les poissons d'eau profonde sont également

concernées (WWF, 2015). L'évolution des catégories de l'IPV rend compte de ces tendances.

III) Impacts dus à la (sur)pêche de capture

La dégradation de la biodiversité des océans et de ses écosystèmes a de nombreuses causes dont la (sur)pêche de capture. Selon la FAO (FAO, 2014a) au moins deux phénomènes de surexploitation peuvent être taxés de surpêche : la capture d'individus peu développés n'ayant pas atteint leur niveau productif maximal (surpêche de potentiel) et la capture d'un nombre d'individus supérieur à celui nécessaire à la reconstitution et/ou au maintien de la population (surpêche du potentiel reproducteur). C'est surtout ce deuxième point qui nous intéresse dans le cadre de notre travail. La pêche implique deux types d'effets sur la faune et la flore marine : les effets directs et les effets indirects. Les premiers représentent les prélèvements voulus issus de la (sur)pêche de capture que nous allons illustrer au travers de l'évolution de l'IPV "poissons consommés" mais aussi les prises secondaires. Les seconds sont associés aux méthodes, pratiques et outils de pêche et concernent également les prises accessoires.

Pour comprendre l'ampleur du nombre d'espèces de poissons marins exploités et les tendances des stocks, nous allons nous baser sur l'IPV. Celui-ci classe 492 espèces de poissons (constitués de 1463 populations) sur les 930 espèces prises en compte, comme "consommés", c'est à dire exploités. L'indice qui se dégage de cette classification met en évidence une réduction de 50% de leurs effectifs au niveau mondial sur une période allant de 1970 à 2012 (WWF, 2015). Sur les 1463 populations étudiées, 456 sont aujourd'hui menacées. La FAO considère qu'à l'heure actuelle 29% des stocks de poissons sont surexploités tandis que 61% le sont complètement (càd à un niveau de prélèvement maximal, permettant toutefois la régénération de la ressource), et donc sans possibilité d'accroissement des prises (FAO, 2014a). Le cas des scombridés (maquereaux, bonites, thons, thazards) illustre cette situation. Sur les 58 populations considérées par l'IPV (appartenant à 17 espèces), on remarque une baisse de 74% entre 1970 et 2010, sans aucun signe de redressement. Bien que les techniques de pêche continuent de s'améliorer, la quantité de poissons pêchés stagne. Le poids total des pêches (marines) s'élevait à 79,7 millions de tonnes en 2012, contre 80,7 en 2007 (FAO, 2014a ; Chapitre 3, Tableau 1). Enfin pour seulement 10 % des pêches, une augmentation des captures est envisageable (WWF, 2015 ; FAO, 2014a). Les dix espèces commerciales fournissant un quart de l'approvisionnement en produits halieutiques de capture font partie de celles dont les stocks sont déjà en majorité surexploités (morue de l'Atlantique Nord-Ouest, un tiers des espèces de thons) ou exploités au maximum (anchois du Pérou du Pacifique Sud-Est, bonites, maquereaux espagnols du Pacifique Est et du Pacifique Nord-Ouest, morue de l'Atlantique Nord-Est, lieu d'Alaska du Pacifique-Nord, hareng de l'Atlantique Nord-Est et Nord-Ouest) (FAO, 2014a).

Les impacts directs dus à la pêche ont une dimension qualitative et quantitative. La pêche affecte directement les populations exploitées mais également d'autres populations d'espèces non directement visées (tant animales que végétales), à tel point qu'elle est considérée comme la cause principale du déclin des espèces marines (WWF, 2015 ; Amara R., 2010). Les prises annuelles illégales non réglementées et non déclarées sont estimées entre 11 et 26 millions de tonnes de

poisson (Agnew D. et al., 2009) soit entre 12 et 28,5 % de la production mondiale des pêches de capture (FAO, 2014a). Signalons aussi la capture d'espèces de poissons d'eaux profondes, qui vise de plus en plus des espèces dont le cycle de vie est long, ce qui les rend particulièrement vulnérables aux activités halieutiques, et dont les effectifs sont en train de s'effondrer (Morato T. et al., 2006 ; Devine J. et al., 2006).

Outre ses effets directs, la pêche affecte les écosystèmes marins de plusieurs autres façons. Le chalutage de fonds est une des techniques au travers desquelles sont provoquées ces impacts. Certains écosystèmes sont particulièrement vulnérables à l'utilisation des techniques de pêche impliquant ce type de matériel comme les habitats d'eaux profondes, notamment employées en Atlantique Nord (FAO, 2009a). Les différents types de techniques de pêche sont également responsables de la destruction des récifs de coraux ou celle des herbiers marins (WWF, 2015 ; WWF-ZSL, 2015). Les prises accessoires (7,3 tonnes/an) touchent de nombreux poissons qui ne sont pas initialement visés, mais également de nombreuses autres espèces, comme les mammifères marins, les tortues marines et des oiseaux (Kelleher K., 2005 ; Amara R., 2010). De manière générale elles sont en augmentation et affectent des espèces parmi lesquelles certaines sont plus vulnérables à l'exploitation. Ainsi les prises de requins, raies et espèces voisines ont triplé sur une période de 53 ans, allant de 1950 à 2003 (Dulvy N. et al., 2014), constat qui pourrait être bien supérieur (de trois à quatre fois) à ce qui est déclaré car la capture des requins et des raies est rarement réglementée (Clarke S. et al., 2006 ; Worm B. et al., 2013).

Bien que la pression sur les espèces de grande taille et à faible capacité reproductrice soit alarmante, elle doit être comprise dans un contexte où la pyramide alimentaire océanique est exploitée également par le bas. Les prises d'espèces de petites tailles représentaient 44% du total des prises en 2000 (Naylor, R. et al., 2000). Ce type de pêche (visant les espèces de petite taille) affecte le fonctionnement de l'écosystème dans son ensemble (Pauly D. et al., 2005). Les petites espèces pélagiques sont un maillon essentiel des écosystèmes marins et constituent la base alimentaire de nombreuses espèces marines. Leur exploitation massive, pour la consommation humaine directe ou pour la transformation (huiles, farines), prive de nombreuses espèces de leur ressource alimentaire.

Enfin, il est important de préciser que la capacité de capture totale de toutes les flottes de pêche maritimes dépasse de deux à trois fois les capacités de renouvellement des populations marines (Nellemann C. et al., 2008). Dans ces conditions, il est aisé de comprendre l'importance des pressions que font peser ces activités sur les écosystèmes marins.

IV) Effets sur les communautés humaines

La disparition des espèces préférentiellement consommées, occupant une place primordiale dans les économies régionales, ou nécessaires à la survie de communautés locales et/ou vulnérables, entraîne des problèmes en termes de disponibilité de ressources alimentaires, de conflits ou d'ordre économique (WWF, 2015). La mauvaise gestion des ressources halieutiques affecte l'humanité dans

son ensemble car la pêche représente le principal apport de protéines pour de nombreuses personnes (FAO, 2014a). Par ailleurs, certaines pratiques de pêche détruisent la ressource halieutique en même temps que son habitat et les services écosystémiques qu'il fournit (Burke L. et al., 2011 ; WWF, 2015). Ceux-ci pouvant être d'ordre global, comme le stockage de grandes quantités carbone (Fourqurean et al., 2012) ou d'ordre local.

La diminution des stocks de poissons risque aussi d'aggraver les inégalités d'accès aux ressources, déjà grandes entre pêcheurs artisanaux et navires industriels de pêche, mais aussi entre les pêcheurs artisanaux eux-mêmes et générer dans les deux cas des conflits. Ces conflits en mer sont susceptibles de se transmettre à terre et provoquer une instabilité sociale, politique et économique, amplifié dans le cas où le secteur de la transformation y est fortement développé. La perte brutale de 40 000 emplois début des années 90 sur l'île canadienne de Terre-Neuve suite à l'effondrement des stocks de morues (WWF, 2015), illustre bien l'ampleur des problèmes pouvant apparaître. Or ce bouleversement s'est produit dans un pays développé mais, dans bien des cas, les ressources halieutiques constituent une ultime source alimentaire pour des populations déjà fragilisées. De plus dans un contexte de changement climatique, certaines espèces (ressources) peuvent migrer vers des zones leur étant plus propices tandis que d'autres peuvent devenir impropres à la consommation (Beaugrand G. et Goberville E., 2010). Dans ces cas, seuls les navires de pêche industriels pourront se déplacer pour atteindre les ressources utiles.

Par ailleurs la consommation de produits de la pêche comporte également des risques sanitaires due à la pollution (bio-concentré) des milieux aquatiques (métaux-lourds, polluants organiques de synthèse, toxines) (Colombo J., 2000 ; EFSA, 2005 ; Dallinger R, 1987), ou à l'intoxication par des produits périmés (FAO, 2014a). Dans les deux cas, les filières non réglementées et non contrôlées ou assimilables à la pêche illégale constituent un facteur de danger (FAO, 2014a).

Enfin, notons que selon certains l'exploitation non durable des océans provoquerait un manque à gagner économique de 50 milliards de dollars (USD) par an pour le secteur de la pêche (Arnason et al., 2008).

V) Protection des océans

Il existe de nombreux traités et accords visant la protection des milieux océaniques (FAO, 2012b, page72, encadré12). Certains concernent spécifiquement la pêche :

- L'accord visant à favoriser le respect par les navires de pêche en haute mer des mesures internationales de conservation et de gestion, de 1995 (FAO)
- L'accord aux fins de l'application des dispositions de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer du 10 décembre 1982 relatives à la conservation et à la gestion des stocks de poissons dont les déplacements s'effectuent tant à l'intérieur qu'au-delà de zones

économiques exclusives (stocks chevauchants) et des stocks de poissons grands migrateurs (Accord des Nations Unies sur les stocks de poissons [ANUSP])

- Instruments régionaux : résolutions contraignantes des organismes régionaux des pêches (ORP ou ORGP) et conventions régionales sur les mers
- Code de conduite pour une pêche responsable (CCPR) et les Plans d'action internationaux (PAI) et autres instruments qui y sont associés (FAO)
- Déclaration de la Conférence internationale sur la pêche responsable (Déclaration de Cancun), 1992.

L'outil de gestion et de protection le plus souvent appliqué est l'aire marine protégée (AMP) (Toropova, C. Et al, 2010). Cet outil ne dispose pas d'une définition unanime (FAO, 2012b) et des niveaux de protection différents peuvent y être rencontrés (UICN, 1994 ; Dudley, 2008). L'efficacité des AMP semble établie dans de nombreux cas sans toutefois être universelle, les facteurs humains et les caractéristiques de certaines espèces, notamment la vulnérabilité à l'exploitation ou à la dégradation de leur milieu y jouent un rôle déterminant (Halpern, 2003 ; Brander et al., 2015). L'emploi des AMP prend tout son sens quand elles sont organisées en réseaux, l'efficacité tant pour la protection de la biodiversité que pour la capacité à fournir des ressources halieutiques en est grandement améliorée (FAO, 2012b) ainsi que le potentiel économique (Brander et al., 2015). Les AMP ne peuvent cependant réduire qu'en partie les pressions que subissent les milieux marins. L'indice liste rouge de l'UICN est souvent utilisé pour déterminer les priorités de protection, et donc pour établir les AMP, mais comme un nombre limité d'espèces y sont évaluées la protection se fait dans beaucoup d'endroits sans les données nécessaires (Polidoro B. et al., 2008).

D'autres mesures de protection existent et peuvent être divisées en deux catégories : les mesures techniques d'un côté, et les mesures socioculturelles, socio-économiques et politiques d'un autre. Les premières comprennent par exemple l'utilisation d'hameçons alternatifs (circulaires) dont l'utilisation permet de réduire de 80% les prises accidentelles (WWF, 2015) ou l'interdiction du chalutage de fonds qui permet d'augmenter la productivité en poissons des milieux où ces mesures sont appliquées (Collie et al., 2005 ; Pitcher et al., 2008). La seconde catégorie comprend les labels (comme le MSC pour la pêche et l'ASC pour l'aquaculture) et leur promotion auprès des consommateurs, la lutte contre la pêche illégale, la réorientation des flux financiers et des subventions aux flottes de pêche, l'instauration d'une gouvernance équitable des ressources et l'application réelle et contrôlée des instruments, traités et engagements internationaux, l'établissement d'une valeur marchande conféré aux services écosystémiques rendus par l'océan, l'organisation en collectivités des pêcheries artisanales et la vente directe de leurs produits aux consommateurs (WWF, 2015). Citons également les outils permettant d'améliorer la transparence du secteur comme la plate-forme numérique [TransparentSea.org](#) (Site 6) permettant le partage des données de localisation des navires de pêche.

3. Production et consommation de produits halieutiques.

La consommation alimentaire directe des produits halieutiques est la principale motivation de la pêche de capture. Mais ce n'est pas la seule. La production aquacole impliquant l'élevage d'espèces carnivores (marines) en devient parfois aussi un moteur, car de grandes quantités d'huiles et de farines de poissons, sources d'acides gras (EPH et DHA), y sont nécessaires. En 2010, ce secteur a consommé 73 % de la farine et 71 % de l'huile de poissons (FAO, 2014a). D'autres utilisations industrielles (pharmaceutique, cosmétique, alimentaire de transformation, traitement de l'eau) ont également été rendues possibles par les progrès technologiques (microencapsulation, nanoencapsulation) (FAO, 2014a) et contribuent à la surexploitation des océans. Les pressions sur les milieux aquatiques, mais aussi la dépendance envers ceux-ci s'en voient renforcés. Entre 2008 et 2012, 9 à 12 % de la production halieutique totale a été réduite (càd transformée en huiles et farines), pourcentage qui augmente jusqu'à environ 20% si on considère uniquement la pêche de capture (FAO, 2014a). Signalons que, dans certains cas, des plantes aquatiques peuvent se substituer à ces utilisations (FAO, 2014a ; McHugh, D., 2003 ; Schwartz M., 2005), tout en étant des coproduits de certains systèmes aquacoles alternatifs que nous analyserons (voir IMTA).

3.1 La situation dans le Monde

Entre 2007 et 2013 la production mondiale de pêche de capture a plafonné autour de 90 millions de tonnes (Mt), toutes espèces confondues, dont 80 Mt proviennent de la pêche maritime et le reste de la pêche continentale (Tableau 1). Sur la même période, la production aquacole a augmenté de 41 %, et atteint 70,2 Mt en 2013. Cette augmentation est en grande partie imputable à l'aquaculture continentale (Tableau 2). Les poissons représentent la plus grande proportion de cette production (66,3 % en 2012) (Tableau 3). Si on considère une période plus longue (1980 à 2012) la production aquacole a connu une croissance moyenne de 8,6 % par an (FAO, 2014a) avec un léger ralentissement (6,2 %) sur la dernière décennie (2000 à 2012). La production de plantes aquatiques a également connu un essor rapide (Tableau 4). La production mondiale totale de produits halieutiques, toutes sources confondues (plantes aquatiques non incluses) atteint 162,7 Mt en 2013 et la tendance constatée sur la période 2007 à 2013 indique une augmentation constante (Tableau 5). Si on en déduit les quantités non utilisées pour l'alimentation humaine (14%) on obtient le chiffre de 136,2 Mt (2012) qui correspond à la consommation mondiale totale directe de produits halieutiques, soit 86 % (Tableau 6). Ce pourcentage était de 71 % dans les années 1980, ce qui y indique la aussi une hausse importante (FAO, 2014a). Rapporté à la population mondiale, estimée à 7,1 milliards d'individus, on obtient une offre par personne de 19,2 kg par personne et par an (Tableau 6). Cette moyenne était de 9,9 kg/personne/an en 1960 (FAO, 2014a). Ces quantités moyennes, ne reflètent en rien les énormes disparités qui correspondent aux réalités locales. Si on considère l'offre par personnes en fonction des pays le tableau est tout autre. Par exemple, en Inde, la consommation est de 5,2 kg/habitant/an contre 51,7 au Japon. Les 14 % restants (21,7 Mt), sont utilisés principalement pour produire de la farine et de l'huile de poisson (75 % de ce volume, soit

16,3 Mt) mais également à des fins ornementales, d'élevage (capture d'alevins, de fretin...), comme appâts, dans l'industrie pharmaceutique et comme matière première pour l'alimentation directe des poissons d'élevage, du bétail et des animaux à fourrure (FAO, 2012a ; FAO, 2014a).

*Tableau 1 : Production pêche de capture (en millions de tonnes).
(Source : FAO, 2014a, page 4, tableau 1 ; Site1)*

<i>Année</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>
Continentale :	10,1	10,3	10,5	11,3	11,1	11,6	11,7
Maritime :	80,7	79,9	79,6	77,8	82,6	79,7	80,9
Total pêche de capture	90,8	90,1	90,1	89,1	93,7	91,3	92,6

*Tableau 2 : Production aquaculture (en millions de tonnes).
(Source : FAO, 2014a, page 4, tableau 1 ; FAO, 2015a)*

<i>Année</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>
Continentale :	29,9	32,4	34,3	36,8	38,7	41,9	44,7
Maritime :	20,0	20,5	21,4	22,3	23,3	24,7	25,5
Total aquaculture	49,9	52,9	55,7	59,0	62,0	66,6	70,2

*Tableau 3 : Production mondiale de l'aquaculture continentale et de la mariculture en 2012, par groupes d'espèces élevées.
(Source : FAO, 2014a, page 27, tableau 8)*

	Aquaculture continentale	Mariculture	Sous-total en quantité		Sous-total en valeur	
	<i>(Millions de tonnes)</i>	<i>(Millions de tonnes)</i>	<i>(Millions de tonnes)</i>	<i>(Pourcentage par volume)</i>	<i>(Millions d'USD)</i>	<i>(Pourcentage par valeur)</i>
Poisson	38,599	5,552	44,151	66,3	87 499	63,5
Crustacés	2,530	3,917	6,447	9,7	30 864	22,4
Mollusques	0,287	14,884	15,171	22,8	15 857	11,5
Autres espèces	0,530	0,335	0,865	1,3	3 512	2,5
Total	41,946	24,687	66,633	100	137 732	100

*Tableau 4 : Production de plantes aquatiques cultivées dans le monde (en tonnes).
(Source : FAO, 2014a, page 29, tableau 9 ; FAO, 2015a)*

<i>Année</i>	<i>1990</i>	<i>1995</i>	<i>2000</i>	<i>2005</i>	<i>2010</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>
Volume	3 765 325	6 849 215	9 306 042	13 518 946	19 009 667	23 776 449	26 978 312

*Tableau 5 : Total mondial de la pêche de capture et de l'aquaculture (en millions de tonnes).
(Source : FAO, 2014a, page 4, tableau 1 ; Site 1)*

<i>Année</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>
Total pêche	90,8	90,1	90,1	89,1	93,7	91,3	92,5
Total aquaculture	49,9	52,9	55,7	59,0	62,0	66,6	70,2
Total	140,7	143,1	145,8	148,1	155,7	158,0	162,7

*Tableau 6 : Utilisation pêche de capture et aquaculture (en millions de tonnes).
(Source : FAO, 2014a, page 4, tableau 1)*

Année	2007	2008	2009	2010	2011	2012(donnés provisoires)
Consommation humaine	117,3	120,9	123,7	128,2	131,2	136,2
Usages non alimentaires	23,4	22,2	22,1	19,9	24,5	21,7
Population (milliards de personnes)	6,7	6,8	6,8	6,9	7,0	7,1
Offre par personne de poisson destiné à la consommation (kg)	17,6	17,9	18,1	18,5	18,7	19,2

La Chine influence fortement les tendances mondiales à la hausse tant en ce qui concerne la production que la consommation de produits halieutiques. En 2013 sa production aquacole est de 57,1 millions de tonnes (Mt) sur une production totale propre de 73,6 Mt, 16,6 Mt correspondant aux quantités capturées (tous milieux confondus). En 1990, ces quantités étaient respectivement, de 7,9 Mt pour l'aquaculture, de 14,6 Mt pour la production totale et de 6,7 Mt pour la pêche de capture. La Chine a donc multiplié par 2,5 les quantités issues de la pêche de capture tandis qu'elle a multiplié par 7,2 sa production aquacole (FishStatJ). Ces chiffres incluent également les végétaux aquatiques dont la production est estimée pour 2013 à 13,8 Mt (Site1, FAO). La consommation y a atteint 35,1 kg/habitant/an en 2010 (FAO, 2014a), contre 18,9 au niveau mondial ou 15,4 si on retire l'apport de la Chine (FAO, 2014a). En 2012, la Chine a produit 100 fois l'équivalent de la production aquacole (hors plantes) des États-Unis, soit 41 108 306 tonnes contre 420 024 tonnes (FAO, 2012a). Dans son ensemble, l'Asie génère 88 % de la production aquacole mondiale (en volume) (FAO, 2014a), ce qui représente 54% de sa production halieutique totale (FAO, 2014a). En 2013, les principaux producteurs de produits aquacoles sont la Chine, l'Inde, l'Indonésie et le Vietnam. En ce qui concerne la pêche de capture l'ordre est le suivant : Chine, Indonésie, Pérou, USA (Tableau 7).

*Tableau 7 : Production mondiale en l'aquaculture de poissons, crustacés, mollusques, etc.(en tonnes), par producteurs principaux en 2013. Top 10 décroissant de gauche à droite. (les données ne comprennent pas les plantes aquatiques)
(Source : Site1).*

Chine	Inde	Indonésie	Vietnam	Bangladesh	Norvège	Égypte	Thaïlande	Chili	Birmanie
43 549 738	4 549 607	3 819 732	3 207 200	1 859 808	1 247 865	1 097 544	1 056 944	1 033 206	929 180
<i>Captures de poissons, crustacés, mollusques, etc. (en tonnes) par principaux producteurs en 2013. Top 10 décroissant de gauche à droite. (les données ne comprennent pas les plantes aquatiques) (Source : Site1).</i>									
Chine	Indonésie	Pérou	USA	Inde	Russie	Birmanie	Japon	Vietnam	Philippines
16 274 926	6 101 725	5 854 233	5 230 874	4 645 182	4 345 868	3 786 840	3 656 854 F	2 803 800	2 331 721
<i>F = estimations FAO</i>									

Les prévisions sur l'évolution de la production mondiale envisagent plusieurs scénarios pour l'horizon 2022 (FAO, 2014a) et 2030 (WB, 2013) avec des estimations de production totale entre 181 et 209 millions de tonnes (Mt). Dans quasi tous les scénarios envisagés, l'aquaculture est

appelée à soutenir cette augmentation et à dépasser la production de capture. La production aquacole se situerait ainsi entre 93,6 et 116,2 tonnes tandis que la pêche de capture resterait plafonnée entre 90 et 95 tonnes ce qui correspond à peu près à la situation d'aujourd'hui.

Cependant, la FAO admet que la pêche de capture semble avoir atteint son niveau de production actuel au prix d'une surexploitation des ressources, et que si la pêche ne s'effectue pas de façon plus durable sa productivité pourrait décliner (FAO, 2014a). Cet élément n'a pas été intégré aux scénarios de la FAO, ni à aucune autre prévision (FAO, 2014a). Or ce niveau de production n'a rien de durable, il découle d'une expansion géographique et spécifique continue et non de la régénération des stocks exploités (Pauly D. et al., 2002), ce qui mène à la disparition d'espèces abondantes (Pauly D. et al., 2005). La protection et la reconstitution des stocks nécessitent donc une réduction importante des quantités prélevées et la mise en place de restrictions en termes de quantités, ce qui va de pair avec une baisse de la production. Pour cette raison, le maintien ou l'augmentation du niveau des captures prévu par quasi tous les scénarios paraît peu probable à moyen terme, car d'une façon ou d'une autre il sera amené à décliner, voir à s'effondrer. Quoi qu'il en soit, pour assurer une consommation moyenne par personne équivalente à 19kg/an, et dans un contexte d'augmentation démographique au niveau mondiale, qui devrait atteindre les 9,6 milliards d'individus en 2050, la production, toutes sources confondues, devra augmenter de 47,5 millions de tonnes (FAO, 2014a). Dans ces conditions, il est certain que l'aquaculture sera un élément déterminant.

La FAO dénombre 1 600 espèces aquatiques exploitées, mais la pêche de capture s'appuie essentiellement sur quelques-unes d'entre elles. Les principales espèces capturées sont présentées dans le tableau 8. Les 45 espèces représentées comptent pour 40 % de la production totale de la pêche de capture, tandis que si seul le milieu marin est considéré, le même pourcentage est atteint par 23 espèces, les deux tiers étant des petits poissons pélagiques (FAO, 2014b). On observe pour certaines espèces (par ex. les anchois) de grandes variations des quantités prélevées qui se répercutent dans le total des captures. L'ordre et les quantités (en millions de tonnes, Mt) par groupement d'espèces sont les suivants, les harengs, sardines et anchois (17,6 Mt), les poissons pélagiques divers (10,4 Mt) les morues, merlus et églefins (7,7 Mt), les thons, pélamides et marlins (7,2 Mt), les encornets, seiches, poulpes (4 Mt), les crevettes (3,4 Mt), les carpes, barbeaux et autres cyprinidés (1,5 Mt), les crabes et araignées de mer (1,5 Mt), les flets, flétans, soles (~1 Mt) et les Saumons, truites, éperlans (~1 Mt) (FAO, 2014b). Par ailleurs, on peut remarquer que certaines espèces (morue de l'Atlantique, thon obèse, églefin) sont considérées comme vulnérables mais sont cependant massivement exploitées (Tableau 8). De plus, étant donné l'absence d'évaluations et le manque d'informations, d'autres espèces parmi les plus pêchées sont susceptibles d'être menacées, d'autant plus que près de 11 Mt ne sont pas identifiées (FAO, 2014b).

Tableau 8 (partie I) : Production de la pêche de capture par espèces principales (en tonnes) et statut UICN.
(Source : FAO, 2014b ; site 20 ; Site 21)

Nom <i>Nom scientifique</i>	Année					Statut UICN
	2008	2009	2010	2011	2012	
Anchois du Pérou <i>Engraulis ringens</i>	7 419 295	6 910 467	4 205 979	8 319 597	4 692 855	LC
Lieu de l'Alaska <i>Theragra chalcogramma</i>	2 649 155	2 502 061	2 828 070	3 207 063	3 271 426	NE
Bonite à ventre rayé (ou thon lisato) <i>Katsuwonus pelamis</i>	2 524 665	2 669 716	2 634 097	2 644 767	2 795 339	LC
Hareng de l'Atlantique <i>Clupea harengus</i>	2 479 203	2 516 755	2 203 687	1 780 268	1 849 969	LC
Maquereau espagnol <i>Scomber japonicus</i>	1 930 286	1 641 344	1 635 449	1 715 536	1 581 314	LC
Albacore <i>Thunnus albacares</i>	1 190 383	1 155 612	1 234 027	1 239 232	1 352 204	NT
Anchois japonais <i>Engraulis japonicus</i>	1 270 331	1 072 589	1 204 106	1 325 758	1 296 383	NE
Poisson-sabre commun <i>Trichiurus lepturus</i>	1 359 660	1 346 372	1 340 760	1 258 389	1 235 373	LC
Morue de l'Atlantique <i>Gadus morhua</i>	770 503	868 049	951 933	1 051 545	1 114 382	VU
Sardine commune <i>Sardina pilchardus</i>	1 065 295	1 244 588	1 245 956	1 037 161	1 019 392	LC
Capelan <i>Mallotus villosus</i>	254 452	364 729	506 897	853 449	1 006 533	NE
Encornet géant <i>Dosidicus gigas</i>	895 365	642 855	815 978	906 310	950 630	DD
Maquereau commun <i>Scomber scombrus</i>	611 006	707 178	887 444	945 452	910 697	LC
Hareng araucian <i>Strangomera bentincki</i>	795 139	855 262	750 750	887 272	848 466	NE
Chevrette akiami <i>Acetes japonicus</i>	558 124	602 420	573 613	550 297	588 761	NE
Menhaden écailléux <i>Brevoortia patronus</i>	420 719	454 758	438 640	623 369	578 693	LC
Sardinelle indienne <i>Sardinella longiceps</i>	428 529	452 143	429 739	503 693	560 145	LC
Anchois <i>Engraulis encrasicolus</i>	551 285	537 567	588 065	607 118	489 297	LC
Morue du Pacifique <i>Gadus macrocephalus</i>	339 015	333 730	394 350	437 340	474 047	NE
Balaou du Japon <i>Cololabis saira</i>	622 119	475 727	432 372	458 954	460 961	NE
Hareng du Pacifique <i>Clupea pallasii</i>	283 915	306 104	330 802	397 440	451 457	NE
Thon obèse <i>Thunnus obesus</i>	445 376	414 128	384 449	402 463	450 546	VU
Chinchard du Chili <i>Trachurus murphyi</i>	1 470 943	1 287 178	686 407	634 126	447 060	DD
"Yellow croaker" <i>Larimichthys polyactis</i>	388 018	407 081	438 837	458 801	437 613	NE

Tableau 8 (partie II) : Production de la pêche de capture par espèces principales (en tonnes) et statut UICN.
(Source : FAO, 2014b ; site 20 ; Site 21)

Nom Nom scientifique	Année					Statut UICN
	2008	2009	2010	2011	2012	
Églefin <i>Melanogrammus aeglefinus</i>	332 178	365 611	396 483	430 028	430 917	VU
Crabe gazami <i>Portunus trituberculatus</i>	370 847	366 446	385 346	395 495	429 959	NE
Sprat <i>Sprattus sprattus</i>	562 223	667 230	630 338	559 341	408 509	NE
Saumon rose <i>Oncorhynchus gorbuscha</i>	294 876	591 654	384 484	585 245	406 131	NE
Merlan bleu <i>Micromesistius poutassou</i>	1 283 536	640 957	551 479	108 077	378 794	NE
Alose hilsa <i>Tenualosa ilisha</i>	329 913	334 564	404 722	381 522	376 734	LC
Murénésocce-dague <i>Muraenesox cinereus</i>	953 351	229 350	331 502	369 387	372 704	NE
Pilchard de Californie <i>Sardinops caeruleus</i>	742 028	758 070	696 585	639 235	364 386	NE
Chinchard du Cap <i>Trachurus capensis</i>	223 156	233 505	219 133	258 105	356 795	NE
Anchois chuchueco <i>Cetengraulis mysticetus</i>	134 092	116 043	60 154	150 572	352 945	LC
Toutenon japonais <i>Todarodes pacificus</i>	403 722	408 188	359 322	414 100	351 229	LC
Encornet rouge argentin <i>Illex argentinus</i>	837 935	261 227	189 967	204 869	340 622	LC
Lieu noir <i>Pollachius virens</i>	455 941	410 216	401 114	348 011	336 838	NE
Thonine orientale <i>Euthynnus affinis</i>	324 165	287 579	272 655	294 602	328 927	LC
Maquereau des Indes <i>Rastrelliger kanagurta</i>	271 828	281 777	273 877	337 826	325 612	DD
Pétoncle du Japon <i>Patinopecten yessoensis</i>	313 793	323 485	330 727	306 400	318 081	NE
Merlu d'Argentine <i>Merluccius hubbsi</i>	315 516	331 302	345 685	352 134	318 067	NE
Crevette nordique <i>Pandalus borealis</i>	393 500	345 205	360 794	337 081	315 511	NE
Maquereau trapu <i>Rastrelliger brachysoma</i>	300 424	310 311	331 818	347 163	312 930	DD
Crevette-archer <i>Trachypenaeus curvirostris</i>	314 984	286 279	293 722	293 219	308 257	NE
Anchois de l'Afrique australe <i>Engraulis capensis</i>	266 105	174 493	217 192	120 154	307 606	LC
Total	40 146 894	37 491 905	34 579 506	39 477 966	36 305 097	

Statut UICN : NE = non évalué, LC = préoccupation mineure, VU = vulnérable, DD = données insuffisantes

En aquaculture la différence de contribution entre les espèces les plus utilisées et les autres est encore plus marquée. Les principales espèces animales d'élevages étant : les carpes (39 % du volume) et d'autres poissons d'eau douce, les crustacés dont notamment les crevettes, les mollusques et les saumons (FAO , 2010 ; chapitre 4, tableaux 14 et 15). Carpes et mollusque sont généralement consommés dans les pays en développement tandis que les consommateurs des pays riches préfèrent les crustacés et les espèces carnivores comme le saumon, qui voient ainsi leur production augmenter (Naylor R. et al.,1998 ; Naylor R. et al, 2001 ; Naylor R. and Burke M., 2005). La production aquacole sera abordée plus en détail au chapitre 4.

3.2 La situation en Europe

En 2013, la production halieutique totale (toutes espèces confondues) de la pêche et de l'aquaculture de l'UE, se place au cinquième rang mondial avec 6,1 millions de tonnes (3,5 % de la production halieutique mondiale), dont 4,8 (79%) proviennent de la pêche et 1,3 (21% pour une valeur de 3,6 milliards d'€) de la culture (EUMOFA, 2015 ; CE, 2014 ; Tableau 9). L'aquaculture de l'UE contribue à hauteur de 1,5 % au volume mondial de production aquacole et à concurrence de 4 % en termes de valeur. Les plus grands producteurs européens sont l'Espagne, le Royaume-Uni, le Danemark et la France (CE, 2014). La flotte européenne déroule son activité dans le monde entier, cependant la plupart des produits sont pêchés dans l'Atlantique Nord-Est et Centre-Est et dans la Méditerranée (92,1 % du total des prises de l'UE). Les espèces pêchées sont essentiellement le sprat, le hareng, le maquereau, le lançon et la sardine, alors que les espèces les plus consommées sont le thon, le cabillaud, le saumon, le lieu jaune, le hareng et les moules. Hormis les moules et les saumons, la production aquacole européenne correspond peu à sa consommation (CE, 2014 ; Tableau 11).

*Tableau 9 : Captures dans toutes les régions de pêche par les flottes de l'UE des 28, par an, exprimées en tonnes poids vif.
(Source : Site 8)*

2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
5 707 950	5 711 102	5 496 248	5 253 806	4 910 121	4 913 810	4 804 331	4 998 909	4 832 692	4 420 587	4 828 990
:=non disponible / p=provisoire										

La consommation apparente (Consommation apparente = [(captures totales – captures industrielles) + aquaculture + importations] – exportations) de l'UE pour l'année 2011 s'élevait à 12,3 millions tonnes de produits halieutiques. Le taux d'autosuffisance (correspondant au rapport entre la production et la consommation apparente) était de 45,1 % (EUMOFA, 2014). Un rapport similaire (48%) sur base de la disponibilité alimentaire (Tableau 10) confirme ce taux. L'UE reste tributaire du marché international pour plus de la moitié de sa consommation. Les produits qui y sont importés proviennent des nombreux partenaires commerciaux de l'UE tant proches (Norvège) que lointains (Chine) (EUMOF, 2014). Si on considère le taux d'autosuffisance par espèce ou groupe d'espèces, il varie fortement de l'une à l'autre. La consommation moyenne de produits halieutiques en 2011 est de 22,9 kg/habitant/an et varie de 56,8 kg/hab/an pour le Portugal à 5,3 kg/hab/an pour

la Hongrie (Site 11). Les espèces les plus consommées en Europe sont le thon (conservé), le cabillaud et le saumon. Sur les 13 espèces les plus consommées, représentant 66 % de la totalité de la consommation européenne, trois sont en grande majorité issues de l'élevage, une l'est à moitié et le reste sont issus de la pêche de capture. Des 12,3 Mt de consommation apparente européenne de 2011, 9,4 Mt (76 %) sont capturées et 2,9 Mt (24 %) proviennent de l'élevage (EUMOFA, 2014, Tableau 4). On constate donc que l'approvisionnement européen est basé en grande partie sur la pêche de capture. Les espèces les plus pêchées par l'UE sont le hareng, le sprat et le maquereau, tandis que la production aquacole européenne concerne en premier lieu les moules (39 %), les truites (15%) et les saumons (14%) (Tableau 11).

Tableau 11 : Les données concernant l'UE des 27 et portant sur l'année 2011.
Source (CE, 2014 ; Site11 ; EUMOFA, 2015 ; Site 8)

<i>Principales espèces consommées, en kg/habitant/an (quantités en poids vif et origine). Population européenne estimée à 500 204 517 individus.</i>				<i>Principales espèces capturées (volume en tonnes de poids vif et % du total).</i>			<i>Principales espèces d'aquaculture (volume en tonnes de poids vif et % du total produit par l'UE).</i>		
Espèce	Kg/hab	Sauvage (%)	Élevage (%)	Espèce	Volume	(%)	Espèce	Volume	(%)
Thon (Conservé)	2,14	100	0	Hareng	509 951	10,46	Moule	492 413	39,18
Cabillaud	1,96	98	2	Sprat	413 415	8,48	Truite	185 539	14,76
Saumon	1,72	2	98	Maquereau	376 333	7,72	Saumon	170 591	13,57
Lieu jaune	1,64	100	0	Lançon	335 023	6,87	Huitre	98 751	7,86
Hareng	1,18	100	0	Sardine	307 963	6,31	Carpe	73 860	5,88
Moule	1,16	10	90	Chinchard	159 756	3,28	Dorade royale	72 900	5,80
Merlu	0,94	100	0	Cabillaud	146 634	3,01	Bar	67 809	5,40
Maquereau	0,87	100	0	Chinchard noir	133 531	2,74	Palourde	37 028	2,95
Pangasius	0,80	0	100	Anchois	126 115	2,59	Autres poissons d'eau douce	13 989	1,11
Crevette tropicale	0,75	46	54	Allache	123 600	2,53	Turbot	10 799	0,86
Sardine	0,71	100	0	Lisato	121 056	2,48			
Calamar	0,70	100	0	Albacore	102 132	2,09			
Coquille St-Jaques et autres péctinidés	0,58	87	13	Peau bleue	100 270	2,06			
				Merlu	85 256	1,75			
				Plie	82 668	1,70			
Total	15,15	72,5	27,5		3 123 703	64,07		1 223 679	97,37
Total Europe	22,9				4 616 715	100,00		1 243 996	100,00
Représentativité	66,16 %				67,66	64,07		98,36	97,37

<i>Tableau 10 : Consommation/approvisionnement dans l'Union Européenne</i>									
<i>Consommation de poissons et "produits de la mer" (seafood) dans l'UE (28 pays) sur base de la disponibilité alimentaire, exprimé en tonnes. (Source : Site 11)</i>									
2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
10 674 000	11 021 000	11 497 000	11 566 000	11 534 000	11 473 000	11 589 000	11 597 000		
<i>Captures UE source hors prises utilisées à des fins autres qu'alimentaires, en tonnes : (EUMOFA, 2015)</i>									
				4 616 715	4 418 416	4 239 416	4 311 081	4 101 624	
<i>Production aquaculture UE, en tonnes : (EUMOFA, 2015)</i>									
				1 255 341	1 301 872	1 253 887	1 243 996	1 235 537	

3.3 La situation en Belgique

La quantité de produits halieutiques disponibles en Belgique avoisine en 2011 les 300 000 tonnes et la tendance est à la hausse, or la production totale du pays, pêche et aquaculture comprises, est à la même période d'environ 23 000 tonnes (Tableau 13). Il en ressort que la consommation représente plus de treize fois la production. Autrement dit, la production nationale totale représente 7,6 % de la consommation, et le pays dépend du marché international pour les 92,4 % restants. La Belgique y importe 572 281 tonnes de produits halieutiques d'une valeur de 2,3 milliards de dollars (USD) et y exporte 300 895 tonnes pour 1,3 milliard d'USD (FAO, 2014b ; Tableau 13). La production nationale de pêche est essentiellement composée de plie (28,6% en volume poids vif), sole (15,9%), baudroie (5,8%), sole-limande, raie, turbot, cabillaud et merlan (CE, 2014 ; Site 32). La production nationale aquacole est faible et varie selon les sources, de 36 tonnes d'une valeur de 202 000 € (CE, 2014) à 101 tonnes pour une valeur de 646 000 USD (Site 4). Des fluctuations annuelles importantes sont également observées. La production aquacole est exclusivement composée de poissons d'eau douce, dont notamment la truite arc-en-ciel qui représente, sur base d'une production aquacole de 49 tonnes, 73 % du poids total produit (STECF, 2013).

La consommation moyenne par habitant et par an est de 25,1 kg, quantité relativement stable sur 10 ans (2001 à 2011) (Site 11). La consommation apparente belge par catégories d'espèces en 2011 (sur base de la disponibilité alimentaire) se répartit comme suit : espèces démersales (poissons de fonds) 66 635 (6,1 kg/belge/an), poissons d'eau douce 65 959 tonnes (6 kg/belge/an), mollusques 47 831 tonnes (4,4 kg/belge/an), poissons marins pélagiques 44 326 (4 kg/belge/an), crustacés 37 192 tonnes (3,4 kg/belge/an), autres poissons marins 14 154 tonnes (1,3 kg/belge/an), céphalopodes 293 tonnes, autres animaux aquatiques 1 614 tonnes. (Site 11). Les espèces les plus consommées sont : les moules (3kg/hab/an), les crevettes (notamment les crevettes grises de la mer du Nord et les crevettes tropicales), le cabillaud, le colin, le pangasius et la plie. La distribution de produits aquatiques frais (représentant, en 2008, 59% du total de la consommation (OCA 2011)) est assurée à 50% par la grande distribution, à 35 % par la restauration et, en faible proportion, par le commerce de détail. La consommation est plus importante en Flandre (Vallet E., 2014).

*Tableau 12 : Production halieutique belge, par capture et aquaculture (en tonnes). (Source : Site 1 et Site 3)
Poissons, crustacés, mollusques, etc (hors Plantes aquatiques). Captures dans toutes les régions de pêche par les
flottes belges, par an, exprimées en tonnes poids vif. (Source : Site 8)*

Année	Capture (source FAO)	Capture (Source EUROSTAT)	Aquaculture	Total
2014		26 509		
2013	25 662 F	25 377	212	25 874 F
2012		24 371		
2011	22 477	22 191	49	22 526
2010	22 418	21 904	539	22 957
2009	21 722	21 208	576	22 298
2008	22 609	22 098	126	22 735
2007	24 541	24 027	128	24 669
2006	23 019	22 519	1 200 F	24 219 F
2005	24 567	24 092	1 200 F	25 767 F

Note : "F" = FAO estimate. (Where officially reported national statistics are lacking or are considered unreliable, FAO/FIPS makes estimates based on the best information available. Such data are flagged with an "F". When alternative sources of information are missing, the most recent officially reported data are repeated such data are flagged with an "R").

*Tableau 13 : Food balance sheet of fish and fishery products in live weight and fish contribution to protein supply.
Belgium.*

(Source : FAO, 2014b ; FAO, 2013 ; FAO, 2012a ; FAO, 2011, FAO, 2010)

Année	Product on	Non- Food Uses	Imports	Exports	Total Food Supply	Populati on	Per Capital Supply	Fish Proteins	Animal Proteins	Total Proteins	Fish/Ani mal Proteins	Fish/Tot al Proteins
	tonnes in live weight					(thousan ds)	(kilogra ms)	(grams per capita per day)			(%)	(%)
2011	22 526	2 776	572 281	300 454	291 577	11 007	26,5	7,1	59,4	101,9	12,0	7,0
2010	22 957	2 512	558 455	300 895	278 005	10 712	26,0	6,5	59,5	74,0	10,9	8,8
2009	22 298	1 634	537 999	292 890	266 873	10 661	25,0	6,3	59,8	98,5	10,6	6,4
2007	24 669	19 577	584 774	335 483	254 383	10 531	24,2	6,4	59,2	98,4	10,8	6,5

4. L'aquaculture

4.1 Introduction

Selon la FAO, faire de l'aquaculture, c'est cultiver/élever une ou plusieurs espèces aquatiques, qu'elles soient animales ou végétales, de façon à obtenir un rendement productif plus élevé que celui existant naturellement (Site 1). D'un point de vue juridique, les individus élevés sont la propriété de l'aquaculteur, et se distinguent des ressources de pêche qui sont publiquement accessibles (Site 1). De nombreuses espèces animales (amphibiens, reptiles, tuniciers ou urochordés, échinodermes) et végétales (plantes aquatiques à racines) peuvent être élevées en aquaculture, cependant la majorité de la production concerne les poissons, les mollusques, les crustacés et les algues (Schwartz M., 2005). La production aquacole a beaucoup de débouchés, elle peut notamment être destinée à l'alimentation humaine directe, à l'alimentation des animaux d'élevage (notamment en aquaculture), à être utilisée comme appât, à la production d'objets ornementaux, à la production de suppléments alimentaires et pharmaceutiques. (Schwartz M., 2005).

L'aquaculture est considérée, dans ce mémoire, comme "classique" quand elle ne bénéficie pas (ou peu) de mesures alternatives destinées à réduire ses impacts sur l'environnement. Au contraire, l'aquaculture dite "alternative" implique de faire appel à des aménagements limitant sensiblement ces impacts.

I) Historique :

La pratique de l'aquaculture est ancienne, elle remonte à environ 4000 ans, et est associée à la domestication de la carpe en Chine (Avault J., 1996 ; Iwama G., 1991), ce qui explique peut-être le succès et les proportions de l'aquaculture chinoise actuelle. Elle semble également avoir été pratiquée dans l'Égypte antique (tilapia), mais des doutes subsistent sur le sujet (Schwartz M., 2005). La pratique de l'aquaculture s'est perpétuée selon diverses variantes à travers l'histoire. Ainsi, durant l'antiquité, les romains pratiquaient l'ostréiculture. Vers les années 730, les chinois pratiquaient l'élevage de la crevette, et l'élevage de la carpe semble avoir atteint l'Europe au cours du Moyen-Âge (Borgese, E., 1977). Des étangs à poissons multi-centenaires où était pratiquée une forme primitive d'aquaculture ont également été découverts à Hawaï (Schwartz M., 2005).

À partir du 18^{ème} siècle la surexploitation des stocks halieutiques, tant marins que continentaux, est devenue évidente aux États-Unis et en Europe, et l'aquaculture a commencé à être utilisée, avec un certain délai (19^{ème} siècle aux États-Unis) afin de remédier à ce problème (aquaculture de

repeuplement) (Stickney R., 1996). Les écloséries se sont développées en Europe à la fin du 18^{ème} siècle, dans le but d'augmenter la disponibilité en saumons sauvages décimés par les pêcheurs (Sylvia G. et al., 2000). Des échanges d'espèces non-indigènes ont également eu lieu à cette époque entre l'Europe, les États-Unis et d'autres pays, la truite arc-en-ciel étant introduite en Europe et la truite brune (ou truite commune) ainsi que la carpe aux USA, tandis que d'autres tentatives d'établissement de populations non indigènes ont échoué (Stickney, R., 1996). Bien que la plupart du temps les résultats des tentatives de repeuplements étaient mitigés, ces efforts ont permis le développement de techniques et technologies constituant les prémisses des méthodes de culture modernes (Schwartz M., 2005).

Vers milieu du 19^{ème} siècle, l'élevage des truites était bien établi en Europe et aux États-Unis (Stickney, R., 1996). La diversification des espèces élevées en aquaculture est relativement récente. Leur domestication, en ce qui concerne 97% d'entre elles (soit ~430 espèces) se fait à partir des années 1900, et leur nombre augmente rapidement (Duarte, C. et al., 2007). A partir des années 1960-1970, l'aquaculture connaît un développement rapide, constituant dorénavant une des sources de base de l'alimentation mondiale (Stickney, R., 1996). La répartition géographique et les hégémonies historiques concernant la production de l'une ou l'autre espèce se modifient rapidement, certains pays producteurs émergents devenant rapidement dominants sur le marché. L'exemple de la crevette permet d'illustrer ces transformations. Les bases de la culture moderne de la crevette sont établies au Japon, dans les années 1930. Les pays producteurs asiatiques dominants dans le domaine étant initialement le Japon et Taïwan, mais, à partir des années 1980, ils sont rejoints (et dépassés) par d'autres pays asiatiques, comme la Thaïlande, la Chine, l'Indonésie, l'Inde et les Philippines (Schwartz M., 2005).

C'est également dans les années 70 que l'élevage d'espèces carnivores prend son essor. Ainsi, la part du saumon d'élevage dans le total de la production n'est que de 1% dans les années 1980, mais dix ans plus tard il domine les échanges commerciaux concernant cette espèce (Sylvia G. Et coll., 2000 ; Naylor R. et al., 2003). C'est notamment l'adoption et la propagation des techniques japonaises de cages flottantes qui ont permis cette évolution rapide (Naylor R. and Burke M., 2005 ; Site16). Plus globalement, la production du saumon d'élevage influence la filière piscicole dans son ensemble. Les améliorations techniques et la baisse de revenus due à l'augmentation de la quantité de saumon ont poussé les éleveurs à se tourner vers la production d'autres espèces de poissons marins plus rentables (Allsopp M. et al., 2008).

II) Donnés socio-économiques

En 2012, la production mondiale de l'aquaculture (91,3 millions de tonnes : Tableau 1) valait 144,4 milliards d'USD (dans l'UE, en 2011, elle valait 3,6 milliards d'€ (STECF, 2013)). La valeur commerciale varie fortement entre espèces. La production animale (66,6 millions de tonnes) valait de 137,7 milliards d'USD tandis que la production végétale (23,8 millions de tonnes) 6,4 milliards d'USD, auxquels on peut ajouter 222,4 millions d'USD (22 000 tonnes) de produits non alimentaires (par exemple ornementaux comme les perles). Parmi la production animale, la production piscicole s'élevait à 44,2 millions de tonnes pour une valeur 87,5 milliards d'USD, desquels 5,6 millions de

tonnes étaient issus de l'aquaculture marine et 38,8 millions de tonnes de l'aquaculture continentale. La valeur marchande des espèces marines (23,5 milliards USD) était toutefois proportionnellement plus grande que celle des espèces continentales (64 milliards USD). De même, les crustacés (6,5 millions de tonnes pour 30,9 milliards USD) valaient plus que les mollusques (15,2 millions de tonnes pour 15,9 milliards USD) (FAO, 2014a).

En 2012, l'aquaculture employait 18,9 millions de personnes dont 96% en Asie et 0,5 % en Europe soit environ 100 000 personnes, mais la productivité moyenne par aquaculteur était de 3,2 tonnes par an en Asie contre 27,8 en Europe. Ces disparités pouvant être encore plus grandes par pays : 1 tonne/aquaculteur/an en Inde contre 195 tonnes/aquaculteur/an en Norvège (FAO, 2014a). Dans certains endroits (comme les régions côtières d'Écosse et de Norvège) les producteurs aquacoles sont les plus grands employeurs.

Le paysage économique varie d'une région à l'autre et d'une espèce à l'autre. La production d'espèces marines et/ou carnivores est caractérisée par une forte intégration verticale des chaînes de valeurs (un même acteur économique est présent à tous les stades de production et de vente) et un secteur dominé par les grandes corporations (Naylor R. and Burke M., 2005). En 2001, 30 compagnies se partageaient les deux tiers de la production des truites et saumons (Berge A., 2002). Cependant si toutes les espèces sont considérées la situation est différente. Par exemple au sein de l'UE les micro-entreprises représentent 90% d'un secteur où entre 11 000 et 15 000 entreprises sont actives (STECF, 2013).

La production aquacole tend à baisser dans les pays développés grands producteurs (USA, Espagne, France, Italie, Japon et République de Corée), tandis qu'elle connaît une croissance importante dans certains pays en développement ou émergents, qui se spécialisent dans la production destinée à l'exportation. En résulte un allongement des distances entre producteurs et consommateurs et une augmentation des flux de marchandises (FAO, 2014a). Ce développement accroît également la dépendance de l'UE envers d'autres pays, et pose dès lors le problème en termes de sécurité alimentaire.

Par ailleurs, la production aquacole entraîne parfois (notamment dans les pays en développement) des problèmes humains et éthiques (EJF, 2013 ; UNODC, 2011) : appropriation violente des terres littorales (EJF, 2003), mauvaises conditions de travail et de sécurité au travail, faible rémunération, non-respect du droit des femmes (Pizarro R., 2006), appropriation des ressources alimentaires par la pêche directe destinée à la réduction ou par la hausse des prix qui en résulte (Sugiyama S., et al., 2004 ; Tacon A. et al., 2006), conflits concernant le partage des bénéfices et des coûts environnementaux (Tiller R. et al., 2012).

4.2 Techniques de production et espèces exploitées

Généralement, la technique aquacole employée et le type d'espèce élevée, sont déterminés par les contraintes physico-chimiques (salinité et température de l'eau disponible, qualité de l'eau, propriétés du sol, climat), le type d'alimentation disponible ou facilement accessible à proximité (poissons ou dérivées de poissons, végétaux, larves), les contraintes économiques et sociologiques (Schwartz M., 2005 ; MARM, 2010).

I) Systèmes de production

La classification des systèmes aquacoles peut se faire sur base de différents critères de production. Ceux-ci ne sont pas nécessairement mutuellement exclusifs. Leur nature peut varier d'un système de classification à l'autre. La figure 4 nous fournit un exemple de classification des systèmes de production, qui n'est toutefois pas complet. Les critères de classifications les plus utilisés sont :

La salinité de l'eau. L'aquaculture peut se faire en eaux douces, saumâtres ou salées et ce en fonction de l'espèce élevée. L'aquaculture continentale est réalisée en eau douce, mais certains procédés peuvent se faire en eau salée en fonction des espèces élevées. La mariculture est, quant à elle, l'aquaculture en eau salée ou saumâtre, pouvant être conduite en mer, en zone intertidale ou dans des bassins à terre. Certaines espèces tolèrent les trois types d'environnements au moins durant une phase de leur développement (diadromes) et peuvent dès lors être élevées dans différents types d'environnements. La pratique de l'aquaculture en eau douce est plus aisée, ce qui explique son grand succès, notamment dans les pays en développement, où elle joue un rôle alimentaire important et fournit 58 % de la production globale de poissons d'élevage (FAO, 2014a).

Le type d'organisme produit. Les différentes espèces produites peuvent être regroupées en catégories, selon qu'il s'agisse d'espèces végétales comme les algues (algoculture), d'espèces animales comme les mollusques (conchyliculture), les crustacés (carcinoculture) ou les poissons (pisciculture). Des regroupements plus fins existent également à l'intérieur de ces catégories comme par exemple la mytiliculture (moules) et l'ostréiculture (huîtres) au sein de la conchyliculture (MARM, 2010).

Le stade de développement des individus. L'élevage d'espèces aquatiques peut englober tous les stades de développement de la reproduction jusqu'au stade utile pour l'utilisation alimentaire. Dans ce cas, on parle de production intégrale. Mais il peut également seulement concerner une seule de ces étapes (écloserie, nurseries, grossissement).

L'origine des individus élevés. Un critère découlant du précédent, non repris dans la figure 4, mais présent dans la classification de la FAO est l'origine des individus élevés. Pour des raisons technologiques ou de rentabilité économique certaines espèces (comme les anguilles par exemple) sont prélevées dans le milieu pour ensuite être élevées en milieu aquacole (FAO, 2014b ; chapitre 4.2 C).

La densité d'élevage. Ce critère correspond au niveau d'intensité technique de la production. L'intensification technique peut concerner plusieurs aspects comme l'alimentation, le travail, l'espace ou encore la quantité d'eau disponible par poids d'individu élevé. C'est ce dernier critère, exprimé en kilogrammes (kg) par mètre cube (m^3), qui est utilisé pour définir la densité. Des seuils peuvent délimiter les différents niveaux d'intensité : extensif (0,01 à 0,1 kg/ m^3), semi-extensif (0,5 à 1 kg/ m^3), semi-intensif (1 à 5 kg/ m^3), intensif (10 à 25 kg/ m^3), super-intensif (100 kg/ m^3 ou plus) (MARM, 2010). Étant donné la diversité et la complexité des systèmes de culture existants, ce critère de classification peut prendre la forme d'un continuum entre les pôles extensif et intensif (Schwartz M., 2005). Les systèmes en eau recirculée ("Recirculating Aquaculture Systems" ou RAS) sont typiquement des systèmes proches du pôle intensif (sans toutefois être les seuls).

Généralement plus le système est intensif et plus ses besoins en alimentation, énergie, oxygène, entretien, contrôle et main d'œuvre (qualifié) augmentent. Ils nécessitent également un plus grand investissement de départ (MARM, 2010).

L'emplacement des installations de production. Ces installations peuvent se trouver sur le continent (à terre, dans les lacs, les rivières et autres plans d'eau), dans la zone littorale de faible profondeur et/ou protégée (intertidal) ou directement en mer (au large)(MARM, 2010).

Le type d'installation de production. Il existe de nombreux types installations aquacoles. Certains sont spécifiques à un groupe d'espèces (culture sur sol en eau peu profonde, culture sur table d'élevage) tandis que d'autres conviennent pour l'élevage de nombreuses espèces (Stickney, R, 1994 ; Schwartz M., 2005 ; MARM, 2010). On peut les classer en deux sous-catégories :

a) Les contenants : *Les étangs (ponds)* : utilisés pour élevage d'une grande majorité d'espèces. Dans les pays développés ils sont alimentés en eau à partir de sources contrôlées, ailleurs, ils reposent uniquement sur les précipitations. Leur étendue peut varier fortement, cependant généralement la taille des exploitations commerciales se situe entre 0,1 et 10 hectares, avec une taille standard habituellement située entre 1 et 5 hectares. Des bassins de tailles variées peuvent exister au sein d'une même exploitation et accueillir les espèces d'élevage à différents stades de leur développement (Schwartz M., 2005). *Les bassins (raceways) linéaires ou circulaires (tanks)* : la plupart de ces bassins sont associés à des systèmes en écoulement (ou flux) continu type "flow-trough", où l'eau est continuellement renouvelée par l'apport d'eau fraîche, de façon à ce que la totalité de l'eau contenue soit ainsi renouvelée plusieurs fois par jour, voire plusieurs fois par heure en fonction de la taille des bassins et de la qualité de l'eau (Schwartz M., 2005).

b) Les installations (totalement ou partiellement) immergées : *Les cages* : ce sont des structures de petite taille, aux parois rigides (souvent métalliques) placées dans des milieux aquatiques ouverts ou semi-ouverts (rivière, grand lac, mer). Elles permettent de contenir les individus élevés et de faciliter l'accès aux aquaculteurs. Leur volume varie de un à quelques mètres cubes. Ces structures peuvent être facilement déplacées pour faciliter la récolte de la ressource exploitée (Schwartz M., 2005). *Les cages-flottantes (Net-pens ou filets-flottants)* : ces installations ressemblent aux cages par leurs fonctions mais s'en différencient par leur taille (beaucoup plus grande) et par la flexibilité des matériaux constituant leur paroi (souvent du nylon). Généralement, il n'y a pas de paroi supérieure et on peut accéder aux différents compartiments par des allées. Cages et cages flottantes sont maintenues par des flotteurs. La taille standard des cages-flottantes est de 20 mètres (de longueur) sur 20 mètres (de largeur) sur 20 mètres ou plus de profondeur. L'exploitation de ces structures était initialement destinée aux eaux calmes, mais elles sont aussi utilisées, moyennant quelques adaptations (fermeture et immersion complètes), en mer ouverte (Schwartz M., 2005).

Le type de circuit. Deux types de circuits existent : les circuits ouverts dans lesquels l'eau est continuellement renouvelée et les circuits fermés (ou recirculés) où l'eau est filtrée et réemployée (un faible apport en eau nouvelle est tout de même nécessaire). Les premiers sont plus faciles à mettre en place, mais les seconds permettent un contrôle optimal des paramètres du milieu d'élevage (MARM, 2010). Les systèmes en eau recirculée seront détaillés au point 4.3.

L'intégration fonctionnelle. L'aquaculture peut se faire en cultivant plusieurs espèces sur un même espace, avec l'objectif de recréer un écosystème (partiel). Généralement, des espèces de niveaux trophiques différents sont employées. Cette approche est appelée aquaculture intégrée multi-trophique (Integrated Multi-Trophic Aquaculture ou IMTA) ou polyculture intégrée. A l'opposé l'aquaculture peut reposer sur une seule espèce (monoculture) (MARM, 2010). L'IMTA sera détaillé au point 4.3.

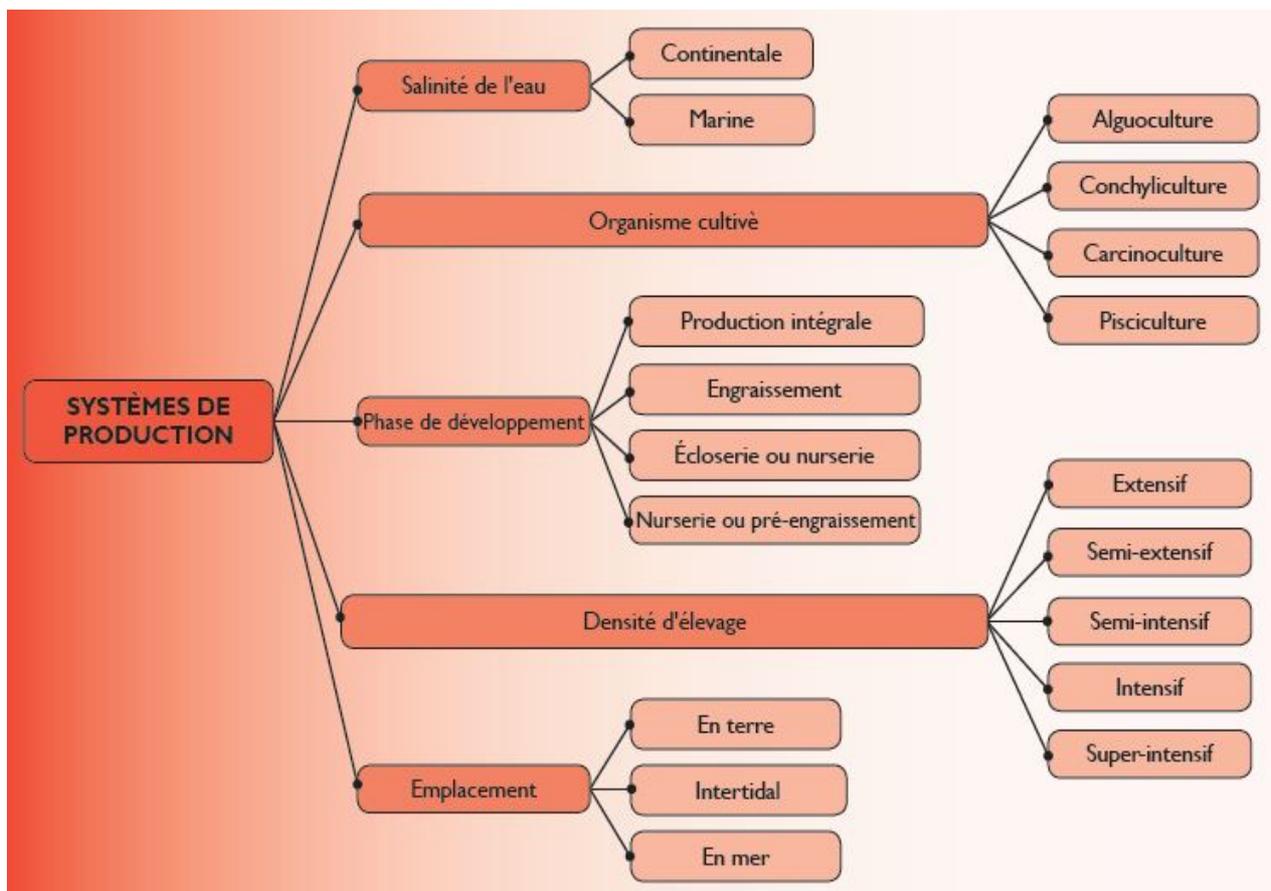


Figure 4: Exemple de classification des systèmes de production aquacoles (Source : MARM, 2010)

Les systèmes rencontrés dans l'UE sont l'aquaculture extensive, l'aquaculture semi-extensive, la conchyliculture, l'aquaculture de repeuplement (voir historique), la pisciculture intensive en eaux douces et la mariculture intensive (Site16).

II) Espèces aquacoles

Un grand nombre d'espèces est actuellement cultivé en aquaculture. La FAO en répertorie 567 en 2012, bien que l'organisation estime que ce chiffre dépasse en réalité les 600 espèces, des espèces endémiques étant utilisées sans qu'elles soient mentionnées dans les statistiques nationales. Par exemple, en Chine, plus de 200 espèces sont cultivées alors que leur nombre officiel est inférieur à 90, et des situations similaires se retrouvant en Inde, au Vietnam, au Canada, en Europe. Par ailleurs, l'élevage de certaines espèces est très répandu (tilapias) mais est rarement signalé et comptabilisé (FAO, 2014a). Les 567 espèces répertoriées se répartissent comme suit : 354 sont des poissons (dont cinq hybrides), 102 des mollusques, 59 des crustacés, 6 des amphibiens et reptiles, 9 des invertébrés aquatiques, et 37 des algues (de mer et d'eau douce).

Les principales espèces animales élevées en eaux salées sont reprises dans le tableau 14. Ces 30 espèces assurent 44 % de la production mondiale en eaux salées et saumâtres (Tableaux 2 et 14).

Les espèces dont l'apport est le plus important sont la crevette à pattes blanches, le saumon de l'Atlantique, le poissons-lait et la crevette géante tigré (Tableau 14). D'autres espèces (morue de l'Atlantique, aiglefin, vivaneau sorbe, flétan de l'Atlantique, plie et sole) sont susceptibles de connaître un développement important. (Naylor R. and Burke M., 2005 ; Schwartz M., 2005).

Tableau 14 : Principales espèces animales élevées en 2013, en eau salé/saumâtre avec quantités.
(Sources : Site 4 ; Site20 ; Site19)

Nom	Nom scientifique	Production 2013 (en millions de tonnes)
la crevette à pattes blanches	<i>Penaeus vannamei</i>	2,665
le saumon de l'Atlantique	<i>Salmo salar</i>	2,087
le chanos ou poisson-lait	<i>Chanos chanos</i>	1,044
la crevette géante tigrée	<i>Penaeus monodon</i>	0,804
le "chinese razor clam"	<i>Sinonovacula constricta</i>	0,721
l'huître creuse du Pacifique	<i>Crassostrea gigas</i>	0,556
l'arche granuleuse	<i>Anadara granosa</i>	0,45
la moule chilienne	<i>Mytilus chilensis</i>	0,242
la moule commune	<i>Mytilus edulis</i>	0,198
le concombre de mer japonais	<i>Apostichopus japonicus</i>	0,194
le pétoncle du Japon	<i>Patinopecten yessoensis</i>	0,170
la moule verte asiatique	<i>Perna viridis</i>	0,16
le bar commun	<i>Dicentrarchus labrax</i>	0,161
la daurade royale	<i>Sparus aurata</i>	0,157
la sériole du Japon	<i>Seriola quinqueradiata</i>	0,150
le saumon argenté	<i>Oncorhynchus kisutch</i>	0,145
le crabe de palétuviers	<i>Scylla serrat</i>	0,139
le bar du Japon	<i>Lateolabrax japonicus</i>	0,129
la moule méditerranéenne	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	0,120
les ormeaux	<i>Haliotis</i>	0,120
le pompaneau lune	<i>Trachinotus blochii</i>	0,113
l'huître creuse américaine	<i>Crassostrea virginica</i>	0,108
le tambour à gros yeux	<i>Larimichthys croceus</i>	0,105
la moule de Nouvelle-Zélande	<i>Perna canaliculus</i>	0,084
le turbot	<i>Psetta maxima</i>	0,076
le pétoncle éventail	<i>Argopecten purpuratus</i>	0,073
le tambour rouge	<i>Sciaenops ocellatus</i>	0,061
la dorade	<i>Pagrus auratus</i>	0,060
le mafou	<i>Rachycentron canadum</i>	0,044
l'huître perlière ailée	<i>Pteria penguin</i>	0,044
Total		11,18

Les principales espèces animales élevées en eau douce sont les carpes (argenté, de roseau, commune et à grosse tête), la palourde japonaise, le tilapia du Nil, le catla et la rohu (Tableau 15). Les 30 espèces reprises dans le tableau 15 représentent plus de 90% de la production mondiale. On peut remarquer que des poissons hybrides sont produits en grandes quantités (tilapia du Nile hybride).

Tableau 15 : Principales espèces animales élevées en 2013, en eau douce avec quantités.
(Sources : Site 4 ; Site 20 ; Site 19)

Nom	Nom scientifique	Production 2013 (en millions de tonnes)
la carpe de roseau	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	5,2
la carpe argentée	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	4,6
la carpe commune	<i>Cyprinus carpio</i>	4,0
la palourde japonaise	<i>Ruditapes philippinarum</i>	3,9
le tilapia du Nil	<i>Oreochromis niloticus</i>	3,4
la carpe à grosse tête	<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	3,1
la catla	<i>Catla catla</i>	2,8
le carassin commun	<i>Carassius carassius</i>	2,6
le rohu	<i>Labeo rohita</i>	1,7
la truite arc-en-ciel	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	0,814
la carpe de Wuchang	<i>Megalobrama amblycephala</i>	0,731
le crabe chinois	<i>Eriocheir sinensis</i>	0,730
l'écrevisse rouge de marais	<i>Procambarus clarkii</i>	0,653
la crevette pattes blanches	<i>Penaeus vannamei</i>	0,624
la carpe noire	<i>Mylopharyngodon piceus</i>	0,526
le poisson à tête de serpent	<i>Channa argus</i>	0,510
le poisson-chat de l'Amour	<i>Silurus asotus</i>	0,439
la barbue de rivière	<i>Ictalurus punctatus</i>	0,419
le "blue-Nile tilapia hybrid"	<i>Oreochromis aureus x O. Niloti</i>	0,415
le mirgal	<i>Cirrhinus mrigala</i>	0,410
la trionyx de Chine	<i>Trionyx sinensis</i>	0,348
l'anguille asiatique des marais	<i>Monopeterus albus</i>	0,346
l'achigan à grande bouche	<i>Micropterus salmoides</i>	0,340
la loche d'eau douce	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	0,322
le requin silure ou panga	<i>Pangasius hypophthalmus</i>	0,306
le "yellow catfish"	<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	0,296
poissons mandarin	<i>Siniperca chuatsi</i>	0,285
le bouquet nippon	<i>Macrobrachium nipponense</i>	0,251
le poisson-chat nord-africain	<i>Clarias gariepinus</i>	0,221
l'anguille du Japon	<i>Anguilla japonica</i>	0,207
Total		40,49

L'aquaculture concerne également la production de plantes aquatiques. On y retrouve des macro-algues, des micro-algues et des macrophytes d'eau douce (la macre, la châtaigne d'eau, le lotus comestible). Certaines de ces plantes (comme la spiruline) peuvent contenir de fortes proportions de protéines. Les catégories de plantes qui dominent (largement) la production sont les algues brunes (Phaeophyceae) et les algues rouges (Rhodophyceae). Les statistiques de la FAO (FAO, 2014a) rapportent une production mondiale de 23,8 millions de tonnes, cependant elles n'englobent souvent qu'une partie de ces plantes. Le tableau 16 en répertorie les principales. La culture de plantes aquatiques peut se faire parallèlement à l'élevage de poissons dans une logique de complémentarité écosystémique. Par exemple en Chine, cette pratique est encouragée dans les zones de mariculture en cages flottantes pour extraire les nutriments excédentaires (FAO, 2014a).

Tableau 16 : Principales espèces de plantes aquacoles produites en aquaculture en 2013 (Source : Site 4 ; Site 19 ; Site 20)		
Nom	Nom scientifique	Production 2013 (en millions de tonnes)
<i>en eau salé et saumâtres</i>		
le laminaire du Japon	<i>Laminaria japonica</i>	5,94
les algues gracilaires	<i>Gracilaria spp</i>	3,47
les "algues"	<i>Algae</i>	2,86
les Wakamé	<i>Undaria pinnatifida</i>	2,08
	<i>Kappaphycus alvarezii</i>	1,71
les nori	<i>Porphyra spp</i>	1,14
les algues nori	<i>Porphyra tenera</i>	0,722
<i>en eau douce</i>		
la spiruline	<i>Spirulina spp</i>	0,082

III) Problèmes environnementaux, de santé et solutions envisageables

L'aquaculture impacte les milieux aquatiques de nombreuses façons. Parmi les plus importantes, on retrouve :

1) L'utilisation d'aliments issus de la pêche de capture.

L'élevage d'espèces carnivores provoque une forte dépendance aux huiles et farines de poissons (Naylor R. and Burke M., 2005 ; Allsopp M. et al., 2008). Ce type d'espèces (poissons carnivores, crevettes) nécessite l'apport de nutriments spécifiques (protéines et acides gras polyinsaturés comme l'acide eicosapentaénoïque (EPA) et l'acide docosahexaénoïque (DHA)) présents dans divers animaux marins, mais les quantités de poissons sauvages nécessaires sont de loin supérieures aux quantités de poissons d'élevage produites en aquaculture, car le taux d'efficacité de conversion est faible, c'est pourquoi quasi tous les élevages de poissons carnivores (diadromes) sont dits "réducteurs" (Allsopp M. et al., 2008). Il en résulte des pertes importantes (de biomasse, d'énergie, de protéines) et une faible efficacité alimentaire. Afin d'avoir une idée de ce taux de conversion en voici quelques exemples :

- a) pour 1kg de saumon, de crevettes ou d'autres poissons marins carnivores, il faut l'apport de 2,5 à 5kg de poissons sauvages (moulus) (Naylor R. et al., 2000)
 - b) pour 1kg de thon, il faut 20kg de poissons sauvages (Volpe J., 2005)
 - c) pour 1kg de mérou, il faut 7 à 15kg de poissons sauvages (De Silva S. and Turchini G.M., 2009)
- (Notons que ces différences peuvent aussi refléter la part d'aliments sauvages remplacés par des aliments d'autres d'autres sources : voir ci dessous)

Les animaux marins destinés à servir d'aliment aux espèces élevées en aquaculture (anchois, harengs, sardines, pilchards, krill, copépodes, zooplancton) sont le plus souvent réduits en farine et huiles. Les quantités utilisées par l'industrie aquacole, situées d'ores et déjà au-delà d'un niveau soutenable, sont en constante augmentation, du fait de la demande de poissons carnivores (Allsopp

M. et al., 2008 ; FAO, 2014a). De plus, les prix de ces produits fluctuent fortement en raison des variations des quantités de poissons disponibles pour la réduction (FAO, 2014a).

Les systèmes en eau recirculée permettent d'éviter le gaspillage d'aliments par dispersion des aliments, de réduire la métabolisation des acides gras en contrôlant l'environnement d'élevage et de coordonner de façon précise stades de développement et apport en nutriments. En effet, l'utilisation, les besoins et la capacité à synthétiser les acides gras à longue chaîne varient tout au long du développement des individus (élevés). Il est donc important de les leur fournir aux moments opportuns pour qu'ils les stockent (FAO, 2014a ; Hixson S., et al. 2014).

Les autres solutions sont l'utilisation d'aliments composites comprenant des protéines végétales (Olsen R. and Hasan M., 2012), l'utilisation des micro algues marines (FAO, 2014a ; Duarte C. et al., 2009), l'utilisation des déchets et sous-produits de la transformation du poisson (FAO, 2014a) et l'élevage d'espèces d'eau douce (cyprinidés, tilapias), filtreuses, non nourries et/ou de bas niveau trophique (carpe argentée, carpe à grosse tête, espèces herbivores et certaines espèces omnivores) et de mollusques (huîtres, moules, palourdes). Toutefois toutes ces solutions rencontrent des problèmes techniques ou économiques. Les végétaux supérieurs ont (généralement) une faible teneur en acides gras polyinsaturés à longue chaîne, problème pouvant cependant être dépassé par l'utilisation de plantes génétiquement modifiés (Ruiz-Lopez N. et al., 2013). La culture de micro-algues marines à une faible viabilité économique (FAO, 2014a), mais son emploi au sein d'un système d'aquaculture ou polyculture intégré (type IMTA) est susceptible de résoudre ce problème (Duarte C. et al., 2009). Les résidus de poissons contiennent plus de minéraux, de petits acides aminés (glycine, proline, hydroxyproline) que d'acides gras polyinsaturés à longue chaîne (FAO, 2014a). Les espèces d'eau douce et autres précédemment citées ont la capacité de produire des acides gras polyinsaturés à longue chaîne à partir d'acides gras oméga-3 à courte chaîne (en convertissant l'acide alpha-linolénique), mais ces poissons ont des propriétés alimentaires réduites par rapport aux espèces marines ou nourries, notamment en ce qui concerne leur teneur en EPA et DHA, or ces éléments sont considérés comme les principaux bienfaits associés à la consommation de poisson. Cependant cette teneur dépasse celle des autres viandes (Toppe J., 2012. ; FAO, 2014a ; Hixson S., et al., 2014). De plus, les poissons d'élevages ont une plus grande proportion de graisse par rapport aux poissons sauvages (Hossain M., 2011). Notons aussi que dans la pratique ils reçoivent également parfois des aliments contenant des huiles et farines de poisson. L'augmentation de la production de mollusques se heurte dans certaines régions à l'absence de disponibilité de larves (FAO, 2014a).

2) La qualité sanitaire des poissons d'élevage.

Ces paramètres dépendent de nombreux facteurs dont les plus importants sont la qualité de l'eau, des aliments, la densité des individus et les quantités de produits sanitaires (antibiotiques) utilisées (FAO, 2014a). L'aquaculture en circuit clos (RAS) permet un plus grand contrôle sur ces différents paramètres. En polyculture intégrée traditionnelle la prolifération de certains agents pathogènes est maîtrisée de façon naturelle sans faire appel à des produits sanitaires (capacité des moules à détruire/se nourrir de certains pathogènes comme le virus de l'anémie infectieuse du saumon et le pou de mer (Site 22 ; Janis W., 2013))

3) La décharge d'effluent et accumulation de sédiment riche en matière organique.

La concentration d'un grand nombre d'espèces animales aquatiques provoque, comme en agriculture, des problèmes d'accumulation de déchets organiques dans la zone d'élevage d'autant plus que la circulation de l'eau est limitée (FAO, 2014a ; Braaten B. et al., 1983 ; Gowen R, and Bradbury N. 1987 ; Iwama G. 1991). Il peut s'agir d'excréments, d'aliments non consommés ou d'animaux morts (Goldburg R. and Naylor, R., 2005). La dégradation de la qualité du milieu aquatique qui s'en suit provoque des phénomènes d'eutrophisation (Buschmann A. et al., 2006 ; Bouwman A. et al., 2013), d'hypoxie, de prolifération d'algues nuisibles (marées rouges, végétaux toxiques) (Allsopp M. et al., 2008 ; Hargreaves J., 1998), de développement de maladies, de prolifération d'agents pathogènes et peut même s'accompagner dans certains cas extrêmes de la mort des individus élevés (FAO, 2014a ; Goldburg R. and Naylor R. 2005). Quand la densité des animaux d'élevage (poissons, crustacés) est forte, la pollution organique si elle n'est pas contrôlée, peut se transmettre au milieu environnant et impacter la vie sauvage (Ervik A, et al., 1997). Elle peut se traduire par la diminution de la biodiversité autour des sites d'élevage intensif, comme c'est le cas autour des cages maritimes d'élevage du saumon (Mente E. et al., 2006) ainsi qu'en dessous de ces cages sur les fonds marins (Pêches et Océans Canada, 2003). Les effets restent cependant majoritairement cantonnés aux zones de production et aux alentours de celles-ci (Goldburg R. and Naylor R., 2005 ; Goldburg R. et al., 2001 ; Naylor R. and Burke M., 2005).

Plusieurs solutions peuvent être envisagées : dans les systèmes à circuit fermé (RAS), la filtration et le traitement des eaux rejetées permettent de dépasser ou du moins de réduire ce problème. Dans les systèmes ouverts ou semi-ouverts, une approche IMTA permet de transformer un déchet en ressource. Le type d'espèce utilisée en aquaculture détermine aussi la quantité de polluants organiques générés, l'élevage de certaines "espèces" produisant plus de déchets que d'autres comme c'est le cas pour la morue (Naylor, R. Et el., 2005). La relocalisation des cages marines au large permet de déplacer le problème dans une zone où certains effets sont moins nuisibles du moins à court terme (Allsopp M. et al., 2008).

4) Les évasions d'individus d'élevage

L'évasion d'individus d'élevage peut provoquer l'hybridation des espèces sauvages et entraîner la perte de certaines aptitudes cruciales ainsi que la réduction de la diversité génétique des espèces sauvages, menant à la réduction de leurs capacités adaptatives (McGinnity P. et al., 2003 ; Naylor R. et al., 2005 ; SECR, 2002). Ce phénomène est aggravé lorsque les individus génétiquement modifiés échappés, sont (génétiquement) éloignés des espèces sauvages, mais capables de se reproduire avec elles (Devlin R, and Donaldson E. 1992 ; Fleming I.A. et al., 2000). De nombreuses populations de saumon sauvages sont déjà hybrides (Naylor R., 2005).

Un autre problème lié aux évasions est l'introduction d'espèces non-indigènes. Quand ces espèces rencontrent des milieux favorables, elles y prolifèrent en absence de leurs prédateurs naturels. Ceci peut avoir des impacts très nuisibles pour le milieu et les espèces qu'il abrite (Pérez, J. et al., 2003) comme une augmentation de la compétition pour l'habitat et la nourriture (Naylor R. et al., 2005), de la prédation des juvéniles et la destruction des habitats nécessaires aux espèces indigènes (Tetreault I., 2006).

Différentes solutions sont envisageables. Le type de système de production est peut-être le plus important. En effet, les risques d'évasions d'un système clos type RAS sont quasi nuls. La filtration

de l'eau et des procédures de manipulation des poissons dans leurs différents stades de développement peuvent réduire les possibilités d'évasion dans les systèmes en écoulement continu (raceways, étangs). L'utilisation d'espèces endémiques ou locales non modifiées et non sélectionnées en est un autre, mais qui risque d'impacter la productivité.

5) Prolifération et propagation des pathogènes

La forte densité d'élevage favorise l'apparition et la propagation des maladies au sein des exploitations, capables de se transmettre aussi aux populations sauvages à proximité (Goldburg, R. et al., 2001 ; Naylor R. et al., 2003). Par exemple, le saumon élevé en aquaculture développe plus facilement le pou de mer, la néphrobactériose à *Renibacterium salmoninarum*, la vibriose septicémique aquatique et la furunculose (Naylor R. et al., 2003) tandis que les élevages de crevettes sont atteints par la maladie des points blancs (FAO, 2014a). Quand la maladie se propage aux espèces sauvages, elle peut entraîner leur disparition (Krkošek M. et al., 2007) mais aussi, par contagion d'autres exploitations, engendrer un syndrome d'effondrement de la production : crevettes au Mexique et en Asie (WWF, 2015 ; FAO, 2014a), "chano" aux Philippines (White P. et al., 2008) et saumon au Chili (anémie infectieuse) (FAO, 2014a ; Naylor R. et al., 2003 ; Goldburg R. and Naylor R., 2005). La dispersion des pathogènes est également facilitée par l'utilisation d'aliments piscicoles issus d'espèces sauvages (Dalton R., 2004). La maladie peut parfois se transmettre à l'homme (WWF, 2015).

En outre, d'autres effets sur la productivité sont associés à une trop grande densité d'individus, comme une réduction de la croissance, un état alimentaire déficient, un taux de conversion (des aliments en poids vif de poisson) en hausse, une érosion des nageoires, une plus grande mortalité, une altération de la conduite natatoire, des agressions plus fréquentes entre individus, du cannibalisme et plus généralement une altération du comportement (Ellis T. et al., 2001). Certains de ces effets sont directement associés au stress provoqué par la densité (Sammouth S. et al., 2009). Notons qu'une densité trop basse peut parfois également être néfaste (Lupatsch I. et al., 2010).

Les systèmes en circuit fermé (RAS) permettent de contrôler la qualité de l'eau, le développement des pathogènes et la propagation aux milieux naturels. Les systèmes de polyculture intégrées (IMTA) peuvent également (dans certains cas) associer l'élevage à la présence d'espèces se nourrissant des pathogènes de l'espèce principale élevée, et servir à leur tour de nourriture ou être consommées (par l'homme). Les autres solutions comprennent la vaccination, l'utilisation d'antibiotiques (Naylor R. and Burke M., 2005) et la réduction du stress par l'amélioration (compensation) des autres variables de production (concentration d'oxygène, niveau de solides en suspension, concentration d'ammonium et d'autres substances dissoutes, alimentation, les bio-incrustations sur les filets et absence de prédateurs) (MARM, 2010 ; Naylor R. and Burke M., 2005).

6) L'aménagement des espaces côtiers

Dans certains cas, cet aménagement qui est réalisé afin de faire place à l'aquaculture (WWF, 2015) et prive les poissons sauvages d'habitat et de lieux de reproduction. La création d'étangs pour l'aquaculture de crevettes de mer a causé la destruction de milliers d'hectares de mangroves et de zones humides côtières aux Philippines (Beveridge M. et al., 1997), au Vietnam (Singkran N. and

Sudara S., 2005), en Thaïlande (Flaherty M. and Karnjanakesorn C., 1995), au Bangladesh (Das B., et al., 2004), et en Équateur (Boyd, C., 2002).

Les solutions à ce problème sont plus d'ordre socio-économique et politique que techniques. Cependant, un approvisionnement local en produits halieutiques dans des zones éloignées des côtes et/ou dans les pays développés, plus à même de protéger les écosystèmes marins, peut sans doute contribuer à réduire la pression sur les milieux naturels si la production était destinée à l'exportation. Or pour certaines espèces non acclimatées (ou acclimatables) la production locale peut impliquer des systèmes clos type RAS. Pour la consommation locale, la polyculture intégrée extensive paraît plus appropriée, mais les systèmes clos et/ou continentaux ne sont pas nécessairement à exclure.

7) L'utilisation des produits chimiques

De nombreux produits chimiques aux fonctions diverses (contrôle des pathogènes, amélioration de la couleur de la chair du poisson, antifouling/biocides) sont employés en aquaculture (Gräslund S. and Bengtsson B-E., 2001; Baker R., 2002 ; EC, 2002). Ils peuvent entraîner des effets nuisibles pour l'homme, l'environnement et les populations d'élevage. Des cas d'antibiorésistance ont été relevés suite à l'administration excessive d'antibiotique (Goldburg R. et al., 2001 ; Naylor R. and Burke M., 2005). Citons le cas des élevages de crevettes au Vietnam (Le T. et al., 2005) et aux Philippines (Holmström K. et al., 2003). Les effets sur la santé humaine de l'ajout de colorants est sujet à débat (Naylor R. and Burke M., 2005), mais pour certains produits (canthaxanthin) les effets sont reconnus (dépôt de cristaux dans l'œil du consommateur) (Baker R., 2002 ; EC, 2002). Les produits anti-salissure (antifouling ou biocides) les plus répandus en aquaculture sont à base de métaux lourds (étain, chrome et cuivre sous forme d'oxyde (Cu_2O)) et sont considérés comme des produits dangereux (dans l'UE), extrêmement nuisibles pour l'environnement (Manley A., 1983 ; Viarengo A., 1989 ; Elfving T. and Tedengren M., 2002 ; Henderson A. and Davies I., 2000). À l'opposé, ne pas en employer peut favoriser le développement et la propagation des maladies (Tan C. et al., 2002).

Ces produits peuvent se déposer à proximité des exploitations aquacoles, notamment dans le cas des installations immergées (cages-flottantes), et y demeurer un certain temps (jusqu'à un an et demi pour les antibiotiques) (Weber M., 2003 ; Naylor R. and Burke M., 2005 ; Goldburg R. et al., 2001).

La présence de quantités d'agents chimiques supérieures aux normes en vigueur (ou interdites) est accrue avec la distance entre le lieu de production et le lieu de consommation. Par exemple, des cargaisons de saumon contaminé au vert malachite en provenance du Chili ont été découvertes en Europe en 2003 (Johnson H., 2004).

Les RAS permettent de contrôler les rejets, la présence de pathogènes et de maladies (ils sont pourvus de systèmes de traitement de l'eau). Une démarche d'exploitation intégrée peut également être pertinente en tant qu'antifouling naturel (Lodeiros C. and García N., 2004). La vaccination, l'utilisation de produits "antifouling" respectueux de l'environnement (en considérant que ces deux termes puissent être compatibles) et le contrôle du respect des normes de quantités de produits chimiques dans les aliments sont les autres solutions préconisées (IUCN, 2007). La consommation d'aliments produits localement rend le contrôle du respect des normes plus aisé.

8) Contamination du poisson d'élevage par la pollution

Les élevages en systèmes ouverts sont exposés aux polluants présents dans leur milieu environnant ou dans les milieux dont est issue l'alimentation des espèces cultivées. Même dans les situations où ces pollutions sont considérées comme négligeables des mécanismes biologiques (bioaccumulation, bio-concentration) peuvent entraîner une haute teneur en polluants dans le produit destiné à l'alimentation humaine. Par exemple, le saumon concentre dans sa graisse de nombreux polluants, comme les polluants organiques persistants (PCB, dioxines) (Hites R. et al., 2004 ; Rembold C, et al 2004). Les risques issus de la consommation de ces produits sont en cours d'étude (Weber M., 2003). Les systèmes clos permettant d'éviter le contact direct entre les milieux environnant et le milieu d'élevage, le traitement de l'eau à l'entrée de ces circuits fermés, le choix des espèces élevées ainsi que l'origine des aliments constituent selon nous les solutions les plus pertinentes. L'aquaculture intégrée (IMTA) associée à un système clos (aquaponie) peut dans certains cas aussi en être une. Il peut également s'agir de systèmes en étangs ou bassins à condition que les critères précédents soient respectés.

9) Les méthodes utilisées pour contrôler la prédation des poissons en élevage

Les méthodes utilisées pour limiter le prélèvement par des prédateurs peuvent mener, volontairement (abattage des phoques) ou non, à la mort de ces derniers. Les méthodes dites non-létales (acoustiques) affectent également de manière négative (désorientation, douleurs, perte de l'audition) les espèces et individus visés ou non par ces mesures (Goldburg R. et al., 2001).

Les systèmes en eau recirculée sont généralement abrités dans des bâtiments et ne sont pas affectés par la prédation. Les autres solutions consistent à éloigner les sites de production des prédateurs, à augmenter la solidité des installations aquacoles (cages), à effectuer des rotations des espèces élevées et à utiliser des filets (par exemple contre les oiseaux) (Goldburg R. et al., 2001).

10) Tarsissement/salinisation des sources d'eau potable et salinisation des terres agricoles.

L'aquaculture peut consommer des grandes quantités d'eau douce. Si l'utilisation n'est pas raisonnée, elle peut entraîner le tarsissement et/ou la dégradation (par salinisation) des sources d'eau potable (PC, 2004 ; Barraclough S. and Finger-Stich A., 1996), privant les populations locales d'accès à l'eau. Ainsi au Sri Lanka, trois quarts des individus vivant à proximité de zones de culture de crevettes côtière intensive n'ont plus accès à de l'eau potable naturellement disponible (EJF, 2003). La salinisation peut s'étendre aussi aux terres agricoles (EJF, 2004).

Les systèmes en eau recirculée sont particulièrement performants pour réduire l'apport en eau jusqu'à n'utiliser que 1% (et parfois moins) de ce qui est utilisé dans d'autres systèmes (point 4.3) et l'eau qui en sort peut être filtrée. On peut également envisager de désaliniser l'eau de mer, mais ces techniques sont coûteuses et énergivores.

11) Disponibilités des terres et de eau

Dans certaines régions la densité de population et les différents usages du territoire limitent le

développement de l'aquaculture (FAO, 2014a ; FAO, 2014c). Les cours d'eau et autres lacs peuvent remplir d'autres fonctions pas toujours compatibles avec les activités aquacoles (transport, irrigation, évacuation des déchets, distribution d'eau, production hydroélectrique et services écosystémiques) (Costanza R. et al., 1997). Le manque d'eau peut aussi être une contrainte importante (par exemple en Asie centrale) (Thorpe A. et al., 2011).

La faible dépendance aux conditions du milieu des RAS permet de déplacer les installations en dehors des zones les plus plébiscitées tandis que la faible demande en eau répond aux pénuries de cette ressource. Dans les systèmes intégrés et en aquaponie, l'eau peut être utilisée de façon concomitante (ou séquentielle) pour la production d'espèces différentes (animales et végétales) et pour rationaliser l'utilisation de l'espace.

12) Le prélèvement d'individus sauvages

Les prélèvements massifs concernent surtout les alevins et les juvéniles (FAO, 2009), mais dernièrement, il affecte aussi les individus adultes de certaines espèces. Les prélèvements de juvéniles sont surtout employés dans le cas d'espèces abondantes (Davenport J. et al., 2003 cité dans IUCN, 2007), mais aussi quand les techniques de reproduction (artificielle) en captivité ne sont pas maîtrisées comme pour certaines crevettes, les anguilles (*Anguilla spp.*), les thons (*Thunnus spp.*), les sérioles (*Seriola spp.*), les mérours (*Epinephelus spp.*), les pieuvres (*Octopus spp.*), les sigans (*Siganus rivulatus*) ou encore quand des raisons d'ordre technique et économique interfèrent avec leur production (Hair C. et al., 2002 ; Ottolenghi F. et al., 2004 ; Islam, M. et al., 2004). Cette pratique revient à de la pêche de capture. Dans certains cas, l'effet sur les stocks sauvages est tel qu'il met en danger la survie des espèces exploitées, comme pour le thon rouge méditerranéen (Ottolenghi F. et al., 2004)

Les solutions envisageables consistent à utiliser des espèces dont la reproduction en captivité est maîtrisée. La recherche se concentre sur l'amélioration variétale pour les espèces dont la reproduction en capture n'est pas maîtrisée et, dans de nombreux cas, la faisabilité technique est atteinte mais le critère économique n'est pas satisfait (Marino G. et al., 2003; Iglesias J. et al., 2004; Mylonas C. et al., 2004 ; García-Gómez A. et al., 2005; Van Ginneken V. and Maes G., 2005; Jerez S. et al., 2006 cités dans IUCN, 2007). Une protection économique à la vente des espèces élevées sans prélèvements pourrait résoudre le problème, mais en faisant, pour un temps du moins, augmenter le prix de ces produits. La production locale (quand c'est techniquement possible), dans des systèmes proches des systèmes expérimentaux (RAS) pourrait avoir l'avantage d'économiser sur les coûts de transport et de stockage. Certaines espèces connaissent également une mortalité larvaire naturelle très importante par prédation et les prélèvements avant ce stade (système C.A.R.E.) sont négligeables pour l'évolution de ces espèces (Planes S. and Lecaillon G., 2001; Doherty P. et al., 2004 cités dans IUCN, 2007).

4.3 L'aquaculture continentale alternative

Chaque système aquacole alternatif (RAS, IMTA, Aquaponie) est caractérisé par un principe particulier lié au processus de production, mais il peut regrouper des pratiques très différentes. Ainsi

lorsqu'on parle d'approche IMTA, il peut s'agir aussi bien d'une installation située en mer que de bassins situés à terre. De plus, les différents principes associés à ces systèmes (recirculation de l'eau, polyculture, association de plantes comestibles) ne sont pas nécessairement mutuellement exclusifs.

Cette variabilité des pratiques complique les comparaisons entre systèmes. Nous avons donc décidé de délimiter notre propos et nous intéresser uniquement aux systèmes en circuit fermé situés sur le continent. Ce choix est motivé par les avantages environnementaux (réduction des émissions de GES dûs au transport, optimisation de l'utilisation de l'espace et des ressources), sociaux (création de lien social, éducation à l'environnement) et économiques (création d'emplois locaux, rélocalisation des investissements) associés aux circuits courts et à l'alimentation de proximité, dans une volonté de s'intégrer dans une approche d'économie circulaire (SPF Économie, 2014), d'alimentation durable (Verdonck M. et al, 2012) et d'agriculture urbaine/périurbaine (Duchemin E. et al, 2008 ; Dufays N., 2014 ; Site 39). Il tient aussi compte de la configuration géographique de la Belgique et notamment du type d'environnement disponible (marin vs. continental) et des contraintes qui y sont associées.

Par ailleurs notons qu'il n'existe pas à proprement parlé de définitions spécifiques de l'aquaculture alternative. La réduction des effets néfastes provoqués par l'aquaculture classique semble cependant bien résumer les différents critères présents dans la littérature (Allsopp M., 2008) comme par exemple la protection de la structure et du fonctionnement de l'environnement, la suppression des évasions d'individus élevés, l'efficacité trophique, la gestion des nutriments, l'absence de produits chimiques, ainsi que des considérations sociales (Costa-Pierce B., 2002).

I) Les systèmes en eau recirculée (RAS)

Les RAS sont des systèmes de production aquacole en circuit fermé basés sur le principe de la réutilisation, après divers processus de filtration (ou autrement dit, de recyclage), de l'eau contenue dans le système de production (MARM, 2010). La réutilisation de l'eau est toutefois relative et n'atteint jamais 100% car des pertes sont provoquées par l'évaporation, les éclaboussures et l'évacuation des déchets (ces systèmes sont considérés comme fermés si aucun autre ajout d'eau n'est effectué). En réalité, les systèmes à proprement dits fermés sont rarement utilisés dans les élevages ou une certaine quantité d'eau supplémentaire est régulièrement ajoutée car bien qu'il soit techniquement possible d'élever des poissons dans ces systèmes, il semble que ce soit économiquement non viable (FAO, 2015b ; Site 23).

La classification des systèmes RAS se fait sur base du taux de recirculation de l'eau ($Internal\ recirculation\ flow / (internal\ recirculation\ flow + new\ water\ intake) \times 100$). Le tableau 17 fournit un exemple des différentes mesures utilisées, mais d'autres mesures existent également (litres d'eau par kg d'aliment fournit par jour). Les RAS les plus performants arrivent à réutiliser plus de 96,6 % de l'eau (FAO, 2015b). Le taux de recirculation peut dépendre de plusieurs facteurs dont l'espèce élevée, les connaissances techniques ou la complexité du système (Blancheton J-P. et al., 2009).

Tableau 17. Différentes modalités de mesure de l'intensité de la recirculation de l'eau dans les systèmes RAS, et les valeurs correspondant à ces intensités, pour une exploitation d'une production de 500 tonnes/an avec un volume d'eau total de 4000 m³, dont 3000 dans les bassins d'élevage. (Sources : FAO, 2015b ; Martins C. et al., 2010)

Type de système	Consommation d'eau nouvelle par kg de poisson produit par an (en m ³)	Consommation d'eau nouvelle par m ³ par heure (en m ³ /h)	Consommation d'eau nouvelle par jour par rapport au volume d'eau contenu système (en %)	Degré de recirculation pour un recyclage de toute l'eau du système en une heure (en %)
Écoulement continu	30	1 712	1 028	0
RAS de faible intensité	3	171	103	95,9
RAS intensif	1	57	34	98,6
RAS super intensif	0,3	17	6	99,6

L'utilisation commerciale des RAS a débuté vers la fin des années 80 (Blancheton J-P. et al., 2009). Conçus initialement comme systèmes expérimentaux ou destinés aux premiers stades de la production aquacole (alevinage, nurseries, écloséries), ils se sont progressivement étendus aux phases de grossissement de telle façon qu'il est aujourd'hui possible d'y élever complètement certaines espèces (Site 23). En Europe, cette technique a été utilisée suivant des stratégies de production différentes (grossissement des poissons d'eau douce au nord et production d'alevins marins au sud) (Blancheton J-P. et al., 2009).

La capacité de production moyenne des exploitations est d'environ 100 tonnes de poisson par an (Blancheton J-P. et al., 2009) mais elle peut varier fortement, allant d'exploitations individuelles produisant quelques centaines de kg à des installations industrielles d'une capacité de production annuelle de 2000 tonnes comme celle de Hirtshals au Danemark (FAO, 2015b ; Site 24). Cependant, la part de la production RAS reste faible comparée à la production aquacole totale (Martins C. et al., 2010). En 2009, les pays européens dominant la production étaient les Pays-Bas (9 680 tonnes/an produites par environ 90 entreprises ; Blancheton J-P. et al., 2009) avec des installations consommant entre 30 et 300 litres d'eau par kg de nourriture par jour) et le Danemark (12 000 tonnes/an pour 3 900 litres d'eau par kg de nourriture par jour) (Martins C. et al., 2010)

A) Fonctionnement

Le bon fonctionnement du système RAS repose sur sa capacité à garder un environnement aquatique suffisamment propice à la vie des individus élevés. Pour y arriver, différents dispositifs fonctionnels sont nécessaires. La figure 5 illustre l'agencement possible des dispositifs du système. Ces dispositifs doivent permettre de contrôler certains paramètres comme la température, la salinité, le pH, la concentration en oxygène et en CO₂ ou la concentration en matière organique. De nombreuses interactions entre ont lieu entre ces paramètres et le système peut être considéré comme étant de haute technicité.

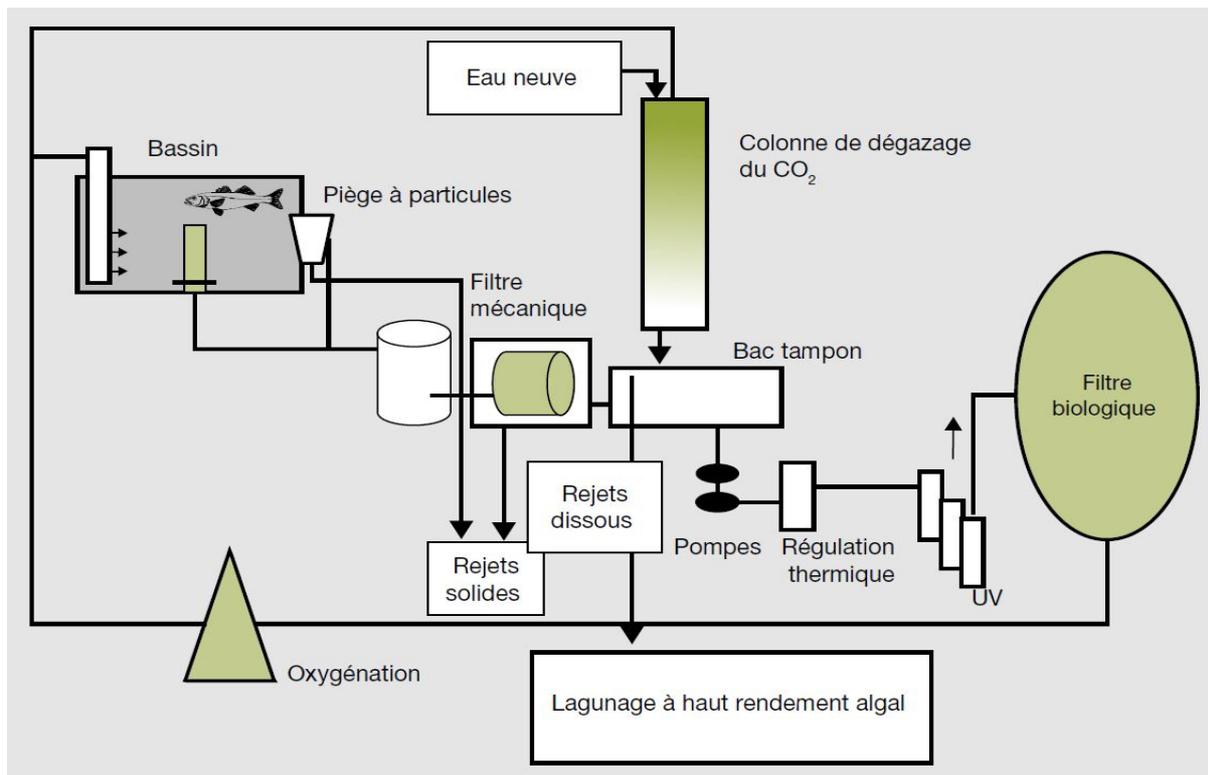


Figure 5. Schéma détaillé d'un système en eau recirculée (RAS)
(Source : Blancheton J-P., 2009)

Les différentes fonctions que le système doit assurer sont (Schwartz M., 2005 ; Klinger D. and Naylor R., 2012 ; Blancheton J-P. et al., 2009) :

1) Assurer un espace de vie

Différentes formes de bassins d'élevage existent (circulaires, octogonaux, couloirs ou raceway, D ended raceway). Elles influencent directement les propriétés hydrauliques (auto-nettoyage), l'optimisation de l'espace ainsi que la résistance des bassins, et indirectement l'efficacité de la production et la rentabilité économique de l'exploitation. Les proportions des bassins dépendent du type de poisson élevé (de fond, pélagique), du reste des équipements du système ainsi que des considérations économiques (FAO, 2015b). Par ailleurs, le taux de remplissage en poissons (densité) doit permettre la rentabilité de l'exploitation sans affecter leur bien-être et/ou santé, ce qui risquerait d'entraîner une baisse de production (Martins C. et al., 2010)

2) Élimination de la matière (organique) en suspension

Première étape permettant d'améliorer la qualité de l'eau (élimination des aliments non consommés, des résidus de digestion et des restes de bactéries) (Klinger D. and Naylor R., 2012), elle accroît également l'efficacité du traitement dans les étapes suivantes (par ex. lors de la nitrification)

(Martins C. et al., 2010). Les dispositifs les plus fréquents sont les filtres mécaniques et la taille minimale des éléments retenus est de 40µm (FAO, 2015b ; Blancheton J-P. et al., 2009 ; David P. et al., 2009).

3) Élimination des nutriments

Les composés azotés (NH₄, NH₃) issus du métabolisme des poissons (dégradation des acides aminés) se retrouvent dans l'eau du système (excréments, urine) et peuvent être très toxiques à faible concentration (NH₃, nitrites) pour ces derniers. La transformation de ces composés en éléments moins toxiques (nitrates : de 10 à 100 fois moins toxiques pour les poissons mais très toxique pour les invertébrés marins) est réalisée par oxydations successives (nitrification) effectuées par des bactéries aérobies (*Nitrosomonas* sp., *Nitrosococcus* sp. et *Nitrospira* sp.) dans les bio-filtres (Tableau 18). Dans certains systèmes la nitrification est suivie d'une transformation (dénitrification) des nitrates en azote gazeux (N₂) (bactéries anaérobies : *Pseudomonas*). (FAO, 2015b ; Klinger D. and Naylor R., 2012). La présence des bio-filtres relativise l'aspect monospécifique de ces élevages.

<i>Tableau 18 : Transformations chimiques dans le bio-filtre. Étapes de la dégradation des déchets azotés.</i>				
Ammonisation	a) Ammonisation	NH ₄ ⁺ + OH ⁻ ammonium + hydroxyle	→	NH ₃ + H ₂ O ammoniac + eau
Nitrification	b) Nitrosation	2NH ₄ ⁺ + 3O ₂ ammonium + oxygène	→	2NO ₂ ⁻ + 2H ₂ O + 4H ⁺ nitrite + eau + hydrogène
	c) Nitratation	2NO ₂ ⁻ + O ₂ nitrite + oxygène	→	2NO ₃ ⁻ nitrate
<i>Toxicité pour les poissons: Ammonium (faible) => Ammoniac (forte : dès 0,02 mg/l) => Nitrites (forte : dès 2.0mg/l) => Nitrates (faible : néfaste pour la croissance à partir de 100mg/l). Source : FAO, 2015b</i>				

4) Élimination des gaz

L'eau du système d'élevage est chargée en gaz (CO₂, N₂, H₂S) issus de l'activité métabolique (respiration) des espèces qui y vivent (poissons, bactéries). Ces gaz sont néfastes (voir mortels) pour les poissons, et il faut les retirer. Le procédé employé est appelé dégazage (stripping) et consiste à pomper de l'air dans l'eau afin de maximiser la surface d'échange entre ces deux éléments, et ainsi faciliter la diffusion des gaz. Plusieurs dispositifs (injection d'air simple, colonnes de dégazage, filtres à ruissellement) peuvent être employés, avec différents niveaux d'efficacité. (FAO, 2015b ; Blancheton J-P. et al., 2009 ; Klinger D. and Naylor R., 2012 ; Site 23).

5) Maintien du taux d'oxygène dissout

Les organismes vivant dans le système consomment l'oxygène disponible dans l'eau (respiration) et la saturation en oxygène est d'environ 70% à la sortie des bassins d'élevage pour baisser d'avantage

par la suite (respiration bactérienne). Afin de maintenir un niveau suffisant à leur survie, il faut un apport pour compenser les pertes. Les processus (et parfois les dispositifs) utilisés sont les mêmes que pour l'élimination des gaz (stripping). L'oxygène peut être ajouté par différents dispositifs (diffuseurs, cônes sous pression, tube en U, plate-formes à jets) à différentes pressions (0,1 à 1,4 bars) et sous différentes formes (air, oxygène gazeux ou liquide pur) afin d'obtenir la saturation voulue. (FAO, 2015b ; David P. et al., 2009 ; Blancheton J-P. Et al., 2009 ; Site 23).

6) Maintien du pH

Le niveau du pH de l'eau interagit avec différents paramètres (voir précédemment). Par exemple, le pH influence l'activité (ammonisation, nitrification) des bactéries du bio-filtre : sous pH 7 l'activité bactérienne est trop faible, mais au delà de 8 la transformation de l'ammonium en ammoniac est trop rapide et crée un milieu toxique pour les poissons. Ce taux influence aussi directement la croissance des poissons et leur survie. Le niveau du pH dépend de la quantité de CO₂ présent dans l'eau ainsi que de l'activité des bactéries nitrifiantes (production de ions H⁺ : voir Tableau 18). Pour rectifier ce niveau on procède au dégazage ou on ajoute une base dans l'eau (hydroxyde de sodium/NaOH) (FAO, 2015b ; Site 23).

7) Élimination des pathogènes

Le milieu propice créé pour les bactéries utiles au système (bio-filtre), la densité des individus élevés et la présence de matière organique (aliments non consommés, fèces) peuvent également profiter à différents pathogènes (bactéries, champignons, protozoaires, virus). Ceux-ci peuvent être introduits dans le système de différentes façons (eau nouvelle, alimentation, individus prélevés/élevés/produits ailleurs, bassins en extérieurs non couverts). Afin de protéger les individus élevés (contamination des poissons, surconsommation d'O₂ par les bactéries), on fait appel à des techniques de décontamination de l'eau (en fin du circuit fermé ou à l'entrée d'eau nouvelle dans le circuit) par l'irradiation UV immergée (destruction de l'ADN des pathogènes) ou par ajout d'un oxydant puissant comme l'ozone (oxydation de la matière organique et des pathogènes). L'irradiation UV atteint une efficacité élevée (90 % d'abattement) à condition que la puissance d'exposition soit suffisante (2000 à 10 000 µWs/cm² pour les bactéries, 10 000 à 100 000 pour les champignons et 50 000 à 200 000 organismes de petite taille comme les protozoaires). L'ozonation permet en outre de récupérer les petites particules de matière organique (floculation et filtration), mais peut être extrêmement toxique pour les poissons élevés, les bactéries utiles, voir pour les employés de l'exploitation. Notons qu'une population bactérienne (utile) saine et équilibrée est le premier rempart contre le développement de pathogènes (FAO, 2015b ; Martins C. et al., 2010 ; Klinger D. and Naylor R., 2012 ; Blancheton J-P. et al., 2009 ; Site 23).

8) Maintien de la température

Comme les poissons sont des animaux à sang froid (ou ectothermes ; température interne =

température du milieu) ce paramètre influe fortement la capacité de croissance et de survie des individus élevés (et donc la productivité/rentabilité de l'exploitation). Les systèmes en eau recirculée doivent gérer ce paramètre en fonction de l'espèce élevée et du climat où est implantée l'exploitation. Un RAS a tendance à accumuler la chaleur issue de l'activité biologique (métabolique) et mécanique (frottements, dégagement de chaleur des moteurs) des différents éléments du système, dans l'eau d'élevage (FAO, 2015b). Il faut dès lors refroidir l'eau. Dans un climat froid, l'enjeu sera de garder une température suffisamment élevée pour permettre la bonne croissance des individus élevés. Dans ce cas, les RAS sont bien plus performants que d'autres systèmes (par exemple ceux en flux continu). Les dispositifs utilisés sont les chauffe-eau et/ou les échangeurs/pompes à chaleur (FAO, 2015b ; Site 23).

9) Assurer la circulation de l'eau

La circulation de l'eau dans les systèmes RAS est assurée par des pompes (électriques). Des pompes de puissance très variable sont employées en fonction de la hauteur et de la taille du système ainsi que de l'agencement et du type de dispositifs utilisés (FAO, 2015b ; David P. et al., 2009).

10) Nourrir les espèces élevées

Comme il s'agit d'un système complètement artificiel, sa capacité à assurer une alimentation suffisante aux individus y vivant est totalement dépassée. Il faut dès lors un apport (manuel ou mécanique) extérieur. Pour réduire les possibilités de contamination (pollution, pathogènes) du système, les poissons doivent être nourris avec des aliments secs (pellets) (FAO, 2015b)

11) Contrôle continu

Dans ces systèmes artificiels et plus ou moins intensifs, certaines pannes (approvisionnement électrique) et/ou dysfonctionnements des dispositifs (d'oxygénation, de dégazage, de décontamination, d'alimentation) sont susceptibles d'entraîner la dégradation rapide des conditions du milieu d'élevage (niveaux d'O₂, CO₂, pH, H₂S, de pathogènes ou de température hors limites) et par conséquent la perte d'une partie ou de la totalité des individus élevés. Pour parer à cette éventualité, des dispositifs d'alerte (détecteurs, alarmes) et d'urgence (générateur électrique, diffuseurs d'oxygène indépendants) sont nécessaires. Dans les exploitations modernes des systèmes informatisées gèrent dans un premier temps les éventuelles défaillances (FAO, 2015b).

12) Autres

Les systèmes RAS peuvent également avoir à assurer des fonctions de maintien de la salinité, du contrôle de la luminosité, de traitement des boues résiduelles et d'élimination de mousses (FAO, 2015b ; Schwartz M., 2005).

B) Caractéristiques techniques de production

Tableau 19 : Caractéristiques techniques de production des systèmes RAS comparées à un système classique (en flux continu). Les données concernent uniquement les ressources et l'espace utilisé au lieu et moment de l'élevage. (Sources : FAO, 2015b ; Site 23 ; Boulet D. et al., 2010 ; Heldbo J., and Klee P., 2014)

	Consommation d'eau par kg de poisson produit (en m ³)	Énergie nécessaire par kg de poisson produit (en kWh)	Surface nécessaire par kg (et tonne) de poisson produit (en m ²)
Flux continu	30 à 100	0,5 à 2	
Systèmes intermédiaires			0,055 (55,12)*
RAS de faible intensité	3 à 10	2,5 à 4	
RAS intensif	1	6 à 7	
RAS super intensif	0,1 à 0,3	> 6	0,032 (32,36)** 0,005 (5)***

* Empreinte terrestre totale de 100 000 m² pour une exploitation de tilapia (en activité depuis 20 ans), produisant 1814,37 tonnes par an (recirculation 85%).

** Empreinte terrestre totale (toutes installations comprises et distance réglementaire par rapport aux habitations) estimé pour une exploitation hypothétique de saumons d'une capacité de 2 500 tonnes/an : 80 900 m² (Densité: 50kg/m³. Profondeur moyenne des bassins : 4m).

*** Empreinte terrestre totale d'une installation récente (2013) de 10 000m² et produisant 2 000tonnes de saumon/an (recirculation + de 99%, soit 200lkg)

Tableau 20 : Consommation, d'énergie, d'espace et productivité du travail par espèce de poisson produite en RAS, pour une exploitation de 100 tonnes/an. (Source: Blancheton J-P. et al., 2009 ; Eding E. and Kamasrta A., 2002)

Espèce	Anguille	Poisson-chat africain	Bar	Turbot
Consommation d'espace en kg/m ² (et en m ² /kg)	200 à 300 * (0,003 à 0,005)	1 000 à 1 500 * (0,001 à 0,0007)	200 * (0,005)	55 à 70 * (0,014 à 0,018)
	67 à 83 ** (0,012 à 0,015)	286 ** (0,0035)		30 ** (0,034)
Consommation d'énergie (en kWh/kg)	7	0,7	6,5	6,7
Productivité du travail (en tonnes/an/pers.)	70		95	50

* Seule la superficie des bassins d'élevage est prise en compte

** Toute la superficie du bâtiment est prise en compte

1) La consommation d'eau par kg de poisson produit dans un RAS varie selon l'intensité de la recirculation (Tableau 17 et 19), l'espèce élevée et le type d'environnement (eau salée/douce). Elle varie également selon la source d'information :

- A partir de 16l d'eau/kg (0,016m³/kg) de poisson marin (daurade royale) et 50l/kg (0,05m³/kg) pour les espèces d'eau douce (Klinger D. and Naylor R., 2012).
- A partir de 20l/kg (0,02m³/kg) de poisson-chat/Claresse. (Exploitation en activité : Site 29).
- Entre 100l/kg (0,1m³/kg) et 10 000l/kg (10m³/kg) selon l'Ifremer (Site 23)
- Entre 300l/kg (0,3m³/kg) et 3000l/kg (3m³/kg) selon la FAO (FAO, 2015b)

La qualité de l'eau est un élément primordial. L'utilisation d'eau de source ou souterraine (puits) est la plus indiquée pour les RAS (peu/pas de pathogènes), mais l'eau de distribution peut également être employée à condition d'en retirer les produits chimiques de désinfection (chlore). Si besoin, l'eau de surface pourra être employée à condition que la filtration et la désinfection préalable soit suffisamment efficace (FAO, 2015b). En théorie, et selon les mêmes conditions, on pourrait employer de l'eau de pluie (si les procédés restent économiquement viables).

2) La consommation d'énergie par kg de poisson produit varie selon de nombreux paramètres comme le type d'équipement, le taux de recirculation, la quantité et qualité des aliments et leur taux de consommation et assimilation, la densité d'élevage (besoins en O₂), la hauteur du système, le degré d'automatisation, la nécessité de désinfection, la nécessité de thermorégulation (dépendant de l'espèce élevée et du climat) (David P. et al., 2009 ; chapitre 4.3 A I). La consommation d'énergie varie dans un RAS, entre 2,5 et 7kWh (voir plus) par kg de poisson (Tableaux 17, 19 et 20). Certains producteurs (de poissons ou d'installations aquacoles) annoncent des consommations de 0,8kWh/kg (de poisson-chat/Claresse) (Site 29) à 2,1 - 2,5kWh/kg (de saumon) (Heldbo J. and Klee P., 2014).

Sur base d'une exploitation super-intensive (en densité) d'esturgeons, la thermorégulation (si nécessaire) (61,4%), la circulation (27%) de l'eau et la désinfection UV (8,1%) sont dans l'ordre les activités les plus énergivores (Figure 6).

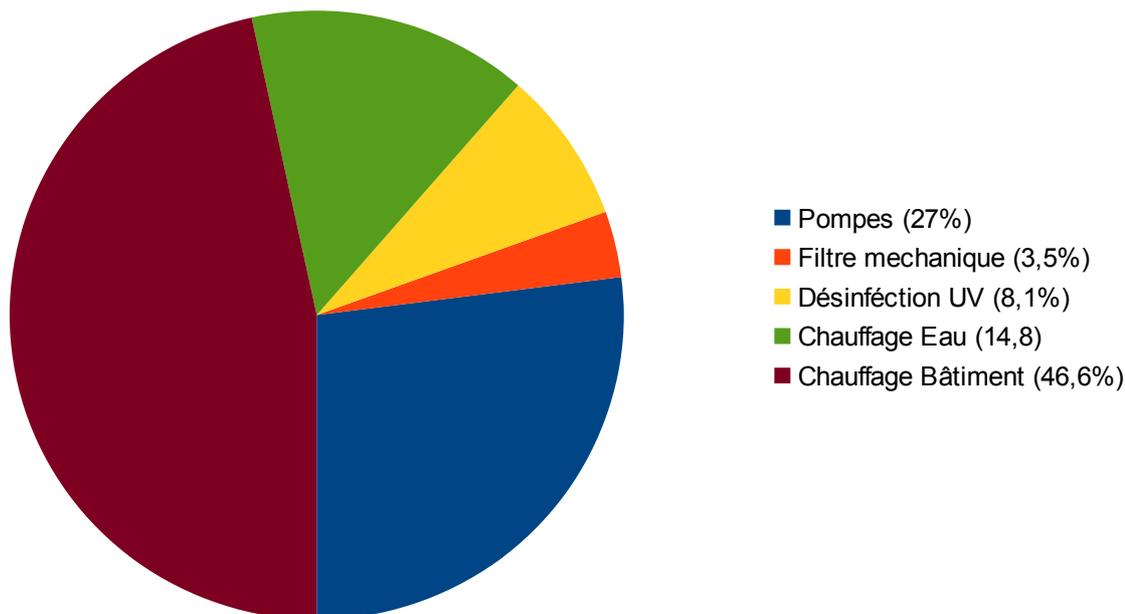


Figure 6 : Répartition (en %) de la consommation annuelle d'énergie dans une exploitation aquacole d'esturgeon en Roumanie avec système RAS super-intensif (80 à 100 kg/m³). La consommation totale est de 537 704 kWh/an. (Source: David P. et al., 2009)

Il existe différents moyens pour réduire la consommation (et la facture) énergétique et/ou l'impact sur l'environnement (émission de GES) (David P. et al., 2009 ; FAO, 2015b ; Site 23 ; Roque d'Orbcastel E., 2008, Roque d'Orbcastel E. et al., 2009 ; Martins C. et al., 2010) tels que :

- L'utilisation de sources d'énergie alternative (solaire, éolienne, hydrodynamique, géothermique) ou la substitution/ajout de dispositifs issus d'une approche de culture intégrée (lagune algale : voir Figure 5 et chapitre 4.3 B)
- L'utilisation de pompes à chaleur et échangeurs de chaleur la thermorégulation. Un haut niveau de recirculation/faible apport d'eau nouvelle, ainsi qu'une bonne isolation des installations/bâtiments ou le choix d'espèces compatibles avec le climat local.
- L'optimisation de la circulation de l'eau (pompes) en réduisant la hauteur du système, en évitant le pompage inutile/excessif, en optimisant la conception du système (suppression des bassins tampons, améliorer les performances hydrauliques du système, choix d'un type de pompe à plus faible consommation) ou en réduisant l'intensité de la recirculation de l'eau.
- La modernisation/optimisation des équipements de filtration, aération, désinfection

3) La consommation d'espace par kg de poisson produit dépend de nombreux paramètres (comme la hauteur des bassins, l'espèce élevée, les caractéristiques de l'exploitation) et il est donc difficile d'établir une valeur moyenne (voir Tableau 19). Les valeurs sont souvent fournies en m³/espèce

(poisson-chat 500kg/m³, barramundi 200kg/m³, koi 45kg/m³, pangasius 300 kg/m³) (Site 27), mais aussi en m²/espèce (anguille 200 à 300kg/m², bar 200kg/m², turbot 70kg/m²) (Blancheton J-P. et al., 2009). Ceci peut s'expliquer par le type d'environnement dans lequel évolue le poisson à l'état naturel (benthique vs. pélagique). Pour évaluer l'empreinte totale, nous nous basons sur :

- Des exploitations en activité :
 - Blue Ridge Aquaculture, USA (Site 25). Espace total nécessaire : 100 000 m² pour 1 814,37 tonnes/an de tilapia, soit 0,055 m²/kg (55,12 m²/tonne). Recirculation 85 %.
 - Hirtshals, Denmark (Heldbo J. and Klee P., 2014). Espace total nécessaire : 10 000 m² pour 2 000 tonnes de saumon/an , soit 0,005 m²/kg (5 m²/tonne). Recirculation + de 99%, soit 200l/kg)
 - Ferme RAS en Russie (Site 27). Espace total nécessaire 4 000 m² pour 500 tonnes/an de truites, soit 0,008 m²/kg (8 m²/tonne).
 - Global Fish Poland (Site 28). Espace total nécessaire 40 000 m² pour 1 300 tonnes/an de tilapia, soit 0,031 m²/kg (30,77 m²/tonne).
 - Données de la FAO (FAO, 2015b). 7 000 m² pour 1 000 tonnes / 1 000 m² pour 100 tonnes.
- Une étude de faisabilité (Boulet D. et al., 2010). Espace nécessaire total 80 900m² pour 2 500 tonnes de saumon par an, soit 0,032 m²/kg (32,36 m²/tonne). Recirculation 98%.
- Un projet (Site 26). Espace total nécessaire : 2 600m² pour 1200tonnes de poisson par an, soit 0,002 m²/kg de poisson (2,167 m²/tonne)

Ces fortes densités de production font planer un doute sur l'état de bien-être des poissons, cependant celui-ci (évalué par la condition générale de santé et l'état des nageoires) semble être plus étroitement associé à la qualité de l'eau qu'à la densité d'élevage (Roque d'Orbcastel., 2008). Autrement dit une forte densité peut être compensée par l'optimisation des autres paramètres d'élevage. La densité atteinte en RAS permet toutefois des gains d'espace par rapport aux autres systèmes de productions. Comparée à un système en flux continu élevant la même espèce (truite), la réduction d'espace est d'environ 40% (Roque d'Orbcastel., 2008). La productivité de l'aquaculture en étang est de loin inférieure à celle en RAS. Il y faut entre 16 et 167m² par kg de poisson produit en France sans apport d'aliments (Barbe J. et al., 2000) et entre 1,6 et 25 par kg de poisson produit en Afrique y compris dans des étangs à production intensive avec apport extérieur d'aliments (Efole Ewoukem T., 2011).

4) Les besoins en énergie, eau et espace nécessaires pour la production d'aliments destinés à nourrir les poissons dépendent fortement du taux de conversion des aliments (Feed Conversion Ratio ou FCR) et de la composition des aliments, à savoir la part de produits végétaux ou d'huiles et farines de poissons (Roque d'Orbcastel E., 2008 ; Roque d'Orbcastel E. et al, 2009 ; Aubin J, 2014).

Le FCR représente la part de nourriture (souvent fournie sous forme de pellets très secs) transformée en poids (vif) de poisson (aliments fournis / gains de poids). Ce taux varie selon de très nombreux paramètres comme l'espèce élevée, sa taille, son stade de développement, la quantité et qualité des aliments ainsi que leur taux d'administration et de consommation, la qualité de l'eau ainsi que sa température et teneur en d'oxygène. Les paramètres les plus importants sont la température de l'eau, l'espèce élevée et sa taille ou stade de développement. Bien optimisées, les RAS sont particulièrement performants en ce qui concerne le FCR. Il faut par exemple 0,70 à 1,1kg d'aliments pour un kg de truite (poids vif) (FAO, 2015b ; Roque d'Orbcastel E., 2009), 0,64 à 0,81 kg d'aliments par kg de poisson-chat (Besson M. et al., 2014). Par exemple pour deux élevages similaires (même espèce, même quantités produites) l'un en flux continu et l'autre en RAS, les FCR respectifs sont de 1.1 et 0,8 (Roque d'Orbcastel E., 2009). Dans ces conditions, un FCR moyen de 1 paraît suffisamment prudent pour estimer l'espace agricole nécessaire à la production d'aliments pour poissons (ce qui permet une extrapolation suivante : quantité de poisson produit = quantité de nourriture nécessaire), et 1,2 dans le cas d'aliments sans huiles et farines de poissons (Davidson J. et al., 2013).

La composition des aliments varie selon la marque. Les huiles et farines de poissons représentent environ 30 % (Tableau 21), réductibles à 10% pour certaines espèces (Vandeputte M. et al., 2011 ; Aubin J, 2014), parfois avantageusement remplaçables par des aliments à base d'insectes (Van Huis A., 2013). Rappelons que l'alimentation des espèces herbivores peut, en théorie, reposer uniquement sur des végétaux (chapitre 4.2).

Tableau 21 : Exemple de composition d'ingrédients d'une gamme de produits (BioMar) destinées à l'alimentation des truites élevées en systèmes recirculés. (Source : FAO, 2015b).

Composition (en %)	3.0mm	4.5mm	6.5mm
Farines de poisson	22	21	20
Huiles de poisson	9	10	10
Huile de colza	15	15	16
Hémoglobine	11	11	11
Pois	5	5	5
Soja	10	11	11
Blé	12	11	11
Gluten de blé	5	5	5
Concentré de protéines	10	10	10
Vitamines, minéraux, autres	1	1	1

Produire un aliment pour l'élevage de truites ou saumons, composé de 10 à 30% d'huiles et farines de poissons, nécessite entre 5 et 6,6kWh/kg (énergie), entre 16 et 39,3l/kg (d'eau) et entre 0,9 et 2,8m²/kg (surface) (Tableau 22 ; Aubin J, 2014). Ces valeurs sont compatibles avec celles d'autres études où les besoins alimentaires sont pondérés par un FCR entre 0,8 à 1,1 (Roque d'Orbcastel E. et al., 2009).

Selon une analyse de cycle de vie (ACV), la consommation moyenne d'énergie serait de 16kWh/kg de poisson (truite) produit, ce qui équivaut à la quantité nécessaire pour pêcher un kg de poisson (Roque d'Orbcastel E. et al., 2009), quantité toutefois réductible jusqu'à 10-12kWh/kg, soit l'équivalent d'un système en flux continu, voir moins (Roque d'Orbcastel E., 2008). Mais selon d'autres auteurs, la consommation totale d'énergie calculée par ACV pour un kg de poisson pourrait être bien plus élevée (entre 16 et 98kWh/kg) (Klinger D. and Naylor R., 2012).

Tableau 22 : Besoins en énergie, eau et terre pour la production d'une unité d'aliments (kg ou tonne) comprenant entre 10 et 30% d'huiles et farines de poissons, destiné à l'élevage piscicole de truites ou saumons. (Source : Aubin J., 2014)

	Énergie : kWh	Eau : litres (m3)	Surface : m2
Par kg d'aliment	5 à 6,6	16 à 39,3 (0,016 à 0,039)	0,9 à 2,8
Par tonne d'aliment	5019,44 à 6611,94	16 000 à 39 300 (16 à 39,3)	932 à 2770

Vu la variabilité des systèmes et des interactions entre leurs paramètres, notre travail consiste à proposer des ordres de grandeur plutôt que de fournir des données absolues.

La production des aliments est également associée à d'autres effets environnementaux, comme l'acidification (par émissions de CO² dues aux activités agricoles) et l'eutrophisation (rejets de nutriments) des milieux aquatiques, les émissions de GES (réchauffement climatique), l'utilisation de matières premières. Ces effets sont aussi modulés par le FCR et le pourcentage d'aliments d'origine végétale qu'ils contiennent. Si le FCR est de faible valeur (bonne conversion) l'alimentation nécessaire sera moindre pour une même quantité de poisson produit, ce qui réduit aussi les impacts associés à sa production. De même, l'augmentation de la proportion d'aliments d'origine végétale dans l'alimentation des poissons accroît les impacts associées à leur production (mais décroît ceux associées à la capture/transformation des poissons) (Aubin J., 2014). Pour ces raisons, l'utilisation de RAS, comparé à des systèmes en flux continu, réduit ces impacts (Figure 8 ; Roque d'Orbcastel E., 2008). La figure 7 illustre ces réductions. Elle exprime les effets sur l'environnement (en pourcents de l'impact le plus important) d'un système recirculé (SR) par rapport à deux systèmes en flux continu (SO). L'illustration de ces impacts, calculés sur base d'une ACV, met en avant la réduction des impacts environnementaux grâce à l'utilisation des RAS. L'énergie consommée se voit toutefois augmenté de 20 à 40%.

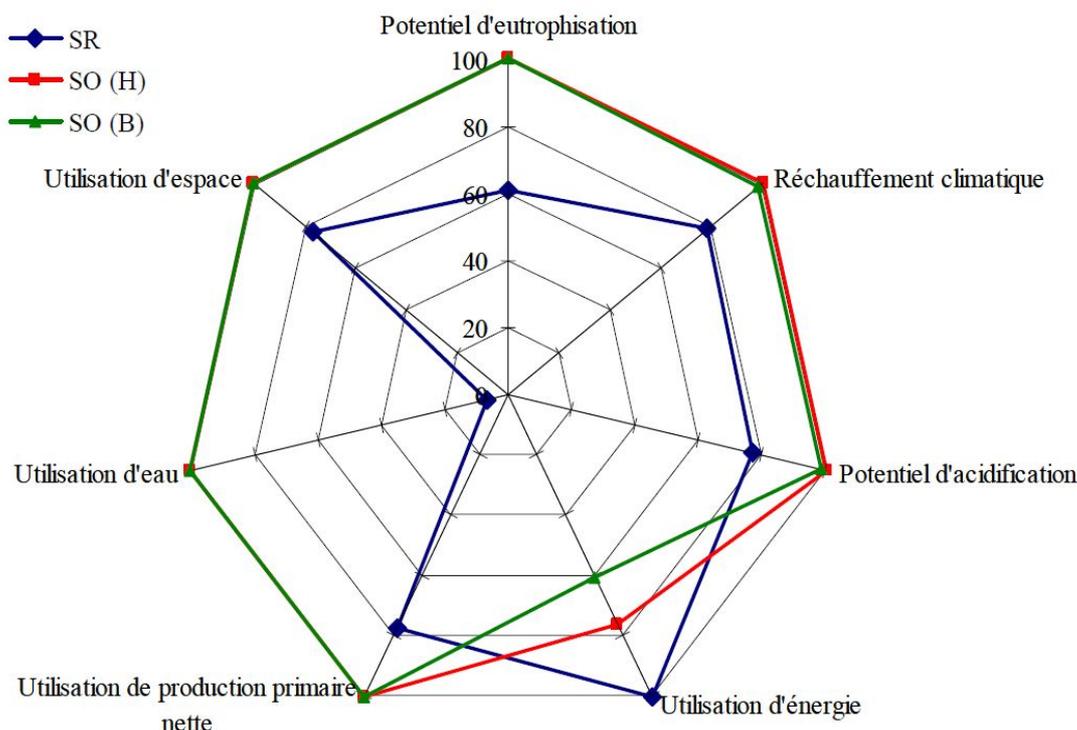


Figure 7 : Comparaison, en pourcent de l'impact le plus important, des impacts environnementaux d'un système en eau recirculé (SR) et deux systèmes ouverts (SO). (Source : Roque d'Orbcastel E., 2008)

5) Les estimations des besoins au niveau de la Belgique sont calculées sur base d'une consommation annuelle de 300 000 tonnes de produits halieutiques. La composition spécifique (moule, soles, truites) de la consommation n'a pas été prise en compte. Étant donné le nombre de choix possibles concernant les paramètres de production pouvant affecter les valeurs au niveau national, la présentation en intervalles de valeurs a été préféré à des valeurs moyennes. Les valeurs retenues sont de 1 à 7kWh/kg, de 0,02 à 3m³/kg et de 0,005m²/kg à 0,03m²/kg pour la phase d'élevage ainsi que de 5 à 6,6 kWh/kg, de 0,016 à 0,039m³/kg et de 0,932m²/kg à 2,77m²/kg pour la production d'aliments. Le FCR est fixé à 1, ce qui permet de considérer qu'il faut 300 000 tonnes d'aliments pour produire la même quantité de poissons correspondant à la demande annuelle belge. Dans ces conditions assurer une production annuelle suffisante pour satisfaire la demande belge, phase d'élevage seule comprise, nécessiterait entre 0,3 et 2,1 Twh, entre 6 et 9 millions de m³ d'eau et entre 1,5 et 9km² (Tableau 23).

Tableau 23 : Estimation des besoins en énergie, eau et surface pour satisfaire la demande en produits halieutiques belge, estimée à 300 000 tonnes par an, à l'aide de RAS. Réalisation propre.

Besoins	Énergie (en MWh)		Eau (en m ³)		Surface (en m ²)	
	Valeur min.	Valeur max.	Valeur min.	Valeur max.	Valeur min.	Valeur max.
Valeurs min/max						
Phase d'élevage RAS	300 000	2 100 000	6 000 000	900 000 000	1 500 000	9 000 000
Production d'aliments	1 505 832	1 983 582	4 800 000	11 790 000	279 600 000	831 000 000
Total	1 805 832	4 083 582	10 800 000	911 790 000	281 100 000	840 000 000

C) Espèces exploitables en RAS

Toutes les espèces et stades de développement (les RAS sont très souvent utilisés pour élever les alevins et juvéniles) ne sont pas compatibles avec la production en RAS, certaines pour des raisons économiques et d'autres pour des raisons techniques (FAO, 2015b ; Site 23). La FAO a dressé une liste des espèces plus ou moins exploitables sur base de ces deux paramètres (Tableau 24). Le cabillaud (Site 23), le vivaneau campêche, la morue de Murray (Martins C. et al., 2010) et l'ombrine ocellée en feraient également partie. Le RAS est surtout utilisé pour la production de poissons, mais d'autres espèces comme les crevettes (Site 30) et certains mollusques peuvent y être élevées (FAO, 2015b).

Tableau 24 : Espèces exploitables en RAS, classées en trois catégories selon le degré de viabilité de la production sur base de critères techniques et économiques. (Source : FAO, 2015b)

Viabilité de l'exploitation		
Grande	Moyenne	Faible
Omble chevalier (<i>Salvelinus alpinus</i>)	Poisson-chat africain (<i>Clarias gariepinus</i>)	Morue de l'Atlantique (<i>Gadus morhua</i>)
Saumon de l'Atlantique, alevin (<i>Salmo salar</i>)	Barramundi (<i>Lates calcarifer</i>)	Saumon de l'Atlantique, adulte (<i>Salmo salar</i>)
Anguille commune (<i>Anguilla anguilla</i>)	Carpes (<i>Cyprinus carpio</i>)	Thon rouge de l'Atlantique (<i>Thunnus thynnus</i>)
Mérus (<i>Epinephelus spp.</i>)	Pangasius (<i>Pangasius bocourti</i>)	Cobia (<i>Rachycentron canadum</i>)
Truite arc en ciel (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	Perche commune (<i>Perca fluviatilis</i>)	Limande-sole (<i>Microstomus kitt</i>)
Bar commun (<i>Dicentrarchus labrax</i>)	Tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>)	Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)
Daurade Royale (<i>Sparus aurata</i>)	Lavaret (<i>Coregonus lavaretu</i>)	
Esturgeon (<i>Acipenser spp.</i>)		
Turbot (<i>Scophthalmus maximus</i>)		
Crevette à pattes blanches (<i>Penaeus vannamei</i>)		
Sérieole (<i>Seriola lalandi</i>)		

Les espèces d'eau douce sont avantagées par leur tolérance envers une eau de moindre qualité (équipements de traitement de l'eau moins nombreux et/ou moins coûteux) mais désavantagées par leur prix de vente généralement plus faible, tandis que l'inverse est vrai pour les espèces marines (Martins C. et al., 2010 ; Blancheton J-P. et al., 2009). Les RAS étant des systèmes dont l'investissement initial est important (une étude canadienne (Boulet D. et al., 2010) estime à 22,6 millions d'USD l'investissement initial nécessaire pour une ferme RAS produisant 2 500 tonnes par an et rapportant au bout de la 3^{ème} année ~380 000 USD tout frais déduits) les espèces exploitées doivent, soit avoir une haute valeur marchande, soit pouvoir être produite de manière très intensive (FAO, 2015b), soit les deux. Notons que parmi les espèces à grandes viabilité technique et/ou économique trois (anguilles, sérieoles, mérus) sont des espèces habituellement élevées à partir

d'individus sauvages prélevées.

Les espèces exploitables correspondent en partie à celles pêchées (sole), élevées (truite) et celles préférentiellement consommées en Belgique (crevettes, cabillaud, pangasius). Mais d'autres espèces importantes en Belgique pour ces mêmes raisons (plie, colin, bauderoie) ne le sont pas, pour des raisons techniques (mais selon la FAO, 2015b toute espèce aquacole est techniquement élevable en RAS) ou économiques. De ce point de vue, assurer localement la production halieutique à hauteur de la consommation impliquerait donc un changement partiel des habitudes de consommation.

D) Déterminants de la viabilité économique d'une exploitation RAS

Tous les éléments techniques que nous avons passé en revue, ainsi que la complexité de leurs interactions représentent autant de paramètres qu'il faut maîtriser pour assurer la viabilité économique de ce type d'exploitation. Pour y parvenir, un personnel qualifié et bien entraîné sera indispensable.

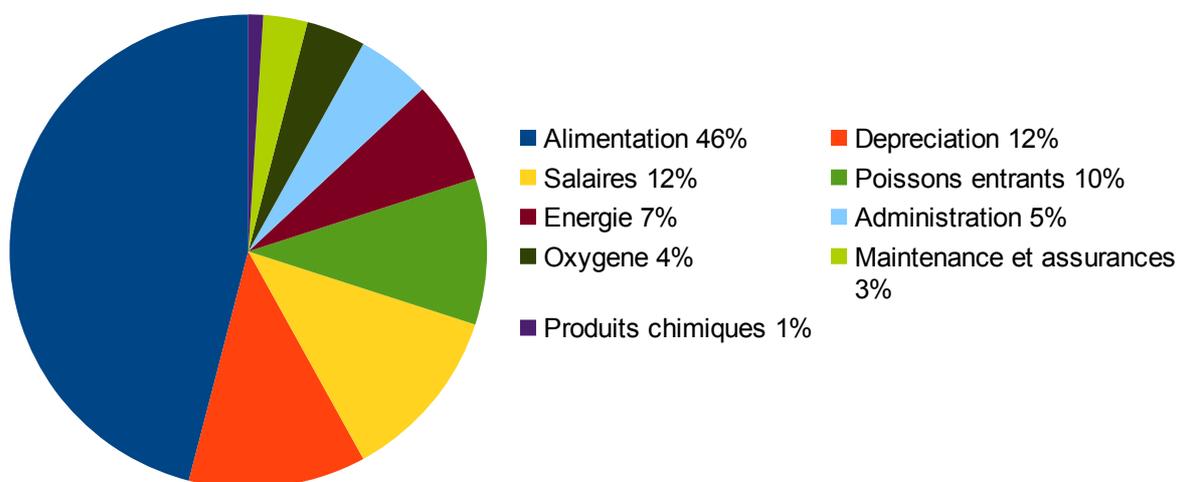


Figure 8 : Répartition des coûts de fonctionnement d'une exploitation RAS d'une production annuelle de 2000 tonnes de poissons. (Source : FAO, 2015b)

Bien maîtriser la technique est une condition nécessaire mais non-suffisante. Une bonne planification financière tenant compte d'un investissement initial important, du délai jusqu'à la première "récolte" et des risques de pertes, est capitale. De la même manière, les capacités de gestion et l'anticipation/adaptation aux changements des prix, tant de vente des poissons élevés

(concurrence avec pêcheurs et éleveurs du monde entier, parfois même si les espèces produites sont différentes) que d'achat des aliments (Figure 8) fera la différence entre la réussite ou la faillite (FAO, 2015b). On peut observer que malgré un impact environnemental accru dans les exploitations RAS, les coûts énergétiques restent faibles par rapport aux coûts généraux de fonctionnement (Figure 8).

Par ailleurs une bonne connaissance de la législation locale urbanistique et environnementale (taux admis pour les rejets d'eau usée et les prix pour les rendre compatibles avec la législation) est également nécessaire (FAO, 2015b). Ces considérations en ce qui concerne la Belgique seront abordée plus bas.

E) Principaux avantages et inconvénients

Les avantages de ces systèmes sont associés à la séparation entre le milieu naturel et le milieu d'élevage et la réutilisation de l'eau (FAO, 2015b ; Klinger D. and Naylor R., 2012 ; Heldbo J. and Klee P., 2014 ; Martains C., 2010):

- Grande indépendance par rapport aux ressources (quantité et qualité de l'eau) et contraintes locales (climat, période solaire)
- Risque limité de contamination (polluants, pathogènes), et réduction des traitements phytosanitaires, de leurs coûts et impacts sur l'environnement.
- Traitement des rejets facilité (eau plus concentrée en rejets)
- Adaptable/conciliable avec les législations sur les rejets agricoles/industriels (contrôle des rejets)
- Possibilité de valorisation des effluents (fertilisants, bio-méthanisation)
- Consommation d'eau limitée
- Production possible proche des lieux de consommation.
- Croissance des poissons plus rapide qu'en flux continu.
- Production constante tout au long de l'année
- Contrôle des paramètres de croissance des poissons
- Meilleur FCR (consommation réduite d'aliments)
- Grande adaptabilité de la production aux conditions/variation du marché
- Réduction des impacts environnementaux
- Optimisation de l'utilisation de l'espace
- Offrent une possibilité de réduire la dépendance belge (et européenne) en produits halieutique, ainsi que le déficit commercial.

Les RAS présentent également certains désavantages (FAO, 2015b ; Klinger D. and Naylor R., 2012 ; Martains C. et al, 2010):

- Besoin d'un personnel hautement qualifié
- Demande accrue en énergie
- Système à haute technicité/complexité
- Investissement initial et coûts de fonctionnements importants
- Solution "Zero-discharge" économiquement non-viable (améliorations nécessaires)
- Risque de perte de toute la production en cas de défaillance technique non détecté/solutionné

F) Orientations du développement

Le développement futur des RAS doit permettre d'améliorer leur efficacité énergétique et économique ainsi que (ou à travers) leurs capacités de récupération des déchets (azote, phosphate, éléments particuliers, substances dissoutes). Deux voies de valorisation sont privilégiées, dans une approche "cradle-to-cradle" (Martins C. et al., 2010 ; Klinger D. and Naylor R., 2012 ; Site 23) :

- 1) la récupération en sortie du système et la production de fertilisants agricoles ou de biogaz
- 2) la récupération à l'intérieur même du système par une approche de culture intégrée (IMTA)

Des améliorations dans les domaines de la robotique et la cybernétique permettraient également une plus grande automatisation du fonctionnement des systèmes RAS (Martins C. et al., 2010).

II) Aquaculture multi-trophique intégrée (IMTA / AMTI)

A) Introduction

L'IMTA (ou polyculture intégrée) est une approche de production aquacole où l'on essaye de recréer, du moins en partie, le fonctionnement d'un écosystème ou d'une chaîne trophique. Les avantages qui découlent de l'utilisation de cette approche sont dus à l'accroissement des possibilités de conversion en produits valorisables, des éléments nutritifs introduits dans le système. Comme dans tout système aquacole, cette conversion se fait lors de leur consommation par les espèces

élevées, mais dans l'IMTA elle se poursuit, à partir des déchets de cette première production, par une production autotrophe, une conversion herbivore, une conversion déchets-bactéries et une conversion détritivore (Blancheton J-P. et al. 2009 ; Figure 9).

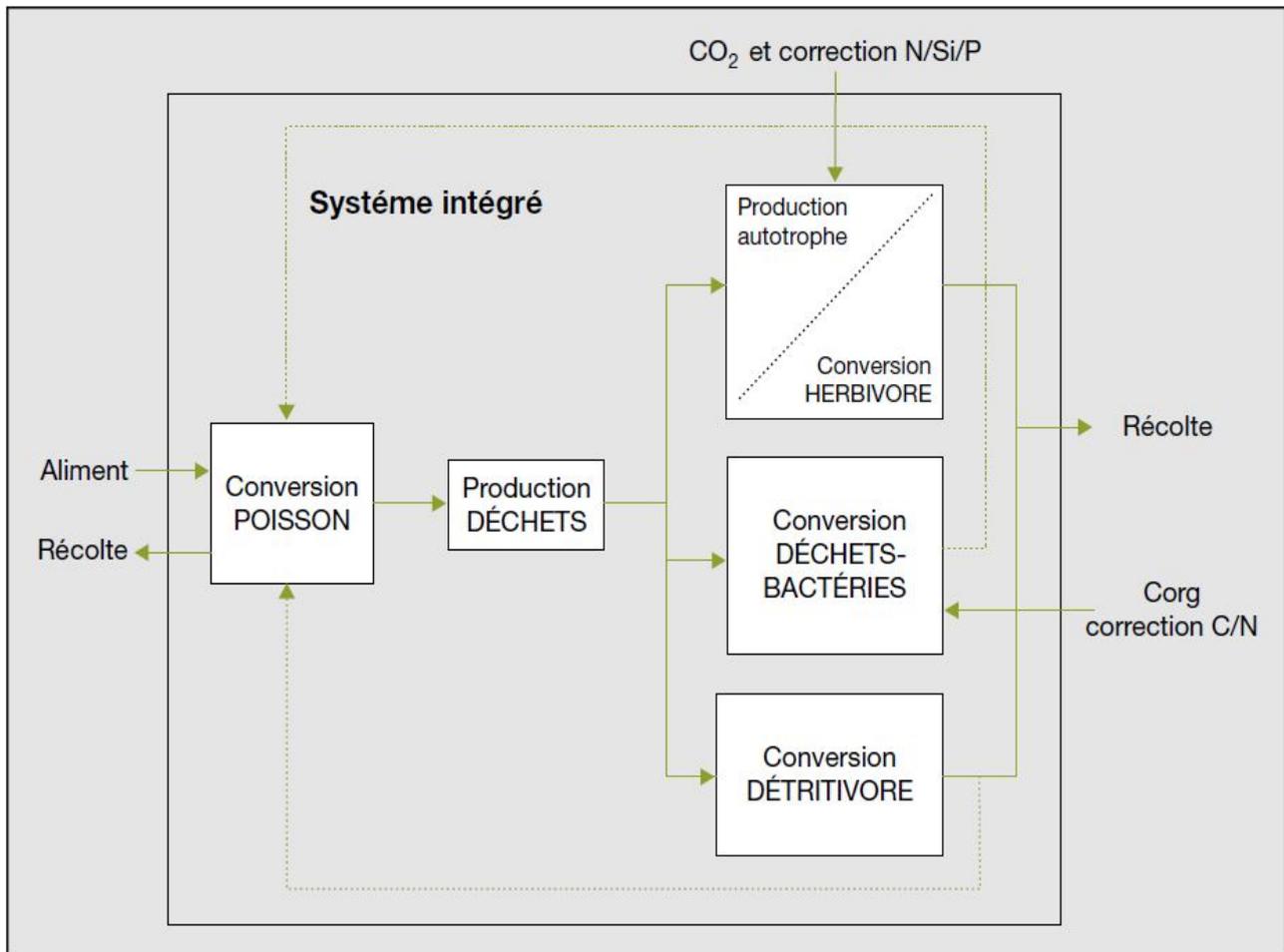


Figure 9. Possibilités de conversion des aliments en biomasse valorisable dans une approche IMTA.
Source : Blancheton J-P. et al., 2009

Dans la variante minimale de l'IMTA, les déchets d'élevage d'une espèce constituent une ressource pour la croissance d'autres espèces, comme par exemple les algues (les déchets azotés/phosphorés fertilisent le milieu de croissance des plantes) (Bertran R., 2014 ; Schwartz M., 2005 ; FAO, 2014a ; Azim M. and Little D., 2006). Dans des systèmes plus élaborés des chaînes trophiques plus longues et/ou complexes peuvent être constituées (agriculture-aquaculture intégrée ; Figure 10). Par exemple, plusieurs espèces de poissons (carpes) peuvent cohabiter et se nourrir d'espèces animales ou végétales différentes (phytoplancton, zooplancton, invertébrés benthiques, plantes aquatiques, vers de terre, larves, mollusques), elles-mêmes se nourrissant directement ou dépendant indirectement, au travers de leur alimentation, des déjections d'un élevage d'animaux de ferme (Schwartz M., 2005 ; FAO, 2014a ; Ahmed N. et al. 2014). Ainsi dans l'approche IMTA, la

réduction de certains impacts environnementaux provoqués par les élevages (eutrophisation, acidification, prolifération de pathogènes et/ou nuisibles, consommation énergétique) est inhérente au système de production lui-même (les déchets étant perçus comme des ressources).

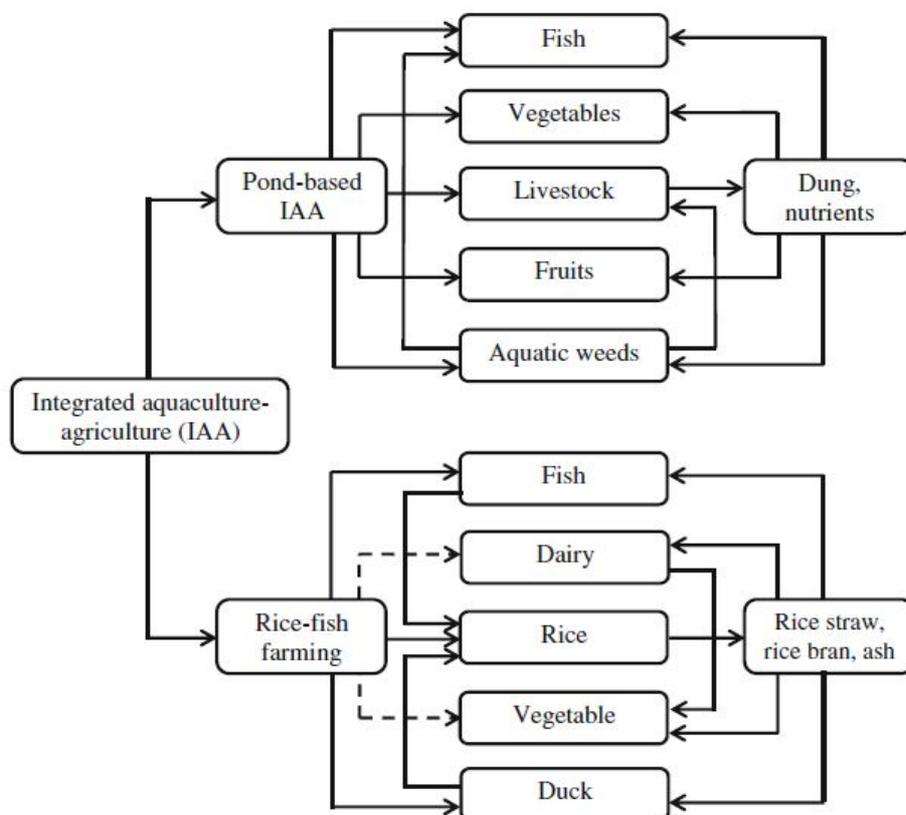


Figure 10. Exemple schématisé d'intégration multi-trophique élaborée de systèmes agricoles et aquacoles.
Source : Ahmed N. et al. 2014

L'approche intégrée est ancienne et remonte à l'antiquité (Bertran R, 2014 ; Schwartz M., 2005 ; FAO, 2014a). Par exemple, en Chine, la riz-pisciculture traditionnelle qui associe l'élevage des poissons (carpes) à la culture du riz en est un exemple. Dans ce cas, outre l'apport en fertilisant les poissons peuvent consommer les "mauvaises herbes" et des insectes nuisibles pour les cultures de riz, réduisant les besoins en produits phytosanitaires (Schwartz M., 2005 ; FAO, 2014a ; Allesop et al., 2008).

Plus récemment, l'intérêt pour cette approche est réapparu dans les pays occidentaux, sous différentes formes comme, par exemple, les cultures aquaponiques ou la mariculture multi-trophique intégrée (Bertran R., 2014). Cependant, parallèlement à ce regain d'intérêt, ce type de production décline en Asie ce qui entraîne, du fait de l'importance de la production asiatique/chinoise, une baisse générale de production des systèmes intégrés (FAO, 2014a).

B) Application de l'approche IMTA aux RAS

Appliquer une approche IMTA aux RAS revient à décharger, en tout ou en partie, certains dispositifs du RAS de leur rôle. Les dispositifs concernés sont principalement les (bio-)filtres, mais l'IMTA peut également suppléer l'action des dispositifs dont le rôle est de contrôler/réduire la prolifération des pathogènes, d'alimenter en oxygène et de fournir une alimentation aux espèces élevées.

Les types de systèmes productifs qui résultent de cette association se divisent en deux catégories : les systèmes compartimentés (SC) et les systèmes non compartimentés (SNC). Dans les premiers, les différentes conversions des nutriments ont lieu dans des compartiments (bassins, marrais artificiel) séparés, tandis que dans les seconds, élevage et conversion s'effectuent dans le même espace.

Parmi les SC, on retrouve l'aquaponie, qui associe une culture hydroponique (plantes cultivées dans l'eau sur un support neutre souvent réalisé en serre) de légumes, fleurs et/ou herbes à un élevage aquacole en RAS. Les chaînes trophiques créées sont de type :

- Poissons (ou écrevisses, escargots, crevettes) > déchets > bactéries et/ou détritivores (vers à soie) > plantes.

Les déchets azotés/phosphorés servent d'engrais aux plantes et dont la croissance est accélérée. Ces dernières filtrent l'eau et la rendent utilisable pour l'élevage (remplacent le rôle des (bio)-filtres). Les densités d'élevages sont similaires aux RAS classiques, la recirculation peut atteindre 98% (320l/kg de poisson) et les capacités d'abattement varient entre 9 et 93 % pour l'azote et entre 0 et 53% pour le phosphore (il faut entre 10 et 17m² pour traiter l'eau contenant l'équivalent d'1kg d'aliment d'élevage fournis aux poissons, en amont de la chaîne). En moyenne, la production d'un kg de poisson s'accompagne de celle de 7kg de plantes. Les espèces privilégiées sont le tilapia, la truite, le barramundi, la morue de Murray, les carpes et les perches en ce qui concerne les poissons, et les laitues, épinards, ciboulette, basilique, cresson et tomates pour les végétaux (bien que d'autres soient utilisés) (Klinger D. and Naylor R., 2012 ; Maidie S. and A., 2013 ; Turcios A. and Jutta Papenbrock J., 2014 ; FAO, 2014d ; Site 37).

L'ajout de marrais artificiels aux RAS (aussi appelé lagunage) est un second type de SC issu de l'association RAS/IMTA. L'approche est similaire à celle de l'aquaponie, mais à une échelle généralement beaucoup plus grande et en extérieur. Les eaux d'élevage usées passent par un marrais artificiel où elles nourrissent différents organismes avant de retourner, une fois épurées, vers les compartiments d'élevage. Les espèces peuplant le marais sont organisées en chaînes trophiques plus ou moins complexes. Elles peuvent être de type :

- Poissons > phytoplancton > mollusques (bivalves) (Turcios A. and Jutta Papenbrock J., 2014)
- Poissons (daurade royale) > algues (*Ulva lactuca*) > macroalgivores (oursins, ormeaux) (Neori A. et al., 2000 ; Robertson-Andersson D. et al., 2008)
- Poissons > plantes (*Arundo donax*, *Phragmites australis*) (Idris S., et al., 2012)
- Poissons (tilapia) > algues (*Ulva* spp., *Prophyra dioica*) > poissons (tilapia) (Silva D. et al., 2015)

Les algues (*Ulva* spp., *Undaria pinnatifida*, *Laminaria digitata* et d'autres) jouent un rôle essentiel dans ces systèmes (Neori A., 2007 ; Copertino M. et al., 2009) et peuvent être plus efficaces que la bio-filtration bactérienne (Cahill P. et al., 2010). Cependant, certains auteurs (Holdt S. and Edwards M., 2014) rapportent une efficacité technique et économique plus grande pour certains mollusques (moules bleues). D'autres végétaux (par exemple *Arundo donax*) ou associations de végétaux atteignent également des très bonnes performances techniques (abattement : azote 98%, phosphore 95%, MES 87%, DBO 95%, E. Coli 99,7%)(Idris S., et al., 2012 ; Li X. et al., 2013). L'une d'entre elles, particulièrement prometteuse, est la Salicorne (*Salicornia* spp.) car elle dispose de bonnes performances techniques (capacités d'abattement élevées, tolérance au sel), de nombreuses possibilités de valorisation (alimentation humaine et animale, huiles et biogaz, cosmétiques) et des propriétés alimentaires intéressantes (teneur élevé en acides gras polyinsaturés, minéraux, vitamines et antioxydants). Elle nécessite en moyenne un espace de 11m² par kg d'aliment (fournis aux poissons) traité par an, et produit sur une même période entre 10 et 40 kg de biomasse par m² (Bertran R., 2014 ; Turcios A. and Jutta Papenbrock J., 2014).

Par ailleurs un des plus grands avantages de l'approche IMTA est illustré par le dernier type de chaîne trophique présenté ci-dessus (Poisson > algue > poisson), à savoir de refermer (partiellement) la boucle trophique. Dans cette chaîne les déjections des poissons nourrissent les algues, qui sont à leur utilisées dans la composition des aliments pour ces mêmes poissons (la part de ces plantes n'est toutefois qu'une partie de l'alimentation que reçoit le poisson). Étant donné l'importance des coûts des aliments dans la production aquacole (Figure 8), cet aspect influence aussi la rentabilité des exploitations. De plus, d'un point de vue environnemental, l'IMTA est susceptible de réduire les impacts associées à la production agricole sur champ (eutrophisation, épandages chimiques, acidification des eaux) ou à leur capture (émission de GES, acidification, dégradation des milieux marins) des aliments.

Les SNC se composent des technologies de bio-floculation (BFT), aussi appelées "Activated Suspension Technology" (AST), dans lesquelles des communautés micro-organiques complexes (flocs), composées de bactéries et de protozoaires, consomment et convertissent la matière organique et les nutriments présents dans les bassins d'élevage en biomasse directement consommables par les poissons (sous formes de flocs). Une autre variante élargit la présence des micro-organismes aux espèces végétales. Elle consiste à favoriser la formation du périphyton plutôt que d'essayer de la combattre comme dans la plupart des exploitations aquacoles. Ces techniques

conviennent d'avantage aux espèces de poissons herbivores/omnivores car la consommation du périphyton constitue leur régime alimentaire à l'état naturel. Mais elle peut également combler les besoins en protéines des poissons carnivores à hauteur de 25%. Ce système de production nécessite un apport important en carbone et en oxygène (Klinger D. and Naylor R., 2012 ; Azim M. and Little D., 2006).

C) Principaux avantages et inconvénients

1) Avantages (Azim M. and Little D., 2006 ; Blancheton J-P. et al., 2009 ; Cahill P. et al., 2010 ; Nobre A. et al., 2010 ; Klinger D. and Naylor R., 2012 ; Bertran R., 2014 ; Turcios A. and Jutta Papenbrock J., 2014 ; Ahmed N., 2014 ; Silva D. et al., 2015) :

- La production de coproduits valorisables à la place de déchets à traiter (1) augmente les revenus par leur vente et/ou réduit les coûts des aliments (~35% pour le tilapia) et (2) les prélèvements dans la nature si le coproduit (ex. algues "kelp") peut/doit être consommé par l'espèce principale élevée (ex. ormeaux)
- Les coûts de traitement de l'eau usée sont diminués, car (1) les besoins de matériel (filtres), d'énergie et donc de GES émis (fonctionnement des filtres), d'intrants chimiques (effet antibiotique de certaines plantes) et de main d'œuvre sont réduits
- Les algues parfois plus efficaces que les bactéries pour l'abatement des nutriments
- La consommation humaine de certains coproduits (Salicorne) peut combler les manques (oméga-3) provoqués par une alimentation des espèces élevées faible en huiles et farines de poissons.
 - Dans les systèmes SNC (BFT/AST), les besoins en matériel (dispositifs), espace, énergie (dispositifs, recirculation), intrants chimiques et en main d'œuvre sont réduits ainsi que l'utilisation des produits chimiques (anti-salissure, antibiotiques) pour ne pas compromettre les commutées microbiennes
- Les coûts d'investissement/fonctionnement sont réduits
- Les marais artificiels peuvent accueillir une grande biodiversité
- Dans les SNC, pour certaines espèces, le régime alimentaire se rapproche du régime naturel
- La diversification de la production, choix sur ce qu'on valorise, et la répartition des risques économiques

2) Inconvénients (Azim M. and Little D., 2006 ; Klinger D. and Naylor R., 2012 ; Turcios A. and Jutta Papenbrock J., 2014) :

- Systèmes complexes nécessitant une main d'œuvre qualifiée (mais peut-être aussi un avantage compétitif)
- Incompatibilité entre les besoins de certaines espèces

- Si les coproduits (surtout à haute teneur en sels) ne sont pas valorisés, ils deviennent un déchet avec une augmentation potentielle des coûts de fonctionnement et/ou de l'impact environnemental
- Augmentation de l'espace nécessaire pour les SC (marais et aquaponie)
- Incertitude économique augmentée par le nombre d'espèces valorisées
- Bioaccumulation de certains pathogènes par les moules
- Besoins en oxygène et carbone (ratio C : N idéal = 10 : 1) plus élevés pour les SNC ce qui augmente les coûts
 - BFT/AST caractérisé par un manque de connaissances concernant (1) les espèces utilisables, (2) les effets de la turbidité sur le bien-être des poissons et (3) les risques de développement de pathogènes (contaminations inter-espèces) dangereux y compris pour la santé humaine.

5. Application et contexte belge

5.1 Besoins et disponibilité des ressources

Les besoins ci-dessous sont calculés sur base du Tableau 20 et sont donc valables uniquement pour les RAS sans IMTA. L'impact de ces derniers étant difficile à uniformiser et à calculer. Certaines réflexions basées sur des systèmes IMTA sont toutefois proposées.

I) Énergie.

Les exploitations aquacoles utilisent l'énergie sous deux formes : fossile et électrique. La première sert essentiellement à la thermorégulation et la seconde au fonctionnement du système. En 2014, la consommation totale d'énergie en Belgique était de 613,5 TWh (SPF Économie, 2016) dont 444.4 TWh sous forme d'énergie fossile. Pour cette même année, la Belgique a produit 72,7 TWh d'énergie électrique (SPF Économie, 2016). Cette dernière valeur reflète les problèmes ayant touché les centrales nucléaires (problème aggravé en 2015). En 2010 la production (95,1 TWh) dépassait la consommation (86 TWh) et permettait de dégager un excédent (SPF Économie, 2013).

Par rapport à 2014, les besoins énergétiques maximums nécessaires à la production aquacole (2,1TWh) représentent 2,88% de la production électrique et 5,61% si la production des aliments est incluse (4,08TWh). Par rapport à la consommation d'énergie sous forme fossile les valeurs sont de respectivement 0,47% et 0,92%.

II) Surface

La surface agricole utilisée (SAU) en Belgique en 2014 était de 13 334 km² (SPF Économie, 2015). La surface nécessaire aux installations aquacoles (1,5 à 9km²) représente entre 0,01 et 0,07% de la SAU, et elle s'élève jusqu'à entre 2,1 et 6,3% (281 à 840km²) si on inclut la production des aliments.

III) Eau

En 2007, les prélèvements d'eau douce en Belgique atteignaient 6 217 millions de m³ et les réserves 22 434 millions de m³. La quantité d'eau distribuée par le réseau public était de 728 millions de m³ (Site 32). L'eau utilisée pour la production aquacole (6 à 900 millions de m³) représenterait entre 0,1 et 14,5% de l'eau prélevée, et entre 0,2 et 14,6% si l'on y inclut la production des aliments (10,8 à 911,8 millions de m³).

5.2 Réflexions concernant les besoins

I) Énergie

Les besoins énergétiques supplémentaires générés par la production en RAS doivent être interprétés en tenant compte des besoins énergétiques et émissions de GES dus au transport et élevage (ou pêche) de ces mêmes produits, si ils provenaient d'ailleurs (92% des produits halieutiques étant actuellement importés). Par ailleurs, en 2014, la flotte de pêche belge a consommé 40,6 millions de litres de carburant (environ 0,05TWh) pour assurer 8% de l'approvisionnement (STECF, 2015).

Les RAS peuvent générer une partie de l'énergie dont ils ont besoin. D'un côté, les fermes aquacoles en intérieur disposent d'une importante surface non utilisée (toits) pouvant être équipée de panneaux photovoltaïques. Actuellement (en 2015), 23,5km² de panneaux produisent 3,2TWh d'électricité chaque année (Site 31). De l'autre, l'association des RAS avec la production d'algues (IMTA) permettrait de générer du bio-gaz ou, selon une approche systémique, de réduire les besoins énergétiques et émissions de GES en se substituant en partie aux fertilisants synthétiques.

Notons que les données utilisées pour ce mémoire ne précisent pas si les quantités d'énergie, nécessaire au pompage de l'eau à partir du sol, ont été ou non prises en compte dans l'estimation des besoins énergétiques des RAS. Il est donc possible que les besoins en énergie doivent être revus à la hausse.

II) Espace

Les installations de production pouvant également être situées dans des zones construites (zonings industriels, zones urbaines pour les installations de petite taille et/ou aquaponiques) ou forestières (7 024km² disponibles) (Site 32) relativisent le besoin d'espace. Par exemple, les installations aquaponiques peuvent être installées sur des toits (plats). Dans ce cas, l'espace nécessaire est déjà utilisé (bâti) et il n'y a pas d'utilisation d'espace allouée à une autre activité ou naturel. En région Bruxelles-Capitale, une étude (Verdonck M. et al, 2012) estime à 50ha la surface disponible pour un tel type d'exploitations. Par ailleurs, les marais artificiels sont compatibles avec l'existence d'une grande biodiversité et pourraient être utilisés dans une approche intégrée de l'économie et de la nature (une installation de 2000tonnes/an nécessiterait ~20 000 000m² de marais : voir ci-dessous).

Selon les informations dont nous disposons par rapport aux marais artificiels (approche IMTA), une espèce comme la salicorne a besoin de 11m² par kg d'aliments fournis aux poissons, pour épurer efficacement les eaux d'élevage (les rendements moyens des surfaces aquaponiques, entre 10 et 17m² d'espace cultivé nécessaire par kg d'aliment fournis, tendent à confirmer ces valeurs). Ceci risque d'augmenter fortement le besoin d'espace pour ce type d'installations. Cependant, cette surface se substitue en réalité à d'autres surfaces agricoles (destinées à l'alimentation humaine ou aquacole) ou autres (toit, marais), tout en fournissant un aliment de qualité (voir systèmes IMTA) et en réduisant les quantités de fertilisants artificiels et autres produits sanitaires épandus sur les champs (produits affectant au final les milieux aquatiques).

III) Espèces

La pêche des poissons de fond est particulièrement dommageable pour le milieu marin (chapitre 2), or, c'est précisément ce genre d'espèces qui sont les plus pêchées par la flotte belge (plie, sole, baudroie, turbot). Remplacer cette production par une production en RAS a donc un fort potentiel de réduction des impacts sur l'environnement.

Dans ce mémoire, nous avons proposé des estimations chiffrées qui selon nous s'approchent des valeurs minimales et maximales des besoins nécessaires. Les paramètres d'exploitation sur base desquels elles ont été construites varient selon plusieurs critères (économiques, technologiques), dont le type d'espèce élevé. Connaître la composition de la consommation spécifique belge, permettrait donc de peaufiner les données. Il nous paraît raisonnable de croire qu'une consommation diversifiée tendrait à ramener les valeurs (espace, eau, énergie) vers la moyenne (certaines espèces étant plus exigeantes que d'autres). Mais il faut également considérer le fait que, dans l'état actuel des choses, la forte consommation/importance économique des poissons de fond (dont la densité d'élevage possible est plus faible) aurait tendance à tirer les valeurs vers le haut.

IV) Économie

Assurer l'approvisionnement en produits halieutiques grâce aux RAS locaux permettrait de rediriger vers l'économie nationale des fonds qui quittent actuellement le pays. En 2008, les dépenses des belges pour les produits halieutiques ont atteint environ un milliard d'€ (OCA, 2011), tandis que le déficit commercial pour ces produits s'élevait à 669 millions d'€ (SPW, 2013). Ça pourrait également générer entre 3 000 et 6 000 emplois directs (Tableau 20), auxquels s'ajoute le personnel administratif et les emplois du secteur de transformation (et des emplois indirects).

Pour comparaison, la flotte de pêche belge se compose de 76 navires actifs âgés (27 ans de moyenne) et emploie 325 personnes (235 ETP), emplois qui seraient perdus. Cette flotte, malgré des subventions directes et indirectes (Sumaila et al., 2010) est en déficit (profit brut : -1,9 million d'€ / profit net : -12 millions d'€)(STEFEC, 2015).

Par ailleurs, l'adoption d'une taxe sur les produits de la pêche et de l'aquaculture pratiquée en milieu marin/ouvert, justifié par la nécessité imminente de protéger les milieux aquatiques, permettrait d'améliorer la rentabilité des RAS et de rendre viable la production d'espèces qui ne le sont pas. Cependant, du point de vue du consommateur, cette taxe entraînerait probablement une hausse du prix des produits halieutiques (par effet d'appel d'air).

Ce mémoire ne s'est pas fixé comme objectif d'évaluer les coûts d'investissement nécessaires à l'installation de telles exploitations (alternatives). Cependant, une transposition simple ((300 000 tonnes / 2 500 tonnes) x 22,6 millions d'USD) des investissements nécessaires pour une exploitation hypothétique produisant 2 500 tonnes de saumon (Boulet D. et al, 2010) par an au Canada, aux besoins belges en produits halieutiques permet d'en donner une idée. Le coût d'investissement initial serait d'environ 2,7 milliards d'USD. Évidemment cette estimation approximative ne tient pas compte du contexte belge, et n'as pas la prétention de fournir une information de grande valeur économique.

Notons par ailleurs que certaines reconversions d'aubaine (par exemple, reconversions de granges agricoles) peuvent avoir lieu et être techniquement et économiquement viable (Site 38). Elles peuvent se faire à des échelles bien plus petites (par exemple ~680kg de poisson/an pour une grange porcine réaménagé) que l'exploitation précédemment citée.

5.3 Situation des RAS en Belgique

Les techniques de recirculation sont peu utilisées en Belgique. Dans la partie francophone du pays, une seule exploitation utilise ce système pour produire 50 tonnes d'esturgeon et 1,5 tonnes de caviar (SPW, 2013). En Wallonie, les freins au développement de ce secteur ont été identifiés comme étant les investissements initiaux élevés, les coûts de fonctionnement, les risques, le manque de familiarisation avec ces systèmes et les disponibilités en d'eau de qualité suffisante (mais établies sur base de l'eau de surface moins propice aux systèmes RAS). Les objectifs de développement visent une production de 250 tonnes d'ici 2022 (SPW, 2013).

En Flandre, le développement de l'aquaculture recirculée semble être un objectif important. Différents partenariats (Université de Weningen), plateformes (Site 34) et projets (Interreg Aqua Vlan, ZORAS) ont été mis en place pour le soutenir. Cependant, il y rencontre également certaines difficultés comme par exemple le manque d'une eau de qualité suffisante (Site 35).

5.4 Législation

La législation belge concernant l'aquaculture est complexe, mais est surtout destinée à l'aquaculture classique (en flux continu, étangs, cages). Étant donné ses spécificités (contrôle des éléments entrants et sortants du système, séparation entre milieu naturel et milieu d'élevage) l'aquaculture recirculée est, a priori, adaptée et adaptable à cette législation (notamment en matière de rejets).

La législation susceptible de s'appliquer à l'aquaculture doit être considérée à trois niveaux : européen, national et régional (et communal si besoin). Selon le Conseil de filière wallonne piscicole (Site 33), elle concerne notamment l'aspect sanitaire, l'hygiène, le bien-être animal, l'environnement, les espèces exotiques, les espèces protégées, les productions "biologiques" et les appellations protégées, les aides aux entreprises, les taxes pour les eaux usées industrielles et la réglementation urbanistique (Tableau 25).

Notons qu'au niveau européen, la législation sur le bien être animal, en ce qui concerne les poissons et autres espèces aquacoles, est relativement lacunaire et pointe un manque de connaissances scientifiques (exemple : Règlement (CE) 1099/2009), motif pour lequel ces espèces sont parfois exclues de ces législations.

Tableau 25. Principaux textes législatifs susceptibles de s'appliquer aux exploitations aquacoles en région wallonne.
(Source : Site 33)

Domaines	Niveaux		
	Européen	Belge	Régional : wallon
Sanitaire	- Directive 2002/99/CE - Directive 2006/88/CE - Décision de la commission du 20 novembre 2008 - Règlement (CE) 1251/2008	- AR du 9 novembre 2009 - AR modifiant l'AR du 9 novembre 2009	
Hygiène	- Règlement (CE) 178/2002 - Règlement (CE) 1774/2002 - Règlement (CE) 852/2004 - Règlement (CE) 853/2004 - Règlement (CE) 854/2004 - Règlement (CE) 882/2004	- AR du 30 avril 1976 - AR du 22 mai 1996 - AR du 14 novembre 2003 - AR du 10 novembre 2005 - AR du 22 décembre 2005 - AR du 16 janvier 2006 - AR du 30 juillet 2008 - AR du 18 mai 2011 - AR du 3 février 2012	
Bien-être animal	- Règlement (CE) 1/2005 - Directive 2006/44/CE (- Directive 98/58/CE) (- Règlement (CE) 1099/2009)		
Environnement et urbanisme	- Directive 2000/60/CE		- AGW du 15 Décembre 1994 - Décret du 11 mars 1999 - AGW du 14 Novembre 2001 - AGW du 14 Novembre 2001 - AGW du 4 juillet 2002 - AGW du 16 janvier 2003 - AGW du 10 mars 2005 - CWATUPE
Natura 2000			- Décret du 6 décembre 2001 - AGW du 19 mai 2011 - AGW du 24 mars 2011
Espèces exotiques	- Règlement (CE) 708/2007 - Règlement (CE) 506/2008 - Règlement (EU) 304/2011		
Dommages des espèces protégées			- ARW du 8 octobre 1998 - Décret du 22 janvier 1998
Production "bio"	- Règlement (CE) 834/2007 - Règlement (CE) 889/2008 - Règlement (CE) 710/2009		- AGW du 24 avril 2008
Appellation contrôlée	- Règlement (CE) 509/2006		- Décret du 19 décembre 2002 - Décret du 19 décembre 2002
Aide aux entreprises	- Règlement (CE) 1595/2004 - Règlement (CE) 875/2007 - Règlement (CE) 736/2008		
Rejets et eaux usées			- Décret du 30 avril 1990

AR = Arrêté royal ; AGW = Arrêté du gouvernement wallon ; CWATUPE = Code wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, du Patrimoine et de l'Énergie

6. Conclusions

L'état des milieux aquatiques (chapitre 2) ainsi que l'importance de la consommation de produits halieutiques au niveau mondial (chapitre 3) nécessitent une réponse bien plus efficace en termes de réductions des impacts environnementaux que celle fournie par l'aquaculture classique (chapitre 4). La Belgique par sa consommation directe et indirecte participe aux impacts que subissent ces milieux. Les systèmes en eau recirculée (RAS) et l'approche multi-trophique intégrée (IMTA) (chapitre 4) peuvent constituer une réponse adéquate à la dégradation des milieux aquatiques, à condition que certaines précautions soient prises. Cependant, ils ne constituent pas des solutions miracles et ont chacun certains inconvénients (chapitre 4) comme par exemple : les coûts d'investissement élevés, des incertitudes économiques accrues, des besoins accrus pour d'autres ressources (mais réductibles). Toutefois, elles apportent également une série d'avantages tant économiques qu'environnementaux (outre ceux directement associés aux milieux marins) comme par exemple : la possibilité de produire localement et d'éviter les émissions de GES dues aux transports (si elles ne sont pas remplacées par les émissions dues au transport des aliments), la diversification des revenus économiques pour les exploitations aquacoles, la réduction du déficit commercial concernant les produits halieutiques, la relocalisation des flux financiers, la création d'emplois (qualifiés), l'accroissement de la sécurité d'approvisionnement alimentaire concernant ces produits (actuellement 8%).

Comme pour la majorité des problèmes environnementaux associés à la production, la situation peut se résumer à un système de vases communicants où les gains obtenus dans un certain domaine sont en réalité convertis en besoins dans un ou plusieurs autres. Dans le cas de notre sujet, les quatre vases communicants sont la biodiversité des milieux aquatiques, la surface, l'énergie et l'eau. Les RAS convertissent l'espace et l'eau nécessaires aux exploitations aquacoles extensives ainsi qu'une partie des atteintes à la biodiversité aquatique (partie qui varie en fonction de l'origine des aliments fournis aux espèces élevées) en besoins énergétiques. L'approche IMTA réduit l'énergie nécessaire aux RAS, mais augmente les besoins en espace (marais artificiels). L'aquaponie (tout comme l'emploi conjoint de dispositifs RAS et IMTA) semble constituer un certain compromis. En outre, pour que la réponse apportée par ces systèmes soit valide, certaines précautions sont obligatoires. Des choix sur les espèces élevées (herbivores, omnivores) et/ou sur leur alimentation (insectes, phytoplancton, salicorne, floc) sont nécessaires au risque d'augmenter tant l'impact sur la biodiversité aquatique que la consommation d'énergie et d'espace. En d'autres mots, la production massive de poissons nourris aux huiles et farines de poissons obtenus par la pêche de capture ruinera tous les avantages apportés par l'adoption des systèmes alternatifs. Ceci implique bien évidemment un changement (partiel) des comportements alimentaires. Du point de vue politique, l'emploi d'un outil de gouvernance économique, à savoir une taxe sur les produits pêchés et cultivés grâce à des ressources prélevées dans les milieux aquatiques naturels sera une aide précieuse pour la viabilité des systèmes alternatifs proposés (mais entraînera à la hausse les prix des produits halieutiques). D'un point de vue économique, les avantages et inconvénients seront associés à une économie relocalisée (un milliard d'€ étant dépensé chaque année par les belges pour acquérir des produits halieutiques). De plus, les subventions accordées à une flotte de pêche déficitaire ne seront

plus nécessaires/justifiables, tandis que les revenus des taxes sur le poisson sauvage permettront d'alimenter le budget national ou de soutenir l'aquaculture alternative (tax shift).

Selon nos estimations (effectuées sur base de données d'exploitations avec RAS), les besoins supplémentaires qu'impliquerait la production locale de produits halieutiques à hauteur de ce qui est consommé en Belgique chaque année sont les suivants :

- Énergie (sur base des estimations les plus élevées) : 2,1TWh par an pour la phase de production et 4,08TWh si on ajoute la production des aliments pour poissons, soit respectivement 2,88% et 5,61% de la production électrique de 2014, ou 0,47% et 0,92% de la consommation annuelle d'énergie fossile.
- Surface : Entre 1,5 et 9km² pour la phase de production et entre 281 et 840km² si on inclut la production des aliments, soit respectivement entre 0,01 et 0,07% et entre 2,1 et 6,3% de la surface agricole utilisée (équivalente à 13 334km²).
- Eau : Entre 6 et 900 millions de m³ d'eau pour la phase de production et entre 10,8 et 911,8 millions de m³ d'eau si la production d'aliment est incluse, soit respectivement entre 0,1 et 14,5% et entre 0,2 et 14,6% de l'eau prélevée annuellement (6 217 millions de m³). Les réserves avoisinant les 22 434 millions de m³.

À la lumière de ces données, nous considérons que, d'un point de vue strictement technique, la production aquacole alternative est compatible avec les ressources disponibles en Belgique. La phase de production demandera un effort énergétique et la production d'aliments un effort en termes d'espace (mais la proximité d'un grand pays agricole comme la France pourrait faciliter ce dernier). La consommation d'eau croîtra dans tous les cas, sans toutefois constituer une pression majeure sur les ressources en eau (bien que des problèmes concernant la qualité de l'eau disponible peuvent apparaître). Rappelons cependant que les données qui sont à la base de nos estimations ont été obtenues pour des espèces nourries avec 10 à 30% d'huiles et farines de poissons. Or pour limiter pleinement les impacts sur les milieux aquatiques dus à la pêche, ce pourcentage devrait être de zéro. Dans ce cas, nos estimations devraient probablement être revues légèrement à la hausse.

Il est cependant évident que ce travail exploratoire ne constitue qu'une ébauche de solution à un problème complexe. Il n'a nullement la prétention de trancher de façon indiscutable la faisabilité d'une telle solution. Comme dans tout problème complexe, certains choix ont dû être faits et influencent les résultats (malgré de nombreuses précautions). Un travail plus approfondi, faisant appel à des disciplines variées (peut-être l'objet de plusieurs mémoires dédiés), est nécessaire. Plus particulièrement une analyse de la faisabilité économique et des coûts environnementaux au sens large (sur base d'ACV), notamment durant la phase de transition, est recommandée pour les travaux à venir. Des travaux sociologiques axés sur les réticences des consommateurs à adopter une alimentation issue des systèmes aquacoles alternatifs, fondées sur des préoccupations éthiques (bien-être et densité des animaux élevés) et/ou de santé (association entre concepts d'élevage intensif, d'utilisation de produits phytosanitaires, d'aliments de moindre qualité) ou sur les possibilités de dépassement de ces réticences, sont également souhaitables.

7. Bibliographie

1. Agnew D.J., Pearce J., Pramod G., Peatman T., Watson R., Beddington J.R. and Pitcher T.J. (2009). Estimating the Worldwide Extent of Illegal Fishing. *PLoS ONE*, 4(2) : e4570. Doi: 10.1371/journal.pone.0004570
2. Ahmed N., Ward J., Saint P. (2014) Can integrated aquaculture-agriculture (IAA) produce “more crop per drop”? *Food Security*, 6(6), 767-779. DOI : 10.1007/s12571-014-0394-9
3. Allsopp M., Johnston P., Santillo D. (2008). *Une industrie mise au défi : Vers une aquaculture durable*. Greenpeace International. Amsterdam. Pays-Bas. Récupéré de : <http://www.greenpeace.org/canada/Global/canada/report/2008/6/vers-une-aquaculture-durable.pdf>
4. Amara R. (2010). Impact de l’anthropisation sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes marins. Exemple de la Manche-mer du nord. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Hors-série (8 octobre 2010), mis en ligne le 04 octobre 2010. DOI : 10.4000/vertigo.10129. Consulté sur internet le 29/04/2016 à l'adresse : <http://vertigo.revues.org/10129>
5. Arnason R., Kelleher K., Willmann R. (2008). *The Sunken Billions: The Economic Justification for Fisheries Reform*. Joint publication of the World Bank and the FAO. ISBN 978-0-8213-7790-1.
6. Aubin J. (2014) *Contribution de l'analyse du cycle de vie à l'analyse environnementale des systèmes de pisciculture*. (Thèse de doctorat). Agrocampus ouest. Université Européenne de Bretagne. Récupéré de : <http://www6.rennes.inra.fr/umrsas/content/download/4399/48149/file/Manuscrit%20Th%C3%A8se%20Aubin%20info.pdf>
7. Avault, J.W. (1996) *Fundamentals of Aquaculture : A Step-by-step Guide to Commercial Aquaculture*. AVA Publishing Company, Baton Rouge, Louisiane, Etats-Unis.
8. Azim M. and Little D. (2006) Intensifying aquaculture production through new approaches to manipulating natural food. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 1(062), DOI: 10.1079/PAVSNNR20061062
9. Baker R. 2002. Canthaxanthin in aquafeed applications: is there any risk? *Trends Food Science and Technoogy*. 12, 240-43.
10. Barbe J., Schlumberger O., Bouretz N. (2000) Evaluation de la production piscicole potentielle des étangs. *Ingenieries - EAT, la revue d'Irestea*, (22) 49-62. Récupéré de : <http://www.set-revue.fr/sites/default/files/articles-eat/pdf/DG2000-PUB00008185.pdf>
11. Barraclough, S. et Finger-Stich, A. (1996). *Some ecological and social implications of commercial shrimp farming in Asia. Discussions Papers 74*. Institut de recherche des Nations Unies pour le développement social, Genève, Suisse. Récupéré de : [http://www.unrisd.org/80256B3C005BCCF9%2F\(httpAuxPages\)%2FA90A3147DD72ACC480256B67005B6935%2F\\$file%2Fdp74.pdf](http://www.unrisd.org/80256B3C005BCCF9%2F(httpAuxPages)%2FA90A3147DD72ACC480256B67005B6935%2F$file%2Fdp74.pdf)
12. Beaugrand G. et Goberville E. (2010) «Conséquences des changements climatiques en milieu océanique», *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Hors-série (8 octobre 2010), mis en ligne le 22 octobre 2010. DOI : 10.4000/vertigo.10143. Consulté sur internet le 26/02/2016 à l'adresse : <http://vertigo.revues.org/10143>
13. Besson M., Komen H., Aubin, J., De Boer I. Poelman M., Quillet E., Vancoillie C., Vandeputte M and Van Arendonk J. (2014) Economic values of growth and feed efficiency for fish farming in recirculating aquaculture system with density and nitrogen output limitations: a case study with African catfish (*Clarias gariepinus*). *Journal of Animal Science*, 92(12), 5394-5405. DOI:10.2527/jas.2014-8266

14. Bertran R. (2014) *Étude de faisabilité technico-économique projet de polyculture intégrée*. Territoire ouest Cornouaille. Agrocampus Ouest / site de Beg-Meil. Récupéré de : <http://www.sioca.fr/documents/la-gestion-integree-des-zones-cotieres/etudes-2012-2014/aquaculture/1853-etude-de-faisabilite-technico-economique-pour-un-projet-damti-rapport-final>
15. Beveridge, M.C.M., Ross, L.G. and Stewart, J.A. (1997). The development of mariculture and its implications for biodiversity. Dans : *Marine Biodiversity: Patterns and Processes*. Ormond R.F.G, Gage J.D and Angel M.V., (p. 105–128). Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
16. Blancheton J-P., Bosc p., Hussenot J., Roque d'Orbcastel E., Romain D. (2009) Tendances pour la pisciculture européenne de demain : cages au large, systèmes en eau recirculée et systèmes intégrés. *Cahiers Agricultures*, 18(2), 227-234. DOI : 10.1684/agr.2009.0294
17. Bostock J., McAndrew B., Richards R., Jauncey K., Telfer T., Lorenzen K., Little D., Ross L., Handisyde N., Gatward I. and Corner R. (2010). Aquaculture: global status and trends. *Philosophical Transactions of the Royal society B.*, 365(1554), 2897-2912. DOI : 10.1098/rstb.2010.0170 . Consulté sur internet le 05/03/2016 à l'adresse <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/365/1554/2897>
18. Boyd, C.E. (2002). Mangroves and coastal aquaculture. Dans : Stickney R.R. and McVey J.P. *Responsible Marine Aquaculture* (p. 145-158). CABI Publishing, New York NY, États-Unis.
19. Boulet D., Struthers A. Et Gilbert E. (2010). *Étude de faisabilité des solutions de parcs clos pour le secteur de l'aquaculture en Colombie-Britannique. Innovation et stratégies sectorielles*. Direction générale de la gestion de l'aquaculture. Ministère des pêches et océans. Canada. Récupéré de : <http://www.dfo-mpo.gc.ca/aquaculture/programmes-programmes/BC-aquaculture-CB-fra.pdf>
20. Braaten B, Aure J, Ervik A, Boge E. (1983). *Pollution problems in Norwegian fish farming*. International Council for the Exploration of the Sea. Mariculture Committee 1983 F : 26. Institute of Marine Research. Austevoll Marine Aquaculture Station, Storebo, Norway.
21. Brander L., Baulcomb C., van der Lelij J. A. C., Eppink F., McVittie A., Nijsten L. and van Beukering P (2015). *The benefits to people of expanding Marine Protected Areas. Final report*. Institute for Environmental Studies. VU University, Amsterdam, The Netherlands.
22. Burke L., Reytar K., Spalding M., Perry A. (2011). *Reefs at Risk Revisited*. World Resources Institute, Washington DC, USA. Récupéré de : http://www.wri.org/sites/default/files/pdf/reefs_at_risk_revisited.pdf
23. Buschmann A.H., Riquelme V.A., Hernández-González D., Varela D., Jiménez J.E., Henríquez L.A., Vergara P.A., Guíñez R. and Filún L. (2006). A review of the impacts of salmonid farming on marine coastal ecosystems in the southeast Pacific. *ICES Journal of Marine Science*, 63(7), 1338-1345. DOI : 10.1016/j.icesjms.2006.04.021. Consulté sur internet le 04/03/2016 à l'adresse : <http://icesjms.oxfordjournals.org/content/63/7/1338.full>
24. Bouwman A.F., Beusen A.H.W., Overbeek C.C., Bureau D.P., Pawlowski M. et Glibert P.M. (2013). Hindcasts and future projections of global inland and coastal nitrogen and phosphorus loads due to finfish aquaculture. *Reviews in Fisheries Science*, 21(2), 112-156.
25. Butchart S.H. et al (2010) Global Biodiversity: Indicators of Recent Declines. *Science*, 328(5982), 1164-1168 DOI: 10.1126/science.1187512 . Récupéré de : http://www.ebcc.info/wpimages/other/Butchart_Science2010.pdf
26. Cahill P., Hurd C., Lokman M., (2010) Keeping the water clean — Seaweed biofiltration outperforms traditional bacterial biofilms in recirculating aquaculture. *Aquaculture*, 306(1-4), 153–159. Consulté sur internet à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/223215758_Keeping_the_water_clean_-_Seaweed_biofiltration_outperforms_traditional_bacterial_biofilms_in_recirculating_aquaculture
27. Clarke S.C., McAllister M.K., Milner-Gulland E.J., Kirkwood G.P., Michielsens C.G.J., Agnew D.J., Pikitch E.K., Nakano H. and Shivji M.S. (2006). Global estimates of shark catches using trade records from commercial markets. *Ecology Letters*, 9(10), 1115-1126. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2006.00968.x

28. Cole, M., Lindeque P., Fileman E., Halsband C., Goodhead R., Moger J., and Galloway T.S. (2013). Microplastic ingestion by zooplankton. *Environmental Science and Technology* 47(12), 6646-6655. DOI: 10.1021/es400663f
29. Collie, J., Hermsen, J., Valentine, P. et Almeida, F. (2005) Effects of Fishing on Gravel Habitats: Assessment and Recovery of Benthic Megafauna on Georges Bank , Dans: Barnes P.W. and Thomas J.P. *Benthic Habitats and the Effects of Fishing* (p. 325–343, Symposium 41). Bethesda, MD, American Fisheries Society.
30. Colombo J. C., Bilos C., R M Lenicov R. M., Colautti D., Landoni P., Brochu C. (2000) Detritivorous fish contamination in the Río de la Plata estuary: a critical accumulation pathway in the cycle of anthropogenic compounds. *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, 57(6), 1139-1150. DOI :10.1139/f00-031
31. CE (2014) *La politique commune de la pêche en chiffres. Données statistiques de base*. Office des publications de l'Union européenne. Édition 2014. Commission européenne. Luxembourg. 2014. DOI:10.2771/36205 Consulté sur internet le 06/03/2016 à l'adresse : http://ec.europa.eu/fisheries/documentation/publications/pcp_fr.pdf et http://www.europedirectpl.fr/wp-content/uploads/politique_peche.pdf
32. Copeland, C. (2008). *Cruise Ship Pollution: Background, Laws and Regulations, and Key Issues. Report RL32450*. Congressional Research Service. Washington DC, USA. Récupéré de : http://www.cep.unep.org/publications-and-resources/databases/document-database/other/cruise-ship-pollution-background-laws-and-regulations-and-key-issues.pdf/at_download/file
33. Copertino M., Tormena T., Seeliger U. (2009) Biofiltering efficiency, uptake and assimilation rates of *Ulva clathrata* (Roth) J. Agardh (Clorophyceae) cultivated in shrimp aquaculture waste water. *Journal of Applied Phycology* 21(1), 31-45.
34. Cortés, E. (2000) Life history patterns and correlations in sharks. *Reviews in Fisheries Science*, 8(4), 299-344. DOI: 10.1080/10408340308951115
35. Costa-Pierce B. A. (2002) Ecology as the paradigm for the future of aquaculture. Dans : Costa-Pierce B. A. *Ecological Aquaculture: The Evolution of the Blue Revolution*. Blackwell Science, Oxford, Royaume-Uni.
36. Costanza R., D'Arge R., De Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P. and Van Den Belt M. (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260. Récupéré de : http://www.esd.ornl.gov/benefits_conference/nature_paper.pdf
37. Dallinger R., Prosi F., Segner H., Back H. (1987) Contaminated food and uptake of heavy metals by fish: a review and a proposal for further research. *Oecologia*, 73(1), 91-98. DOI :10.1007/BF00376982
38. Dalton R. (2004) Fishing for trouble. *Nature*, 431(7008), 502-504. DOI :10.1038/431502a
39. Das, B., Khan, Y.S.A. et Das, P. (2004). Environmental impact of aquaculture-sedimentation and nutrient loadings from shrimp culture of the southeast coastal region of the Bay of Bengal. *Journal of Environmental Sciences*, 16(3), 466–470.
40. David P., Pop A., Popovici V. (2009) Considerations upon energetic efficiency of a recirculating aquatic system (RAS) for super intensive fish culture. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation International Journal of the Bioflux Society*, 2(2),153-159.
41. Davidson J., Good C., Barrows F., Welsh C., Kenney B., Summerfelt S. (2013) Comparing the effects of feeding a grain- or a fish meal-based diet on water quality, waste production, and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance within low exchange water recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 52,45–57. Récupéré de : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860912000611>
42. Devine J.A., Baker K.D., Haedrich R.L. (2006) Fisheries: deep-sea fishes qualify as endangered. *Nature* ,439 (7072), 29. DOI :10.1038/439029a
43. Devlin R., Donaldson E. (1992) Containment of genetically altered fish with emphasis on salmonids. Dans :

- Hew C.L. And Fletcher G.L. *Transgenic Fish*, (p. 229-265). World Scientific, Singapore.
44. De Silva S. and Turchini G.M. (2009) Use of wild fish and other aquatic organisms as feed in aquaculture – a review of practices and implications in the Asia-Pacific. Dans : Hasan M.R. and Halwart M. *Fish as feed inputs for aquaculture: practices, sustainability and implications*, (p. 63-127). Document technique sur les pêches et l'aquaculture n° 518. Rome, FAO. 407 pages
 45. Dorneles P.R., Sanz P., Eppe G., Azevedo A.F., Bertozzi C.P., Martínez M.A., Secchi E.R., Barbosa L.A., Cremer M., Alonso M.B., Torres J.P., Lailson-Brito J., Malm O., Eljarrat E., Barceló D. and Das K. (2013) High accumulation of PCDD, PCDF, and PCB congeners in marine mammals from Brazil: A serious PCB problem. *Science of the Total Environment*, 463-464, 309-318. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2013.06.015
 46. Duchemin E., Wegmuller F. and Legault A.-M. (2008) Urban agriculture : multi-dimensional tools for social development in poor neighbourhoods. *Field Actions Science Reports* [En ligne], 1. Mis en ligne le 16 janvier 2009. Consulté sur internet le 26/06/2016 à l'adresse : <http://factsreports.revues.org/113>
 47. Dudley, N. (2008) *Guidelines for applying protected area management categories*. Union Internationale de conservation de la nature. Gland, Suisse.
 48. Dufays N. (2014) *L'agriculture en ville Simple quête de sens ou réponse aux crises actuelles ?* Centre Permanent pour la Citoyenneté et la Participation. Bruxelles
 49. Dulvy N.K., Fowler S.L., Musick J.A., Cavanagh R.D., Kyne P.M., Harrison L.R., Carlson J.K., Davidson L.N.K., Fordham S.V., Francis M.P., Pollock C.M., Simpfendorfer C.A., Burgess G.H., Carpenter K.E., Compagno L.J.V., Ebert D.A., Gibson C., Heupel M.R., Livingstone S.R., Sanciangco J.C., Stevens J.D., Valenti S., White W.T. (2014) Extinction risk and conservation of the world's sharks and rays. *eLife* 3 : e00590. [En ligne]. DOI: [10.7554/eLife.00590](https://doi.org/10.7554/eLife.00590)
 50. Duarte C.M., Holmer M., Olsen Y., Soto D., Marbà N., Guiu J., Black K. et Karakassis I. (2009) Will the oceans feed humanity? *BioScience*, 59(11), 967-976.
 51. Duarte, C.M., Marbà, N. et Holmer, M. (2007) Rapid domestication of marine species. *Science*, 316(5823), 382-383. DOI: 10.1126/science.1138042.
 52. Heldbo J., and Klee P. (2014) *Rethinking aquaculture to boost resource and production efficiency. Sea and land-based aquaculture solutions for farming high quality seafood*, Version 1.1. Rethink Water Network & Danish Water Forum, White paper. The rethink water network | industrial water — aquaculture. Copenhagen.
 53. Edgar, G.J., Banks, S., Bensted-Smith, R., Calvopiña, M., Chiriboga, A., Garske, L.E., Henderson, S., Miller, K.A. and Salazar, S. (2008) Conservation of threatened species in the Galapagos Marine Reserve through identification and protection of marine Key Biodiversity Areas. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 18(6), 955-968. DOI : 10.1002/aqc.901
 54. Eding E. and Kamastra A. (2002) Netherlands Farms Tune Recirculation Systems to Production of Varied Species. *Global aquaculture advocate*, 5(3), 52-55.
 55. Efole Ewoukem T. (2011) *Optimisation biotechnique de la pisciculture en étang dans le cadre du développement durable des Exploitations Familiales Agricoles au Cameroun*. (Thèse de doctorat). AGROCAMPUS OUEST, Université Européenne de Bretagne. Récupéré de : <http://prodinra.inra.fr/ft?id=622EE94B-AFC9-4F25-AC46-050A025D6676>
 56. EFSA (2005) Opinion of the scientific panel on contaminants in the food chain on a request from the european parliament related to the safety assessment of wild and farmed fish. Question N° EFSA-Q-2004-22. European Food Safety Authority. *The EFSA Journal*, 236, 1-118. DOI : 10.2903/j.efsa.2005.236.
 57. EJF (2003) *Smash & Grab: Conflict, Corruption and Human Rights Abuses in the Shrimp Farming Industry*. Environmental Justice Foundation, Londres, Royaume-Uni.
 58. EJF (2004) *Farming The Sea, Costing The Earth: Why We Must Green The Blue Revolution*. Environmental Justice Foundation, Londres, Royaume-Uni.

59. EJF (2013) The hidden cost : Human Rights Abuses in Thailand's Shrimp Industry. Environmental Justice Foundation, Londres, Royaume-Uni.
60. Elfving, T. and Tedengren, M., (2002) Effects of copper on the metabolism of three species of tropical oysters, *Saccostrea cucullata*, *Crassostrea lugubris* and *C. belcheri*. *Aquaculture*, 204(1-2), 157-166. DOI : 10.1016/S0044-8486(01)00638-X.
61. Ellis T., Scott A.P., Bromage N., North B., Porter M. (2001) What is stocking density? Dans : Lincoln D., and Glasscock D. *Trout News Number 32*, (p. 35-37). Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science. Department for Environment, Food and Rural Affairs. London.
62. Eriksen M, Lebreton LCM, Carson HS, Thiel M, Moore CJ, et al. (2014) Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS ONE*, 9(12): e111913. DOI :10.1371/ journal.pone.0111913
63. EUMOFA (2014) *Le marché européen du poisson édition 2014*. Rapport. Direction générale des affaires maritimes et de la pêche. Commission européenne. Récupéré de : https://www.eumofa.eu/documents/20178/30530/Le+march%C3%A9+europ%C3%A9en+du+poisson_FR.pdf/97de7b82-fac3-47a5-bd92-2911f682f333
64. EUMOFA (2015) *Le marché européen du poisson édition 2015*. Rapport. Direction générale des affaires maritimes et de la pêche. Commission européenne. Récupéré de : <https://www.eumofa.eu/fr>
65. EC (2002) *Opinion of the Scientific Committee on Animal Nutrition on the Use of Canthaxanthin in Feeding Stuffs for Salmon and Trout, Laying Hens, and Other Poultry*. Directorate C - Scientific Opinions C2 - Management of scientific committees; scientific co-operation and networks. Health & consumer protection directorate-general. European commission. Brussels, Belgium. Récupéré de : http://ec.europa.eu/food/fs/sc/scan/out81_en.pdf
66. Ervik A., Hansen P., Aure J., Stigebrandt A., Johannessen P., Jahnsen T. (1997) Regulating the local environmental impact of intensive marine fish farming I. *Aquaculture*, 158(1-2), 85–94. DOI : 10.1016/S0044-8486(97)00186-5
67. Fabry V. J., Seibel B. A., Feely R. A., and Orr J. C. (2008) Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science*, 65(3), 414-432.
68. FAOa (2015a) *Global Aquaculture Production database updated to 2013 – Summary information*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
69. FAO (2015b) *A Guide to Recirculation Aquaculture. An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems*. 2015 edition. Food and Agriculture Organization of the United Nations and EUROFISH International Organisation. The FAO Sub-regional Office for Central and Eastern Europe. Budapest, Hungary. Récupéré de : <http://www.fao.org/3/a-i4626e.pdf>
70. FAO (2014a). *La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture. Possibilités et défis*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie. Récupéré de : <http://www.fao.org/3/contents/9780c0d7-0a87-4b67-ab13-5d7f3b8af26d/i3720f.pdf>
71. FAO (2014b) *Annuaire FAO. Statistiques des pêches et de l'aquaculture pour 2012*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
72. FAO (2014c) *GLOBEFISH Highlights. A quarterly update on world seafood markets*. 2014 Issue 1. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
73. FAO (2014d) *Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, FAO.
74. FAO (2013) *Annuaire FAO. Statistiques des pêches et de l'aquaculture pour 2011*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.

75. FAO (2012a) *Annuaire FAO. Statistiques des pêches et de l'aquaculture pour 2010*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
76. FAO (2012b) *FAO Gestion des pêches. Les aires marines protégées et la pêche. Directives techniques de la FAO pour une pêche responsable. N. 4, Suppl. 4*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
77. FAO (2011) *FAO annuaire. Statistiques des pêches et de l'aquaculture pour 2009*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
78. FAO (2010) *FAO annuaire. Statistiques des pêches et de l'aquaculture pour 2008*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
79. FAO (2009a) *International Guidelines for the Management of Deep-sea Fisheries in the High Seas*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
80. FAO (2009b) *Climate change implications for fisheries and aquaculture. Overview of current scientific knowledge*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
81. FAO (2009c) *La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture*. Département des pêches et de l'aquaculture de la FAO. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
82. Flaherty M. and Karnjanakesorn C. (1995) Marine shrimp aquaculture and natural resource degradation in Thailand. *Environmental Management*, 19(1), 27-37.
83. Fleming I.A., Hindar K., Mjølnerod I, Jonsson B, Balstad T, Lamberg A. (2000) Lifetime success and interactions of farm salmon invading a native population. *Proceedings of the Royal Society London B*, 267(1452), 1051– 63. Récupéré de : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1690700/pdf/11007327.pdf>
84. Fourqurean J., Duarte C., Kennedy H., Marbà N., Holmer M., Mateo M.A., Apostolaki E., Kendrick G., Krause-Jensen D., McGlathery K. and Serrano O. (2012) Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geoscience*, 5(7), 505–509. DOI : 10.1038/ngeo1477
85. García-Hernández J., Cadena-Cárdenas L., Betancourt-Lozano M., García-De-La-Parra L.M., García-Rico L. and Márquez-Farías F. (2007) Total mercury content found in edible tissues of top predator fish from the Gulf of California, Mexico. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 89(3), 507-522. DOI : 10.1080/02772240601165594
86. GBRMPA. (2014) *Great Barrier Reef Outlook Report 2014*. Great Barrier Reef Marine Park Authority, Townsville, Australia. Consulté sur internet le 15/01/2016 à l'adresse : <http://elibrary.gbrmpa.gov.au/jspui/handle/11017/2855>
87. Goldberg R.J., Elliot M.S. and Naylor, R.L. (2001) *Marine aquaculture in the United States. Environmental impacts and policy options*. Pew Oceans Commission, Arlington, Virginie, États-Unis. Récupéré sur internet à l'adresse : https://fsi.stanford.edu/sites/default/files/marine_aquaculture_pew_2001.pdf
88. Goldberg, R. and Naylor, R. (2005) Future seascapes, fishing, and fish farming. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3(1), 21–28.
89. Gowen R, and Bradbury N. (1987) The ecological impact of salmonid farming in coastal waters: a review. Dans : Barnes M. *Oceanography and marine biology: an annual review*, 25, 563–575. Aberdeen University Press, Aberdeen, U.K.
90. Gräslund S. and Bengtsson B-E (2001) Chemicals and biological products used in south-east Asian shrimp farming, and their potential impact on the environment—a review. *The Science of the Total Environment*, 280(1-3), 93–131
91. Hair C., Bell J. and Doherty P. (2002) The use of wild-caught juveniles in coastal aquaculture and its

- application to coral reef fishes. Dans : Stickney R.R. and McVey J. *Responsible Marine Aquaculture*, (p. 327-351). Wallingford, Angleterre, CAB International.
92. Halpern, B. (2003) The impact of marine reserves: do they work and does reserve size matter? *Ecological Applications [Hors-série]* 13(sp1), 117-137. DOI : 10.1890/1051-0761(2003)013[0117:TIOMRD]2.0.CO;2
 93. Hargreaves J. (1998) Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds. *Aquaculture*, 166(5-4), 181-212. DOI : 10.1016/S0044-8486(98)00298-1
 94. Henderson, A.R. and Davies, I.M., (2000) Review of aquaculture, its regulation and monitoring in Scotland. *J. Applied Ichthyology*, 16(4-5), 200-208. DOI : 10.1046/j.1439-0426.2000.00260.x
 95. Hites R, Foran J, Carpenter D, Hamilton M, Knuth B, Schwanger S. (2004) Global assessment of organic contaminants in farmed salmon. *Science*, 303(5655), 226-29. DOI : 10.1126/science.1091447
 96. Hixson S., Parrish C. et Anderson D. (2014) Full substitution of fish oil with camelina oil, with partial substitution of fish meal with camelina meal, in diets for farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) and its effect on tissue lipids and sensory quality. *Food Chemistry*, 157, 51–61. DOI : 10.1016/j.foodchem.2014.02.026
 97. Hoegh-Guldberg O., Mumby P. J., Hooten, A. J., Steneck R. S., Greenfield P., Gomez E., Harvell C.D., Sale P.F., Edwards A.J., Caldeira K., Knowlton N., Eakin C.M., Iglesias-Prieto R., Muthiga N., Bradbury R.H., Dubi A. and Hatziolos M.E. (2007). Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, *Science*, 318(5857), 1737-1742. DOI : 10.1126/science.1152509
 98. Hoegh-Guldberg, O. et al. (2015) *Reviving the Ocean Economy: the case for action – 2015*. WWF International, Gland, Switzerland. Geneva.
 99. Hoffmann, M., Brooks, T.M., da Fonseca, G.A.B., Gascon, C., Hawkins, A.F.A., James, R.E., Langhammer, P., Mittermeier, R.A., Pilgrim, J.D., Rodrigues, A.S.L. and Silva, J.M.C. (2008) Conservation planning and the IUCN Red List. *Endangered Species Research*, 6(2), 113-125 . DOI: 10.3354/esr00087
 100. Holdt S. and Edwards M. (2014) Cost-effective IMTA: a comparison of the production efficiencies of mussels and seaweed. *Journal of Applied Phycology*, 26(2), 933-945. DOI 10.1007/s10811-014-0273-y
 101. Holmström, K., Gräslund, S., Wahlström, A., Pongshompoo, S., Bengtsson, B-E. et Kautsky, N. (2003) Antibiotic use in shrimp farming and implications for environmental impacts and human health. *International Journal of Food Science and Technology* 38(3), 255-266. DOI : 10.1046/j.1365-2621.2003.00671.x
 102. Hossain M.A., (2011) Fish as source of n-3 polyunsaturated fatty acids (PUFAs), which one is better-farmed or wild? *Advance Journal of Food Science and Technology*, 3(6), 455-466. Récupéré de : <http://maxwellsci.com/print/ajfst/v3-455-466.pdf>
 103. Idris S., Jones P., Salzman S., Croatto G., Allinson G (2012) Evaluation of the giant reed (*Arundo donax*) in horizontal subsurface flow wetlands for the treatment of recirculating aquaculture system effluent. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(4), 1159-1170. DOI : 10.1007/s11356-011-0642-x
 104. Islam M.S., Wahad M.A., Tanaka M. (2004) Seed supply for coastal brackish water shrimp farming: environmental impacts and sustainability. *Marine Pollution Bulletin*, 48(1-2), 7-11. DOI : 10.1016/j.marpolbul.2003.11.006
 105. IUCN (2007) *Guide for the Sustainable Development of Mediterranean Aquaculture. Interaction between Aquaculture and the Environment*. IUCN, Gland, Switzerland and Malaga, Spain. Récupéré de : https://cmsdata.iucn.org/downloads/acua_en_final.pdf
 106. Iwama G. (1991) Interactions between aquaculture and the environment. *Crit. Rev. Environ. Control*, 21(2), 177–216. DOI: 10.1080/10643389109388413
 107. Janis L. W., Julie V., Bradley P., Shawn M.C. R., Stephen F. C., Simon R.M. J., Christopher M. P. (2013) Effects of temperature, diet, and bivalve size on the ingestion of sea lice (*Lepeophtheirus salmonis*) larvae by various filter-feeding shellfish. *Aquaculture*, 406-407, 9-17. DOI : doi:10.1016/j.aquaculture.2013.04.010

108. Johnson H. (2004) *Salmon aquaculture: market overview and strategic assessment*. Report. WWF White Paper, World Wildl. Fund, Washington, DC
109. Kelleher K. (2005). *Discards in the World's Marine Fisheries; an Update*. FAO Fisheries Technical Paper 470. FAO Fisheries Department. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
110. Klinger D. and Naylor R. (2012) Searching for Solutions in Aquaculture: Charting a Sustainable Course. *Annual review of environment and resources*, 37, 247-276. DOI: 10.1146/annurev-environ-021111-161531
111. Krkošek M., Ford J.S., Morton A., Lele S., Myers R.A. et Lewis M.A. (2007) Declining wild salmon populations in relation to parasites from farm salmon. *Science*, 318(5857), 1772-1775. DOI: 10.1126/science.1148744
112. Lawrence A. J., Ahmed M., Hanafy M., Gabr H., Ibrahim A. and Gab-Alla A.A.F.A. (2005) Status of the sea cucumber fishery in the Red Sea - the Egyptian experience. Dans : Lovatelli A., Conand C., Purcell S., Uthicke S., Hamel J.-F., Mercier A. *Advances in sea cucumber aquaculture and management*. FAO Fisheries Technical Paper. No. 463, (p. 79-90). Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
113. Le T.X., Munekage Y. and Shin-ichiro K. (2005) Antibiotic resistance in bacteria from shrimp farming in mangrove areas. *The Science of the Total Environment*, 349(1-3), 95-105. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2005.01.006
114. Levrel H., Fossat J., Pelletier D. (2010) Les indicateurs de biodiversité marine et côtière : état des lieux institutionnel. *Vertigo La revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], 10(2), mis en ligne le 27 septembre 2010. DOI: 10.4000/vertigo.9893 Récupéré de : <http://www.erudit.org/revue/vertigo/2010/v10/n2/045523ar.pdf>
115. Li X., Li G., Zhang S., Tao L. (2013) Effect of Recirculating Aquaculture System (RAS) on Growth Performance, Body Composition and Hematological Indicators of Allogynogenetic crucian Carp (*Carassius auratus gibelio*). *Advance Journal of Food Science and Technology*, 5(3), 348-355. Récupéré de : <http://maxwellsci.com/print/ajfst/v5-348-355.pdf>
116. Lodeiros, C. and García, N., (2004) The use of sea urchins to control fouling during suspended culture of bivalves. *Aquaculture*, 231(1-4), 293-298. DOI : 10.1016/j.aquaculture.2003.10.022
117. Lupatsch I., Santos G.A., Schrama J.W., Verreth J.A.J. (2010). Effect of stocking density and feeding level on energy expenditure and stress responsiveness in European sea bass *Dicentrarchus labrax*. *Aquaculture*, 298(3-4), 245-250. DOI : 10.1016/j.aquaculture.2009.11.007
118. Lusher A., McHugh M. and Thompson R. (2013) Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel. *Marine Pollution Bulletin*, 67(1-2), 94-99. DOI : 10.1016/j.marpolbul.2012.11.028
119. Manley, A.R., (1983) The effects of copper on the behaviour, respiration, filtration and ventilation activity of *Mytilus edulis*. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 63(1), 205-222. DOI : 10.1017/S0025315400049900
120. MARM (2010) *La diversification en aquaculture: Un outil pour la durabilité*. Ministère de l'Environnement et du Milieu Rural et Marin. Secrétariat Général de la Mer. Madrid, Espagne.
121. Martins C. I. M., Edinga E. H., Verdegema M.C.J., Heinsbroeka L.T.N., Schneider O., Blancheton J.P., Roque d'Orbecastel E. and Verreth J.A.J. (2010) New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, 43(3), 83-93. DOI : 10.1016/j.aquaeng.2010.09.002
122. Mazoyer M. And Roudart L. (2002) Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine. Editions Points, Paris, France.
123. Tetreault I. (2006) *Seafood Watch, Seafood Report: Farmed Tilapia. Final Report*. Monterey Bay Aquarium,

Monterey, CA, États-Unis.

124. McCauley D.J., Pinsky M.L., Palumbi S.R., Estes J.A., Joyce F.H. and Warner R.R. (2015) Marine defaunation: Animal loss in the global ocean. *Science*, 347(6219) . DOI: 10.1126/science.1255641.
125. McGinnity P, Prodohl P, Ferguson A, Hynes R, Maoileidigh NO, et. al. (2003) Fitness reduction and potential extinction of wild populations of Atlantic salmon, *Salmo salar*, as a result of interactions with escaped farm salmon. *Proceedings of the Royal Society London B*, 270(1531), 2443-2450. DOI : 10.1098/rspb.2003.2520
126. McHugh D. J. (2003) *A guide to the seaweed industry. FAO Fisheries Technical Paper, No. 441*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie.
127. Mente E., Pierce G.J., Santos M.B. et Neofitou C. (2006) Effect of feed and feeding in the culture of salmonids on the marine aquatic environment: a synthesis for European aquaculture. *Aquaculture International*, 14(5), 499-522. DOI : 10.1007/s10499-006-9051-4
128. Maidie S. and A. (2013) Evaluation on Biofilter in Recirculating Integrated Multi-Trophic Aquaculture. *International Journal of Science and Engineering*, 4(2), 80-85. DOI : 10.12777/ijse.4.2.80-85
129. Morato T., Cheung W.W.L., Pitcher T.J. (2006) Vulnerability of seamount fish to fishing: fuzzy analysis of life history attributes. *Journal of Fish Biology* 68(1), 209–221. DOI: 10.1111/j.0022-1112.2006.00894.x
130. Naylor R. and Burke M. (2005). Aquaculture and ocean resources: raising tigers of the sea. *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 185-218. DOI : 10.1146/annurev.energy.30.081804.121034
131. Naylor R., Eagle J., Smith W. (2003). Salmon aquaculture in the Pacific Northwest: a global industry with local impacts. *Environment*, 45(8), 18-39. DOI : 10.1080/00139150309604562
132. Naylor, R.L., Goldberg, R.J., Primavera, J.H., Kautsky, N., Beveridge, M.C.M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H. et Troell, M. (2000) Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* , 405(6790), 1017-1023. DOI : 10.1038/35016500
133. Naylor R, Goldberg R, Mooney H, Beveridge M, Clay J, et al. (1998) Nature's subsidies to shrimp and salmon farming. *Science*, 282(5390), 883–884. DOI : 10.1126/science.282.5390.883
134. Naylor, R., Hindar, K., Fleming, I.A., Goldberg, R., Williams, S., Volpe, J., Whoriskey, F., Eagle, J., Kelso, D. et Mangel, M. (2005) Fugitive salmon: assessing the risks of escaped fish from net-pen aquaculture. *BioScience* 55(5), 427–437. DOI : 10.1641/0006-3568(2005)055[0427:FSATRO]2.0.CO;2
135. Naylor R., Williams S, Strong D. (2001) Aquaculture—a gateway for exotic species. *Science*, 294(5547), 1655-1656. DOI : 10.1126/science.1064875
136. Nellemann C., Hain S., and Alder J. (2008) *In Dead Water – Merging of climate change with pollution, overharvest, and infestations in the world's fishing grounds*. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, Norway. Récupéré de : http://www.unep.org/pdf/InDeadWater_LR.pdf
137. Neori A., Shpigel M., Ben-Ezra D. (2000) A sustainable integrated system for culture of fish, seaweed and abalone. *Aquaculture*, 186(3-4), 279-291. DOI : 10.1016/S0044-8486(99)00378-6
138. Nobre A., Robertson-Andersson D., A. Neori A., Sankar K. (2010) Ecological–economic assessment of aquaculture options: Comparison between abalone monoculture and integrated multi-trophic aquaculture of abalone and seaweeds. *Aquaculture*, 306(1-4), 116-126. DOI : 10.1016/j.aquaculture.2010.06.002
139. OCA (2011) *Rapport 2011. Filière piscicole*. Observatoire de la Consommation Alimentaire. Unité d'Économie et Développement rural. Unité de Statistique, Informatique et Mathématique appliquées à la bioingénierie. Université de Liège. Gembloux agro bio tech. Décembre 2011.
140. Olsen R.L. et Hasan M.R. (2012) A limited supply of fishmeal: impact on future increases in global aquaculture production. *Trends in Food Science & Technology*, 27(2), 120-128. DOI : 10.1016/j.tifs.2012.06.003

141. Ottolenghi F., Silvestri C., Giordano P., Lovatelli A., New MB. (2004) *Capturebased Aquaculture: The Fattening of Eels, Groupers, Tunas and Yellowtails*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie.
142. Pauly D., Christensen V., Guénette S., Pitcher U., Sumaila R., Walters C.J., Watson R. et Zeller D. (2002) Towards sustainability in world fisheries. *Nature*, 418(6898), 689-695. DOI : 10.1038/nature01017
143. Pauly D., Watson R., Alder J. (2005) Global trends in world fisheries: Impacts on marine ecosystems and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 360(1453), 5-12. DOI : 10.1098/rstb.2004.1574.
144. Hargrave B.T., Cranford P., Dowd M., Grant J., Hargrave B., McGladdery S., BurrIDGE L.E. (2003) *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2450. A scientific review of the potential environmental effects of aquaculture in aquatic ecosystems. Volume 1*. Pêches et Océans Canada. Ottawa, Ontario, Canada
145. Pérez, J.E., Alfonsi, C., Nirchio, M., Muñoz, C. et Gómez, J.A. (2003) The introduction of exotic species in aquaculture: a solution or part of the problem? *Interciencia* 28(4), 234-238.
146. Pitcher C.R., Austin M., BurrIDGE C.Y., Bustamante R.H., Cheers S.J., Ellis N. Jones P.N., Koutsoukos A.G., Moeseneder C.H., Smith G.P., Venables W. et Wassenberg T.J. (2008) *Recovery of seabed habitat from the impact of prawn trawling in the far northern section of the Great Barrier Reef Marine Park. CISRO final report to GBRMPA*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. Great Barrier Reef Marine Park Authority, Canberra, Australie.
147. Pizarro, R. (2006) *The ethics of world food production: the case of salmon-farming in Chile*. Análisis de Políticas Públicas. No. 37. Publicaciones Fundacion Terram, Santiago, Chile.
http://www.terram.cl/2006/09/01/app_-37_the_ethics_of_world_food_production_the_case_of_salmon_farming_in_chile/
148. Polidoro B.A., Livingstone S.R., Carpenter K.E., Hutchinson B., Mast R.B., Pilcher N., Sadovy de Mitcheson Y. and Valenti S. (2008) Status of the world's marine species. Dans : Vié J.-C., Hilton-Taylor C. and Stuart S.N. *The 2008 Review of The IUCN Red List of Threatened Species*. IUCN, Gland. Switzerland.
149. PC (2004). *Shell game. The environmental and social impacts of shrimp aquaculture*. Public Citizen, Washington DC, États-Unis. Récupéré de http://www.citizen.org/cmep/article_redirect.cfm?ID=12521
150. Purcell S., Samyn Y. and Conand C. (2012) *Commercially important sea cucumbers of the World. FAO Species Catalogue for Fishery Purposes. No. 6*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie.
151. Purcell S. W., Mercier A., Conand C., Hamel J. F., Toral-Granda M. V., Lovatelli A. and Uthicke S. (2013) Sea cucumber fisheries: global analysis of stocks, management measures and drivers of overfishing. *Fish and fisheries*, 14(1), 34-59. DOI : 10.1111/j.1467-2979.2011.00443.x
152. Rembold C, Hites R, Foran J, Carpenter D, Hamilton M, et al. (2004) The health benefits of eating salmon. *Science*, 305(5683), 475. DOI : 10.1126/science.305.5683.475b
153. Robertson-Andersson D., Potgieter M., Hansen J., Bolton J., Troell M., Anderson R., Halling C., Probyn P. (2008) Integrated seaweed cultivation on an abalone farm in South Africa. *Journal of Applied Phycology* 20(5), 579-595. DOI : 10.1007/s10811-007-9239-7
154. Rochette, J. (2014) *International regulation of offshore oil and gas activities: time to head over the parapet*. IDDRI Sciences Po. Policy Brief, N°6/2014. Récupéré de : http://www.iddri.org/Publications/Collections/Syntheses/PB0614_JR_offshore_FR.pdf
155. Roque d'Orbcastel E. (2008) *Optimisation de deux systèmes de production piscicole : bio-transformation des nutriments et gestion des rejets*. (Thèse de doctorat), Université Paul-Sabatier, Toulouse. Récupéré de : http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000632/01/roque_d_orbcastel.pdf

156. Roque d'Orbcastel, E., Blancheton, J.P., Aubin, J., (2009) Towards environmentally sustainable aquaculture: comparison between two trout farming systems using life cycle assessment. *Aquacultural Engineering*, 40(3), 113-119. DOI : 10.1016/j.aquaeng.2008.12.002
157. Ruiz-Lopez N., Haslam R.P., Usher S.L., Napier J.A. et Sayanova O. (2013) Reconstitution of EPA and DHA biosynthesis in arabidopsis: iterative metabolic engineering for the synthesis of n-3 LC-PUFAs in transgenic plants. *Metabolic Engineering*, 17, 30-41. DOI : 10.1016/j.ymben.2013.03.001
158. Sammouth S., Roque d'Orbcastel E., Gassetta E., Lemariéa G., Breuila G., Marinob G., Coeurdaciera J.L., Fivelstad S. & Blancheton J.P. (2009) The effect of density on sea bass (*Dicentrarchus labrax*) performance in a tank-based recirculating system. *Aquacultural Engineering*, 40(2), 72-78. DOI : 10.1016/j.aquaeng.2008.11.004
159. Schwartz M. L. (2005) *Encyclopedia of Coastal Science*. Springer, The Netherlands.
160. SECR (2002). *Review and synthesis of the environmental impacts of aquaculture*. The Scottish Association for Marine Science and Napier University. Scottish Executive Central Research Unit. The Stationery Office, Edinburgh, Royaume-Uni. Récupéré de : <http://www.gov.scot/Resource/Doc/46951/0030621.pdf>
161. Shepherd S. A., Martinez P., Toral-Granda M. V. and Edgar G.J. (2004) The Galápagos sea cucumber fishery: management improves as stocks decline. *Environmental Conservation*, 31(02), 102-110.
162. Silva D., Valente L., Sousa-Pinto I., Pereira R., Pires M., Seixas F., Remand P. (2015) Evaluation of IMTA-produced seaweeds (*Gracilaria*, *Porphyra*, and *Ulva*) as dietary ingredients in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L., juveniles. Effects on growth performance and gut histology. *Journal of Applied Phycology*, 27(4), 1671-1680. DOI : 10.1007/s10811-014-0453-9
163. Singkran, N. et Sudara, S. (2005) Effects of changing environments of mangrove creeks on fish communities at Trat Bay, Thailand. *Environmental Management*, 35(1), 45-55. DOI : 10.1017/S0376892903001188
164. SPF Économie (2013) *Le marché de l'énergie en 2010*. Observatoire de l'Énergie. Service public fédéral Économie, P.M.E., Classes moyennes et Énergie. Bruxelles, Belgique. Récupéré de : http://statbel.fgov.be/fr/binaries/Le_marche_de_l_energie_en_2010_tcm326-227346.pdf
165. SPF Économie (2014) *Vers une Belgique Pionnière de l'économie circulaire. Pour une utilisation efficace et durable des ressources, assurant le renforcement de la compétitivité et un environnement de qualité*. Propositions du groupe de travail conjoint. SPF Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement SPF Économie, P.M.E., Classes moyennes et Énergie. Juin 2014. Récupéré de : http://economie.fgov.be/fr/binaries/Vers_une_Belgique_Pionniere_de_l_economie_circulaire_tcm326-259697.pdf
166. SPF Économie (2015) *Chiffres clés de l'agriculture 2015. L'agriculture en Belgique en chiffres*. Direction générale Statistique. Service public fédéral Économie, P.M.E., Classes moyennes et Énergie. Bruxelles, Belgique. Récupéré de : http://statbel.fgov.be/fr/binaries/FR_Kerncijfers%20Landbouw_2015k_tcm326-270401.pdf
167. SPF Économie (2016) *Chiffres clés 2014. Observatoire de l'Énergie*. Service public fédéral Économie, P.M.E., Classes moyennes et Énergie. Bruxelles, Belgique. Récupéré de : http://economie.fgov.be/fr/binaries/chiffres_cles_2014_energie_tcm326-278018.pdf
168. SPW (2013) *Programme régional wallon pour le secteur de la pêche et de l'aquaculture 2014-2020. 1ère version – août 2013*. Service public de Wallonie. DGO3. Direction générale opérationnelle de l'agriculture des ressources naturelles et de l'environnement. Namur, Belgique. Récupéré de : <http://www.fernemont.be/downloads/ProgRW%20FEAMP%201ere%20lect%20GW-Versus%20CabDA.PDF>
169. STECF (2015) *The 2015 Annual Economic Report on the EU Fishing Fleet. Scientific, Technical and Economic Committee for Fisheries (STECF-15-07)*. 2015. Publications Office of the European Union, Luxembourg. Récupéré de : https://stecf.jrc.ec.europa.eu/documents/43805/1034590/2015-07_STECF+15-07+-+AER+2015_JRCxxx.pdf

170. STECF (2013) *Scientific, Technical and Economic Committee for Fisheries – Summary of the 2013 Economic Performance Report on the EU Aquaculture sector (STECF-13-30)*. 2013. Publications Office of the European Union, Luxembourg. Récupéré de : https://stecf.jrc.ec.europa.eu/documents/43805/622206/2013-12_STECF+13-30+-+Aquaculture+economics+Summary+report_JRC86673.pdf
171. Stickney R.R. (1996) *History of Aquaculture in the United States*. John Wiley & Sons, New York, New York USA.
172. Streftaris N., Zenetos A. (2006) Alien Marine Species in the Mediterranean - the 100 'Worst Invasives' and their Impact. *Mediterranean Marine Science*, 7(1), 87-118. DOI : 10.12681/mms.180
173. Sugiyama S., Staples D. and Funge-Smith S.J. (2004) *Status and potential of fisheries and aquaculture in Asia and the Pacific. RAP Publication 2004/25*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thaïlande. Récupéré de : <http://www.fao.org/docrep/007/ad514e/ad514e00.htm>
174. Sumaila U.R., Lam V., Le Manach F., Swartz W. and Pauly D. (2013) *Global Fisheries Subsidies*. Policy department b: structural and cohesion policies. Fisheries. European Parliament Directorate-General For Internal Policies, Bruxelles, Belgique. Récupéré de : [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2013/513978/IPOL-PECH_NT\(2013\)513978_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2013/513978/IPOL-PECH_NT(2013)513978_EN.pdf)
175. Sumaila, U., Khan, A., Dyck, A., Watson, R., Munro, G., Tydemers, P. and D. Pauly. (2010) A bottom-up re-estimation of fishing subsidies. *Journal of Bioeconomics*, 12(3), 201-225. DOI : 10.1007/s10818-010-9091-8
176. Sylvia G, Anderson JL, Hanson E. (2000) The new order in global salmon markets and aquaculture development: implications for watershed management in the Pacific Northwest. Dans : Knudsen E., Steward C., MacDonald D., Williams J., Reiser D. *Sustainable Fisheries Management: Pacific Salmon*, (p. 393–405). Lewis Publishers. CRC Press LLC. Boca Raton, Florida, Etats-Unis.
177. Tacon A.G.J., Hasan M.R. and Subasinghe R.P. (2006) *Use of fishery resources as feed inputs for aquaculture development: trends and policy implications*. Circular No. 1018. Département des Pêches de la FAO. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie. Récupéré de <http://www.fao.org/3/a-a0604e.pdf>
178. Tan C.K.F., Nowak B.F. and Hodson S.L. (2002) Biofouling as a reservoir of *Neoparamoeba pemaquidensis* (Page 1970), the causative agent of amoebic gill disease in Atlantic salmon in Atlantic salmon. *Aquaculture*, 210(1-4), 49-58. DOI : 10.1016/S0044-8486(01)00858-4
179. Thorpe A., Whitmarsh D., Drakeford B., Reid C., Karimov B., Timirkhanov S., Satybekov K. and Van Anrooy R. (2011) *Feasibility of stocking and culture-based fisheries in Central Asia*. FAO, Document technique sur les pêches et l'aquaculture N° 565. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Subregional Office for Central Asia, Ankara, Turquie. Récupéré de : <http://www.fao.org/docrep/016/ba0037e/ba0037e.pdf>
180. Tiller R., Brekken T. Et Bailey J. (2012) Norwegian aquaculture expansion and integrated coastal zone management (ICZM): Simmering conflicts and competing claims. *Marine Policy*, 36(5), 1086-1095. DOI : doi:10.1016/j.marpol.2012.02.023
181. Toropova C., Meliane I., Laffoley D., Matthews E. and Spalding M. (2010) *Global Ocean Protection: Present Status and Future Possibilities*. Brest, France: Agence des aires marines protégées, Gland, Switzerland, Washington, DC and New York, USA: IUCN WCPA, Cambridge, UK : UNEP-WCMC, Arlington, USA: TNC, Tokyo, Japan: UNU, New York, USA: WCS.
182. Tournadre, J. (2014) Anthropogenic pressure on the open ocean: The growth of ship traffic revealed by altimeter data analysis. *Geophysical Research Letters* 41(22), 7924–7932. DOI : 10.1002/2014GL061786
183. Toppe J. (2012) Eat more fish – a healthy alternative. Farmed fish – a good choice. *FAO Aquaculture Newsletter*, 49, 8-9.
184. Turcios A. and Jutta Papenbrock J. (2014) Sustainable Treatment of Aquaculture Effluents—What Can We

- Learn from the Past for the Future? *Sustainability*, 6(2), 836-856. DOI : 10.3390/su6020836)
185. UICN. (1994) *Guidelines for protected area management categories*. CNPPA with the assistance of WCMC. Union internationale pour la conservation de la nature. Cambridge, Royaume-Uni, et Gland, Suisse.
 186. UNODC (2011) *Transnational organized crime in the fishing industry. Focus on: Trafficking in Persons, Smuggling of Migrants, Illicit Drugs Trafficking*. United Nations Office on Drugs and Crime. Vienne, Autriche. Consulté sur internet le 29/04/2016 à l'adresse : http://www.unodc.org/documents/human-trafficking/Issue_Paper_-_TOC_in_the_Fishing_Industry.pdf
 187. Vallet E. et al. (2014) *Guide des espèces à l'usage des professionnels*. Édition 2014. SeaWeb Europe. Paris. France.
 188. Vandeputte M., Aubin J., Médale F., Quillet E., Duchaud E., Boudinot P., Labbé, L., Kaushik S.J. (2011) Vers une pisciculture durable à hautes performances environnementales. *Innovations Agronomiques*, 12, 179-188. Récupéré de : <https://www6.inra.fr/ciag/Revue/Volumes-publies-en-2011/Volume-12-Fevrier-2011>
 189. Van Huis A. (2013) Potential of Insects as Food and Feed in Assuring Food Security. *Annual Review of Entomology*, 58, 563-583. DOI: 10.1146/annurev-ento-120811-153704
 190. Verdonck M., Taymans M., Chapelle G., Dartevelle G. et Zaoui C. (2012) Système d'alimentation durable. Potentiel d'emplois en Région de Bruxelles-Capitale. Rapport final de la recherche réalisée pour le compte de l'Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement. Facultés Universitaires Saint-Louis. Centre d'études régionales bruxelloises. Bruxelles, Belgique. Récupéré de : http://www.profacility.be/piclib/biblio/pdf_00000802FR.pdf
 191. Viarengo, A., (1989) *Heavy metals in marine invertebrates: mechanisms of regulation and toxicity at the cellular level*. Reviews in Aquatic Sciences. Volume 1. (p. 295–317). CRC Press, Boca Raton, Floride, Etats-Unis.
 192. Volpe, J.P. (2005) Dollars without sense: the bait for big-money tuna ranching around the world. *BioScience*, 55(4), 301-302. DOI : 10.1641/0006-3568(2005)055[0301:DWSTBF]2.0.C
 193. WB (2013) *Fish to 2030. Prospects for fisheries and aquaculture. Agriculture and environmental services discussion paper 03. World bank report number 83177-GLB*. Agriculture and Environmental Services. International Bank for Reconstruction and Development / International Development Association or The World Bank. Washington DC, Etats-Unis. Récupéré de : <http://www.fao.org/docrep/019/i3640e/i3640e.pdf>
 194. Waycott M., Duarte C.M., Carruthers T.J.B., Orth R.J., Dennison W.C., Olyarnik S., Calladine A., Fourqurean J.W., Heck Jr K.L., Hughes A.R., Kendrick G.A., Kenworthy W.J., Short F.T. and Williams S.L. (2009) Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106 (30), 12377-12381. DOI : 10.1073/pnas.0905620106
 195. Weber M. (2003) *What Price Farmed Fish: A Review of the Environmental and Social Costs of Farming Carnivorous Fish*. SeaWeb Aquaculture Clearinghouse. Washington, DC, Etats-Unis. Récupéré de : <http://seafoodchoices.com/resources/documents/WhatPriceFarmedFish.pdf>
 196. White P., Palerud R., Christensen G., Legović T. et Regpala R. (2008) Recommendations for practical measures to mitigate the impact of aquaculture on the environment in three areas of the Philippines. *Science Diliman*, 20(2). Récupéré de : <http://www.journals.upd.edu.ph/index.php/sciencediliman/article/viewFile/1453/1411>
 197. Worm B., Davis B., Kettner L, Ward-Paige C.A., Chapman D., Heithaus M.R., Kessel S.T. and Gruber S.H. (2013) Global catches, exploitation rates, and rebuilding options for sharks. *Marine Policy* 40, 194-204. DOI : 10.1016/j.marpol.2012.12.034
 198. WWF (2015) *Living Blue Planet Report. Species, habitats and human well-being*. WWF, Gland, Suisse. Récupéré de : http://ocean.panda.org/media/Living_Blue_Planet_Report_2015_Final_LR.pdf
 199. WWF (2014) *Rapport Planète Vivante. Des hommes, des espèces, des espaces, et des écosystèmes*. WWF,

Gland, Suisse. Récupéré de : http://www.wwf.be/_media/LPR2014-full_fr_199304.pdf

200. WWF-ZSL (2015) *The Living Planet Index database*. WWF and the Zoological Society of London. Consulté sur internet le 29/04/2016 à l'adresse : www.livingplanetindex.org

Sites internet consultés

(Tous les sites internet ont été consulté à plusieurs reprises durant l'année académique 2015-2016. Ils ont été également été vérifiées le 07/07/2016.)

1. (Site1, FAO) **Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture**. Département des pêches et de l'aquaculture. Statistiques. Annuaire des statistiques des pêches : Tableaux récapitulatifs des statistiques halieutiques
Adresse : <ftp://ftp.fao.org/FI/STAT/summary/debut.htm>
Adresse site principal : <http://www.fao.org/fishery/statistics/fr>
2. (Site2, FAO) **Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture**. Département des pêches et de l'aquaculture. Statistiques. Toutes les collections d'informations.
Adresse : <http://www.fao.org/fishery/statistics/collections/fr>
Adresse site principal : <http://www.fao.org/fishery/statistics/fr>
3. (Site3, FAO) **Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture**. Département des pêches et de l'aquaculture. Statistiques. Annuaire des statistiques des pêches : Tableaux récapitulatifs des statistiques halieutiques. Archives.
Adresse : ftp://ftp.fao.org/fi/stat/summ_tab.htm
Adresse site principal : <http://www.fao.org/fishery/statistics/fr>
4. (Site4, FAO) **Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture**. Département des pêches et de l'aquaculture. Statistiques. Statistiques sur la production mondiale (interrogation en ligne).
Adresse : <http://www.fao.org/fishery/statistics/global-production/query/fr>
Adresse site principal : <http://www.fao.org/fishery/statistics/fr>
5. (Site5, UICN) **Union Internationale pour la conservation de la nature**.
Adresse : <http://www.uicn.fr/La-Liste-Rouge-des-especes.html>
Adresse site principale : <http://www.uicn.fr/>
6. (Site 6, TransparentSea) **TransparentSea.org**
Adresse : <http://transparentsea.org/?lang=fr>
7. (Site7, EAS) **European Atlas of the Seas**. The European Commission's Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries
8. Adresse :
http://ec.europa.eu/maritimeaffairs/atlas/maritime_atlas/#lang=EN;p=w;pos=19.665:53.883:4;bkgd=20:0.49;gra=0;mode=1;
9. (Site8, EUROSTAT) **Office statistique de l'Union européenne**
Adresse : <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
10. (Site9, EUMOFA) **Observatoire européen des marchés des produits de la pêche et de l'aquaculture**
Adresse : <http://www.eumofa.eu/>
11. (Site10, FEPA) **Fédération européenne des producteurs aquacoles**
Adresse : <http://www.feap.info/default.asp>
12. (Site11, FAOSTAT) **Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture**
Adresse : <http://faostat.fao.org/>

13. (Site12, CFWP) **Conseil de Filière Wallonne Piscicole**
Adresse : <http://www.cfwp.be/accueil/accueil.html>
14. (Site13, CFWP) **Conseil de Filière Wallonne Piscicole**. Résumé des législations pertinentes pour l'aquaculture.
Adresse : <http://www.cfwp.be/documents-a-telecharger/legislations-et-aquaculture.html>
15. (Site 14, ICCAT) **Commission Internationale pour la Conservation des Thonidés de l'Atlantique**, responsable de la conservation des thonidés et des espèces apparentées dans l'océan Atlantique et ses mers adjacentes.
Adresse : <https://www.iccat.int/fr/introduction.htm>
16. (Site15, Commission européenne) Commission européenne : **Better fish for farms**
Adresse : <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/better-fish-farms?lang=en>
Adresse principale : http://ec.europa.eu/index_en.htm
17. (Site16, Commission européenne) **Commission européenne** > Pêche > PCP > Aquaculture
Adresse : http://ec.europa.eu/fisheries/cfp/aquaculture/index_fr.htm
Adresse principale : http://ec.europa.eu/index_en.htm
18. (Site17, FISHBOOST) **Boosting European aquaculture**, by advancing selective breeding to the next levels
Adresse : <http://www.fishboost.eu/research.html>
19. (Site18, AQUAlity) **AQUAlity**
Adresse : <http://www.aqualityproject.com/>
20. (Site19, FAO) **Fiches d'information sur les espèces aquatiques cultivées**
Adresse : <http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/search/fr>
21. (Site20, FishBase) **FishBase : A Global Information System on Fishes**
Adresse : <http://www.fishbase.se/search.php>
Adresse principale : <http://www.fishbase.se/home.htm>
22. (Site 21, Red list UICN) **La liste rouge de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature**
Adresse : <http://www.iucnredlist.org/>
23. (Site 22, CIMTAN) **Canadian Integrated Multi-Trophic Aquaculture Network**
Adresse : <http://www.cimtan.ca/index.php>
24. (Site 23, Ifremer Aquaculture) **Ifremer Aquaculture**
Adresse : <https://aquaculture.ifremer.fr/Fiches-d-information/Filiere-Poissons/Les-systemes-en-circuit-recircule-interet-et-cas-d-utilisation>
Adresse principale : <https://aquaculture.ifremer.fr/>
25. (Site 24, Danish Salmon) **Danish Salmon, Hirtshals, Danmark**
Adresse : <http://www.danishsalmon.dk/pres3.php?id=1#>
26. (Site 25, Blue Ridge Aquaculture) **Blue Ridge Aquaculture Inc.**
Adresse : <http://www.blueridgeaquaculture.com/aboutus.cfm>
27. (Site 26, Krüger Veolia) **Krüger Veolia**
Adresse : <http://www.kruger.dk/en/industry/aquaculture/>
28. (Site 27, Aqua Maof) Industrial Aquaculture Business
Adresse : http://www.aquamaof.com/case_studies_russia_ras.asp
Adresse principale : <http://www.aquamaof.com/default.asp>
29. (Site 28, Global Fish Poland) **Global Fish Poland**
Adresse: http://www.globalfish.pl/pliki/pliki/pdf/ulotka_uk_v7.pdf

30. (Site 29, Fishion) **Fishion**
Adresse : <http://www.fishion-aquaculture.com/en/farming/technology/>
31. (Site 30, Marvesta Shrimp Farms) **Marvesta Shrimp Farms**
Adresse : <http://marvesta.com/about-marvesta/process-why-marvesta/>
32. (Site 31, FEBEG) **Fédération Belge des Entreprises Électriques et Gazières**
Adresse : <https://www.febeg.be/fr/statistiques-electricite>
33. (Site 32, SPF Économie) **Service public fédéral économie, Direction générale statistique**
Adresse : <http://statbel.fgov.be/fr/statistiques/chiffres/environnement/eau/dispo/#1>
34. (Site 33, CFWP) **Conseil de filière wallonne piscicole**
Adresse : <http://www.cfwp.be/>
35. (Site 34, Aquacultuurvlaanderen) **Aquacultuurvlaanderen**
Adresse : <http://www.aquacultuurvlaanderen.be/3rd-nordicras-workshop-recirculating-aquaculture-systems>
36. (Site 35, ILVO) **Instituut voor landbouw- en visserijonderzoek**
Adresse : http://www.ilvo.vlaanderen.be/language/nl-BE/EN/Press-and-Media/Newsletter/Survey/articleType/ArticleView/articleId/1636/Less-aqua-in-aquaculture-ZORAS-a-zero-output-recirculation-system-for-aquaculture#.V2vST_mLS71
37. (Site 36, Tomatenfisch) **Tomatenfisch**
Adresse : <http://www.tomatenfisch.igb-berlin.de/>
38. (Site 38, UME) **University of Missouri Extension, Agriculture**
Adresse : <http://extension.missouri.edu/p/G9472>
39. (Site 39, BE) **Bruxelles-Environnement : Agriculture urbaine**
Adresse : <http://www.environnement.brussels/thematiques/alimentation/du-champ-lassiette/produire-des-aliments-bruxelles/lagriculture-urbaine>

Applications et bases de données :

1. FishStatJ. Version : 2.12.4
Bases de données : Bases de données FAO (FAO_FI Regionals_2015.0.0.fws ; FAO_FI_Global_2015.0.0.fws)