



Réunion des points focaux du MED POL

Téléconférence, 27-28 mai et 6-7 octobre 2021

Point 13 de l'ordre du jour : Méthodologies communes sur les techniques d'estimation du budget national de référence (BNB) des polluants liés à :

- a) **Rejets de sources diffuses provenant de l'agriculture**
- b) **Rejets de sources ponctuelles provenant de l'aquaculture**
- c) **Rejets de sources non ponctuelles provenant des eaux de ruissellement des bassins versants**

Lignes directrices sur les techniques et les méthodologies appliquées pour estimer les rejets de sources diffuses provenant de l'aquaculture

Pour des raisons environnementales et économiques, le tirage du présent document a été restreint. Les participants sont priés d'apporter leur copie à la réunion et de ne pas demander de copies supplémentaires.

Note du Secrétariat

Le Protocole relatif à la pollution tellurique exige, dans son article 13 (paragraphe 2), que les parties contractantes soumettent des rapports qui comprennent, entre autres, les éléments suivants : (i) les données résultant de la surveillance des polluants et (ii) les quantités de polluants rejetées par leurs territoires. À cette fin, le budget national de référence des polluants (BBN) a été convenu par les parties contractantes comme « l'outil de surveillance » pour suivre l'évolution, sur une base quinquennale, des charges de polluants rejetés. Pour aider les pays à remplir ce mandat, des lignes directrices actualisées sur les BBN ont été élaborées en 2015 (UNEP(DEPI)/MED WG.404/7).

COP21 (Naples, Italie, 2-5 décembre 2019) a mandaté le Programme MED POL dans son programme de travail pour l'exercice biennal 2020-2021 d'élaborer de nouvelles lignes directrices techniques pour l'estimation du budget de base national BBN fournissant des méthodologies sur les techniques d'estimation pour les rejets de non-sources ponctuelles (eaux de ruissellement et agriculture) et aquaculture ; renforçant ainsi les capacités de rapport des Parties contractantes à la Convention de Barcelone pour le secteur des activités dans le cadre du Protocole relatif à la pollution, Annexe I.

À cette fin, le présent document a été élaboré et fournit des informations spécifiques sur l'estimation des rejets d'azote total, de phosphore total, de carbone organique total (DBO ou DCO) et de certains métaux lourds (Cu et Zn et leurs composés) provenant du secteur de l'aquaculture. Il sert à renforcer la capacité de déclaration pour le cinquième cycle de déclaration de la BBN, prévu pour l'exercice 2024-2025, et à assurer une rationalisation plus poussée des méthodes de l'(e)PRTR. La nouvelle directive devrait faciliter aussi la collecte de données pour le suivi de la mise en œuvre de plan régional pour l'agriculture qui sera élaboré au cours de l'exercice 2022-2023.

Ce document d'orientation a été examiné et approuvé lors de la réunion sur l'évaluation de la mise en œuvre des plans d'action nationaux et des évaluations, et sur les outils utilisés pour estimer la charge polluante provenant de sources diffuses qui s'est tenue les 22 et 23 avril 2021. Les participants à la réunion ont convenu de soumettre le document mis à jour à la réunion des points focaux du MED POL pour examen et approbation finale.

Table des matières

1.	Introduction	1
2.	Base juridique des lignes directrices sur les BBN en ce qui concerne le secteur de l'aquaculture	2
3.	Rejets de polluants provenant de l'aquaculture	3
3.1	Production d'aliments pour animaux aquatiques.....	3
3.2	Effets néfastes sur l'environnement des rejets potentiels de nutriments, de cuivre et de zinc et de leurs composés et de carbone organique provenant des installations de production aquacole	4
	<i>Nutriments (azote totale et phosphore total)</i>	4
	<i>Cuivre et ses composés</i>	5
	<i>Zinc et ses composés</i>	5
	<i>Carbone organique total (en tant que carbone total ou demande chimique d'oxygène)</i>	6
3.3	Effets néfastes sur l'environnement des rejets potentiels de pesticides et de polluants organiques persistants provenant des installations de production aquacole	6
4.	Méthodes et techniques d'estimation des rejets de polluants provenant du secteur de l'aquaculture.....	6
4.1	Résumé des techniques utilisées pour estimer les rejets de nutriments, de cuivre et de zinc et de leurs composés et de carbone organique provenant du secteur de l'aquaculture	6
4.1.1	Nutriments (azote totale et phosphore total).....	7
4.1.2	Techniques utilisées pour estimer les rejets de cuivre et de zinc.....	10
4.1.3	Techniques utilisées pour estimer les rejets de carbone organique total	12
5.	Conclusions	12
Annexe I :	Industrie de l'aquaculture (en anglais seulement)	
Annexe II :	Aperçu des techniques d'estimation des rejets et des méthodologies appliquées pour l'estimation des rejets de pollution du secteur de l'aquaculture (en anglais seulement)	
Annexe III :	Aperçu des techniques d'estimation des rejets et des méthodologies appliquées pour l'estimation des rejets de pollution du secteur de l'aquaculture (en anglais seulement)	
Annexe IV :	Bibliographie	

Listes des abréviations/ acronymes

PCP	Politique commune de la pêche
Cu	Cuivre
CE	Commission européenne
EcAp	Approche écosystémique
AEE	Agence européenne pour l'environnement
EMEP	Programme européen de suivi et d'évaluation
APE	Agence de protection de l'environnement
UE	Union européenne
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GESAMP	Groupe mixte d'experts chargé d'étudier les aspects scientifiques de la protection de l'environnement marin
HAB	Efflorescences algales nuisibles
HELCOM	Commission pour la protection du milieu marin de la mer Baltique
OMI	Organisation maritime internationale
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
CCR	Centre commun de recherche de la Commission européenne
LBS	Sources terrestres (de pollution)
MED POL	Convention pour la protection du milieu marin et du littoral de la Méditerranée (Convention de Barcelone)
MSFD	Directive-cadre « stratégie pour le milieu marin »
PAN	Plan d'action national
NASO	Aperçu du secteur national de l'aquaculture
BBN	Bilan de base national
BBN/PRTR	Bilan de base national/Registre des rejets et transferts de polluants
N	Azote
PANs	Plans d'action nationaux
NPI	Inventaire national des polluants (Australie)
OCPs	Pesticides organochloriques
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OSPAR	Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est
P	Phosphore
PCB	Polychlorobiphényle
POPs	Polluants organiques persistants
PRTR	Registres des rejets et transferts de polluants
AQ/CQ	Assurance de la qualité/Contrôle de la qualité
TOC	Carbone organique total
UNITAR	Institut des Nations unies pour la formation et la recherche
USGS	Service géologique des États-Unis
WFD	Directive-cadre sur l'eau
OMS	Organisation mondiale de la santé
Zn	Zinc

1. Introduction

1. Suite à la 21^e réunion des Parties contractantes à la Convention de Barcelone – CdP 21 (Naples, Italie, 2-5 décembre 2019)¹ et à l'adoption de la décision IG.24/14², le Programme MED POL a été chargé, conformément au Programme de travail établi, d'élaborer/de mettre à jour des lignes directrices techniques sur les techniques d'estimation des rejets de polluants provenant de l'agriculture, du ruissellement des bassins versants et de l'aquaculture.

2. En conséquence, les présentes lignes directrices sur les techniques et les méthodologies appliquées pour estimer les rejets de sources diffuses provenant de l'aquaculture ont été élaborées. Elles décrivent les techniques d'estimation des rejets ponctuels dans l'eau provenant des activités relevant du **secteur aquacole**, notamment les rejets de polluants énumérés à l'Annexe I du Protocole « tellurique ».

3. Le présent document porte en particulier sur :

- a. Les rejets, dans le secteur aquacole, d'azote total, de phosphore total, de cuivre et de ses composés, de zinc et de ses composés et de carbone organique total ;
- b. Les méthodes et techniques d'estimation des rejets visant à évaluer les charges polluantes susmentionnées provenant du secteur de l'aquaculture.

4. En outre, les présentes lignes directrices fournissent des informations sur la situation actuelle de l'aquaculture (aquaculture continentale et mariculture), en particulier en ce qui concerne les pratiques d'alimentation des poissons et l'industrie aquacole (Annexe I), ainsi qu'une vue d'ensemble des démarches utilisées dans le cadre des techniques d'estimation des rejets de polluants provenant du secteur de l'aquaculture, y compris concernant la précision et l'incertitude des méthodes d'estimation, et des informations sur le contrôle de la qualité/l'assurance de la qualité des inventaires des rejets de polluants provenant de la production aquacole et des activités piscicoles (Annexe II). Enfin, l'Annexe III examine d'autres sujets de préoccupation liés à la possibilité que certains polluants organiques persistants et pesticides pénètrent de manière involontaire dans le milieu marin par l'intermédiaire des aliments pour poissons.

5. Le présent document a été élaboré suivant une méthodologie en plusieurs étapes :

- a. Une analyse documentaire approfondie (Annexe I-III) portant sur :
 - i. La situation actuelle du secteur de l'aquaculture (aquaculture continentale et mariculture), en particulier en ce qui concerne les pratiques d'alimentation des poissons et leurs effets néfastes sur l'environnement ;
 - ii. Les rejets de polluants dans l'eau ainsi que les problèmes liés à la charge polluante d'azote total, de phosphore total, de cuivre et de ses composés, de zinc et de ses composés et de carbone organique total provenant des installations de production aquacole, les techniques d'estimation correspondantes et les possibles rejets involontaires de pesticides et de polluants organiques persistants ;
 - iii. Des rapports techniques, documents et articles scientifiques évalués par des pairs décrivant les différentes démarches, méthodes et techniques recommandées pour estimer les rejets dans l'eau des polluants susmentionnés provenant du secteur de l'aquaculture ;
 - iv. Les problèmes et inconvénients potentiels concernant la précision et l'incertitude associées aux méthodes, techniques et démarches de calcul proposées.

¹ <https://www.unenvironment.org/unepmap/events/meeting/21st-meeting-contracting-parties-convention-protection-marine-environment-and>

² https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/31712/19ig24_22_2414_eng.pdf

Bien que l'examen ait été effectué à l'échelle mondiale, le présent document porte essentiellement sur la région méditerranéenne. Les documents analysés contiennent des informations sur l'Europe ainsi que sur les États-Unis, le Canada, l'Australie et l'Asie.

- b. L'élaboration de méthodologies rationalisées et des techniques les plus appropriées pour estimer les rejets de nutriments, de cuivre et de ses composés, de zinc et de ses composés et de carbone organique total provenant des activités aquacoles.
- c. L'intégration des informations disponibles dans les présentes lignes directrices sur les méthodes et techniques visant à aider les Parties contractantes à estimer les rejets de polluants provenant du secteur aquacole qui s'écoulent dans l'eau.

6. Les nouvelles techniques proposées pour l'estimation des charges polluantes permettront de générer des données compatibles pour évaluer l'efficacité des mesures adoptées dans le cadre des plans d'action nationaux et du Plan régional sur la gestion de l'aquaculture.

2. Base juridique des lignes directrices sur les BBN en ce qui concerne le secteur de l'aquaculture

7. Le Protocole relatif à la protection de la mer Méditerranée contre la pollution provenant de sources et activités situées à terre (Protocole « tellurique ») est l'un des six protocoles à la Convention de Barcelone. Il a été adopté le 17 mai 1980 par la Conférence de plénipotentiaires des États côtiers de la région méditerranéenne sur la protection de la mer Méditerranée et est initialement entré en vigueur le 17 juin 1983³. Le Protocole initial a été modifié par des amendements adoptés le 7 mars 1996 [UNEP(OCA)/MED IG.7/4]⁴, puis enregistré comme le « Protocole relatif à la protection de la mer Méditerranée contre la pollution provenant de sources et activités situées à terre ». Il est entré en vigueur le 18 mai 2006⁵.

8. Le Protocole « tellurique » exige, au paragraphe 2 de l'article 13, que les Parties contractantes soumettent des rapports comprenant, entre autres : i) les données résultant de la surveillance ; et ii) les quantités de polluants émis à partir de leurs territoires⁶. À cette fin, les Parties contractantes sont convenues d'utiliser le bilan de base national (BBN) des rejets/émissions de polluants comme « l'outil de surveillance » de l'évolution, sur une base quinquennale, de la charge polluante rejetée, traduisant l'efficacité des mesures prises pour réduire la pollution provenant de sources terrestres.

9. Pour aider les pays dans cette tâche, des lignes directrices actualisées sur les BBN ont été élaborées en 2015 [UNEP(DEPI)/MED WG.404/7, Annexe IV, Appendice B, page 11]⁷. Cependant, ces lignes directrices n'indiquent pas les moyens par lesquels les rejets de polluants provenant de l'aquaculture peuvent être estimés. En outre, les techniques actuelles d'estimation appliquées dans le cadre des inventaires et des registres des rejets et transferts de polluants (PRTR) ne fournissent aucune information sur les rejets de l'aquaculture. Ce point a fait l'objet de discussions lors de la réunion régionale sur les rapports relatifs aux rejets dans le milieu marin et côtier provenant de sources et activités situées à terre et les indicateurs connexes, qui s'est tenue à Tirana, en Albanie, les 19 et 20 mars 2019⁸. Il a donc été recommandé d'aider les Parties contractantes à compléter la méthodologie BBN/PRTR par des techniques d'estimation des rejets de sources ponctuelles liées au secteur de l'aquaculture (UNEP/MED WG.462/8).

³ <https://www.informea.org/en/treaties/land-based-sources-protocol>

⁴ <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/3016>

⁵ https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7096/Consolidated_LBS96_ENG.pdf?sequence=5&isAllowed=y

⁶ https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/3016/96ig7_4_lbsprotocol_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y

⁷ https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/5481/1/15wg417_inf6_eng.pdf

⁸ file:///C:/Users/aleks/AppData/Local/Temp/19wg462_08_Meeting%20Report.pdf

3. Rejets de polluants provenant de l'aquaculture

10. Les principales voies de rejet des contaminants issus des activités de production aquacole sont les aliments pour animaux, les produits chimiques utilisés sous forme de médicaments, de désinfectants et d'antiparasitaires, ainsi que les matières fécales des poissons. Bien qu'étant un facteur de production crucial en aquaculture, les aliments pour animaux sont considérés comme la principale source de pollution dans les systèmes aquacoles [1-7]. Les effets de la production de déchets et de la pollution causée par les aliments pour poissons varient selon la quantité d'aliments complémentaires. Ils dépendent d'un certain nombre de facteurs, notamment la composition en nutriments des aliments, la méthode de production (aliments extrudés ou en granulés), le rapport entre la taille des aliments et celle du poisson, la quantité d'aliments par unité de temps, la méthode d'alimentation et la durée de stockage des aliments [1][7].

3.1 Production d'aliments pour animaux aquatiques

11. Les types d'aliments peuvent se diviser en trois groupes : i) les aliments composés de production industrielle ; ii) les aliments fabriqués à la ferme ; et iii) les organismes crus. Entre 1995 et 2007, la production totale d'aliments composés industriels pour animaux aquatiques s'est multipliée par 3,5, passant de 7,6 millions de tonnes (1995) à 27,1 millions de tonnes (2007), avec un taux de croissance annuel moyen de 11,1 % [4]. On estime qu'en 2015, 39,62 millions de tonnes d'aliments composés industriels [8], entre 15 et 30 millions de tonnes d'aliments fabriqués à la ferme, et entre 3 et 6 millions de tonnes d'organismes crus, principalement du poisson de rebut [1] [8], ont été utilisés pour produire les principales espèces aquacoles.

12. Les régimes alimentaires des poissons et des crevettes doivent contenir environ quarante nutriments essentiels tels que des acides aminés, des vitamines, des minéraux et des acides gras [1] [9-11-36]. Ces nutriments sont apportés à l'alimentation par un certain nombre d'ingrédients, dont la farine de poisson, l'huile de poisson, les plantes et les déchets d'animaux. L'alimentation se présente généralement sous la forme de granulés séchés⁹. Le régime alimentaire exact diffère selon le type et l'espèce de poisson. Schalekamp et al. [1] et Tacon et al. [3] [12] fournissent des informations détaillées sur les ingrédients et la composition des aliments utilisés pour différents types de poissons. Pour les espèces aquacoles qui sont nourries, les ingrédients peuvent être sommairement divisés en deux catégories : les ressources marines et les ressources terrestres. Les ressources marines sont principalement constituées de farine et d'huile de poisson, dont la production dépend de la pêche sauvage et est donc limitée [1] [9-11]. Tacon et al [5] ont indiqué que l'utilisation totale de farines et d'huiles de sous-produits d'animaux terrestres dans les aliments composés pour animaux aquatiques se situe entre 0,15 et 0,30 million de tonnes, soit moins de 1 % de la production mondiale totale d'aliments composés pour animaux aquatiques. Les principales ressources terrestres pour l'alimentation animale sont le soja, le maïs et le riz [8-10]. Le tourteau de soja est la source la plus courante de protéines végétales utilisée ; il représente environ 25 % du poids total des aliments composés pour animaux aquatiques [5]. Des sources lipidiques autres que l'huile de poisson sont également utilisées en grande quantité, les principaux substituts étant les huiles végétales, de préférence celles à forte teneur en oméga-3 (par exemple, les abats de poissons d'élevage), et l'huile de volaille [5].

13. Pour garantir que les nutriments alimentaires sont ingérés, digérés, absorbés et transportés vers les cellules, on utilise de plus en plus d'additifs alimentaires non nutritifs dans les aliments pour animaux aquatiques [1] [10-12]. La gamme d'additifs utilisés dans les aliments pour animaux aquatiques est variée [13]. Par exemple, certains visent la qualité de l'alimentation, notamment les liants des granulés, les antioxydants et les conservateurs (composés antimoisissures et antimicrobiens). Les enzymes sont utilisées pour améliorer la disponibilité de certains nutriments (protéases, amylases) ou pour éliminer la présence de certains antinutriments (phytase, enzymes des polysaccharides non amylacés). D'autres additifs sont utilisés pour améliorer les performances et la santé des animaux, notamment des probiotiques, des prébiotiques, des immunostimulants, des substances phytogènes et des acides organiques [13].

⁹ <https://www.fisheries.noaa.gov/insight/feeds-aquaculture>

3.2 Effets néfastes sur l'environnement des rejets potentiels de nutriments, de cuivre et de zinc et de leurs composés et de carbone organique provenant des installations de production aquacole

14. La production aquacole utilise de nombreuses ressources, dont la terre, l'eau, les aliments pour animaux, les engrais, l'énergie, le capital et la main-d'œuvre, et a des répercussions sur les écosystèmes par l'intermédiaire de la libération ou de l'extraction de nutriments, de polluants chimiques et de polluants microbiens, de l'introduction d'espèces étrangères, de l'utilisation de désinfectants et d'antibiotiques, et de la modification des débits d'eau [10] [14-20]. Ces effets néfastes sur l'environnement dépendent de différents facteurs tels que le type de méthode d'aquaculture utilisée, la situation géographique et les espèces produites, notamment les aliments administrés, les produits chimiques utilisés, les excréments, les animaux morts et les interactions entre les animaux d'élevage et les animaux sauvages [18]. L'accumulation de déchets alimentaires et de matières fécales de poissons entraîne des rejets de nutriments, de polluants chimiques et microbiens et d'immunostimulants ainsi que des modifications des sédiments situés sous les cages à poissons. Bien que des articles scientifiques ont rapporté l'existence d'incidences environnementales significatives à des distances allant jusqu'à 100 mètres des cages, ces incidences sont généralement localisées dans un rayon de 20 à 50 mètres autour des cages [14].

15. Les installations d'aquaculture peuvent détériorer la qualité de l'eau en modifiant la turbidité et le pH (en particulier dans l'eau douce), et en augmentant la concentration et la production primaire de nutriments, ce qui entraîne l'eutrophisation et des efflorescences algales nuisibles, la diminution des concentrations d'oxygène dissous [17-21] et la toxicité [18] [24-30].

16. Les pesticides utilisés dans l'alimentation des poissons, en particulier des saumons d'élevage, ont suscité de plus en plus d'inquiétudes ces dernières années quant à leurs effets potentiels sur la santé humaine [24-25] [28-32].

17. Il a été signalé que la fuite d'animaux élevés (ou de leurs cellules reproductrices) peut influencer les populations sauvages par croisement ou hybridation, déprédation, concurrence, destruction de l'habitat ou propagation de maladies [18]. L'élevage de crevettes a entraîné une destruction et une perte considérables des forêts de mangroves en Asie de l'Est et du Sud-Est, au Mexique et au Brésil [33-34].

Nutriments (azote totale et phosphore total)

18. Les principales voies de rejet des nutriments provenant des installations de production aquacole sont les aliments non consommés (notamment en raison de la suralimentation), la décomposition des organismes morts, la surfertilisation et les matières fécales [34-41]. Dans les bassins d'aquaculture continentale basés sur l'alimentation, 60% à 80 % de l'azote contenu dans les protéines des aliments pénètre dans l'eau sous forme d'aliments non consommés et de fèces, ou est excrété sous forme d'azote ammoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$) par les animaux aquatiques [37-39]. Pour éviter la toxicité de l'ammonium, les élevages de truites arc-en-ciel ont besoin de grandes quantités d'eau, généralement 86 000 m³/tonne de truites produites, et sont donc à l'origine de rejets considérables d'ammonium dans les rivières [39-41]. Bien que la concentration de phosphore dans les effluents des élevages de truites soit faible (teneur en phosphate total de 0,30 mg/l) en raison des quantités d'eau utilisées, la charge massique totale de phosphore est très élevée et peut provoquer une eutrophisation [42-43].

19. L'aquaculture côtière et marine contribue également de manière significative à l'enrichissement en nutriments. Par exemple, il a été signalé que pour une production annuelle mondiale de crevettes d'environ 5 millions de tonnes, 5,5 millions de tonnes de matière organique, 360 000 tonnes d'azote et 125 000 tonnes de phosphore sont rejetées chaque année dans l'environnement [37]. L'augmentation de la production de métabolites azotés, en particulier l'ammoniac, est très préoccupante car l'ammoniac est hautement toxique sous sa forme ionisée (NH_3) pour de nombreux organismes aquatiques [37-38] [44]. Bowman et al. [45] ont récemment montré que les rejets de nutriments dissous et particuliers provenant de la mariculture intensive entraînent une

augmentation des charges en nutriments (poissons et crustacés) ainsi que des changements dans la stœchiométrie des nutriments (ce qui vaut pour tous les types de mariculture). Les auteurs ont signalé que la mariculture est une cause importante et croissante d'enrichissement en nutriments des côtes, et prévoient que les nutriments provenant de la mariculture seront multipliés par six d'ici à 2050, donnant lieu à un dépassement de la capacité d'assimilation des nutriments dans les régions du monde où la mariculture connaît une expansion rapide [45]. Ils ont également souligné que l'augmentation des charges en nutriments peut favoriser une augmentation des efflorescences algales nuisibles, soit directement, soit par la stimulation des algues dont les efflorescences algales nuisibles mixotrophes peuvent se nourrir. Les efflorescences algales nuisibles peuvent tuer ou intoxiquer les produits de la mariculture, ce qui entraîne de graves pertes économiques et peut augmenter les risques pour la santé humaine [45-46] [43].

Cuivre et ses composés

20. Le cuivre et ses composés peuvent pénétrer dans le milieu marin de plusieurs façons, notamment par les aliments et les additifs alimentaires non consommés [47-50], par le lessivage des revêtements biocides appliqués sur les structures immergées et les cages en filet couramment utilisées dans les installations de production aquacole [51-53], et par les déchets fécaux des poissons d'élevage [47][51]. La toxicité d'un métal dans le milieu marin est principalement déterminée par sa forme chimique et par sa biodisponibilité (c'est-à-dire sous une forme qu'un organisme peut absorber ou ingérer directement). L'état le plus toxique d'un métal, et donc biodisponible, est la forme ionique libre ou dissoute. Clement et al. [52] offrent une étude approfondie des incidences écologiques de la présence de cuivre et de zinc dans les sédiments.

21. L'application d'un revêtement biocide sur les structures immergées et les cages en filet pour prévenir et réduire l'encrassement biologique est une pratique courante dans le secteur de l'aquaculture. Les peintures antisalissures sont principalement à base de cuivre, généralement sous la forme d'oxyde de cuivre et, par conséquent, les sédiments proches des fermes piscicoles présentent des niveaux élevés de cuivre, dépassant souvent les niveaux recommandés pour la qualité des sédiments [47-48] [51] [53]. Par exemple, Dean et al. [48] ont signalé que 19 des 25 produits antisalissures autorisés pour l'aquaculture écossaise contiennent du cuivre comme ingrédient actif (par exemple, l'oxyde cuivreux – Cu₂O, le thiocyanate de cuivre – CuSCN et le sulfate de cuivre – CuSO₄) et que certains contiennent également du zinc. Les auteurs ont également souligné que les agents antisalissures peuvent constituer une source importante de cuivre, et possiblement de zinc, pour le milieu marin, étant donné que le métal actif peut être rejeté sous forme soluble ou particulaire, soit par lessivage des filets traités, soit par écaillage des structures en dur qui sont peintes [48]. L'utilisation intensive de biocides antisalissures, lesquels sont associés à des effets létaux ou sublétaux ainsi qu'au mécanisme de défense immunitaire immédiat des poissons exposés [54], est également considérée comme une source potentielle d'accumulation de métaux dans les poissons d'élevage.

Zinc et ses composés

22. Les voies d'entrée du zinc et de ses composés dans le milieu marin sont les mêmes que pour le cuivre, par exemple les aliments et les additifs alimentaires non consommés, le lessivage des revêtements biocides appliqués sur les structures immergées et les cages en filet couramment utilisées dans les installations de production aquacole, et les déchets fécaux des poissons d'élevage [47-54].

23. La pyrithione de zinc (ZnPT) et le zinèbe sont les biocides à base de zinc les plus couramment utilisés dans les peintures antisalissures [55-56]. Soon et al. [56] ont récemment offert une revue complète de l'utilisation de la pyrithione de zinc dans le milieu marin, de sa toxicité et de son devenir dans l'environnement. Ils ont souligné qu'une fois que la pyrithione de zinc est rejetée dans le milieu marin, elle peut facilement se transformer en un autre complexe de pyrithiones métalliques en libérant l'ion zinc dans le complexe et en absorbant d'autres ions métalliques libres présents dans l'eau de mer.

24. Guardiola et al [55] ont mis en avant que, malgré les effets bénéfiques des produits chimiques pour l'aquaculture, l'utilisation de biocides peut également causer des dommages aux organismes aquatiques et même aux humains. Les auteurs ont signalé deux types de risques associés à l'utilisation

de biocides dans le secteur de l'aquaculture : i) les prédateurs et les humains peuvent ingérer les poissons et les crustacés qui ont accumulé ces contaminants ; et ii) le développement de la résistance aux antibiotiques chez les bactéries. L'ingestion de poissons et de mollusques contaminés peut présenter un grand risque pour la santé humaine [57-58]. Les conditions et les emplacements des fermes aquacoles jouent un rôle notable dans la propagation de ces produits chimiques et métaux lourds dans l'environnement [58].

Carbone organique total (en tant que carbone total ou demande chimique d'oxygène)

25. La contribution de la production primaire à la charge de carbone dans l'aquaculture avec apport de nourriture, l'accumulation de carbone et la détérioration benthique subséquente sous les fermes piscicoles ont été étudiées par plusieurs chercheurs [4] [17] [22] [37] [57-62]. Élément majeur de la matière organique largement étudié ces dernières décennies [61-62], le carbone organique dissous (COD) joue un rôle important dans le cycle du carbone et la boucle microbienne dans le milieu marin. Les principales voies de transfert de la matière organique dans l'eau de mer sont la dissolution des boulettes fécales, l'excès d'alimentation, la décomposition des cellules et l'activité bactérienne [57-62]. On a constaté que la sédimentation du carbone organique (CO) sous les fermes piscicoles est de 4 à 27 fois plus élevée que celle des sites non touchés, et qu'elle diminue rapidement à mesure qu'on s'éloigne des fermes [63]. De plus, les espèces de niveau trophique inférieur (coquillages et algues) intégrées à la monoculture de poissons ou de crevettes dans les eaux côtières peuvent assimiler la matière organique de l'eau environnante et la libérer par des excréments qui passent à former partie du réservoir organique [62]. Verdegem [17] a estimé la contribution de la production primaire à la charge en carbone dans l'aquaculture avec apport de nourriture et a souligné que, dans les systèmes à flux continu (notamment les cages), la charge environnementale de carbone est supérieure à la quantité de nourriture administrée. L'auteur a également souligné que dans l'aquaculture avec apport de nourriture, un bilan massique plus détaillé incluant la croissance et les différents types de déchets produits peut être calculé pour les différents composants de l'alimentation, notamment la matière sèche, la demande chimique en oxygène, le carbone, l'azote, les cendres et le phosphore.

3.3 Effets néfastes sur l'environnement des rejets potentiels de pesticides et de polluants organiques persistants provenant des installations de production aquacole

26. Comme mentionné précédemment, les principales voies de rejet des contaminants de plus en plus préoccupants issus des activités de production aquacole sont les aliments pour animaux, les produits chimiques utilisés sous forme de médicaments, de désinfectants et d'antisalissures, ainsi que les matières fécales des poissons. Les présentes lignes directrices n'ont pas pour objet d'examiner les questions liées à la santé, mais certains problèmes préoccupants à cet égard sont toutefois abordés à l'Annexe III.

4. Méthodes et techniques d'estimation des rejets de polluants provenant du secteur de l'aquaculture

27. Les techniques utilisées pour estimer les rejets du secteur de l'aquaculture diffèrent selon le type de rejets : i) rejets de nutriments ; ii) rejets de cuivre et de zinc et de leurs composés ; et iii) rejets de carbone organique. Elles sont examinées en suivant.

4.1 Résumé des techniques utilisées pour estimer les rejets de nutriments, de cuivre et de zinc et de leurs composés et de carbone organique provenant du secteur de l'aquaculture

28. À ce jour, peu de documents décrivent les techniques d'estimation de la charge polluante émise par les installations aquacoles, et les ceux qui s'y intéressent portent principalement sur les rejets de nutriments. On trouvera ci-après une description des techniques et des équations proposées par les lignes directrices techniques utilisées en Australie [64], en Europe [65] et aux États-Unis [66], ainsi que des techniques proposées dans plusieurs articles scientifiques évalués par des pairs.

29. Comme indiqué précédemment, on sait que les apports alimentaires et les pratiques alimentaires (c'est-à-dire la densité de mise en charge, le régime alimentaire et le taux d'alimentation)

sont les principales sources de rejets de polluants et les facteurs qui déterminent la qualité des effluents rejetés par les installations de production d'aquaculture en cage [2-7]. Les autres sources de pollution sont les produits chimiques utilisés sous forme de médicaments, de désinfectants et d'antisalissures, ainsi que les matières fécales des poissons. La quantité réelle d'aliments administrés qui est consommée par le poisson et sa digestibilité sont les deux facteurs les plus importants qui déterminent la quantité de déchets fécaux produits et rejetés dans le milieu environnant [66-67].

30. Par conséquent, il est essentiel de se renseigner auprès des fournisseurs d'aliments pour déterminer le contenu de l'aliment et la quantité d'ingrédients que contient ce dernier (par exemple azote, phosphore, matière organique, protéines), et cette demande d'informations devrait constituer le point de départ de toute estimation du potentiel de rejet de polluants par une installation de production aquacole [19-22] [65-66].

31. Un paramètre particulièrement important à cet égard est le taux de conversion alimentaire (feed conversion ratio – FCR), lequel est défini comme une mesure de l'efficacité de l'alimentation [66]. Il est calculé comme le rapport entre le poids de l'alimentation administrée et le poids du poisson produit :

$$\text{FCR} = \text{Poids sec de l'alimentation administrée} / \text{Gain de poids humide du poisson}$$

(Équation 4.1)

32. L'Agence des États-Unis pour la protection de l'environnement (US EPA) [66] a signalé qu'avec des aliments à haute teneur énergétique, des taux de conversion de 1,0 ou moins sont maintenant couramment observés dans les élevages de saumons et de truites. Lorsque les taux de conversion alimentaire sont sensiblement plus élevés, une partie moins importante de l'alimentation contribue à la croissance et une plus grande partie vient à l'appui des processus métaboliques, ce qui augmente la production de déchets, de façon aussi bien intrinsèque qu'extrinsèque (gaspillage d'aliments).

4.1.1 Nutriments (azote totale et phosphore total)

33. L'Agence australienne pour la protection de l'environnement propose deux techniques différentes pour estimer les rejets de nutriments provenant des installations d'aquaculture de poissons d'eau tempérée en Australie [64] :

- a. La *méthode de mesure directe*, qui peut être utilisée dans le cas de systèmes semi-fermés et fermés et qui implique une mesure directe de la quantité totale d'azote et de phosphore dans l'eau de rejet. Les lignes directrices [64] soulignent que, pour cette méthode, les données sur la qualité de l'eau doivent être collectées sur une période raisonnable pour tenir compte des variations avant de pouvoir déterminer des chiffres précis et fiables à introduire dans l'équation de mesure directe (Équation 4.2).

$$T_{N+P} = E_{N/P} * F_A$$

(Équation 4.2)

où :

- T_{N+P} = le rejet d'azote (N) et de phosphore (P) totaux dans l'eau (t/an) ;
- $E_{N/P}$ = la concentration de N et de P dans l'effluent (mg/l) ;
- F_A = le facteur de conversion (non fourni dans le document de référence).

- b. La *méthode du bilan massique*, qui a été recommandée pour les élevages de poissons marins et d'eau douce terrestres utilisant des systèmes semi-ouverts :

$$T_{N+P} = (F_{N+P} * \text{FCR}) - (A_{N+P})$$

(Équation 4.3)

où :

- T_{N+P} = le rejet de N et de P totaux dans l'eau (kg/t de poisson produit) ;
- F_{N+P} = la quantité de N et de P totaux dans l'alimentation¹⁰ (kg/t) ;
- FCR = le taux de conversion alimentaire (sans dimension) ;

¹⁰ The proportion of P and N in the feed is obtained directly from the producers

$A_{N+P} = N$ et P convertis en biomasse de poisson (kg/t).

34. Les lignes directrices OSPAR [65] ont proposé l'équation suivante basée sur les nutriments présents dans les aliments (N_{feed}) qui sont convertis en biomasse de poisson (N_{fish}) ou rejetés dans l'eau en tant que nutriments non convertis (N_{rel}) :

$$N_{\text{feed}} = N_{\text{fish}} + N_{\text{rel}} \quad (\text{Équation 4.4})$$

35. Pour les estimations des valeurs N_{feed} et N_{fish} , les lignes directrices OSPAR [65] renvoient aux données fournies par l'autorité environnementale centrale allemande, le Bureau fédéral de l'environnement (UBA)¹¹, selon lesquelles environ 25 % des nutriments contenus dans les aliments pour animaux sont convertis en biomasse, les 75 % restants étant rejetés dans l'environnement ; Handy et Poxton¹² estiment quant à eux que de 52 % à 95 % de l'azote ajouté aux systèmes d'aquaculture sous forme d'aliments pour animaux finira par se retrouver dans l'environnement.

36. Les lignes directrices [65] soulignent également que les nutriments non convertis (N_{rel}) peuvent résulter : i) d'aliments non consommés, d'aliments sédimentés et de constituants non comestibles ; ii) de fèces et d'aliments indigestes ; et iii) d'excréments (c'est-à-dire de rejets branchiaux et rénaux).

37. L'Agence des États-Unis pour la protection de l'environnement [66] a utilisé les facteurs de conversion des aliments pour animaux en polluants pour estimer la charge de polluants non traités, ou « charge brute de polluants » (raw pollutant loading – RPL), comme suit :

$$\text{RPL} = \text{facteur de conversion } FI_A * F_{iP} \quad (\text{Équation 4.5})$$

où :

- RPL = la charge polluante de chaque polluant en question (c'est-à-dire les matières totales en suspension, la demande biochimique en oxygène, l'azote total et le phosphore total) en livres ou tonnes/an ;
- FI_A (Annual feed input) = la quantité d'aliments distribués au système de production (livres ou tonnes/an) ;
- F_{iP} (Feed-to-pollutant conversion factor) = la conversion des apports d'aliments en charges de polluants (c'est-à-dire les matières totales en suspension, la demande biochimique en oxygène, l'azote total et le phosphore total) en livres ou en tonnes de polluants par livre ou tonne d'aliments.

38. Foy et Rosell [68] ont proposé une équation pour déterminer les charges en nutriments dans les fermes aquacoles, sur la base de la valeur du taux de conversion alimentaire (FCR) et des teneurs en nutriments des aliments (FEED) et des poissons (FISH), comme suit :

$$\text{Taux de perte de nutriments} = (\text{FCR} \times \text{FEED}) - \text{FISH} \quad (\text{Équation 4.6})$$

où :

- TAUX DE PERTE = taux de perte de nutriments en kg/tonne de poisson produit ;
- FEED = teneur en nutriments du régime alimentaire en kg/tonne ;
- FISH = teneur en nutriments du poisson en kg/tonne.

¹¹ UBA (1996). Die Einflüsse der Fischerei und Aquakultur auf die marine Umwelt. UBA-Texte 46-96. Umweltbundesamt, Berlin.

¹² Handy, R.D. and Poxton, M.G. (1993). Nitrogen pollution in mariculture: toxicity and excretion of nitrogenous compounds by marine fish. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 3: 205–241.

39. Olsen et al. [19] ont proposé une série d'équations simples pour estimer le taux de rejet des nutriments par les poissons, sur la base du bilan massique dans un système aliments-poissons-déchets :

$$I = A + F = G + R + F \quad (\text{Équation 4.7})$$

où :

- I = la nourriture consommée ;
- A = la nourriture assimilée, ou absorbée par les tissus ;
- F = les défécations ;
- R = la respiration ;
- G = la croissance et la reproduction (toutes les valeurs en termes de carbone ou d'énergie).

40. Le bilan nutritif correspondant est exprimé à l'aide de l'équation analogique suivante :

$$I_{N,P} = A_{N,P} + F_{N,P} = G_{N,P} + E_{N,P} + F_{N,P} \quad (\text{Équation 4.8})$$

où l'excrétion de N et P ($E_{N,P}$) remplace la respiration.

41. Les auteurs ont souligné que ces deux équations générales (4.7 et 4.8) ainsi que les connaissances sur l'efficacité d'assimilation du carbone (C), de l'azote (N) et du phosphore (P) et sur la composition stœchiométrique C:N:P des poissons et des aliments produits sont fondamentales pour estimer l'apport en nutriments et en carbone, le métabolisme et les pertes par chaque poisson d'élevage [19].

42. La nourriture assimilée est la partie de la nourriture qui est digérée par le poisson et absorbée dans les tissus, et les auteurs [19] ont estimé que l'efficacité d'assimilation (AE) se définit comme (de même pour N et P) :

$$AE = A/I \quad (\text{Équation 4.9})$$

43. Les aliments non digérés, ou fèces, traversent l'intestin du poisson sans être digérés ou en étant partiellement digérés. Cette fraction se constitue principalement de substances organiques particulières, notamment des formes particulières de l'azote et du phosphore, mais une partie est rapidement rejetée sous des formes moléculaires dissoutes dans l'eau. La nourriture assimilée favorise la croissance et l'augmentation du poids, et l'efficacité de la croissance (GE) est généralement définie comme (de même pour N et P) :

$$GE = G/I \quad (\text{Équation 4.10})$$

où :

- GE = l'efficacité avec laquelle la nourriture ingérée est convertie en nouvelle biomasse.
- L'efficacité de la croissance (GE) s'apparente, bien qu'à l'inverse, au taux de conversion alimentaire (FCR), lequel est un terme fonctionnel établi et utilisé en aquaculture.
- I = la nourriture consommée (définie dans l'équation 4.7)
- G = la croissance et la reproduction (définies dans l'équation 4.7).

44. **Les déchets totaux de carbone (TL_C) et de nutriments (TL_{NP})** générés par les poissons d'élevage sont exprimés comme suit :

$$TL_C = I - G = R + F \quad (\text{Équation 4.11})$$

$$TL_{NP} = I_{NP} - G_{NP} = E_{NP} + F_{NP} \quad (\text{Équation 4.12})$$

où I, G, R, F sont définis dans l'équation 4.7 comme étant :

- I = la nourriture consommée ;
- G = la croissance et la reproduction ;
- R = la respiration ;

F = les défécations ;
 E_{NP} = l'excrétion de N et P (définie dans l'équation 4.8).

45. La respiration entraîne un rejet de CO_2 inorganique. L'émission de **déchets de carbone organique** (L_{OC}) est facilement estimée comme suit :

$$L_{OC} = I - A = I(1 - AE) \quad (\text{Équation 4.13})$$

où :

A = la nourriture assimilée, ou absorbée par les tissus (définie dans l'équation 4.8) ;
AE = l'efficacité d'assimilation du carbone ou de l'énergie, qui peut être obtenue, selon les auteurs [44], dans des articles scientifiques et dans certains cas auprès des entreprises d'alimentation animale. Les auteurs ont également souligné que pour les composants dissous des fèces, il n'existe pas de moyen formel de distinguer ces composants organiques dissous (DOC) des composants particuliers des déchets organiques (POC), mais que c'est la fraction particulière qui est la plus importante, et que la part correspondante de **déchets de nutriments organiques** (L_{ONP}) rejetés par les poissons peut être estimée comme suit :

$$L_{ONP} = I_{NP} - A_{NP} = I_{NP}(1 - AE_{NP}) \quad (\text{Équation 4.14})$$

où :

I_{NP} = l'azote (N) et le phosphore (P) consommés peuvent être estimés sur la base de la consommation totale d'aliments multipliée par les teneurs en N et P des aliments.
On peut supposer que l'efficacité d'assimilation de l'azote est égale à celle des protéines, et les valeurs sont largement rapportées dans les articles scientifiques ainsi que par les entreprises d'alimentation animale. L'efficacité d'assimilation du phosphore est elle aussi largement rapportée, mais elle est plus incertaine en raison de l'ajout dans l'alimentation de composés de phosphore indigestes provenant de plantes terrestres (phosphore de phytate). En ce qui concerne l'apport de carbone, il n'existe pas de moyen formel de faire la distinction entre les nutriments organiques dissous (azote et phosphore dissous) et les composants de déchets de nutriments organiques particuliers (azote et phosphore particuliers) provenant des fèces, mais la fraction de nutriments particuliers est plus importante.

46. **Le rejet de N et P inorganiques** par les poissons (L_{INP}) peut être défini comme la différence entre l'assimilation et la production :

$$L_{INP} = A_{NP} - G_{NP} = (I_{NP} * AE_{NP}) - G_{NP} \quad (\text{Équation 4.15})$$

où :

G_{NP} = N et P dans le poisson produit, obtenu en multipliant le poids du poisson produit par les teneurs en N et P ;
 A_{NP} = N et P dans la nourriture assimilée, ou dans les tissus ;
 I_{NP} = N et P consommés ;
 AE_{NP} = l'efficacité de l'assimilation de N et P.

4.1.2 Techniques utilisées pour estimer les rejets de cuivre et de zinc

47. Les informations sur les techniques d'estimation des émissions et des rejets pour déterminer la charge en métaux provenant des installations aquacoles sont très rares.

48. Dean et al. [48] ont étudié la distribution spatiale à haute résolution des métaux potentiellement écotoxiques que sont le zinc (Zn), le cuivre (Cu) et le cadmium dans les sédiments autour d'un élevage en cages et ont tenté d'établir un bilan pour ces éléments dans le système d'élevage. Pour chaque carotte de sédiment prélevée à la profondeur y , la concentration de chaque métal (Cu, Zn ou autre) a été déterminée et convertie en masse de métal par unité de surface (gm^{-2}) comme suit :

$$\text{Inventory } (\text{gm}^{-2}) = \frac{\sum_{i=1}^{n=y} ([\text{metal}]_i \text{ dry wt.})}{\text{Area}} \quad (\text{Équation 4.16})$$

où :

[metal]_i = la concentration de métal dans la $i^{\text{ème}}$ tranche (mg g^{-1}) ;
dry wt (poids sec) = le poids sec de la tranche complète (g) ;
area (surface) = $r^2\pi$, r = diamètre de la carotte (m^2).

49. Pour estimer le bilan des métaux, la masse totale des métaux dans l'alimentation et dans le poisson « sur place » a été calculée en utilisant les informations sur l'alimentation et l'apport de biomasse et le taux de conversion alimentaire (FCR).

50. Plus récemment, Earley et al. [69] ont évalué la charge environnementale et les taux de lessivage des métaux pour quatre matériaux en alliage de cuivre et un matériau traditionnel de filet en nylon enduit lors d'un essai *in situ* de 365 jours dans la baie de San Diego, en Californie (États-Unis).

51. Les auteurs ont combiné les dimensions de la surface d'un exemple d'enclos d'élevage aquacole (30 x 30 x 12 m) avec des données sur le taux de lessivage et un modèle générique de cycle de vie qu'ils ont mis au point [69] pour estimer les charges du cycle de vie environnemental (quantité totale de cuivre rejetée pendant la durée de vie utile du matériau) des enclos d'élevage aquacole fabriqués à partir du matériau en alliage de cuivre (CAM) ou du matériau de filet susmentionnés.

52. La charge cumulée (cumulative loading – CL) sur un intervalle de temps donné (x_0, x_n) a été calculée approximativement à partir des mesures du taux de lessivage (R) en utilisant l'équation suivante :

$$CL_{x_0, x_n} \approx \sum_{x_0}^{x_n} (x_1 - x_0) \frac{R(x_0) + R(x_1)}{2} + (x_2 - x_1) \frac{R(x_1) + R(x_2)}{2} + (x_n - x_{n-1}) \frac{R(x_{n-1}) + R(x_n)}{2}$$

où :

CL x_0, x_n = la charge cumulée de cuivre ($\mu\text{g cm}^{-2}$) du jour x_0 au jour x_n ;
 x_n = une série de points temporels consécutifs (jours) pendant lesquels des mesures du taux de rejet ont été effectuées, en commençant par le jour x_0 et en terminant par le jour x_n ;
 $R(x_n)$ = le taux de rejet mesuré ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) pour le point temporel x_n . (Équation 4.17)

53. Les chercheurs [69-70] ont également signalé que les modèles typiques de taux de rejet du cuivre présentent un pic initial de concentration, suivi d'une baisse jusqu'à un niveau asymptotique bas ou un état pseudo-stationnaire (pseudo-steady state – PSS). Ils ont proposé l'équation suivante pour calculer le PSS :

$$PSS_{x_a, x_n} = \frac{CL_{x_a, x_n}}{(x_n - x_a)} \quad (\text{Équation 4.18})$$

où :

PSS_{x_a, x_n} = le taux de charge à l'état pseudo-stationnaire ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{d}^{-1}$), qui se produit après le jour x_a ;

CL_{x_a, x_n} = la charge cumulée de cuivre ($\mu\text{g cm}^{-2}$) du jour x_a au jour x_n ;
 x_a = le temps après lequel les taux de rejet du cuivre baissent jusqu'au PSS.

54. Pour déterminer la charge cumulative de cuivre pendant la période initiale de rejet, les chercheurs [70] ont proposé l'équation suivante :

$$IL_{x_0, x_a} = CL_{x_0, x_a} \quad (\text{Equation 4.19})$$

où :

IL_{x_0, x_a} = la charge initiale de rejet ($\mu\text{g cm}^{-2}$), qui se produit avant le jour x_a ;

CL_{x_a, x_n} = la charge cumulée de cuivre ($\mu\text{g cm}^{-2}$) du jour x_0 au jour x_a ;

55. La charge totale de cuivre au cours du cycle de vie d'un matériau a ensuite été estimée en utilisant les variables ci-dessus dans l'équation suivante :

$$\text{Life Cycle Loading}_{s,f} = ((IL_{x_0, x_n}) \times (\Sigma E_{\text{cleaning}} + \Sigma E_{\text{replacement}})) + (PSS \times \Sigma D_{PSS}) \quad (\text{Équation 4.20})$$

où :

$\text{Life Cycle Loading}_{s,f}$ (Charge du cycle de vie_{s,f}) = le rejet cumulé de cuivre ($\mu\text{g cm}^{-2}$) entre les points temporels x_s et x_f , c'est-à-dire le temps pendant lequel le matériau est exposé à l'eau ;

$\Sigma E_{\text{cleaning}}$ = le nombre total d'opérations de nettoyage du matériau régulièrement programmées sur une période donnée du cycle de vie ;

$\Sigma E_{\text{replacement}}$ = le nombre total d'opérations de remplacement du matériau régulièrement programmées sur une période donnée du cycle de vie (qui comprend la mise

ΣD_{PSS} = le nombre total de jours où l'on prévoit des rejets dans un état pseudo-stationnaire (PSS).

4.1.3 Techniques utilisées pour estimer les rejets de carbone organique total

56. Les techniques d'estimation des rejets de carbone (organique et inorganique) total, utilisées par Olsen et al. [17], sont décrites ci-dessus dans l'équation 4.7 et dans les équations 4.11 à 4.13.

5. Conclusions

7. Le présent document offre une revue complète des polluants qui constituent une source de préoccupation (énumérés dans le Protocole « tellurique ») dans les installations de production aquacole, ainsi que des démarches, méthodes et techniques utilisées pour estimer les rejets de nutriments, de cuivre et de zinc et de carbone organique total provenant de ces polluants.

8. En outre, étant donné l'inquiétude croissante concernant les rejets dans les eaux de pesticides et de polluants organiques persistants (POP) provenant des installations de production aquacole, le document examine également les questions liées à la possible charge polluante provenant de ces sources et fournit une description des techniques d'estimation utilisées à l'heure actuelle pour évaluer ce type de pollution. Bien qu'il n'existe aucune méthode d'estimation convenue, les techniques d'estimation pouvant être utilisées sont abordées à l'Annexe III.

9. Il convient de noter que :

- a. Contrairement à l'inventaire des émissions atmosphériques, les lignes directrices et les inventaires sur les rejets de polluants provenant des installations aquacoles sont rares ;
- b. Les techniques d'estimation des rejets de polluants provenant des installations de production aquacole sont elles aussi très rares ;

- c. L'estimation des rejets de polluants provenant des installations de production aquacole est un domaine complexe de la recherche scientifique qui exige des connaissances spécialisées.

10. L'élaboration des présentes lignes directrices a permis de rechercher, de compiler et d'intégrer les informations contenues dans des articles scientifiques évalués par des pairs afin d'aider les Parties contractantes à déterminer les méthodes et techniques les plus appropriées pour estimer la charge polluante potentielle de l'aquaculture. À cet égard, l'Annexe IV fournit une vaste bibliographie d'ouvrages de références contenant des informations complémentaires et des recommandations s'agissant d'autres sources d'information et d'articles scientifiques évalués par des pairs particulièrement pertinents pour la région méditerranéenne.

Annexe I
Industrie de l'aquaculture (en anglais seulement)

A. Brief Overview

1. The FAO State of World Fisheries and Aquaculture Report [75-76] provides technical insight and exhaustive (22 Tables and 58 Figures) information on a sector and highlights major trends and patterns in global fisheries and aquaculture. These reports [75-76] highlighted that there has been a steep growth in the aquaculture industry for the last seven decades. Between 1961 and 2016, the average annual increase in global food fish consumption, grew from 9.0 kg in 1961 to 20.2 kg in 2015 (expressed per capita terms), at an average rate of about 1.5 percent per year [75]. In 2018, the world aquaculture production reached a record high of 179 million tons (Mt)¹³ in live weight, of which 156 Mt were used for human consumption, and the remaining 23 Mt to produce fishmeal and fish oil [76]. Aquaculture accounted for 46 % (82.3 Mt) of the total production and 52 percent of fish for human consumption (81.1 Mt) [76]. According to the OECD – FAO Agricultural Outlook 2020-2029 [77], global fish production is projected to reach 200 Mt by 2029, increasing by 25 Mt (or 14%) from the base period (average of 2017-19), though at slower pace (1.3% p.a.) than over the previous decade (2.3% p.a.).

Aquaculture in The Mediterranean

2. A detailed description of Aquaculture production in the Mediterranean has been described in several reports over the past five decades [78-81]. Although it was initially land-based, since the 1990s the Mediterranean marine fish farming was transferred to floating cages at sea [82-84]. In 2013, the marine fish farming in the Mediterranean was dominated by two main species: the European seabass *Dicentrarchus labrax* with ~161,000 metric tons year⁻¹ and the gilthead seabream *Sparus aurata* with ~135,000 metric tons year⁻¹. Farming of these species involves a first phase taking place in a land-based hatchery, then the moving of juvenile fish to floating cages at sea.

3. Of the brackish and freshwater form of aquaculture, the production of the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) has been the greatest and the most important aquaculture industry in the Mediterranean region, with 769,000 metric tons produced in Egypt alone in 2012. Tilapia production continued rapid growth and expansion during the past several years [85-86]. Today, Egypt is the seventh-largest aquaculture producer in the world by production quantity and the largest in Africa, accounting for 73.8 % of aquaculture in Africa by volume and for 64.2 % by value [85-86]. Nile tilapia remains the main cultured species in Egypt contributing about 65.15% of the entire Egyptian fish production [86].

4. Taking into account both inland, brackish and marine waters production, since 2010 Egypt, France, Spain, Italy, Turkey and Greece have been the main aquaculture producing countries [87]. According to the Joint Research Centre (JRC) Scientific, Technical and Economic Committee for Fisheries (STECF)¹⁴ these countries remain the leaders in aquaculture production, with Spain (21%), France (15%), Italy (14%), and Greece (10%), making up 60% of the sales volume in EU27 [87]. Therefore, the guidelines on estimation techniques and methodologies to estimate potential pollutant loadings from aquaculture activities may be of particular interest to these countries.

B. Aquaculture Systems and Practices

5. There are several aquaculture practices which are used world-wide for production of a great variety of culture organisms. However, according to the water environment (freshwater, brackish water, marine water) in which the organisms are cultured, the three main types of aquaculture are:

¹³ In this FAO publication, the term “fish” indicates fish, crustaceans, molluscs and other aquatic animals, but excludes aquatic mammals, reptiles, seaweeds and other aquatic plants.

¹⁴ <https://stecf.jrc.ec.europa.eu/index.html>

- a. Freshwater aquaculture carried out either in fish ponds, fish pens, fish cages or, on a limited scale, in rice paddies. It is located inland (hence, “inland aquaculture”) and represents 57% of animal aquaculture production [76] [88-90];
- b. Brackish water aquaculture, which is located in coastal areas, hence “coastal aquaculture”. It is practised in completely or partially artificial structures in areas adjacent to the sea, such as coastal ponds and gated lagoons [88-92].
- c. Marine aquaculture, “mariculture” is conducted in the sea, in a marine water environment. It employs either fish cages or substrates for molluscs and seaweeds such as stakes, ropes, and rafts, and can be located along the coastline or off-shore (off-shore, high seas aquaculture) [91-95].

6. The environmental impact of aquaculture is largely determined by the farming method used. According to the water-holding facility in which the organisms are grown, the aquaculture production methods are grouped into four types: ponds, cages, raceways, and recirculating systems (Table A.1). Depending on the stocking density of the culture organisms, the level of inputs, and the degree of management, culture systems range from very extensive, through semi-intensive and highly intensive to hyper-intensive [88-96]. The management interventions, infrastructure and supporting technologies utilized in aquaculture include a wide range of activities, such as seed supply and stocking, handling, feeding, controlling, monitoring, sorting, treating, harvesting, processing and use of preventive measures [76] [88-96].

Table A.1: Aquaculture methods¹⁵

High-Risk Systems
Open-net Pens or “cages” are found offshore, in coastal areas or in freshwater lakes. These systems allow for free exchange of waste, chemicals, parasites and disease between the farm production site and the surrounding environment. There is also the potential for farmed fish to escape. Farms can also attract predators, such as marine mammals, that can get tangled in fish farm nets and drown.
Ponds , which are semi or fully enclosed bodies of water, and typically used to farm Tilapia and shrimp. “High-risk” pond farms discharge untreated wastewater, which pollutes the surrounding environment and can also cause considerable habitat damage (for example, shrimp ponds are a leading cause of mangrove destruction [97-99]). To be considered a “low risk” method, discharged waste must be filtered and treated.
Low Risk Systems
Closed systems , or closed containment farming methods, use a barrier to control the exchange between farms and the natural environment. This method significantly reduces adverse effects on the environment including pollution, fish escapes, negative wildlife interactions, and parasite and disease transfer from farms to marine and freshwater ecosystems. The most common types are race ways and recirculating systems.
Raceways are typically used for raising rainbow trout. In this method, flowing water is diverted from natural streams or a well. To be considered a low-risk method, waste must be treated, and fish escapes prevented.
Re-circulation Systems: In these systems water is treated and re-circulated, with minimal wastewater discharge. Common species farmed this way include Arctic char, striped bass, barramundi, sturgeon, and increasingly, salmon. These systems are designed to treat effluent before it is discharged to natural water bodies, which reduces pollution, disease and parasite transfer. Fish escapes are virtually impossible, with appropriate barriers designed into the facilities.

¹⁵ Modified from Seachoice.org. url: <https://www.seachoice.org/info-centre/aquaculture/aquaculture-methods/>

Suspended-aquaculture is the method of growing shellfish on beaches or suspended in water on ropes, plastic trays or in mesh bags. The shellfish farmed using these methods are filter feeders and require only clean water to thrive. Oysters, scallops, mussels, and clams are cultured using suspension systems. Shellfish farming in suspended aquaculture is often low risk, if the farmed species is native to the area, and if the farm has sufficient water flow to prevent waste accumulation.

Annexe II

Aperçu des techniques d'estimation des rejets et des méthodologies appliquées pour l'estimation des rejets de pollution du secteur de l'aquaculture (en anglais seulement)

A. Background

7. Aquaculture is one of the pillars of both the Common Fisheries Policy (CFP)¹⁶ and initiatives of the European Union, i.e., the Blue Growth Agenda Strategy¹⁷ and the strategic guidelines for the sustainable development of EU aquaculture¹⁸. However, until recently, regulations and international oversight for the aquaculture industry are extremely complex, with several agencies regulating aquaculture practices, including site selection, pollution control, water quality, feed supply, and food safety. Moreover, these practices differ from country to country and sometimes between states and territories within a country [100-101].

8. FAO [102] recently developed and proposed an ecosystem approach to aquaculture (EAA), which they defined as a “strategy for the integration of aquaculture within the wider ecosystem such that it promotes sustainable development, equity, and resilience of interlinked social-ecological systems”. The strategy is led by three key principles: 1) Aquaculture development and management should take account of the full range of ecosystem functions and services and should not threaten the sustained delivery of these to society; 2) Aquaculture should improve human well-being and equity for all relevant stakeholders; 3) Aquaculture should be developed in the context of other sectors, policies and goals. In describing the EAA, the authors [102] also discussed site selection and carrying capacity, which is an important concept for ecosystem-based management and assist in setting the upper limits of aquaculture production given the environmental limits and social acceptability of aquaculture.

B. Overview of approaches

9. To date there have been very few Inventories/Guidelines describing approaches, methods and techniques for estimating pollutant loading from Aquaculture production activities. In Europe, the two main guidelines have been developed over 20 years ago:

Guidelines on Nutrient Discharges from Fish Farming in the OSPAR Convention Area developed by the OSPAR Commission [65].

10. This Guidelines document proposed techniques to estimate nutrient discharges and provides methods to assess these discharges: (i) assessment based on the feed used; (ii) assessment based on production; and (iii) assessment based on national information and other sources (Table A.2).

11. The Guidelines also provide information on Nutrients discharged (ton/year) according to national calculations for several countries. However, these calculations are based on production data from over 25 years ago, therefore the information should be updated. Moreover, the data presented in the OSPAR guidelines [65] mainly concern aquaculture within the OSPAR Convention Area. Only a proportion of the data included activities within the Mediterranean Sea, while data for a few countries are missing completely.

12. The guidelines concluded that Nutrient discharges should be calculated separately for the various types of aquaculture; the main distinctions being between marine and brackish-water net cage farming, intensive farming in ponds, basins and channels, and extensive carp pond farming. However, the data that would enable such distinctions were not available [65].

¹⁶ https://ec.europa.eu/fisheries/cfp_en

¹⁷ http://ec.europa.eu/fisheries/cfp/aquaculture/index_en.htm

¹⁸ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0229&from=EN>

Table A.2: Methods for assessment of nutrient discharges from fish farming

Assessment based on the feed used¹
<p>The feed used is determined by:</p> <ul style="list-style-type: none"> • the species of fish farmed; • the type of farming (i.e. farm type, marine/freshwater, seasonal and climatic conditions, fish density); • the age of the fish (i.e. fry, adult); and the production objective (i.e. for food or as stock).
Assessment based on production²
<p>This method estimates approximate nutrient discharges from the non-converted nutrients per ton of fish produced. Information must be obtained from the producers. At the time OSPAR guidelines were created in 2000, various producers estimated that approximately 40 – 70 kg N and 4 – 11 kg P/ton of fish produced are not converted when using dry feed with a DOM of > 90%.</p>

¹ Notes: The guidelines [65] also provides information on the composition of the most frequently used feed which at the time (year 2000) was the same for marine and inland sectors (Table 6, pp. 14 of the OSPAR guidelines), and examples of calculation for both N and P releases; ² The Guidelines [65] highlighted that the assessments using this method are inexact because production-specific information such as aquaculture type, feeding method, the species farmed and its age structure, losses through mortality and the import/export of stock are not included in the calculation.

HELCOM Guidelines for the compilation for waterborne pollution load to the Baltic Sea (PLC-Water) [103]

13. This Guidelines describe methods for compilation of annual pollutant load for Fish farming plants in Section 3.1.3.3. For the quantification of discharges, the Guidelines highlight a distinction between two main production types: a) Plants without treatment (e.g., plants where the sludge is not collected or where the sludge is collected but discharged to the aquatic environment without treatment); and b) Plants with treatment (e.g., plants with permanent removal of sludge), where the N and P contents (and organic matter) in the sludge removed are quantified.

14. The two proposed quantification Approaches are:

- a. *Approach 1*, which is based on calculations from production parameters. The starting point is that information is available on both production and feed consumption at catchment level. The quantification method is based on mass balance equations.
- b. *Approach 2* is based on monitoring the discharge. It is practicable for ponds or other land-based production systems where the discharges are distinct point discharges (such as end of pipe/channel). The quantification of losses is also based on mass balance equation but on monitoring results³⁰.

15. In **Australia**, there are two main Guidelines documents, both developed 20 years ago [64][104]: 1) The Emissions Estimation Technique (EET) Manual for Aquaculture from Temperate Water Finfish Aquaculture provides a general overview of the temperate water finfish aquaculture methods and describes the procedures and methods for estimating emissions of Category 3 National Pollutant Inventory (NPI) listed substances, specifically total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) [64] It 2) The EET Manual for The Aquaculture of Barramundi, Prawns, Crocodiles, Pearl oysters, Red claw and Tropical abalone In Tropical Australia [104], which describes the procedures and methods relevant only to Tropical Aquaculture Facilities.

16. In the **USA**, the US Environmental Protection Agency (USEPA) developed Guidelines for the Final Effluent Limitations Guidelines and New Source Performance Standards for the Concentrated Aquatic Animal Production Point Source Category [66]. It describes industry processes, pollutants generated, available control and treatment technologies, the technical basis for the final rule, and costs of the rule.

17. In **Canada**, aquaculture is managed by different levels of government. Provincial governments are the primary regulators and leasing authorities for aquaculture (except in British Columbia and Prince Edward Island), while the federal government has responsibility for navigation, disease prevention affecting international trade, and the environment under the Fisheries Act and the Health of Animals Act.¹⁹ Measures to reduce detriment are listed in Section 7 of the Aquaculture Activities Regulations guidance document. However, no estimation techniques or methods are described. Recommendations and rules for management of organic wastes can be found at the Fisheries and Oceans Canada website.²⁰

C. Accuracy and uncertainty

18. The UNITAR Guidelines [105] highlighted that evaluation of availability and accuracy of information is a key when considering types of pollution sources to be included in the national PRTR system. However, the availability of information needed varies greatly between countries and for different regions within a country [105]. The Guidelines also pointed out that quality of inventories is influenced by several factors including 1) accuracy (the measure of ‘truth’ of a measure or estimate); 2) comparability (between different methods or datasets); 3) completeness (the proportion of all emissions sources that are covered by the inventory); and 4) representativeness (in relation to the study region and sources of emissions) [105]. The USEPA highlighted that prediction uncertainty is caused by natural process variability, and bias and error in sampling, measurement, and modeling [137].

19. According to the OECD Compendium [106], errors or uncertainty in the preparation of the inventories may include: 1) Emission factors (which do not reflect real life conditions); 2) Activity data that do not adequately reflect the study region (scaling down national or state activity data to smaller regions always results in decreased accuracy); 3) Spatial and temporal disaggregation may introduce errors that are difficult to quantify; 4) Sample surveys may be subject to sampling errors.

20. One of the key documents for Aquaculture, the OSPAR Guidelines [65] underlined that they were not able to produce complete and reliable datasets on production and nutrient discharges from aquaculture. Some of the reasons for the lack of reliability were 1) missing or incomplete responses to the questionnaire; 2) a lack of detail in the response (e.g., no distinction between marine and freshwater production and the respective feed used); 3) little or no distinction between the total production of a particular country, production within the OSPAR Convention Area and/or production within ‘eutrophication problem areas’; 4) differences in the quality and accuracy of the data supplied, 5) owing to variability in the calculation procedures and assessment methods used; and 6) data supplied for different years.

21. The OSPAR Guidelines [65] also highlighted that a further limitation is imposed by the wide range of aquaculture systems in use. Moreover, factors crucial to an assessment of this type of pollutants release are not reported statistically due to the large number of farms and species farmed. Variability in the technical equipment used (for example cleaning and filtration systems) and types of farm-specific feed and feeding techniques also affected data accuracy.

D. Quality control and quality assurance

22. The OECD Compendium [106] provides summary of quality assurance/quality control (QA/QC). They highlight the importance of proper documentation, which ensures reproducibility, transparency and assists future inventory updates. Documentation should include all raw data used, assumptions, steps in calculations, and communications with data providers and QA/QC processes.

¹⁹ Government of Canada (2021). Fisheries and Oceans Canada. Aquaculture Activities Regulations guidance document. url: <https://www.dfo-mpo.gc.ca/aquaculture/management-gestion/aar-raa-gd-eng.htm>

²⁰ <https://www.dfo-mpo.gc.ca/aquaculture/protect-protege/waste-dechets-eng.html>

Moreover, the important missing data (e.g., missing pollutants, missing source types) also need to be acknowledged and documented [106].

23. The International Plant Protection Convention (IPPC) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories provides a comprehensive description of the quality assurance/quality control (QA/QC) and verification which are also relevant to inventories of pollutants releases/discharges from aquaculture production and fish farming activities [107]. They also highlighted that well developed and established QA/QC contributes to the transparency, consistency, comparability, completeness, and accuracy of inventories (Box A.1).

Box A.1.: Definitions of QA/QC and Verification

Quality Control (QC) is a system of routine technical activities and procedures to assess and maintain the quality of the inventory. The QC system is compiled by the inventory team and is designed to: (i) Provide routine and consistent checks to ensure data integrity, correctness, and completeness; (ii) Identify and address errors and omissions; and (iii) Document and archive inventory material and record all activities. QC activities comprise general methods such as accuracy checks on data acquisition and calculations, and the use of approved standardized procedures. QC activities also include technical reviews of categories, activity data, emission factors, other estimation parameters, and methods.

Quality Assurance (QA) is a system of review procedures conducted by independent third parties. The purpose of reviews is to verify that measurable objectives (data quality objectives) are met, and to ensure that the inventory represents the best possible estimates of emissions and removals given the current state of scientific knowledge and data availability and support the effectiveness of the QC programme.

Verification refers to the collection of activities and procedures conducted during the planning and development stage, or after the completion of an inventory that can help to establish its reliability for the intended applications of the inventory.

Annexe III

Aperçu des techniques d'estimation des rejets et des méthodologies appliquées pour l'estimation des rejets de pollution du secteur de l'aquaculture (en anglais seulement)

A. Brief Overview

1. Replacing marine ingredients with plant material in the feed results in introduction of pesticides used in terrestrial agriculture in aquaculture production facilities globally [28-32][108]. The aquaculture feed includes soybeans, maize and rice [8-10], with soybean meal representing about 25% total compound aquafeeds by weight [5].

3. The main source of persistent organic pollutants (POPs) in farmed fish, in particular farmed Atlantic salmon are fish oils, obtained from pelagic fish species, used in fish feed. Oil spill accidents are among the most concerning exposure events for Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) pollution of aquatic environments [109-112]. Hydrocarbon chemicals are major components of crude oil and are classified as PAHs, aliphatic saturated hydrocarbons, aliphatic unsaturated hydrocarbons, and alicyclic saturated hydrocarbons [109-112]. The impact of these four categories of PAHs on the ecosystem is especially concerning because of their carcinogenicity [112-113]. Several studies reported PAHs in fish in various areas of Mediterranean Sea [25] [110-120].

4. Microplastics may enter aquatic environments through different pathways, and they have occurred in all environmental matrices (beaches, sediments, surface waters and water column). Microplastic exposure potential in marine fish, for example, is likely to arise from ingestion of particles in the water column or on the seafloor resembling prey or by ingesting prey that previously ingested microplastics themselves [121]. The exposure can also occur via feed. About 25% of global commercial marine fisheries landings are used to produce fishmeal and fish oil [121-122]. Recent research has shown that fishmeal is both a source of microplastics to the environment, and directly exposes organisms for human consumption to these particles [121-124]. Thiele et al. [121] made a conservative estimate that over 300 million microplastic particles (mostly < 1 mm) could be released annually to the oceans through marine aquaculture. Due to their widespread and increasing presence in both freshwater and marine environments, and their potential hazard risk to the marine environment via ingestion and accumulation of PBTs, microplastics have emerged as one of the most concerning environmental problems in the aquatic ecosystem [121-126].

5. Apart from the main pollutants described in the main document (Sections 1.3.2.1 to 1.3.2.4), all of the above pollutants described above accumulate in sediments [47-52] [59-61][118][127-128].

Pesticides

1. The main sources of pesticides in aquaculture production, in particular salmon, is through fish feed and also to control parasites²¹ [24-25] [28-32]. The use of pesticides in fish feed, in particular farmed salmon has caused an increased concern regarding their potential effects on human health in recent years [24-25] [28-32]. It has been reported that feed used in the seawater production phase of Atlantic salmon aquaculture typically contains 70% plant ingredients [63][129]. In Asia, Cheung et al [130] reported highly elevated concentrations of organochlorine pesticides (OCPs) in fish collected from the fishponds located in Pearl River Delta (PRD). The concentrations of OCPs in human tissues (e.g. milk and plasma) were significantly correlated with the frequency of fish consumption in both Hong Kong and Guangzhou populations [28][131]. In Europe, recent wide-scale screening of Atlantic salmon feeds has shown that they contain chlorpyrifos-methyl (CPM) [108][132]. Other compound found was Chlorpyrifos (CPF) a widely used agricultural organophosphorus pesticide (OP) that can be highly toxic to fish [108].

2. Pesticides pollution of fish is becoming a problem of increasing concern in the Mediterranean Sea. Pesticide residues (Metribuzin DADK, propamocarb HCl, and piperonyl butoxide (PBO)) were found in muscles of several marine fish species and seaweeds in Mediterranean (Iskenderun Bay, Turkey) [133]. Polychlorinated biphenyl (PCB) and OCP concentrations were determined in livers of two deep-sea fish species (roughsnout grenadier and hollowsnout grenadier), from the Adriatic Sea [134]. PCBs and Organochlorine Pesticides (OCPs) were also detected in the sediments and *Siganus rivulatus* (marble spinfoot) from two areas along the Egyptian Mediterranean Coast [127], Greece [135], Italy [136], Spain [137], France [128]. Ibrahim et al [138] found that 27 freshwater fish species

²¹ Caligus or "sea louse" is a small crustacean that attaches to the surface of the skin and gills of salmon, generating significant injuries to the fish.

that are native to Europe and widespread in the EU streams, ditches or ponds in agricultural landscapes are at the elevated risk of being exposed to pesticides.

Persistent organic pollutants (POPs)

3. Persistent organic pollutants (POPs) are toxic chemicals that adversely affect human health and the environment around the world and are listed as pollutants of concern in the LBS protocol. Fish can accumulate high amounts of POPs and Hg, and therefore can be the sources of their entry in human organism [117-118][139]. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs), polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) (collectively referred to as dioxins) highly lipophilic and accumulate in the fatty tissue of humans and animals and thus in the fatty fish livers [25]. Several studies demonstrated that the concentrations of organic contaminants in cod livers depend on the fishing area [25][120].

4. The main source of persistent organic pollutants (POPs) in farmed fish, in particular farmed Atlantic salmon are fish oils, obtained from pelagic fish species, used in fish feed. Oil spill accidents are among the most concerning exposure events for Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) pollution of aquatic environments [109-112]. Hydrocarbon chemicals are major components of crude oil and are classified as PAHs, aliphatic saturated hydrocarbons, aliphatic unsaturated hydrocarbons, and alicyclic saturated hydrocarbons [109-112]. The impact of these four categories of PAHs on the ecosystem is especially concerning because of their carcinogenicity [112-113][111]. Several studies reported PAHs in fish in various areas of Mediterranean Sea [25] [108-120].

Microplastics

5. Microplastics are typically defined as plastic items which measure less than 5 mm in their longest dimension and include also nanoplastics (which are less than 100 nanometres long). These plastic items may be manufactured or may result from the degradation and fragmentation of larger plastic items (defined as secondary micro- and nanoplastics). Microplastics contain a mixture of various chemicals and additives from manufacturing process, and they can also efficiently sorb (adsorb or absorb) persistent, bioaccumulative and toxic contaminants (PBTs) from the environment [121-126].

6. Following Global Oceans Action Summit for Food Security and Blue Growth in 2014 recommendations, FAO, The International Maritime Organization (IMO) and UNEP worked together with the Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection (GESAMP) to improve the knowledge base on microplastics in the marine environment and provide policy advice on this topic [125].

B. Summary of techniques used to estimate releases of pesticides and persistent organic compounds (POPs) from the aquaculture sector

7. There are no techniques for estimation of the releases of pesticides and POPs as such, however, this document postulates some methods which could be evaluated for making such estimations. It should be noted that, these estimation techniques need to be further tested.

8. Similarly to nutrients, metals and TOC, pesticides and persistent organic compounds (POPs) entering aquaculture production facilities via fish feed, chemicals (medications, disinfectants, and antifoulants) and could be, unintentionally, released to the environment via uneaten food and fish faecal material.

9. Therefore, as highlighted earlier, determining the feed content and the quantity of its ingredients from the feed suppliers is key [19-22][65-66]. A particularly important parameter is the feed conversion ratio (FCR), determined as:

$$\text{FCR} = \text{Dry weight of feed applied/Wet weight of fish gained} \quad (\text{Equation 4.21.})$$

10. Most of the techniques used to estimate releases of nutrients, TOC and metals (e.g. Equations 4.3 to 4.5, 4.8, 4.9-4.10, 4.12, 4.15 to 4.20) could be applied to estimate pesticides and persistent

organic compounds (POPs), where nutrients content/concentration would be substituted by the pollutant in question (i.e. pesticides, POPs), **though they would need to be tested.**

11. For example, if we follow the same analogy of techniques proposed for nutrients, a simple equation for nutrient discharges (equation 4.4.) proposed by OSPAR guidelines, an equation could be tested for determination of organic chemical releases:

$$OC_{\text{feed}} = OC_{\text{fish}} + OC_{\text{rel}} \quad (\text{Equation 4.22})$$

where:

OC_{feed} = organic chemical content in feed²²

OC_{fish} = Organic chemical content converted to fish biomass (OC_{fish}) or

OC_{rel} = unconverted organic chemical released into the water,

Pesticides and POPs

12. As mentioned above (paragraphs 7 and 8) equation 4.22 could also be used for determination of POPs, **though it would need to be tested.** Several authors developed models with the aim of predicting bioaccumulation of organic chemicals in aquatic food-webs in freshwater [71-74].

13. Mackay and Fraser [72] conducted an extensive literature review of mechanisms and models used for predictions and estimates of persistent organic chemicals bioaccumulation in fish (which would be OC_{fish}) and suggested a new empirical model for determination of bioconcentration (**Tier 1**) and mechanistic model for estimates of bioaccumulation (**Tier 2**). The authors [72] defined *bioconcentration* as the uptake of chemical by absorption from the water can only occur via the respiratory surface and/or the skin, and thus results in the chemical concentration in an aquatic organism being greater than that in water. The bioconcentration factor (BCF) is defined as the ratio of the chemical concentration in an organism C_B , to the total chemical concentration in the water C_{WT} , or to C_{WD} , the freely dissolved chemical concentration in water.

14. *Bioaccumulation* (BAF) is the process which causes an increased chemical concentration in an aquatic organism compared to that in water, due to uptake by all exposure routes including dietary absorption, transport across respiratory surfaces and dermal absorption. *Bioaccumulation can thus be viewed as a combination of bioconcentration and food uptake.*

15. The authors [72] highlighted that bioaccumulation is particularly relevant for estimates of pesticides and POPs releases from aquaculture production facilities. The proposed models are summarized in Table 4.1. below.

16. In 2009, the US EPA Office of Pesticide Programs' Environmental Fate and Effects Division scientists developed KABAM (K_{ow} (based) Aquatic BioAccumulation Model) to estimate potential bioaccumulation of hydrophobic organic pesticides in freshwater aquatic food webs and subsequent risks to mammals and birds [73-74]. The KABAM model is composed of two parts: i) bioaccumulation model estimating pesticide concentrations in aquatic organisms, and ii) a risk component translating exposure and toxicological effects of a pesticide into risk estimates for mammals and birds consuming contaminated aquatic prey.²³ A detailed description of the model can be found on the USA EPA website [73-74].

²² This information can be obtained from the fish feed suppliers. Within the EU, According to Regulation (EC) No 396/2005 on maximum residue levels of pesticides in or on food and feed, Member States have to monitor pesticide residue levels in food samples including aquaculture products and submit the monitoring results to EFSA and the European Commission. http://publications.europa.eu/resource/cellar/7deccc8e-5c03-11eb-b487-01aa75ed71a1.0006.03/DOC_1

²³ <https://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/kabam-version-10-users-guide-and-technical#Section1>

Table 4.1: Tier 1 and Tier 2 Models for Bioconcentration and Bioaccumulation of persistent organic chemicals in fish

Tier 1 Empirical model of Bioconcentration $BCF = C_B/C_{WD} = (1 + L \cdot K_{OW})$, where L is lipid volume fraction, C_{WD} is dissolved concentration or equivalently for fugacity in biota f_B and in water f_W $f_B = f_W$ where $f_W = C_W/Z_W$, $f_B = C_B/Z_B$ and $BCF = Z_B/Z_W = (1 + LK_{OW})$ <i>Assumptions:</i> Partitioning is predominantly to lipids, no ionization, no metabolism no biomagnification, 100% bioavailability, and equilibrium applies. <i>Criteria:</i> $BCF > 5000$ or $K_{OW} > 100000$	Tier 2 Mechanistic model of Bioaccumulation $BAF = C_B/C_{WD} = (k_1 + k_A C_A/C_{WD}) / (k_2 + k_M + k_E)$, where k_1 is the respiratory uptake rate constant, k_A is the food consumption rate constant, k_2 is the respiratory clearance rate constant = k_1/BCF k_M is the metabolic rate constant, and k_E is the egestion rate constant = $k_A/4$ <i>Assumptions:</i> Partitioning is predominantly to lipids, no ionization, no metabolism, no biomagnification, 100% bioavailability, and equilibrium applies. <i>Criteria:</i> $BCF > 5000$ or $K_{OW} > 100000$
<p>K_{OW} = octanol²⁴-water partition coefficient²⁵ represents the ratio of concentrations of a compound between two phases, one being octanol and the other water. It serves as a measure of the relationship between lipophilicity (fat solubility) and hydrophilicity (water solubility) of a substance.</p> <p><i>Fugacity</i> is partial pressure, a criterion of equilibrium analogous to temperature in the case of heat transfer.</p> <p>Z_w and Z_b are constants for water and biota, respectively. Z is a constant (units of mol/m³ Pa) specific to the chemical, the phase in which it is dissolved or sorbed and temperature and can be calculated from physical and chemical properties.</p>	

²⁴ Octanol is any of four liquid alcohols C₈H₁₇OH derived from normal octane; Octane is a hydrocarbon and an alkane with the chemical formula C₈H₁₈, and the condensed structural formula CH₃(CH₂)₆CH₃. It has many structural isomers that differ by the amount and location of branching in the carbon chain. Octane is also an agent designed to control the life of pesticides: https://indigospecialty.com.au/wp-content/uploads/2019/11/ISP-Octane-5L-Label_F090919.pdf

²⁵ <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/octanol-water-partition-coefficient>

Annexe IV
Bibliographie

- [1] Schalekamp, D., van den Hill, K. and Huisman, Y. (2016). A Horizon Scan on Aquaculture 2015: Fish Feed. Brief for GSDR – 2016 Update. url: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1034769_Schalekamp%20et%20al._A%20Horizon%20Scan%20on%20Aquaculture%202015-Fish%20Feed.pdf
- [2] Babatunde Dauda, A., Abdullateef Ajadi, Adenike Susan Tola-Fabunmi, Ayoola Olusegun Akinwole (2019). Waste production in aquaculture: Sources, components and managements in different culture systems, *Aquaculture and Fisheries* 4(3): 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2018.10.002>.
- [3] Martins, C.I.M., Eding, E.H., Verdegem, M.C.J. , Heinsbroek, L.T.N., Schneider, O., Blancheton, J.P. et al. (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability *Aquacultural Engineering* 43 (3): 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002>
- [4] Tacon, A.G.J., Hasan, M.R., Allan, G., El-Sayed, A.-F., Jackson, A., Kaushik, S.J., Ng, W.-K., Suresh, V. & Viana, M.T. (2012). Aquaculture feeds: addressing the long-term sustainability of the sector. In R.P. Subasinghe, J.R. Arthur, D.M. Bartley, S.S. De Silva, M. Halwart, N. Hishamunda, C.V. Mohan & P. Sorgeloos (eds). *Farming the Waters for People and Food. Proceedings of the Global Conference on Aquaculture 2010, Phuket, Thailand. 22–25 September 2010.* pp. 193–231. FAO, Rome and NACA, Bangkok.
- [5] Tacon, A.G.J., Hasan, M.R. and Metian, M. (2011). Demand and supply of feed ingredients for farmed fish and crustaceans. Trends and prospects. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 564. url: <http://www.fao.org/3/ba0002e/ba0002e.pdf>
- [6] Miller, D. and Semmens, K. (2002). Waste management in aquaculture. *Aquaculture Information Series* (2002), pp. 1-10. #AQ02-1(January).
- [7] Read, P. and Fernandes, T. (2003). Management of environmental impacts of marine aquaculture in Europe. *Aquaculture* 226(1-4):139-163.
- [8] Tacon, A.G.J. & Metian, M. (2015). Feed Matters: Satisfying the Feed Demand of Aquaculture. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture* 23 (1): 1–10. doi:10.1080/23308249.2014.987209.
- [9] Tacon, A.G.J. & Metian, M. (2009). Fishing for aquaculture: non-food use of small pelagic forage fish – a global perspective. *Reviews in Fisheries Science* 17(3): 305-17. doi:10.1080/10641260802677074
- [10] Troell, M., Naylor, R.L., Metian, M., Beveridge, M., Tyedmers, P.H., Folke, C. and de Zeeuw, A. (2014). Does aquaculture add resilience to the global food system? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111(37):13257-63 doi:10.1073/pnas.1404067111.
- [11] Tacon, A.G.J. & Metian, M. (2008). Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: trends and future prospects. *Aquaculture* 285: 146–158.
- [12] Tacon, A.G.J., Metian, M. & Hasan, M.R. (2010). Feed ingredients and fertilizers for farmed aquatic animals: sources and composition. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 540. Rome, 210 pp.
- [13] Encarnação, P. (2015). Functional feed additives in aquaculture feeds. In: Nates, S.F. (2015). *Aquafeed Formulation*. Academic Press. 279 pp. url: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-18878-2>
- [14] Mente, E., Graham J. P., Begona Santos, M. and 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* 14:499–522. DOI 10.1007/s10499-006-9051-4
- [15] FAO (2009). Environmental impact assessment and monitoring in aquaculture Requirements, practices, effectiveness and improvements. Technical Report 527. 675 pages. <http://www.fao.org/3/i0970e/i0970e.pdf>
- [16] Jegatheesan, V., Shu, L. and Visvanathan, C. (2011). *Aquaculture Effluent: Impacts and Remedies for Protecting the Environment and Human Health*, Editor(s): J.O. Nriagu, Encyclopedia of Environmental Health, Elsevier 2011, Pages 123-135. ISBN 9780444522726, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00340-8>.
- [17] Verdegem, M.C.J. (2013). Nutrient discharge from aquaculture operations in function of system design and production environment. *Reviews in Aquaculture* 5(3):158-171.
- [18] Domínguez, L.M. and Martín, J.M.V. (2004). Aquaculture environmental impact assessment. *Waste Management and the Environment II*, V. Popov, H. Itoh, C.A. Brebbia & S. Kungolos (Editors). Pp. 321-333. url: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/WM04/WM04032FU.pdf>
- [19] Olsen, L.M., Holmer, M. and Olsen, Y. (2008). Perspectives of nutrient emission from fish aquaculture in coastal waters: Literature review with evaluated state of knowledge. DOI: 10.13140/RG.2.1.1273.8006
- [20] Ying Zhang et al. (2015). Environmental Resources Letters 10 04500. Nutrient discharge from China’s aquaculture industry and associated environmental impacts. url: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/4/045002/pdf>

- [21] Reid, G.K. (2007). Chapter One: Nutrient Releases from Salmon Aquaculture. In: Costa-Pearce B. (Ed.), *Nutrient Impacts of Farmed Atlantic Salmon (Salmo Salar) on Pelagic Ecosystems and Implications for Carrying Capacity*. World Wildlife Fund.
- [22] Tornero, V. and Hank, G. (2016). Identification of marine chemical contaminants released from sea-based sources. A review focusing on regulatory aspects. JRC Technical Report. 130 pp. <https://mcc.jrc.ec.europa.eu/documents/technicalreportmarinespecificcontaminants.pdf>
- [23] Alderman, D.J., Rosenthal, H., Smith, P., Steward, J. and Weston, D.. *Chemicals used in mariculture*. ICES-COOP. RES. REP. 100 pp. 1994.
- [24] Ole Jakob Nøstbakken, Helge T. Hove, Arne Duinker, Anne-Katrine Lundebye, Marc H.G. Berntssen, Rita Hannisdal, Bjørn Tore Lunestad, Amund Maage, Lise Madsen, Bente E. Torstensen, Kåre Julshamn (2015). Contaminant levels in Norwegian farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) in the 13-year period from 1999 to 2011. *Environment International* 74: 274-280. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.008>.
- [25] Horst Karl, Ulrike Kammann, Marc-Oliver Aust, Monika Manthey-Karl, Anja Lüth, Günter Kanisch (2016). Large scale distribution of dioxins, PCBs, heavy metals, PAH-metabolites and radionuclides in cod (*Gadus morhua*) from the North Atlantic and its adjacent seas. *Chemosphere* 149: 294-303. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.052>.
- [26] Jureša, D. and Blanuša, M. (2003). Mercury, arsenic, lead and cadmium in fish and shellfish from the Adriatic Sea. *Food Additives and Contaminants* 20 (3): 241-246.
- [27] Guerranti, C., Grazioli, E., Focardi, S., Renzi, M. and Perra, G. (2016). Levels of chemicals in two fish species from four Italian fishing areas. *Marine Pollution Bulletin* 111 (1–2): 449-452. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.07.002>.
- [28] Zhang Cheng, Wing-Yin Mo, Yu-Bon Man, Xiang-Ping Nie, Kai-Bing Li, Ming-Hung Wong (2014). Replacing fish meal by food waste in feed pellets to culture lower trophic level fish containing acceptable levels of organochlorine pesticides: Health risk assessments. *Environment International* 73: 22-27. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.07.001>.
- [29] Vidal, J. (2017). Salmon farming in crisis: 'We are seeing a chemical arms race in the seas'. url: <https://www.theguardian.com/environment/2017/apr/01/is-farming-salmon-bad-for-the-environment>
- [30] Kelly BC, Ikonomou MG, Higgs DA, Oakes J, Dubetz C. (2011). Flesh residue concentrations of organochlorine pesticides in farmed and wild salmon from British Columbia, Canada. *Environ Toxicology and Chemistry* 30(11):2456-64. doi: 10.1002/etc.662.
- [31] Fernandez, C. and Sanhueza, S. (2019). Consequences of the use of pesticides in salmon farming in Chile. url: <http://latinamericanscience.org/2019/05/consequences-use-pesticides-salmon-farming-chile/>
- [32] Edwards, R. (2021). Farm salmon is now most contaminated food on shelf. url: <http://www.eurocbc.org/page223.html>, accessed February 21, 2021.
- [33] Yisheng P., Xulin L I, Kalan W U, Yongui P. and Guizhu, C. (2009) Effect of an integrated mangroves-aquaculture system on aquaculture health. *Frontiers of Biology in China* 4(4): 579-784.
- [34] Bhavsar, Dhara O, H. Pandya and Y. Jasrai (2016). Aquaculture and Environmental Pollution -A Review work. *International journal of scientific research in science, engineering and technology* 2: 40-45.
- [35] Gyllenhammar, A. and Hakanson, L. (2005). Environmental consequence analyses of fish farm emissions related to different scales and exemplified by data from the Baltic—a review. *Marine Environmental Research*, 60 (2): 211–243.
- [36] Focardi, S., Corsi, I. and Franchi, E. (2005). Safety issues and sustainable development of European aquaculture: new tools for environmentally sound aquaculture. *Aquaculture International* 13 (1-2): 3–17.
- [37] Martinez-Porchas, M. and Martinez-Cordova, L.R. (2012). World Aquaculture: Environmental Impacts and Troubleshooting Alternatives. *The Scientific World Journal* Volume 2012, Article ID 389623, 9 p. doi:10.1100/2012/389623.
- [38] Zhou, L. and Boyd, C.E. (2015). Ammonia Nitrogen Management in Aquaculture Ponds. *Aquaculture Magazine*. October 2015.
- [39] Sidoruk, M. and Cymes, I. (2018). Effect of Water Management Technology Used in Trout Culture on Water Quality in Fish Ponds. *Water* 10(9), 1264; <https://doi.org/10.3390/w10091264>.
- [40] Sindilariu, P.D.; Brinker, A.; Reiter, R. Waste and particle management in a commercial, partially recirculating trout farm. *Aquatic Engineering* 41:127–135.
- [41] Bergero, D., Forneris, G., Palmegiano, G.B., Zoccaratoc, I., Gasco, L. and Sicuro, B. (2001). A description of ammonium content of output waters from trout farms in relation to stocking density and flow rates. *Ecological Engineering* 17: 451 – 455.

- [42] Naylor, S., Drizo, A., Brisson, J. and Comeau, Y. (2003). Treatment of freshwater fish farm effluent using constructed wetlands: the role of plants and substrate. *Water Science and Technology* 48 (5): 215-222.
- [43] Drizo, A. (2019). *Phosphorus Pollution Control: Policies and Strategies* pp. 176. Wiley-Blackwell, October 2019. ISBN: 978-1-118-82548-8. |url: <https://www.wiley.com/en-us/Phosphorus+Pollution+Control%3A+Policies+and+Strategies-p-9781118825426>
- [44] Kelly, L.A., Bergheim, A. and Hennessy, M.M (1994). Predicting output of ammonium from fish farms. *Water Research* 28 (6):1403-1405. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90307-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90307-7).
- [45] Bouwman, L., Beusen, A., Glibert, P.M., Overbeek, C., Pawlowski, M., Herrera, J., Mulsow, S., Yu, R. and Zhou, M. (2013). Mariculture: significant and expanding cause of coastal nutrient enrichment. *Environmental Research Letters* 8: 044026. doi:10.1088/1748-9326/8/4/044026
- [46] Glibert, P.M. and Burford, M.A. (2017). Changing Nutrient Loads and Harmful Algal Blooms: Recent Advances, New Paradigms, and Continuing Challenges. *Oceanography* 30 (1): 58–69. JSTOR, www.jstor.org/stable/24897842. Accessed 23 Feb. 2021.
- [47] Tornero, V. and Hank, G. (2016). Chemical contaminants entering the marine environment from sea-based sources: A review with a focus on European seas. *Marine Pollution Bulletin* 112 (2016) 17–38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.091>.
- [48] Dean, R.J., Shimmield, T.M. and Black, K.D. (2007). Copper, zinc and cadmium in marine cage fish farm sediments: An extensive survey. *Environmental Pollution* 145 (1): 84-95.
- [49] Grigorakis, K., Rigos, G. (2011). Aquaculture effects on environmental and public welfare – the case of Mediterranean mariculture. *Chemosphere* 855, 899–919. doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.07.015.
- [50] Burrige, L.E., Weis, J.S., Cabello, F., Pizarro, J., Bostik, K. (2010). Chemical use in salmon aquaculture: a review of current practices and possible environmental effects. *Aquaculture* 306, 7–23.
- [51] Simpson, S.L., Spadaro, D.A., O'Brien, D. (2013). Incorporating bioavailability into management limits for copper in sediments contaminated by antifouling paint used in aquaculture. *Chemosphere* 93: 2499–2525.
- [52] Clement, D., Keeley, N. and Sneddon, R. (2010). Ecological Relevance of Copper (Cu) and Zinc (Zn) in Sediments Beneath Fish Farms in New Zealand. Prepared for Marlborough District Council. Report No. 1805. 48 p. url: <https://envirolink.govt.nz/assets/Envirolink/877-MLDC48-Ecological-relevance-of-Cu-and-Zn-in-sediments-beneath-fish-farms-in-NZ.pdf>
- [53] Willemsen, P.R. (2005). Biofouling in European aquaculture: is there an easy solution? *European Aquaculture Society (EAS) Special Publication* 35: 82–87.
- [54] Nikolaou, M., Neofitou, N., Skordas, K., Castritsi-Catharios, I., Tziantziou, L. (2014). Fish farming and anti-fouling paints: a potential source of Cu and Zn in farmed fish. *Aquaculture Environment Interactions* 5:163–171.
- [55] Guardiola, F.A., Cuesta, A., Meseguer, J., Esteban, M.A. (2012). Risks of using antifouling biocides in aquaculture. *International Journal of Molecular Science* 13:1541–1560.
- [56] Muñoz, I.; Martínez Bueno, M.J.; Agüera, A.; Fernández-Alba, A.R. (2010). Environmental and human health risk assessment of organic micro-pollutants occurring in a Spanish marine fish farm. *Environmental Pollution* 158: 1809–1816.
- [57] Hites, R.A., Foran, J.A., Carpenter, D.O., Hamilton, M.C., Knuth, B.A., Schwager, S.J. (2004). Global assessment of organic contaminants in farmed salmon. *Science* 303: 226–229.
- [58] Soon, Z.Y., Jung, J.H., Jang, M. et al. (2019). Zinc Pyrithione (ZnPT) as an Antifouling Biocide in the Marine Environment—a Literature Review of Its Toxicity, Environmental Fates, and Analytical Methods. *Water Air Soil Pollution* 230: 310. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4361-0>
- [59] Sowles, J. W., L. Churchill, and W. Silvert (1994). The effect of benthic carbon loading on the degradation of bottom conditions under farm sites, p. 31-46. In B. T. Hargrave [ed]. *Modelling Benthic Impacts of Organic Enrichment from Marine Aquaculture*. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1949:125 p. url: <https://www.maine.gov/dmr/aquaculture/reports/documents/benthic%20C%20loading%201994.pdf>
- [60] Belias, C.V., Bikas, V.G., Dassenakis, M.J. et al. Environmental impacts of coastal aquaculture in eastern Mediterranean bays the case of Astakos gulf, Greece. *Environ Sci & Pollut Res* 10, 287 (2003).
- [61] Mahmood, T., Fang, J., Jiang, Z., Ying, W. and Zhang, J. (2017). Seasonal distribution, sources and sink of dissolved organic carbon in integrated aquaculture system in coastal waters. *Aquaculture International* (2017) 25:71–85. DOI 10.1007/s10499-016-0014-0.
- [62] Mostofa KMG, Liu C, Mottaleb MA, Wan G, Ogawa H, Vione D, Yoshioka T, Wu F. (2013) Dissolved organic matter in natural waters. In: Mostofa KMG, Yoshioka T, Mottaleb MA, Vione D (eds).

Photobiogeochemistry of organic matter: principles and practices in water environments. Environmental science and engineering, Springer, Berlin, pp 1–137.

- [63] Gunnvør á Nori, Glud, R.N., Gaard, E. and Simonsen, K. (2011). Environmental impacts of coastal fish farming: carbon and nitrogen budgets for trout farming in Kaldbaksfjørur (Faroe Islands). *Marine Ecology Progress Series* 431: 223–241. doi: 10.3354/meps09113.
- [64] Environment Australia (2001). Emissions Estimation Technique Manual for Aquaculture from Temperate Water Finfish Aquaculture (Environment Australia, Canberra, Australia).
<http://www.npi.gov.au/system/files/resources/e2fdd93d-2693-7df4-89fb-5b5a849b730d/files/aquatemp.pdf>
- [65] OSPAR Commission (2000). Nutrient Discharges from Fish Farming in the OSPAR Convention Area
<https://www.ospar.org/documents?v=6911>
- [66] US EPA (2004). Technical Development Document for the Final Effluent Limitations Guidelines and New Source Performance Standards for the Concentrated Aquatic Animal Production Point Source Category (Revised August 2004). url: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-11/documents/caap-aquaculture_tdd_2004.pdf
- [67] Islam, M.S. (2005). Nitrogen and phosphorus budget in coastal and marine cage aquaculture and impacts of effluent loading on ecosystem: review and analysis towards model development. *Marine Pollution Bulletin* 50: 48–61.
- [68] Foy, R.H. and Rosell, R. (1991). Loadings of nitrogen and phosphorus from a Northern Ireland fish farm. *Aquaculture* 96:17–30.
- [69] Earley PJ, Swope BL, Barbeau K, Bundy R, McDonald JA, Rivera-Duarte I. (2014). Life cycle contributions of copper from vessel painting and maintenance activities. *Biofouling*. 30:51–68. doi:10.1080/08927014.2013.841891
- [70] Patrick J. Earley, Brandon L. Swope, Marianne A. Colvin, Gunther Rosen, Pei-Fang Wang, Jessica Carilli & Ignacio Rivera-Duarte (2020). Estimates of environmental loading from copper alloy materials, *Biofouling*, 36:3, 276-291, DOI: 10.1080/08927014.2020.1756267
- [71] Gobas, F.A.P.C. (1993). A model for predicting the bioaccumulation of hydrophobic organic chemicals in aquatic food-webs: application to Lake Ontario. *Ecological Modelling* 69 (1–2):1-17.
[https://doi.org/10.1016/0304-3800\(93\)90045-T](https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)90045-T).
- [72] Mackay, D. and Fraser, A. (2000). Bioaccumulation of persistent organic chemicals: mechanisms and models. *Environmental Pollution* 110: 375-391.
- [73] Arnot, J.A. and Gobas, F.A.P.C. (2004). A food web bioaccumulation model for organic chemicals in aquatic ecosystems. *Environmental Toxicology and Chemistry* 23 (10): 2343-2355.
<https://doi.org/10.1897/03-438>
- [74] USA EPA (2021). KABAM Version 1.0 User's Guide and Technical Documentation - Appendix A - Description of Bioaccumulation Model (Kow (based) Aquatic BioAccumulation Model). url: <https://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/kabam-version-10-users-guide-and-technical-7>
- [75] FAO (2018). 2018 The State of World Fisheries and Aquaculture. Meeting the Sustainable Development Goals. 227 pp. url: <http://www.fao.org/3/i9540en/i9540en.pdf>
- [76] FAO (2020). 2020 The State of World Fisheries and Aquaculture. Sustainability in Action. 224 pp. url: <http://www.fao.org/3/ca9229en/ca9229en.pdf>
- [77] OECD (2021). OECD-FAO Agricultural Outlook 2020-2029. Chapter 8 Fish. url: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/4dd9b3d0-en/index.html?itemId=/content/component/4dd9b3d0-en>
- [78] FAO (1979). Development of Coastal Aquaculture in the Mediterranean region. Report of a mission to formulate a cooperative programme of activities October 1978 – February 1979 url: <http://www.fao.org/3/N7865E/N7865E00.htm>
- [79] Basurco, B. (1996). Mediterranean Aquaculture: Marine Fish Farming Development. url: <https://www.oceandocs.org/bitstream/handle/1834/544/BBasurco.pdf?sequence=1>
- [80] Barazi-Yeroulanos, L. (2010). Aquaculture In The Mediterranean. url: <https://thefishsite.com/articles/aquaculture-in-the-mediterranean>
- [81] FAO (2018). General Fisheries Commission for the Mediterranean. Report of the twentieth session of the Scientific Advisory Committee on Fisheries, Tangiers, Morocco, 26-29 June 2018. FAO Fisheries and Aquaculture Report No. R1245. Rome, Italy. 225 pp.

- [82] Boudouresque C-F, Blanfuné A, Pergent G, Pergent-Martini C, Perret-Boudouresque M and Thibaut T (2020). Impacts of Marine and Lagoon Aquaculture on Macrophytes in Mediterranean Benthic Ecosystems. *Frontiers in Marine Science* 7:218. doi: 10.3389/fmars.2020.00218
- [83] Massa, F., Onofri, L., and Fezzardi, D. (2017). Aquaculture in the Mediterranean and the Black Sea: a blue growth perspective. In: Bunes, P. A. L. D., Svernnson, L. E. and Markadya, A. (eds). *Hanbook on the Economics and Management of Sustainable Oceans*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, pp. 93–122.
- [84] Kaleem, O., Bio, A-F. and Sabi, S. (2020). Overview of aquaculture systems in Egypt and Nigeria, prospects, potentials, and constraints. *Aquaculture and Fisheries*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2020.07.017>.
- [85] Feidi, I. (2018). Will the new large-scale Aquaculture projects make Egypt self-sufficient in fish supplies? *Mediterranean Fisheries and Aquaculture Research* 1(1): 31–41. url: <https://dergipark.org.tr/en/pub/medfar/issue/34642/364877>
- [86] Elsheshtawy, A., Yehia, N., Elkemary, M., & Soliman, H. (2019). Investigation of Nile tilapia summer mortality in Kafr El-sheikh governorate, Egypt. *Genetics of Aquatic Organisms* 3(1):17–25. https://www.genaqua.org/uploads/pdf_26.pdf
- [87] JRC (2019). European and Mediterranean Aquaculture data collection and reporting under the Scientific, Technical and Economic Committee for Fisheries (STECF). *MedAid Mini-Reviews and Opinion Pieces*. url: <http://www.medaid-h2020.eu/index.php/2019/02/25/aquaculture-data-collection-stecf/>.
- [88] Duarte, C.M., Holmer, M., Olsen, Y., Soto, D., Marba, N, Guiu, J, Black, K. & Karakassis, I. 2009. Will the oceans feed humanity? *BioScience*, 59(11): 967–976. url: <https://academic.oup.com/bioscience/article/59/11/967/251334>
- [89] Lucas, J. and Southgate, P. (2012) *Aquaculture: farming aquatic animals and plants*. Wiley-Blackwell, West Sussex, UK, pp. 1-648.
- [90] Bardach, J.E. (1997) (Ed). *Sustainable Aquaculture*. John Wiley and Sons Inc. 251 pp.
- [91] Baluyut, E.A. (1989). *Aquaculture Systems and Practices: A Selected Review*. Report Number ADCP/REP/89/43. <http://www.fao.org/3/t8598e/t8598e00.htm#Contents>
- [92] La Don, S. (1992). A Basic Overview of Aquaculture. url: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.503.1826>
- [93] Froehlich H.E., Smith, A., Gentry, R.R. and Halpern B.S. (2017). Offshore Aquaculture: I Know It When I See It. *Frontiers in Marine Sciences* 4:154. doi: 10.3389/fmars.2017.0015
- [94] Halwart M, Soto D, and Arthur JR (2007). *Cage aquaculture: regional reviews and global overview: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Technical Paper 498*. pp. 241.
- [95] Funge-Smith, S. and Phillips, M.J. (2001). *Aquaculture Systems and Species*. In: NACA/FAO, 2001. *Aquaculture in the Third Millennium*. Subasinghe, R.P., Bueno, P., Phillips, M.J., Hough, C., McGladdery, S.E., & Arthur, J.E. (Eds.) *Technical Proceedings of the Conference on Aquaculture in the Third Millennium*, Bangkok, Thailand. 20-25 February 2000. NACA, Bangkok and FAO, Rome. 471pp. url: <http://www.fao.org/3/AB412E/ab412e07.htm>
- [96] Subasinghe, R.P., Bueno, P., Phillips, M.J., Hough, C., McGladdery, S.E., & Arthur, J.E. (2001). (Eds.) *Technical Proceedings of the Conference on Aquaculture in the Third Millennium*, Bangkok, Thailand. 20-25 February 2000. NACA, Bangkok and FAO, Rome. 471pp. url: <http://www.fao.org/3/AB412E/ab412e01.htm>
- [97] Ashton, E.A. (2008). The impact of shrimp farming on mangrove ecosystems. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 3 (003). url: doi: 10.1079/PAVSNNR20083003.
- [98] Doyle, A. (2012). Mangroves under threat from shrimp farms: U.N. url: <https://www.reuters.com/article/us-mangroves-idUSBRE8AD1EG20121114>
- [99] Bales, K. (2016). How Hunger for Shrimp and Slavery Destroy Mangroves. url: <https://www.scientificamerican.com/article/how-hunger-for-shrimp-and-slavery-destroy-mangroves-excerpt/>
- [100] Cole, D.W., Cole, R., Gaydos, S.J., Gray, J., Hyland, G., Jacques, M.L., Powell-Dunford, Charu Sawhney, N. and Au, W.W. (2009). Aquaculture: Environmental, toxicological, and health issues, *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 212 (4): 369-377. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2008.08.003>.
- [101] Siemers, H. (2009). A European Integrated Maritime Policy: An Innovative Approach to Policy-Making. *Ocean Yearbook Online* 23 (1): 231–249. DOI: <https://doi.org/10.1163/22116001-90000195>.

- [102] Ross, L.G., Telfer, T.C., Falconer, L., Soto, D., Aguilar-Manjarrez, J., Asmah, R., et al. (2013). Carrying capacities and site selection within the ecosystem approach to aquaculture. In L.G. Ross, T.C. Telfer, L. Falconer, D. Soto & J. Aguilar-Manjarrez, eds. Site selection and carrying capacities for inland and coastal aquaculture, pp. 19–46. FAO/Institute of Aquaculture, University of Stirling, Expert Workshop, 6–8 December 2010. Stirling, the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland. FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings No. 21. Rome, FAO. 282 pp. <http://www.fao.org/3/i3099e/i3099e02.pdf>
- [1103] HELCOM (2021). Guidelines for the compilation for waterborne pollution load to the Baltic Sea (PLC-Water). http://archive.iwlearn.net/helcom.fi/groups/monas/en_GB/plcwaterguide/index.html, accessed February 24th, 2021.
- [1104] Environment Australia (2000), Emission Estimation Technique Manual for The Aquaculture of Barramundi, Prawns, Crocodiles, Pearl oysters, Red claw and Tropical abalone In Tropical Australia (Environment Australia, Canberra, Australia). <http://www.npi.gov.au/system/files/resources/70e0763a-7f21-0674-3d2d-d2b1c7d441ad/files/aquatropic.pdf>
- [1105] UNITAR (1998). UNITAR Series of PRTR Technical Support Materials - No. 3. Guidance on Estimating Non-point Source Emissions. url: https://cwm.unitar.org/cwmplatformscms/site/assets/files/1264/prtr_tech_support_3_nov2003.pdf
- [106] OECD (2020). Resource Compendium of PRTR release estimation techniques, Part II: Summary of Diffuse Source Techniques, Series on Pollutant Release and Transfer Registers No. 19. ENV/JM/MONO (2020)30. Published 25th November 2020.
- [107] IPCC (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Volume 1 General Guidance and Reporting. Chapter 6: Quality Assurance/Quality Control and Verification. Published: IPCC, Switzerland. url: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol1.html>
- [108] Olsvik PA, Larsen AK, Berntssen MHG, Goksøyr A, Karlsten OA, Yadetie F, Sanden M and Kristensen T (2019). Effects of Agricultural Pesticides in Aquafeeds on Wild Fish Feeding on Leftover Pellets Near Fish Farms. *Frontiers in Genetics* 10:794. doi: 10.3389/fgene.2019.00794.
- [109] Koyama, J., Uno, S., Nagai, Y., Anukorn, B. (2016). Early monitoring of spilled oil contamination in Rayong, Thailand. *Japan Journal of Environmental Toxicology* 19: 25–33.
- [110] Ladwani, K.D., Ladwani, K.D., Ramteke, D.S. (2013). Assessment of poly aromatic hydrocarbon (PAH) dispersion in the near shore environment of Mumbai, India after a large-scale oil spill. *Bulletin of Environmental Contaminat Toxicology* 90: 515–520.
- [111] Erin L. Pulster, Adolfo Gracia, Maickel Armenteros, Brigid E. Carr, Justin Mrowicki, Steven A. Murawski (2020). Chronic PAH exposures and associated declines in fish health indices observed for ten grouper species in the Gulf of Mexico. *Science of The Total Environment* 703: 135551. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135551>.
- [112] Honda, M. and Suzuki, N. (2020). Toxicities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons for Aquatic Animals. *International Journal of Environmental Research and public Health* 17: 1363. doi:10.3390/ijerph17041363.
- [113] Rengarajan, T., Rajendran, P., Nandakumar, N., Lokeshkumar, B., Rajendran, P., Nishigaki, I. (2015). Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons with special focus on cancer. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine* 5:182–189.
- [114] Nagel, F., Kammann, U., Wagner, C., Hanel, R., 2012. Metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in bile as biomarkers of pollution in European eel (*Anguilla anguilla*) from German rivers. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 62: 254e263.
- [115] El Deeb, K.Z., Said, T.O., El Naggat, M.H. et al. (2007). Distribution and Sources of Aliphatic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments, Fish and Bivalves of Abu Qir Bay (Egyptian Mediterranean Sea). *Bull Environmental Contaminants Toxicology* 78:373–379. <https://doi.org/10.1007/s00128-007-9173-z>
- [116] Ferrante M, Zanghi G, Cristaldi A, Copat C, Grasso A, Fiore M, Signorelli SS, Zuccarello P, Oliveri Conti G. (2018). PAHs in seafood from the Mediterranean Sea: An exposure risk assessment. *Food Chem Toxicol.* 2018 May;115:385-390. doi: 10.1016/j.fct.2018.03.024. Epub 2018 Mar 24. PMID: 29580821.
- [1117] Barni MFS, Ondarza PM, Gonzalez M, Da Cuña R, Meijide F, Grosman F, Sanzano P, Lo Nostro FL, Miglioranza KSB (2016). Persistent organic pollutants (POPs) in fish with different feeding habits inhabiting a shallow lake ecosystem. *Science of Total Environment* 550: 900-909. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.176.

- [118] Solé M, Manzanera M, Bartolomé A, Tort L, Caixach J. Persistent organic pollutants (POPs) in sediments from fishing grounds in the NW Mediterranean: ecotoxicological implications for the benthic fish *Solea* sp. (2013). *Marine Pollution Bulletin* 67(1-2):158-65. doi: 10.1016/j.marpolbul.2012.11.018.
- [119] Julshamn, K., Duinker, A., Berntssen, M., Nilsen, B.M., Frantzen, S., Nedreaas, K., Maage, A. (2013). A baseline study of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans, non-ortho and mono-ortho PCBs, non-dioxin-like PCBs and polybrominated diphenyl ethers in Northeast Arctic cod (*Gadus morhua*) from different parts of the Barents Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 75, 250e258.
- [120] Karl, H., Lahrssen-Wiederholt, M. Dioxin and dioxin-like PCB levels in cod-liver and -muscle from different fishing grounds of the North- and Baltic Sea and the North Atlantic. *J. Verbr. Lebensm.* 4, 247 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00003-009-0308-5>.
- [121] Thiele, C.J., Hudson, M.D., Russell, A.E., Saluveer, M. and Sidaoui-Haddad, G. (2021). Microplastics in fish and fishmeal: an emerging environmental challenge? *Science Report* 11: 2045 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81499-8>
- [122] Wright, S. L., Thompson, R. C. & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution*. 178: 483–492.
- [123] Lusher, A., Hollman, P. and Mendoza-Hill, J. (2017). Microplastics in fisheries and aquaculture. Status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper* 615. url: <http://www.fao.org/3/i7677e/i7677e.pdf>
- [124] Collignon A, Hecq JH, Glagani F, Voisin P, Collard F, Goffart A. Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea (2012). *Marine Pollution Bulletin* 64(4):861-4. doi: 10.1016/j.marpolbul.2012.01.011.
- [125] Olgaç Güven, Kerem Gökdağ, Boris Jovanović, Ahmet Erkan Kıdeys (2017). Microplastic litter composition of the Turkish territorial waters of the Mediterranean Sea, and its occurrence in the gastrointestinal tract of fish. *Environmental Pollution* 223: 286-294, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.025>.
- [126] Zhang W, Zhang S, Wang J, Wang Y, Mu J, Wang P, Lin X, Ma D. Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China. *Environ Pollut.* 2017 Dec;231(Pt 1):541-548. doi: 10.1016/j.envpol.2017.08.058. Epub 2017 Aug 29. PMID: 28843202.
- [127] Mohamed Attia Sheradah, Amany Ahamed El-Sikaily, Nehad Mohamed Abdel Moneam, Nabila El Sayed Abdel Maguid and Marwa Gaber Zaki (2018). Polychlorinated Biphenyls (PCBs) and Pesticides in Sediments and *Siganus rivulatus* from Two Areas Along the Egyptian Mediterranean Coast. *Current Environmental Engineering* 5: 168. <https://doi.org/10.2174/2212717805666181009101510>
- [128] Lazartigues A, Thomas M, Cren-Olivé C, Brun-Bellut J, Le Roux Y, Banas D, Feidt C. (2013). Pesticide pressure and fish farming in barrage pond in Northeastern France. Part II: residues of 13 pesticides in water, sediments, edible fish and their relationships. *Environmental Science Pollution Research International* 20(1):117-25. doi: 10.1007/s11356-012-1167-7.
- [129] Ytrestøyl, T., Aas, T. S., and Asgard, T. (2015). Utilisation of feed resources in production of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Norway. *Aquaculture* 448: 365–374. doi: 10.1016/j.aquaculture.2015.06.023.
- [130] Cheung KC, Leung HM, Kong KY, Wong, MH. (2007). Residual levels of DDTs and PAHs in freshwater and marine fish from Hong Kong markets and their health risk assessment. *Chemosphere* 66:460–8.
- [131] Wang HS, Chen ZJ, Wei W, Man YB, Giesy JP, Du J, et al. (2013). Concentrations of organochlorine pesticides (OCPs) in human blood plasma from Hong Kong: markers of exposure and sources from fish. *Environment International* 54:18–25.
- [132] Portoles, T., Ibanez, M., Garlito, B., Nacher-Mestre, J., Karalazos, V., Silva, J., et al. (2017). Comprehensive strategy for pesticide residue analysis through the production cycle of gilthead sea bream and Atlantic salmon. *Chemosphere* 179: 242–253. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.03.099.
- [133] Polat, A., Polat, S., Simsek, A. et al. (2018). Pesticide residues in muscles of some marine fish species and seaweeds of Iskenderun Bay (Northeastern Mediterranean), Turkey. *Environ Sci Pollut Res* 25, 3756–3764 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0756-x>
- [134] M.M. Storelli, S. Losada, G.O. Marcotrigiano, L. Roosens, G. Barone, H. Neels, A. Covaci (2009). Polychlorinated biphenyl and organochlorine pesticide contamination signatures in deep-sea fish from the Mediterranean Sea. *Environmental Research* 109 (7): 851-856. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2009.07.008>.
- [135] Kasiotis, K. (2009). Organochlorine Pesticides Residues in Mussels of Greek Island Evia. *International Journal of Chemistry* 1(2): 1-9. 10.5539/ijc.v1n2p3
- [136] Masci M, Orban E, Navigato T. (2013). Organochlorine pesticide residues: an extensive monitoring of Italian fishery and aquaculture. *Chemosphere* 94:190-198. doi:10.1016/j.chemosphere.2013.10.016.

- [137] Roque Serrano, Mercedes Barreda, Miguel A. Blanes (2008). Investigating the presence of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in wild and farmed gilthead sea bream (*Sparus aurata*) from the Western Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin* 56 (5): 963-972. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.01.014>.
- [138] Ibrahim, L., Preuss, T. G., Ratte, H. T., & Hommen, U. (2013). A list of fish species that are potentially exposed to pesticides in edge-of-field water bodies in the European Union--a first step towards identifying vulnerable representatives for risk assessment. *Environmental science and pollution research international*, 20(4), 2679–2687. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1471-x>
- [139] Petrenya, N., Dobrodeeva, L., Brustad, M., Bichkaeva, F., Menshikova, E., Lutfaliev, G., Poletaeva, A., Poletaeva, A., Repina, V., Cooper, M. et al. (2011). Fish consumption and socio-economic factors among residents of Arkhangelsk city and the rural Nenets autonomous area. *International Journal of Circumpolar Health* 70: 46–5.