



POLLUANTS AQUATIQUES DANS LES OCÉANS ET LES PÊCHERIES

Avril 2021



POLLUANTS AQUATIQUES DANS LES OCÉANS ET LES PÊCHERIES

Auteurs principaux

Matt Landos, BVSc (Hons) MANZCVS (*Chapitre sur la santé des animaux aquatiques*)

Mariann Lloyd Smith, PhD, *Conseillère principale, NTN*

Joanna Immig, B.App.SC, *Coordonnatrice nationale, NTN*

AVRIL 2021



IPEN est un réseau d'organisations non gouvernementales qui travaillent dans plus de 100 pays pour réduire et éliminer les effets nocifs des produits chimiques toxiques à la santé humaine et à l'environnement.

www.ipen.org



National Toxics Network (NTN) est un réseau de la société civile à but non lucratif qui lutte pour la réduction de la pollution, la protection de la santé environnementale et la justice environnementale pour tous. Le NTN s'est engagé pour un avenir sans produits chimiques toxiques.

ntn.org.au

ISBN: 978-1-955400-03-9

© 2021, Réseau International d'Élimination des Polluants (International Pollutants Elimination Network). Tous droits réservés.

Équipe de production de l'IPEN: Bjorn Beeler, Tim Warner, Betty Wahlund

Ce document a été traduit de l'anglais par Vivianne Atah.

Veuillez citer cette publication comme:

Landos, M., Lloyd-Smith, M., Immig, J. *Polluants aquatiques dans les océans et les pêcheries*. Réseau International d'Élimination des Polluants (IPEN), Avril 2021.

LES PRINCIPALES CONCLUSIONS

- **La surpêche n'est pas la seule cause du déclin de la pêche.** Les pêcheries et les bassins versants mal gérés ont entraîné une dégradation de la qualité de l'eau et l'habitat essentiel des pépinières, ainsi que la réduction et la suppression des ressources alimentaires aquatiques. L'exposition aux polluants environnementaux a un impact négatif sur la fertilité, le comportement et la résilience, ainsi que sur le recrutement et la capacité de survie des espèces aquatiques. Il n'y aura jamais de pêche durable tant que tous les facteurs contribuant au déclin de la pêche ne seront pas abordés.
- **Les polluants chimiques ont un impact sur les chaînes alimentaires océaniques et aquatiques depuis des décennies et les conséquences s'aggravent.** La littérature scientifique documente la pollution d'origine humaine dans les écosystèmes aquatiques depuis les années 1970. Selon les estimations jusqu'à 80 % de la pollution chimique marine provient de la terre ferme et la situation s'aggrave. La gestion des sources ponctuelle de polluants n'a pas réussi à protéger les écosystèmes aquatiques contre les sources diffuses partout dans le monde. L'aquaculture atteint également ses limites en raison de l'impact des polluants, l'intensification entraînant déjà une détérioration dans certaines zones et les contaminants présents dans les aliments aquacoles affectant la santé des poissons.
- **Les polluants, notamment les produits chimiques industriels, les pesticides, les produits pharmaceutiques, les métaux lourds, les plastiques et les microplastiques, ont des effets néfastes sur les écosystèmes aquatiques à tous les niveaux trophiques, du plancton aux baleines.** Les produits chimiques perturbateurs endocriniens, qui sont biologiquement actifs à des concentrations extrêmement faibles, constituent une menace particulière à long terme pour la pêche. Les polluants persistants tels que le mercure, les composés bromés et les plastiques se bioamplifient dans le réseau trophique aquatique et finissent par atteindre les humains.
- **Les écosystèmes aquatiques qui soutiennent les pêches subissent des changements fondamentaux en raison des changements climatiques.** Les océans se réchauffent et deviennent plus acides en raison de l'augmentation des dépôts de dioxyde de carbone. La fonte des glaces de mer, des glaciers et du permafrost fait monter le niveau de la mer et modifie les courants océaniques, la salinité et les niveaux d'oxygène. On observe une augmentation des « zones mortes » désoxygénées et des proliférations d'algues côtières. En outre, le changement climatique mobilise à nouveau les contaminants historiques de leurs « puits polaires ».



- **Le changement climatique et l'exposition chronique aux pesticides peuvent tous amplifier les effets de la pollution en augmentant l'exposition, la toxicité et la bioaccumulation des polluants dans la chaîne alimentaire. Le méthylmercure (MeHg) et les PCB sont parmi les contaminants les plus répandus et les plus toxiques dans la chaîne alimentaire marine.**
- **Nous sommes au bord d'une catastrophe, mais nous avons une chance de nous en sortir. Pour progresser, il faut des changements fondamentaux dans l'industrie, l'économie et la gouvernance, l'arrêt de l'exploitation minière en eaux profondes et d'autres industries destructrices, une gestion chimique écologiquement rationnelle et de véritables économies circulaires. Il est urgent d'aborder les approches régénératives en matière d'agriculture et d'aquaculture pour réduire les émissions de carbone, mettre fin à la pollution et entamer le processus de restauration.**

TABLE DES MATIÈRES

Avant-Propos	vi
1. Résumé	9
2. Impacts des polluants aquatiques et marins	17
2.1 Perturbation endocrinienne – Menace à long terme pour la pêche	19
2.1.1 Intersexuel et Imposexuel	25
2.1.2 Les effets sur le système immunitaire	28
2.1.3 Les effets comportementaux et indirects.....	34
2.2 Les effets de la pollution par les microplastiques sur la pêche	35
2.2.1 Les microplastiques et leurs contaminants	37
3. Le climat, les polluants et les pêches	41
3.1 Les interactions du changement climatique et des polluants persistants	42
4. Sources et contributions de polluants	47
4.1 Les rejets industriels	48
4.2 Installations de traitement des eaux usées.....	48
4.3 La pollution par les produits pharmaceutiques.....	50
4.4 La pollution par les hydrocarbures	51
4.4.1 Les hydrocarbures aromatiques polycycliques.....	51
4.5 Les déchets miniers - Élimination des résidus miniers en haute mer	52
4.6 Dragage et sédiments.....	53
4.7 Les pesticides.....	60
4.7.1 Les impacts écologiques cumulés des pesticides.....	64
4.7.2 Les néonicotinoïdes	64
4.7.3 Les néonicotinoïdes menacent l'aquaculture des crevettes	66
4.7.4 Les herbicides à base de glyphosate	67
4.7.5 Les insecticides organophosphorés et les carbamates	69
5. Une voie à suivre	75
5.1 L'agriculture régénératrice	76
5.2 Les approches écosystémiques de l'aquaculture	77
Références	80
Remerciements	94

AVANT-PROPOS

Les spécialistes de la santé vantent depuis longtemps les avantages de l'intégration du poisson dans un régime alimentation sain pour le cœur, pourtant, il est désormais bien établi qu'une grande partie des produits de la mer que nous consommons sont dangereusement pollués. La contamination, associée au fait que près de 90 % de nos pêcheries mondiales sont pleinement exploitées, surexploitées ou épuisées, nous incite à limiter notre consommation de poisson afin d'éviter des espèces plus chargées en toxines nocives ainsi que celles qui risquent de disparaître. Cependant, certains d'entre nous n'ont pas le luxe de pouvoir choisir des produits de la mer moins contaminés ou plus durables. Plus de 3 milliards de personnes dépendent du poisson comme source importante de protéines animales, notamment les habitants des pays les plus pauvres du monde.

Malgré l'importance mondiale des produits de la mer, ce rapport montre comment les scientifiques découvrent maintenant de graves perturbations dans des chaînes alimentaires aquatiques entières à travers le monde en raison de l'utilisation croissante de produits chimiques dangereux, du changement climatique, de la pollution plastique et d'autres facteurs d'origine humaine. Des environnements marins sains sont essentiels non seulement pour la survie de tous les organismes aquatiques, mais aussi pour toute vie sur terre, y compris les humains. Malheureusement, lorsque que les dommages causés par ces menaces dites « invisibles » deviennent « visibles », il est trop tard – le mal est déjà fait.

La production et l'utilisation de produits chimiques ont connu une croissance rapide depuis les années 1970, et il existe aujourd'hui 100 000 à 350 000 produits chimiques disponibles dans le commerce. Il est choquant de constater qu'environ seulement 1 % des produits chimiques commercialisés ont été testés pour évaluer leur impact sur la santé humaine et l'environnement. Dans le même temps, le climat se réchauffe à un rythme sans précédent, et le plastique s'accumule partout dans le monde et partout dans les profondeurs de nos océans.

Nous en sommes encore à découvrir l'impact total de ces développements sur les environnements marins, mais nous savons que la vie marine est détériorée, menacée et en voie de disparition rapide. Les pesticides tuent non seulement les invertébrés dont dépendent les poissons pour se nourrir, mais les ruissellements de pesticides empoisonnent également les cours d'eau où les poissons se reproduisent et frayent/pondent. Les produits pharmaceutiques passent de nos usines de traitement des eaux aux milieux aquatiques où ils inhibent la fertilité et endommagent les systèmes hormonaux des animaux marins. Les poissons, les crabes, les moules et les homards qui prennent les microplastiques pour de la nourriture deviennent mal nourris,

et les microplastiques et les produits chimiques qui y sont associés s'accumulent dans la chaîne alimentaire. Le changement climatique aggrave ces menaces en créant des océans plus chauds et plus acides, ce qui détruit les habitats et les pêcheries essentiels. Et lorsque tous ces processus se mélangent, leurs résultats peuvent être imprévisibles et amplifiés.

L'impact le plus insidieux concerne le réseau alimentaire lui-même. Le monde diversifié dans lequel nous vivons est un écosystème complexe d'interrelations qui se sont développées au cours de millions d'années. Planktons et herbes marines, microbes et bactéries, insectes et oiseaux, larves de poissons et poissons prédateurs, ours polaires et humains : tous jouent un rôle dans la chaîne alimentaire et tous dépendent d'un environnement marin sain pour leur survie.

Heureusement, il est encore temps d'inverser ces tendances. Et surtout, nous devons :

- Exiger et faire respecter des contrôles stricts relatifs à la pollution chimique industrielle
- Limiter la production de nouveaux plastiques et innover dans de nouveaux matériaux et systèmes sans plastiques et les additifs chimiques nocifs
- Abandonner la dépendance à l'égard de l'utilisation intensive de pesticides et d'engrais pour produire la nourriture mondiale
- Investir dans les agriculteurs et les pêcheurs artisanaux qui pratiquent une agriculture et une aquaculture régénératives

Ce rapport est le tout premier qui commence à détailler les nombreuses façons et les nombreux endroits où la pollution chimique et le changement climatique déstabilisent cette infrastructure marine et les pêcheries du monde entier. Il est encore temps de mettre un terme à cette destruction, mais comme l'indique ce rapport, nous devons aller au-delà de la simple réflexion sur la manière de contrôler la surpêche ou de gérer les polluants présents dans les poissons que nous consommons. Notre survie, ainsi que celle de toutes les autres espèces, dépendra de la garantie de la santé de l'océan tout entier, un objectif que nous devons tous nous efforcer d'atteindre.



Kristian Parker, Oak Foundation



Sara Lowell, Marisla Foundation





1. RÉSUMÉ

C'est grâce à l'abondance des fruits de mer provenant des océans autrefois abondants que le cerveau humain s'est apparemment agrandi, contribuant à notre évolution en tant qu'Homo sapiens.^[30]

En effet, notre succès en tant qu'espèce est tel que notre croissance rapide en nombre, associée à notre consommation et à notre impact polluant sur la planète, menace désormais l'ensemble des écosystèmes marins et aquatiques qui ont nourri l'humanité.

Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture^[70] un tiers des stocks de poissons commerciaux sont pêchés à des niveaux biologiquement non durables et 90 % des pêcheries sont exploitées au maximum de leur capacité.

La population de thon rouge du Pacifique, par exemple, a chuté de 97 % par rapport aux niveaux historiques en raison de la surpêche de l'un des principaux prédateurs de l'océan. La persistance des stocks surexploités

OÙ SONT PASSÉS TOUS LES POISSONS ?

- En avons-nous trop attrapé ?
- Avons-nous mal géré la pêche ?
- Avons-nous supprimé leurs habitats ?
- Leur avons-nous enlevé leurs ressources alimentaires ?
- Avons-nous drainé leurs pépinières ?
- Les avons-nous rendus moins fertiles ?
- Avons-nous modifié leur comportement ?
- Les avons-nous rendus moins résilients ?

Tout ce qui précède.

est une préoccupation importante pour la réalisation des Objectifs de développement durable des Nations Unies en matière de réglementation de l'exploitation, d'élimination de la surpêche et de la restauration des pêcheries.

Lorsque l'on examine la raison de la diminution des stocks de poissons, on s'aperçoit qu'ils ont tout simplement été surexploités. Si tel était le cas, le passage à l'aquaculture, qui représente aujourd'hui près de 50 % de la consommation de poisson, ainsi qu'une meilleure gestion de la pêche sauvage « durable » régleraient le problème. Cependant, ce n'est pas le cas et les raisons du déclin continu de la pêche sont bien plus complexes.

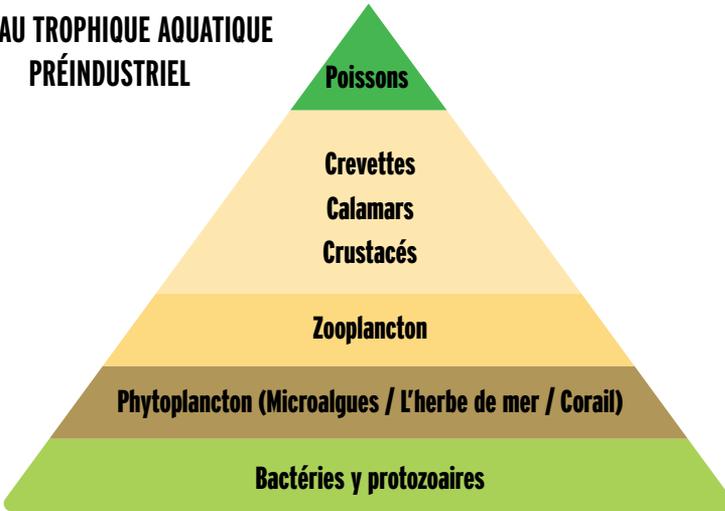
ALORS QUE LES MORTS MASSIVES DES POISSONS SONT ÉVIDENTES ET FONT SOUVENT L'OBJET D'UNE COUVERTURE MÉDIATIQUE, LES TUEURS LENTS ET INVISIBLES COMME LES POLLUANTS ORGANIQUES PERSISTANTS ET LES EXCÈS DE NUTRIMENTS ONT UN IMPACT BIEN PLUS INSIDIEUX SUR LA VIE AQUATIQUE. DE NOMBREUSES RECHERCHES SCIENTIFIQUES INDIQUENT AUJOURD'HUI DE GRAVES RÉPERCUSSIONS SUR L'IMMUNITÉ, LA FERTILITÉ, LE DÉVELOPPEMENT ET LA CAPACITÉ DE SURVIE DES ANIMAUX AQUATIQUES.

La réglementation de la pêche n'est pas toujours étayée par des données biologiquement ou scientifiquement pertinentes sur tous les facteurs contribuant à la santé des stocks de poissons. Cela a conduit à une vision étroite des raisons de diminution du nombre de poissons, axée en grande partie sur les taux des quotas de capture et l'effort de pêche. Les tentatives de gestion des pêcheries sans tenir compte de leur interface avec la terre et des effets de la pollution sur le bien-être des poissons aboutiront inévitablement à de mauvais résultats. Si les principes fondamentaux de la qualité de l'eau et de l'habitat sont erronés, la durabilité — ou la productivité élevée soutenue dont les pêcheries sont capables — ne sera pas atteinte. Les autorités de réglementation n'ont pas encore saisi l'impact de la pollution.

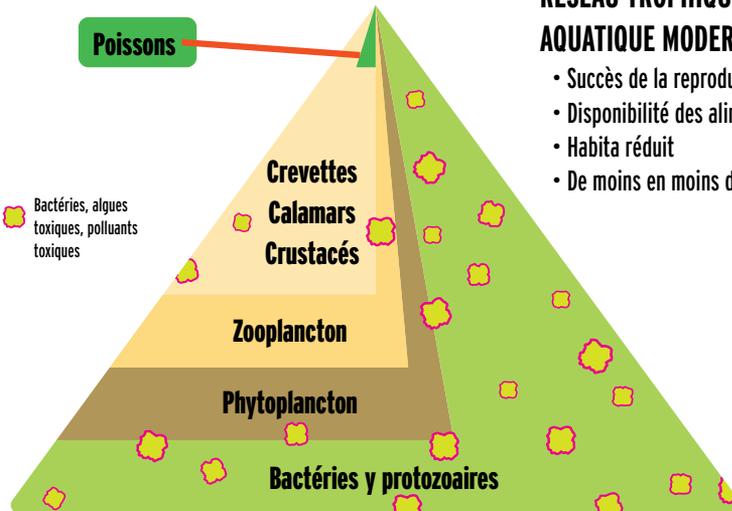
La pollution a des effets néfastes sur toutes les parties des chaînes alimentaires aquatiques. Elle provoque le déclin des populations de poissons et d'autres organismes aquatiques en affectant leur survie et leur capacité à se reproduire. Le déclin des pêcheries survient au milieu de la tempête

Avant l'industrialisation, les populations de poissons contribuaient à maintenir à l'équilibre le réseau trophique aquatique. Aujourd'hui, cependant, le réseau trophique est perturbé, ce qui entraîne la prolifération de bactéries et d'algues toxiques qui menacent encore davantage tous les niveaux de la chaîne alimentaire.

RÉSEAU TROPHIQUE AQUATIQUE PRÉINDUSTRIEL



RÉSEAU TROPHIQUE AQUATIQUE MODERNE



- Succès de la reproduction réduite
- Disponibilité des aliments réduite
- Habita réduit
- De moins en moins de poissons



Les polluants organiques persistants, tels que les pesticides, se retrouvent dans les cours d'eau, les lacs et les océans, ce qui a un impact inattendu sur la faune et la flore.

parfaite de la destruction des habitats, de la perte de ressources alimentaires saines dans les chaînes alimentaires aquatiques, de l'assèchement et des dommages causés aux zones de reproduction, ainsi que des impacts sur la qualité de l'eau causés par la pollution et le changement climatique. Alors que la mortalité massive des poissons est évidente et fait souvent l'objet d'une couverture médiatique, les tueurs lents et invisibles, tels que les polluants organiques persistants et les excès de nutriments, ont un impact bien plus insidieux sur la vie aquatique. De nombreuses recherches scientifiques indiquent aujourd'hui de graves répercussions sur l'immunité, la fertilité, le développement et la capacité de survie des animaux aquatiques.

Avant l'industrialisation, Réseau trophique aquatique était constituée d'une abondance de poissons, de crevettes, de calmars et de mollusques et crustacés grâce à une large base de zooplancton, de phytoplancton, de bactéries et de protozoaires. L'intégrité de la chaîne alimentaire aquatique post-industriel a été sérieusement compromise, avec de moins en moins de poissons au sommet, des pertes d'invertébrés dans les sédiments et dans la colonne d'eau, des pertes d'algues marines, de coraux et d'autres

producteurs primaires, ainsi que la prolifération des bactéries et d'algues toxiques.

L'écosystème marin est menacé par l'augmentation des niveaux de pollution chimique et plastique résultant des ruissellements industriels et urbains, de l'exploitation minière et de l'agriculture. Les impacts sur la pêche sont importants, la contamination étant désormais évidente dans les écosystèmes marins et aquatiques et dans les chaînes alimentaires. La pollution affecte la santé des poissons ainsi que la qualité et la quantité des fruits de mer sauvages disponibles pour la consommation humaine. Elle compromet également aujourd'hui l'adéquation de certaines eaux côtières à la production aquacole.

Depuis les années 1970, les contaminants organochlorés persistants, comme les biphényles polychlorés (PCB) et le DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane), ont été mesurés dans les cours d'eau, les océans et la vie marine et aquatique. Mais aujourd'hui, de nombreux autres produits chimiques extrêmement persistants et toxiques, y compris les pesticides, les métaux comme le mercure, les produits pharmaceutiques et les produits chimiques industriels- sont présents dans les milieux marins et aquatiques et chez leurs habitants. Souvent, ces polluants ont un impact totalement inattendu sur les écosystèmes aquatiques.

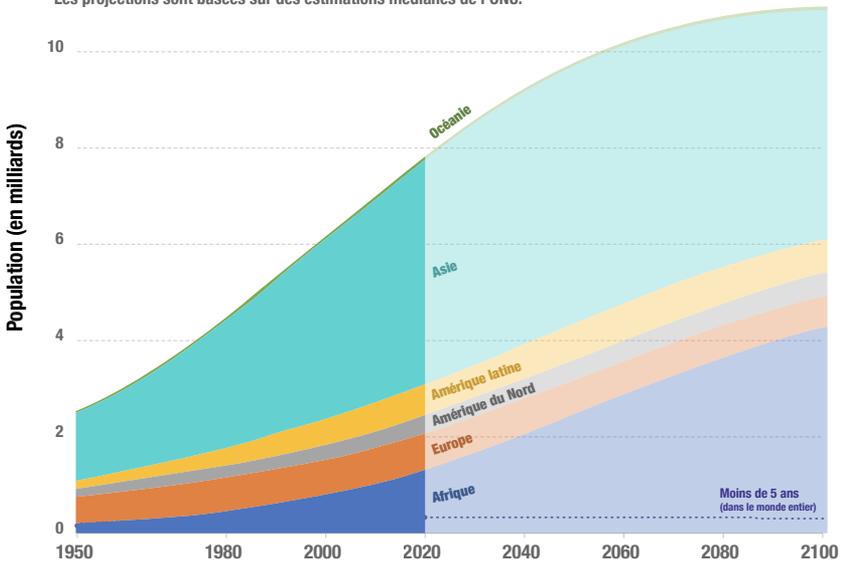
La solution à la pollution était autrefois considérée comme une « dilution » : déverser nos déchets dans les rivières et les océans, les diluer et les laver. Dans de nombreux endroits cependant, nous avons fondamentalement manqué de « diluant » pour maintenir les niveaux de polluants en dessous des niveaux « sûrs ». En raison de l'urbanisation et de l'intensification de l'industrie, les panaches de pollution localisées sont si intenses qu'ils dépassent souvent la capacité des écosystèmes fluviaux d'eau douce et des écosystèmes marins côtiers à les diluer.

La pollution est déjà une limitation pour la production aquacole et la productivité continue des pêches sauvages. Il existe de nombreuses localités où la qualité de l'eau est si mauvaise à cause des polluants de telle sorte que les poissons d'élevage élevés dans ces eaux ont des résultats très médiocres en matière de santé et de survie. Les difficultés auxquelles l'industrie asiatique de l'aquaculture de la crevette est confrontée en sont un bon exemple.

Nous avons tendance à penser que les forêts sont les poumons de la terre, mais en fait, c'est le plancton qui constitue les « poumons océaniques » qui produisent les deux tiers de l'oxygène mondial. Les océans assurent

Population mondiale et croissance prévue jusqu'en 2100

Les projections sont basées sur des estimations médianes de l'ONU.



Les populations humaines continuent d'augmenter à un rythme rapide, ce qui exerce une pression supplémentaire sur les réseaux trophiques et augmente les sources de pollution.

également une quantité importante de la séquestration du carbone de la nature.

Le changement climatique menace déjà la croissance durable de la production aquacole et de la pêche sauvage dans le monde entier. Les températures plus élevées remobilisent la contamination historique tandis que l'augmentation de la température des océans modifie les courants essentiels et contribue à l'augmentation des maladies bactériennes, au blanchiment des récifs coralliens, à la dégradation des zones intertidales, à la mort des forêts de varech et à l'impact sur l'ensemble de l'écosystème marin par une acidification accrue.^[203]

Dans le contexte de l'urgence climatique et de l'aggravation des niveaux de pollution, la population mondiale continue de croître, et la demande de fruits de mer augmente au fur et à mesure que la richesse s'accroît. Pourtant, les pêches de capture sauvage stagnent et sont de plus en plus

en deçà de la demande mondiale croissante de fruits de mer. L'industrie mondiale des fruits de mer, ainsi que les moyens de subsistance de millions de familles, de petits pêcheurs et de communautés qui dépendent des fruits de mer, sont à la croisée des chemins.

L'industrie pétrochimique basée sur les combustibles fossiles, qui représente actuellement près de 5,7 milliards de dollars de ventes mondiales, devrait doubler de taille d'ici 2030, ce qui augmentera considérablement les émissions dangereuses, les effets du changement climatique et la pollution plastique dans nos océans.



2. IMPACTS DES POLLUANTS AQUATIQUES ET MARINS

Les rejets souvent invisibles de produits chimiques industriels, de pesticides, de produits pharmaceutiques et de nutriments dans nos cours d'eau contaminent les écosystèmes aquatiques et marins et contribuent à la disparition des pêches et de la biodiversité aquatique.

Les polluants chimiques pénètrent dans nos cours d'eau et nos océans par le biais des émissions et rejets industrielles, du ruissellement des eaux agricoles et des eaux pluviales, du déversement de déchets, des égouts domestiques, de la dérive des pulvérisations agricoles et de l'exploitation minière. Associée à l'augmentation de la température des océans, à l'acidification et à la désoxygénation, l'exposition à la pollution toxique ajoute un autre facteur de stress important pour la vie aquatique et marine.

Les contaminants tels que les PCB et le DDT ont été mesurés dans les rivières et les eaux océaniques et dans la vie aquatique depuis les années 1970^[214] mais aujourd'hui de nombreux autres produits chimiques

extrêmement persistants et toxiques, y compris les pesticides, les produits pharmaceutiques et les produits chimiques industriels actuellement utilisés, tels que les substances per et polyfluoroalkyliques (PFAS)^[142] et les polybomodiphényle éthers (PBDEs)^[91] contaminent de nombreux, voire tous les milieux marins et aquatiques et leurs habitants.

Les PCB, bien qu'interdits dans de nombreux pays, continuent de polluer même les milieux polaires marins les plus reculés. Alors que certaines

**L'EXPOSITION AUX
POLLUANTS PERSISTANTS
[ENDOMMAGE] LA
REPRODUCTION, LA
CROISSANCE ET LE
DÉVELOPPEMENT, AINSI
QUE LES RÉPONSES
IMMUNITAIRES AUX
MALADIES**

des contaminations les plus élevées par les PCB se produisent dans les zones côtières et les estuaires chinois^[84], les concentrations de PCB dans les poissons d'Antarctique continuent d'augmenter^[207], tandis que dans certaines régions de l'Arctique, les métabolites des PCB augmentent également.^[244]

L'exposition aux polluants persistants a des effets néfastes sur les poissons, les invertébrés aquatiques et les mammifères marins, ce qui nuit à leur reproduction, à leur croissance et à leur développement, ainsi qu'à leurs réponses immunitaires aux maladies. On sait que les expositions aux pesticides causent la mort, les cancers et les lésions, l'inhibition et l'échec de la reproduction, la suppression du système immunitaire, la perturbation du système endocrinien et les dommages aux cellules et à l'ADN.^[168] Les expositions chimiques peuvent également provoquer des changements de comportement qui altèrent la capacité de survie d'un animal^[152] et affectent à leur tour la dynamique des populations.

Les insecticides pyréthroïdes largement utilisés sont toxiques pour les macroinvertébrés aquatiques (écrevisses et escargots aquatiques, vers et insectes aquatiques) et les zooplanctons à des niveaux qui sont déjà évidents dans l'environnement.^[86] Les insecticides néonicotinoïdes, l'imidaclopride et la clothianidine, ainsi que l'insecticide chimiquement similaire fipronil, sont extrêmement toxiques pour les crustacés, y compris les crevettes, les crabes, le homard, les insectes aquatiques et le zooplancton à de très faibles doses. De plus, ils peuvent avoir des effets sublétaux, tels qu'une altération de la fonction immunitaire, une réduction de la croissance et de la reproduction, et des effets génotoxiques, qui endommagent l'information génétique. Ces effets se produisent à des concentrations d'exposition actuellement observées dans l'environnement et bien inférieures à celles associées à la mortalité.^[80]

Certains produits chimiques ignifugeants industriels, comme les PBDE, peuvent agir en combinaison et provoquer une neurotoxicité développementale, affectant négativement le système nerveux en développement à des niveaux de concentrations écologiquement pertinentes.^[45, 221] Les niveaux de ces PBDE extrêmement persistants continuent d'augmenter dans le milieu marin, comme le montrent les concentrations croissantes dans le krill et le phytoplancton de l'Antarctique.^[143]

Les produits chimiques toxiques et les métaux peuvent se bioamplifier à mesure qu'ils remontent dans la chaîne alimentaire aquatique, atteignant des concentrations très élevées chez les prédateurs de haut niveau tels que les requins, le flétan, le sébaste, le thon et l'espadon.

L'impact de ces mélanges chimiques sur la vie marine est imprévisible. Les effets peuvent être additifs ou même synergiques, c'est-à-dire lorsque les produits chimiques augmentent les toxicités des uns et des autres.^[225] Un impact synergique a été observé lorsque la cécidomyie aquatique *Chironomus dilutes* a été exposée à un mélange de pesticides néonicotinoïdes, qui s'est avéré être beaucoup plus toxique que les toxicités individuelles.^[142]

Tant la séquence que le moment des expositions affectent la toxicité d'un polluant pour un organisme aquatique. Les crustacés d'eau douce ont subi des effets toxiques différents lorsque l'ordre d'exposition de deux substances chimiques a été inversé, tout en maintenant la même dose.^[11] Les expositions à des stades de développement critiques et sensibles peuvent perturber les processus naturels modifiant la structure ou les fonctions des organismes vivants, parfois de manière irréversible.

Ces impacts peuvent être transgénérationnels, les effets de la pollution se faisant sentir sur plusieurs générations.^[31] Par exemple, à la suite d'une exposition au PFOS, on a observé une baisse du taux de survie des poissons zèbres (*Danio rerio*) sur plusieurs générations.^[119]

La pollution de l'eau peut également avoir des impacts indirects sur les populations de poissons en affectant négativement leurs sources de nourriture, comme par exemple en tuant les invertébrés qui vivent dans les sédiments. La disponibilité réduite des fourrages pour les larves de poissons réduira inévitablement la survie des larves de poissons et aura à son tour un impact sur les populations de poissons.^[80]

2.1 PERTURBATION ENDOCRINIENNE - MENACE À LONG TERME POUR LA PÊCHE

Les produits chimiques perturbateurs endocriniens (PE) représentent une menace à long terme pour toute la vie aquatique, des fonctions neurologiques et cardiovasculaires, ainsi que des effets immunitaires entraînant une p. L'exposition aux perturbateurs endocriniens perturbe le système



De nombreux appareils électroniques contiennent des ignifugeants bromés. Les niveaux de ces toxines augmentent dans les milieux marins.

Suite à la page 22

LE MERCURE ET LES POISSONS

On prévoit que les concentrations de mercure doubleront dans l'océan Pacifique Nord d'ici 2050.^[211] La combustion du charbon et l'extraction de l'or à petite échelle représentent plus des deux tiers des émissions anthropiques totales de mercure dans le monde.^[112]

Dans les milieux aquatiques, le mercure métallique inorganique est converti par des bactéries ou des micro-organismes en méthylmercure extrêmement toxique. Comme les polluants organiques persistants (POP) en termes de toxicité, de persistance, de bioaccumulation et de capacité de transport à longue distance, le méthylmercure se bioaccumule chez les organismes aquatiques.

Le mercure est une puissante neurotoxine et l'accumulation de mercure peut endommager le cerveau des poissons. Le mercure est également associé à des troubles de la reproduction chez de nombreuses espèces de poissons.^[248] L'exposition des poissons au mercure à des niveaux écologiquement pertinents a entraîné une réduction significative du nombre de cellules dans l'hypothalamus, le tectum optique et le cervelet et s'est accompagnée de modifications du comportement natatoire, liées à la fois à la fonction motrice et à l'état d'esprit (anxiété).^[249]



Les communautés insulaires fortement dépendantes des fruits de mer pour leurs protéines souffrent d'un profil d'exposition chronique, disproportionné et plus dangereux au mercure toxique.

Les concentrations de méthylmercure chez certaines espèces de poissons de premier ordre peuvent être jusqu'à un million de fois plus élevées que les niveaux dans les eaux environnantes.^[98] Les poissons situés en haut de la chaîne alimentaire marine, tels que l'espadon du sud de l'océan Atlantique, ont les niveaux moyens de mercure les plus élevés, suivis par le thon rouge du Pacifique du nord de l'océan Pacifique.^[112]

Les communautés insulaires fortement dépendantes des fruits de mer pour leurs protéines souffrent d'un profil d'exposition chronique, disproportionné et plus dangereux au mercure toxique. Les femmes des petits États insulaires en développement (PEID) du Pacifique ont des taux de mercure très élevés dans leur corps par rapport à d'autres endroits, car leur régime alimentaire est riche en fruits de mer. Les gros poissons prédateurs qu'elles

endocrinien d'un organisme en interférant avec l'activité hormonale normale. Cela peut provoquer des dommages au niveau du développement, de la reproduction, la grande susceptibilité aux maladies et aux parasites.

[220]

Les impacts des PE ont d'abord été identifiés chez les gastropodes (escargots marins) puis sont rapidement devenus évidents chez les poissons, les grenouilles, les alligators, et finalement chez les êtres humains. Dans les cas les plus extrêmes, les animaux ont développé des caractéristiques sexuelles mâles et femelles rendant la reproduction impossible. Les PE peuvent affecter les systèmes biologiques de toutes les espèces aquatiques.

On trouve de nombreux PE, naturels et synthétiques, dans les milieux

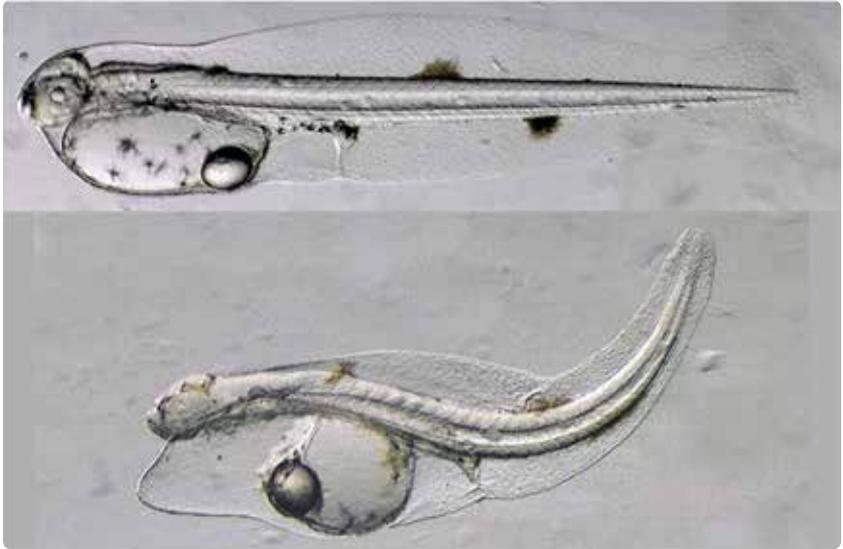


Les PE affectent toutes les créatures aquatiques – poissons, amphibiens, reptiles, mammifères et oiseaux de mer, ainsi que la vaste gamme d'insectes et d'invertébrés aquatiques dont ils dépendent.

marins et aquatiques, notamment des produits chimiques industriels tels que les PCB et les dioxines, les produits chimiques perfluorés (par exemple, les PFAS) et bromés (par exemple, les PBDE) utilisés dans de nombreux biens de consommation, le DDT et les pesticides actuellement utilisés, les produits pharmaceutiques, les détergents (par exemple, les alkylphénols), ainsi que les additifs pour plastiques tels que le bisphénol A (BPA) et les phthalates.^[198, 229]

Un organisme en développement est particulièrement vulnérable aux PE, et l'exposition aux premiers stades de la vie peut entraîner des défauts structuraux et physiologiques.^[40] Les « fenêtres de sensibilité » critiques sont reconnues dans la toxicologie humaine et l'effet est similaire chez les animaux aquatiques tels que les poissons, les crevettes et les mollusques et crustacés.

Cependant, plutôt que de laisser l'embryon dans l'utérus, comme dans la reproduction des mammifères, de nombreux animaux aquatiques frayent directement dans l'eau et l'embryon couve dans le « ventre » de la masse d'eau. L'embryon est exposé aux polluants — ceux qui sont déposés dans



Par rapport à une larve normale d'albacore (en haut), une larve exposée au pétrole brut de Deepwater Horizon pendant son développement embryonnaire (en bas) présente une série d'anomalies potentiellement mortelles au niveau du cœur, des nageoires et des yeux. Photo John Incardona, NOAA

l'eau et le sac vitellin des poissons, ainsi qu'à une myriade de produits chimiques présents dans l'eau — qui peuvent entraîner la mortalité, des déformations et des modifications du métabolisme tout au long de la vie. Par exemple, les hydrocarbures provenant des déversements de pétrole et des forages ont affecté le développement cardiaque des larves de thon et de martin-pêcheur.^[157, 29]

Les PE persistants et bioaccumulables présents dans le jaune d'œufs entraînent des expositions toxiques dans les tout premiers stades larvaires, car les jeunes en développement puisent dans les réserves du jaune d'œuf au fur et à mesure qu'ils grandissent. Dans une étude réalisée dans les estuaires de la côte Est des États-Unis, des concentrations biologiquement significatives de PCB, de PBDE et de pesticides actuels et anciens ont été détectées dans tous les échantillons d'œufs provenant de poissons prélevés dans les rivières. Le développement anormal du cerveau et du foie ainsi que les impacts sur la croissance globale étaient évidents chez les larves des poissons prélevés dans les rivières.^[169]

On sait que les PBDE affectent les hormones thyroïdiennes^[222] et provoquent des effets toxiques sur la reproduction, le développement, et le système neurologique ainsi que des effets sur le système immunitaire.^[221, 222, 223] Chez les embryons et les larves de poissons exposés aux PBDE, des

anomalies de développement se sont produites à de très faibles concentrations d'exposition. La progéniture des parents exposés aux POP a connu une diminution du taux d'éclosion, une altération des niveaux d'hormones thyroïdiennes, et une inhibition de la croissance.^[17]

Les poissons d'eau douce ayant été exposés toute leur vie à des mélanges de POP (par exemple, PBDE, PCB, métabolites de DDT) à des concentrations écologiquement pertinentes ont démontré des effets sur le développement et la reproduction. Il s'agissait notamment de développement sexuel prématuré, des modifications du rapport de masculinité, des différences de poids corporel et des changements dans la régulation des gènes.^[141] Le taux de déformation des poissons augmente à mesure que l'on se rapproche des estuaires pollués^[133] ce qui affecte à la fois le succès de la reproduction et la viabilité des populations, car la capacité de survie des poissons déformés est diminuée.

La fertilité des poissons marins a diminué, car ils se sont bioconcentrés en PE persistants tels que les POP. Chez les poissons mâles de plusieurs espèces sauvages, des altérations de la densité et de la fertilité des spermatozoïdes ont été observées, tandis que chez les poissons femelles, les résultats négatifs sur la croissance des ovules étaient évidents.

Même les plus petits crustacés aquatiques sont touchés par les PE. L'exposition à des concentrations écologiquement pertinentes de nonylphénol (NP) sur le mysidacé *Americamysis bahia*, un petit crustacé ressemblant à des crevettes présent dans les eaux marines, douces et saumâtres, a entraîné une réduction de la longueur du corps et du nombre total de mues, ce qui a eu un effet négatif sur leur croissance globale.^[146] Il a été démontré que les pesticides organophosphorés interfèrent avec l'hormone thyroïdienne et ralentissent la métamorphose chez le flet, ce qui entraîne une absence de formation d'yeux à la surface supérieure du poisson plat.^[247]

Les PE ont souvent des dose-réponses non conventionnelles appelées dose-réponses non monotones.^[130] Les effets ne sont pas linéaires et les impacts d'une exposition à faible dose ne peuvent être prédits à partir d'expériences d'exposition à forte dose. Dans certains cas, de faibles doses peuvent avoir un impact biologique plus important que des doses élevées pour une réponse spécifique. Néanmoins, on observe généralement des taux plus élevés de problèmes de reproduction chez les animaux ayant été exposés à des doses plus élevées de PE.^[220]

Certains PE peuvent muter l'ADN ou provoquer des changements épigénétiques^[36]—des changements héréditaires qui affectent la façon dont les cellules lisent les gènes. Ces modifications, bien que pouvant être

transmises à la génération suivante, ne modifient pas la séquence d'ADN proprement dite.

Les PE sont maintenant largement dispersés dans les milieux d'eau douce et marins, même dans les zones les plus reculées^[207, 84, 114, 166, 216]. Des concentrations élevées de PCB, les PE connus, ont été trouvées dans les corps de crustacés amphipodes ressemblant à des crevettes et vivant à plus de 10 kilomètres sous la surface de l'océan.^[114]

Toutefois, les risques de PE sont plus élevés dans les eaux côtières qu'en haute mer.^[135] Dans le bassin versant de la Grande Barrière de Corail en Australie, les poissons côtiers sont exposés aux composés œstrogéniques associés aux écoulements des pesticides provenant de la production de canne à sucre et de bananes, ainsi que d'autres activités agricoles.^[128]

Il existe maintenant de nombreuses preuves mettant fortement en cause le rôle des PE dans la réduction des populations d'amphibiens, de reptiles, de poissons d'eau douce et de mer et d'invertébrés.^[220]

2.1.1 INTERSEXUEL ET IMPOSEXUEL

L'intersexualité ou imposex est la présence de caractéristiques sexuelles masculines et féminines au sein d'un même organisme. Il s'agit d'une manifestation clairement observable de perturbations endocriniennes chez les espèces aquatiques, notamment les poissons, les grenouilles et autres



reptiles. Signalée pour la première fois chez les mollusques il y a plus de trois décennies^[182,62], elle est maintenant observée chez les poissons dans de nombreux cours d'eau à travers les États-Unis.^[229]

La tributyltine (TBT), utilisée auparavant dans les peintures antisalissure des bateaux, a détruit des bancs de coquillages commerciaux. À de très faibles concentrations, le TBT a fait que les mollusques femelles ont pu développer des caractéristiques sexuelles mâles, ce qui a bloqué la libération des œufs.^[182] En 1995, une étude des gastropodes marins de la côte Sud de l'Australie a révélé que 100 % d'entre eux démontraient un « imposex ».^[62] La sensibilité des mollusques marins aux PE est devenue un indicateur important de la perturbation endocrinienne dans l'écosystème marin.^[106]

LES PRODUITS CHIMIQUES PFAS FOREVER IMMUNOTOXIQUES SONT OMNIPRÉSENTS

On sait que de nombreux POP et autres polluants affectent le système immunitaire des organismes vivants. Les contaminants marins omniprésents, les PFAS, y compris les trois produits chimiques contenant des POP, l'acide perfluorooctanesulfonique (PFOS), l'acide perfluorooctanoïque (PFOA) et le sulfonate de perfluorohexane (PFHxS), sont très préoccupants. Ils sont extrêmement persistants, bioaccumulables et endommagent le système



immunitaire des animaux et des personnes.^[227] Les PFAS sont des contaminants omniprésents que l'on trouve même dans les zones les plus reculées, y compris dans l'environnement marin de l'Arctique et de l'Antarctique et chez ses habitants.

À ce jour, la réglementation ne s'est concentrée que sur une poignée de produits chimiques contenant des

PFAS, mais il existe entre 3 000^[65] et 4 730 composés de PFAS^[99], dont beaucoup n'ont pas été évalués pour leurs effets néfastes, mais se trouvent dans les milieux marins. Un groupe, les acides carboxyliques perfluoroalkyliques, ont été détectés dans plus de 80 % des 30 échantillons d'eau de mer de surface des océans Pacifique Nord et Arctique.^[132]

Des concentrations significativement plus élevées de PFAS ont été trouvées à la surface de la mer que dans les eaux souterraines correspondantes (>30 cm de

Dans les systèmes d'eau douce, l'herbicide atrazine, l'un des pesticides les plus couramment détectés dans les eaux souterraines, les eaux de surface et les précipitations, s'est avéré modifier les tissus reproducteurs des poissons mâles lorsqu'ils y sont exposés pendant le développement. L'atrazine a démasculinisé et féminisé les poissons mâles, les amphibiens et les reptiles. Cela s'est traduit par une réduction de la spermatogenèse, l'apparition des ovaires chez les poissons mâles, la production de la protéine, la vitellogénine, normalement synthétisée par les femelles et la production d'ovules chez les mâles.^[89]

L'apparition de l'intersexualité chez les bars mâle à petite bouche du fleuve Potomac et de ses affluents en Virginie, aux États-Unis, était particulièrement élevée pendant la saison de frai, la fréquence des intersexualités étant plus élevée dans les cours d'eau qui drainent des zones de

profondeur).^[239] La micro-couche de surface de la mer, la couche de <50 µm d'épaisseur où se produisent les échanges entre l'atmosphère et l'océan, fournit un habitat vital pour le biote, y compris les œufs et les larves de nombreuses espèces de pêche commerciale et leurs sources alimentaires phytoplanctoniques. La contamination de la micro-couche de surface de la mer dans les zones polluées a entraîné des taux de mortalité et d'anomalie des embryons et des larves de poissons significativement plus élevés.^[242]

On trouve des PFAS dans les poissons et autres animaux marins à travers le monde.^[166, 216] En Australie, les PFAS ont été trouvés à des niveaux élevés chez les yabbies (écrevisses) et des poissons d'eau douce associés aux bases de la défense.^[96] En Chine, les poissons du fleuve Yangtze et du lac Tangxun ont été analysés pour détecter les PFAS. En plus des PFAS courants (par exemple, PFOS, PFOA, PFHxS, PFBS), plus de 330 autres produits chimiques fluorés ont été détectés dans le foie des poissons.^[136] Dans l'État américain de Caroline du Sud, neuf PFAS ont été trouvés dans les filets de six espèces de poissons dont les niveaux de PFOS dépassaient les valeurs de dépistage et étaient considérés comme représentant un risque potentiel pour les prédateurs de la faune.^[67]

La consommation fréquente de poissons sauvages pourrait présenter des risques pour la santé de certaines populations locales. La cuisson de la majorité des fruits de mer ne réduit pas les concentrations de PFAS et, dans certains cas, peut augmenter l'exposition alimentaire. Les concentrations de PFOS, de PFHxS et de PFOA dans les crevettes en bancs ont effectivement doublé après ébullition, tandis que la cuisson de certains poissons a également augmenté les concentrations de PFOS.^[213]

production agricole intensive et de forte population, par rapport aux zones non agricoles et non développées.^[22]

De même, les poissons mâles en aval des points de rejet des eaux usées ont été féminisés.^[230, 125] Dans certains cas, ils ont produit de la vitellogénine et présentaient des œufs à un stade précoce dans leurs testicules. Cela a été attribué à la présence des substances œstrogéniques, telles que les pilules contraceptives à base d'œstrogènes synthétiques, et d'imitateurs d'œstrogènes, tels que le nonylphénol présent dans les eaux usées.^[125] En Argentine, les poissons d'un lac peu profond situé dans une zone agricole ont également produit de la vitellogénine, et ont développé des lésions dans leurs branchies et leur foie associées à des niveaux élevés de l'endosulfan, un perturbateur endocrinien, dans ces organes.^[16] Les poissons vivant en amont et en aval des sites militaires utilisés dans le passé (FUD) sur l'île de Saint-Lawrence dans la mer de Béring a été contaminée par des PCB et les concentrations de vitellogénine chez les mâles indiquent une exposition à des contaminants œstrogéniques. Les poissons vivant en aval ont également démontré des impacts sur l'ADN.^[246]

Les scientifiques du *US Geological Survey* qui ont documenté la présence de contaminants perturbateurs endocriniens dans les rivières et les cours d'eau à travers les États-Unis ont mis en garde contre les « impacts ruineux des PE sur les populations de poissons ».^[229]

2.1.2 LES EFFETS SUR LE SYSTÈME IMMUNITAIRE

La pollution par les PE peut également avoir des effets immunitaires et accroître la sensibilité aux maladies des espèces aquatiques et marines, y compris les poissons et les invertébrés.^[77] Des recherches menées dès les années 1970 ont montré que l'infection par *Baculovirus* chez les crevettes augmentait en intensité lorsque les crustacés étaient exposés à des niveaux croissants de PCB.^[46]

Au milieu des années 1990, les POP, y compris les PCB, avaient été associés à l'immunosuppression et aux maladies chez les phoques.^[167] Les chercheurs ont également conclu qu'un certain nombre de polluants à base de métaux lourds, y compris le cadmium, le chrome, le cuivre, le plomb, le manganèse, le nickel, et le zinc, étaient immunotoxiques. Il a été démontré que ces métaux lourds modifiaient les fonctions immunorégulatrices de diverses espèces de poissons, ce qui en fin de compte, entraînait une plus grande sensibilité de l'hôte aux maladies infectieuses et malignes.^[241]

Une étude exhaustive^[51] des impacts des POP sur le biote arctique (par exemple, le phoque à fourrure du Nord, l'otarie de Steller, les ours po-



Les herbicides comme l'atrazine peuvent modifier le sexe et les processus de reproduction chez les animaux.

lares, l'omble chevalier) a fait état d'associations entre les concentrations de certains POP et les biomarqueurs liés à la résistance aux infections. De même, des études ont montré que les concentrations de mercure, de biphényles polychlorés (PCB) et de 4,4'-DDE (dichlorodiphényl-dichloroéthylène), qui sont écologiquement pertinentes, peuvent affecter la fonction immunitaire et la santé des tortues de mer caouannes, *Caretta caretta*.^[231] Par exemple, chez les tortues caouannes de la Caroline du Sud et de Floride, lorsque les niveaux de mercure dans leur sang augmentaient, le nombre de lymphocytes et les réponses immunitaires diminuaient. Ces impacts négatifs sur la fonction immunitaire ont été observés à des concentrations écologiquement pertinentes.^[49]

Les enquêtes sur un événement de mortalité massive de l'huître du Pacifique *Crassostrea gigas*, ont révélé que l'exposition à l'herbicide diuron supprimait différents gènes impliqués dans les réponses immunitaires.^[138] De même, l'exposition des mollusques d'eau douce à des insecticides pyréthriinoïdes, la cyperméthrine et le fenvalérate, a entraîné des dommages importants à leurs théocytes qui sont les cellules des mollusques qui remplissent diverses fonctions immunologiques.^[181] Des études sur la mortalité massive des poissons dans la rivière Shenandoah, aux États-Unis,



ÉTUDE DE CAS

DÉCLIN DES APPÂTS BLANCS EN NOUVELLE-ZÉLANDE : EFFETS SYNERGIQUES DE LA FORMULATION DU GLYPHOSATE ET DE L'INFECTION PARASITAIRE

L'appât blanc, *Galaxias anomalus*, est un poisson d'eau douce qui fraie en masse et qui remonte et descend des rivières pour compléter sa course de frai et accéder à l'habitat et à la nourriture pour ses petits. Une série d'espèces de poissons partout dans le monde effectuent des voyages fluviaux héroïques similaires pour achever leurs cycles de reproduction.

Auparavant, les populations d'appâts blancs étaient si abondantes que les gens pouvaient littéralement se tenir sur la rive et les ramasser dans les filets à la main. Ils les transformaient en beignets d'appât blanc, qui sont considérés comme un mets national néo-zélandais. On a observé que les populations d'appâts blancs ont commencé à diminuer dans les rivières où l'élevage laitier à l'échelle industrielle s'était étendu dans les bassins versants. Les zones humides ont été drainées, les cours d'eau artificiellement canalisés et la végétation enlevée des berges avec des applications de glyphosate, un herbicide, pour permettre aux bétails d'avoir accès à l'eau.

Les scientifiques ont également commencé à trouver des taux croissants de

poissons déformés dans ces bassins versants.^[121] Il a été déterminé que la cause de ces difformités était un parasite qui s'incruste dans les épines des poissons et les fait se courber. Les poissons courbés ne peuvent pas nager très vite, ce qui les rend plus vulnérables à la prédation. Une enquête plus approfondie a révélé que le parasite responsable des malformations était présent dans l'environnement depuis un certain temps et qu'il avait été décrit pour la première fois en 1945. Les populations d'appâts blancs avaient coexisté et prospéré en leur présence, alors qu'est-ce qui avait changé?

Des recherches^[120] ont révélé que la pulvérisation des berges de la végétation avec des formulations de glyphosate contenant des polyoxyéthylénamines (POEA) avait modifié l'équilibre naturel. Les formulations de glyphosate contenant des POEA sont plus cytotoxiques et présentent plus d'effets de perturbation endocrinienne que l'ingrédient actif glyphosate seul.^[243] Si vous mettez des poissons dans une concentration de formulation de glyphosate contenant des POEA à des taux écologiquement rationnels, ils deviennent



plus sensibles à l'infection et l'intensité du parasitisme augmente.

Le parasite en question a un cycle de vie à deux hôtes, qui implique également un escargot de rivière. Les recherches ont révélé que l'exposition des escargots à la formulation du glyphosate leur permettait

de produire beaucoup plus de parasites. Les appâts blancs sont confrontés à un double problème insidieux: ils doivent faire face à une augmentation du nombre de parasites et une diminution de leur résistance et de leur tolérance pour pouvoir les combattre.

ont montré que de nombreux poissons étaient incapables de fabriquer des globules blancs normaux pour lutter contre la maladie.^[187]

Les parasites des poissons représentent une part importante de la biodiversité aquatique.^[170] L'équilibre entre les parasites et les hôtes peut être affecté par de nombreux facteurs, y compris la présence d'une contamination chimique, la chaleur, et le stress nutritionnel, ainsi que l'infection par certains agents pathogènes; tous ces facteurs affectent la réponse immunitaire de l'hôte au parasite.

Les herbicides à base de glyphosate (GBH) ont été associés à une augmentation du risque de maladie chez les poissons, car les parasites et les GBH peuvent agir en synergie à des concentrations écologiquement pertinentes, amplifiant les effets néfastes les uns les autres.^[121]



Le glyphosate a été associée aux maladies chez les poissons.



IMPACTS SUR LA CHAÎNE ALIMENTAIRE

Les polluants peuvent également affecter les ressources alimentaires dont dépendent les animaux aquatiques. Par exemple, les herbicides affectent la viabilité des herbiers marins et avec la perte d'herbiers marins, les ressources alimentaires et les habitats diminuent pour les jeunes crevettes et poissons. De nombreux poissons se nourrissent d'insectes ou en dépendent pour l'élevage de leur progéniture. Lorsque les petites proies invertébrées sont réduites en raison de l'exposition aux pesticides néonicotinoïdes tels que l'imidaclopride et le fipronil, les poissons ont moins de nourriture à manger, ce qui entraîne une baisse des taux de croissance.^[80]

Plus de 40 % des espèces d'insectes pourraient être menacées d'extinction, les quatre principaux ordres d'insectes aquatiques (*Odonata*, libellules et demoiselles; *Plecoptera*, mouches des pierres; *Trichoptera*, phryganes; et *Ephemeroptera*, éphémères) étaient déjà en danger. La perte d'habitat due à l'agriculture intensive, les polluants industriels et agricoles, les espèces envahissantes et le changement

climatique sont tous à blâmer. Dans les milieux aquatiques, les résidus persistants de fipronil dans les sédiments inhibent l'émergence des libellules et le développement de chironomides (moucheron non piqueur ou mouches des lacs) et d'autres larves d'insectes, ce qui a des effets négatifs en cascade sur la survie des poissons dépendants. Les éphémères (insectes minces à ailles membranaires délicates ayant un stage larvaire aquatique et une étape de vie terrestre durant généralement moins de deux jours) ont été éliminées dans les cours d'eau où l'acidification due à la fonte et aux activités minières ont fait passer le pH de l'eau en dessous de 5,5. Les nymphes d'éphémères fournissent de la nourriture à de nombreux types de poissons d'eau douce.^[193]

Le réseau trophique aquatique a été gravement perturbé lorsque l'œstrogène synthétique utilisé dans la pilule contraceptive 17 α -éthynylestradiol (EE2), a décimé la petite population de poissons d'un lac, ce qui a eu pour conséquence de réduire considérablement la nourriture

des grands poissons prédateurs tels que les truites, entraînant une perte de condition correspondante chez ces espèces prédatrices.^[124]

La pollution des nutriments et le réchauffement climatique sont à l'origine des proliférations d'algues dans les eaux marines et une dominance d'algues bleues et de bactéries toxiques en eau douce. Les dinoflagellés (espèces d'algues unicellulaires) sont très courants et très répandus mais, dans certaines conditions environnementales (par exemple, augmentation des nutriments) ils peuvent croître très rapidement. Le dinoflagellé *Karenia brevis* colore la surface de l'océan d'un rouge profond, d'où le nom de « marée rouge ».

Les marées rouges créent des océans temporairement toxiques, mais elles peuvent aussi épuiser l'oxygène dissous dans l'eau, provoquant un phénomène connu sous le nom de « zone morte ». Lorsque les algues meurent, elles sont consommées par les bactéries et autres microbes. Comme tous les animaux, les microbes ont besoin d'oxygène. Lorsqu'ils se nourrissent des algues mortes, ils se multiplient et meurent, consommant une grande partie de l'oxygène, laissant peu de place aux poissons et autres créatures aquatiques.

Les algues toxiques, tant en eau douce qu'en eau de mer sont associées à la mort massive des poissons, un phénomène de plus en plus courant. Alors que la plupart des mortalités de poissons sont dues à la décomposition de la prolifération d'algues, qui entraîne une diminution de l'oxygène dans l'eau, cer-

taines algues, comme les algues bleues *Cyanobactéries* ou les algues dorées *Prymnesium parvum* produisent des toxines qui affectent la vie aquatique.

Les algues dorées que l'on trouve dans les lacs, les étangs et les rivières d'eau douce et saumâtres peuvent produire une toxine qui perturbe la respiration des organismes qui respirent par les branchies comme les poissons, les écrevisses et certains amphibiens. Après une exposition, les branchies n'absorbent pas correctement l'oxygène, ce qui provoque des hémorragies internes et éventuellement la mort par asphyxie. La présence de ces toxines a provoqué la mort de nombreux poissons dans tout le sud-ouest des États-Unis.^[100] Les mollusques et crustacés accumulent naturellement ces toxines en filtrant les algues de l'eau pour se nourrir et la consommation de crustacés contaminés peut entraîner une grave maladie chez l'homme.

Les effets croissants de la pollution des nutriments, de la prolifération d'algues toxiques et de l'acidification induite par le climat sur des micro-organismes tels que les diatomées et les foraminifères benthiques, organismes unicellulaires qui constituent la base même des chaînes alimentaires aquatiques et marines, associés aux impacts des polluants persistants, à l'augmentation de la température et à d'autres stress, représentent de graves risques pour la santé des réseaux alimentaires marins et aquatiques à travers le monde et pour les pêches dont dépendent tant de communautés.

Néanmoins, il reste difficile d'établir des liens de causalité clairs dans les populations de poissons sauvages exposées aux polluants et aux maladies infectieuses en raison de la multiplicité des expositions. De nombreux poissons sont des porteurs asymptomatiques de bactéries et de virus qui, dans des conditions normales, ne causeraient pas de maladies. Mais lorsque leur système immunitaire est affaibli par des polluants, une augmentation de la température ou d'autres facteurs de stress, les agents pathogènes peuvent se multiplier et rendre l'hôte malade. L'altération des relations hôte-parasite ou hôte-pathogène établies de longue date avec les substances toxiques immunitaires a des conséquences néfastes.^[46]

2.1.3 LES EFFETS COMPORTEMENTAUX ET INDIRECTS

L'impact des polluants sur les espèces marines n'est pas toujours immédiat. Les animaux marins exposés à des substances toxiques peuvent souffrir d'une perte de résilience, l'exposition sublétales aux polluants chimiques rendant les poissons plus sensibles à la chaleur et à d'autres facteurs de stress, modifiant leurs comportements.^[199]

Des changements subtils dans les comportements, les habitudes alimentaires et de « mue » peuvent affecter de manière significative la viabilité de la population de poissons ou d'invertébrés. Par exemple, le pesticide néonicotinoïde imidaclopride a le potentiel de causer indirectement la létalité des populations d'invertébrés aquatiques à de faibles concentrations sublétales en entravant les mouvements et donc l'alimentation.^[164] Avec des expositions constantes à de faibles doses d'imidaclopride, l'arthropode aquatique *Gammarus pulex*^[81] meurt tout simplement de suite de famine.

L'exposition au pesticide organophosphoré dichlorvos au début du développement des poissons a également entraîné des troubles de comportement détectables après l'éclosion.^[204] Le chlorpyrifos, un insecticide organophosphoré très répandu et très mobile, présente de graves risques pour les organismes et les écosystèmes aquatiques car il a des effets sublétaux sur le comportement et la perception olfactive des arthropodes et des poissons.^[145, 81]

Les embryons et les larves de poissons exposés à une série de doses sublétales d'un mélange de POP ont vu leur comportement se modifier, notamment la vitesse de nage des larves.^[123] De même, une exposition embryonnaire aiguë à des PFAS individuels a entraîné des modifications biochimiques et comportementales importantes chez les jeunes poissons zèbres adultes six mois après l'exposition. Ces changements comprenaient une réduction de la distance totale parcourue ainsi que des changements de comportement agressif. Cette exposition embryonnaire à court terme à



Les microplastiques sous forme de microflocs provenant de déchets plastiques dégradés, les microfibrilles de vêtements synthétiques et les microbilles de l'industrie se retrouvent dans les cours d'eau et les océans. Avec la propagation du coronavirus COVID 19 (SRAS-CoV-2), les gants en latex, les masques en polypropylène et les bouteilles de désinfectant pour les mains constituent une nouvelle source de plastiques dans l'océan. Source: NOAA.com

des contaminants PFAS a eu des effets à long terme et persistants jusqu'à l'âge adulte.^[115, 8]

2.2 LES EFFETS DE LA POLLUTION PAR LES MICROPLASTIQUES SUR LA PÊCHE

Les microplastiques sont une forme de pollution qui contamine les habitats aquatiques et marins, y compris les estuaires, lieux de reproduction de nombreuses espèces de poissons.^[15] Plus de 690 espèces marines ont été touchées par les débris de plastique et les microplastiques, qui ont des effets néfastes sur un nombre croissant d'organismes marins de tous les niveaux trophiques, y compris le zooplancton, les bernaches, les bivalves, les crustacés décapodes, les poissons, les mammifères marins et les oiseaux marins.^[34]

Des microplastiques ont été trouvés dans des espèces de poissons commerciales (benthiques et pélagiques) provenant de la Manche, de la mer du Nord, de la mer Baltique, de l’océan Indo-Pacifique, de la mer Méditerranée, de la mer Adriatique et du Nord-Est de l’Océan Atlantique.^[26] Tous les échantillons de poissons d’eau profonde de la mer de Chine méridionale étaient contaminés par des microplastiques.^[134] Les poissons du golfe Persique avaient également des microplastiques dans leur tractus gastro-intestinal, leur peau, leur muscle, leurs branchies, et leur foie, tandis que les microplastiques ont été trouvés dans l’exosquelette — et surtout dans les muscles — des crevettes tigrées du golfe Persique.^[192]

Des fibres microplastiques (provenant par exemple de vêtements et de cordes synthétiques) ont été trouvées dans le tractus digestif des poissons sauvages et dans leurs larves provenant de la Manche^[140] et dans 63 % des échantillons de crevettes du crustacé commercialement important *Crangon crangon* de la mer du Nord et de la zone de la Manche.^[53] Les mollusques et autres animaux aquatiques consommés entiers sont particulièrement préoccupants pour l’exposition humaine.^[205]

Les microplastiques présents dans la colonne d’eau et les sédiments constituent une voie d’exposition directe pour les organismes aquatiques et marins, tandis que les nanoplastiques sont facilement transférés à travers les chaînes alimentaires aquatiques.^[38]

De nombreux organismes qui se nourrissent en suspension, comme les huîtres et les moules, ainsi que ceux qui se nourrissent sur le fond, comme les concombres de mer, les crabes et les homards, consomment des microplastiques, car ils ne peuvent pas faire la différence entre les microplastiques et les aliments.^[147] Les microplastiques ont la même taille que le plancton et les grains de sable, et comme les salissures biologiques jouent un rôle important, il est facile pour la vie marine de confondre le plastique avec une source d’aliments nutritifs.^[34]

L’exposition des organismes aquatiques aux microplastiques a été associée à des effets négatifs sur la santé, tels qu’une réponse immunitaire accrue, une diminution de la consommation des aliments, une perte de poids et un appauvrissement énergétique, une baisse du taux de croissance, une diminution de la fertilité et des répercussions sur les générations suivantes.^[139]

Daphnia les puces d’eau exposées à des plastiques en polystyrène de taille nanométrique ont démontré une taille corporelle réduite et de graves altérations de la reproduction.^[18] Chez les crevettes mysidacées, l’exposition à de fortes concentrations de microplastiques en polystyrène a entraîné un taux de mortalité de 30%.^[151] On a observé un retard significatif du temps

de développement et une diminution du taux de survie chez le petit crustacé aquatique, une espèce de copépodes *Tigriopus japonicus*^[39], alors que lorsqu'ils étaient exposés de façon chronique sur des générations successives, d'autres crustacés ont connu des taux de mortalité accrus.^[139]

Chez les mollusques, l'exposition aux microplastiques a modifié leurs réponses immunologiques, a provoqué des effets neurotoxiques et une génotoxicité, et endommagé l'information génétique. Les microplastiques ont également affecté la reproduction et la croissance démographique des huîtres creuses du Pacifique^[14], tandis que la survie des moules a diminué avec l'abondance croissante des plastiques PVC, probablement en raison des périodes prolongées de fermeture des valves en réaction à la particule.^[188]

Les microplastiques présents dans les branchies, le foie et le tube digestif du poisson zèbre provoquent une inflammation, un stress oxydatif, et perturbent le métabolisme énergétique.^[137] L'exposition à des plastiques en polystyrène de taille nanométrique affecte l'activité des poissons, tandis que les nanoplastiques pénètrent les parois de l'embryon et se trouvent dans le sac vitellin des éclos juvéniles.^[38]

2.2.1 LES MICROPLASTIQUES ET LEURS CONTAMINANTS

Les microplastiques en milieu marin contiennent des contaminants écotoxicologiques^[79] y compris des additifs chimiques provenant de leur fabrication. Certains additifs plastiques tels que les ignifugeants PBDE sont des PE et peuvent être présents dans les plastiques à des niveaux très élevés.^[76]

Les microplastiques attirent également des contaminants tels que les PCB, le DDT, le HCB, les HAP et autres hydrocarbures pétroliers provenant du milieu environnant (par exemple, les sédiments, l'eau de mer) et concentrent ces contaminants sur leur surface plastique jusqu'à six ordres de grandeur de plus que l'eau de mer ambiante.^[34]

Les écosystèmes marins et leurs habitants sont menacés à la fois par les microplastiques et par les contaminants qui s'y concentrent. Dans l'océan Atlantique Sud, des densités de microplastiques plus importantes sont associées à des concentrations nettement plus élevées de PBDE chez les poissons myctophiles.^[189] Alors que les moules (*Mytilus galloprovincialis*) exposées aux microplastiques contaminés par les HAP avaient des plastiques dans leur hémolymphe (un liquide équivalent au sang), leurs branchies et leurs tissus digestifs, ainsi qu'une accumulation marquée de pyrène HAP, les moules ont également connu des altérations des réponses immunologiques et des effets neurotoxiques.^[14] L'hexabromocyclododé-



Le polystyrène de faible poids se déplace facilement à travers les cours d'eau et les égouts pluviaux, pour finalement atteindre l'océan où il se décompose en morceaux plus petits et non biodégradables qui sont ingérés par la vie marine.



cane (HBCDD) utilisé dans la mousse de polystyrène (EPS/XPS) a été retrouvé dans les huîtres provenant de fermes aquacoles où des bouées en polystyrène contenant du HBCDD étaient utilisées.^[76]

Les phtalates toxiques sont des plastifiants largement utilisés que l'on trouve dans les microplastiques. Dans une étude, plus de la moitié des échantillons de planctons de surface analysés contenaient des particules microplastiques à forte concentration de phtalates. Des concentrations d'un mono-(2-éthylhexyl) phtalate (MEHP) ont également été retrouvées dans le lard des rorquals communs échoués, ce qui pourrait indiquer la menace des microplastiques et de leurs contaminants pour la vie marine.^[75]

Il existe des preuves de transfert trophique à travers la chaîne alimentaire marine de microplastiques et de contaminants associés.^[34] On craint de plus en plus que les effets des volumes toujours croissants de microplastiques et de leurs contaminants entraînés s'ajoutent aux facteurs de stress existants et puissent augmenter la mortalité des populations naturelles de poissons.^[165]



3. LE CLIMAT, LES POLLUANTS ET LES PÊCHES

En raison du changement climatique, nos océans sont plus chauds, plus acides et moins productifs. La fréquence et l'intensité des tempêtes augmentent également.^[111] Les écosystèmes qui soutiennent la pêche et l'aquaculture subissent des changements importants en raison du changement climatique.

Les projections indiquent que ces changements ne feront qu'empirer à l'avenir.^[71] De nombreuses régions font état d'une diminution de l'abondance des stocks de poissons et de crustacés en raison des effets directs et indirects du réchauffement climatique et les changements biogéochimiques ont déjà contribué à la réduction des prises de pêche.^[111]

L'élévation du niveau de la mer est souvent primordiale dans l'esprit des gens lorsqu'ils pensent au changement climatique, mais les effets du changement climatique sur l'écosystème marin affecteront chaque aspect de la chaîne alimentaire marine. L'augmentation des températures fait fondre la glace de mer, les glaciers et le permafrost, ce qui contribue non seulement à l'élévation du niveau de la mer, mais aussi à la modification des courants océaniques, de la salinité et des niveaux d'oxygène, ainsi que des températures de l'eau, tandis que l'augmentation des dépôts de dioxyde de carbone (CO₂) rend les océans beaucoup plus acides.

Les zones désoxygénées ou « zones mortes » dans l'océan ont augmenté de manière significative en raison de la pollution et du réchauffement des eaux.^[28] La diminution des niveaux d'oxygène dans l'eau et l'eutrophication, ainsi que la prolifération de parasites et d'agents pathogènes^[219] ont toutes un impact sur la capacité des poissons et des autres espèces aquatiques à réagir et à s'adapter aux conditions changeantes. Des pluies plus intenses entraînent un ruissellement plus important des sédiments et, avec lui, tous les contaminants qui y adhèrent, tels que les produits chimiques agricoles et les hydrocarbures.

Les efflorescences algales nuisibles ont augmenté en fréquence dans les zones côtières depuis les années 1980 en réponse à des facteurs climatiques (réchauffement des océans, vagues de chaleur marines, perte d'oxygène, eutrophication) et non climatiques, tels que la pollution et l'augmentation du ruissellement des eaux usées dans les rivières.^[111]

Le changement climatique entraîne également une baisse de l'état nutritionnel car il affecte les espèces dont dépend la chaîne alimentaire marine, comme le phytoplancton marin et les invertébrés comme le krill. Dans l'océan Austral, l'habitat du krill antarctique, une espèce de proie essentielle pour les pingouins, les phoques et les baleines, devrait se contracter vers le sud. Les algues qui poussent sous la glace de mer diminuent également et avec elles une partie de la nutrition à la base de la chaîne alimentaire.

De nombreuses espèces marines ont déjà subi des changements dans leur aire de répartition et leurs activités en réponse au changement climatique et à la perte d'habitat. Les changements dans la composition des espèces, l'abondance et la production de biomasse des écosystèmes ont contribué à la diminution du potentiel de capture.^[111]

3.1 LES INTERACTIONS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DES POLLUANTS PERSISTANTS

Les changements induits par le climat peuvent renforcer les effets toxiques des contaminants. Des interactions synergiques entre les pesticides et le stress thermique ont été mises en évidence chez les crustacés des cours d'eau agricoles^[190], tandis que l'exposition chronique à certains pesticides (par exemple, l'endosulfan, le phénol et le chlorpyrifos) peut réduire la tolérance des poissons à l'augmentation de la température.^[172]

Le réchauffement climatique modifie également la répartition des contaminants. L'augmentation des températures remobilise les contaminants historiques de leurs « puits polaires ». ^[191] Les polluants générés aux latitudes tempérées sont transportés vers les régions polaires par des processus atmosphériques et océaniques où ils sont déposés dans la neige, la glace, l'eau, les sols et les sédiments. L'augmentation des températures accroît la libération et les émissions de ces substances toxiques persistantes, et les vents plus forts, les inondations et les phénomènes météorologiques extrêmes augmentent leur distribution.^[219, 178]



Le réchauffement, la désoxygénation et l'acidification des océans peuvent amplifier les effets de la pollution en augmentant à la fois l'exposition et la bioaccumulation de nombreux contaminants dans la chaîne alimentaire marine. Un climat plus chaud affecte les organismes à sang froid tels que



ACIDIFICATION DES OCÉANS

À mesure que la concentration de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère augmente en raison de l'utilisation de combustibles fossiles et d'autres activités telles que le déboisement, davantage de CO_2 se dissout dans l'eau de mer ce qui rend les océans plus acides. L'acidité de l'eau a augmenté de 26% depuis le début de la révolution industrielle.^[71]

Si les effets de l'augmentation de l'acidité varient selon les espèces de poissons, l'acidification des océans provoque des troubles sensoriels et comportementaux chez de nombreuses espèces de poissons.^[44] Les eaux acides peuvent interférer avec les neurotransmetteurs des poissons, affectant leur comportement.^[56] L'augmentation de l'acidification cause également des lésions chez les poissons en corrodant leurs branchies, en attaquant la teneur en calcium du squelette^[177] et en affectant leur capacité de reproduction.^[149] Les nouveau-nés ou les petits alevins peuvent être incapables de supporter l'augmentation de l'acidité.

L'acidification a de graves conséquences sur d'autres espèces marines, notamment les polypes, qui constituent la base de nombreux récifs coralliens, les minuscules mollusques tels que les pteropodes^[78] et le krill^[95] dont dépendent tant de poissons, de baleines et d'espèces d'oiseaux. Les diatomées à la base du réseau trophique aquatique construisent leur couche externe en silicate, mais l'augmentation de l'acidité a réduit leur capacité à le faire.^[175] Les grandes populations de foraminifères benthiques qui vivent dans les plates-formes des récifs coralliens sont les principaux producteurs de carbonate de calcium (CaCO_3) dans les écosystèmes récifaux, mais le réchauffement et la pollution des océans entraînent également une diminution significative de leur production de CaCO_3 . Cela a de graves implications pour l'avenir des récifs coralliens.^[58, 184] Les éclosiers commerciaux d'huîtres subissent déjà les effets de l'acidification avec une réduction de la survie des larves d'huîtres.^[17]



Les ignifugeants ainsi que la cendre des feux de forêt se retrouvent dans les rivières. Les effets toxiques induits et la désoxygénation aiguë peuvent nuire à la vie aquatique.

les invertébrés, les poissons, les amphibiens et les reptiles en augmentant directement l'absorption interne des contaminants dans leurs branchies et leurs intestins.^[219] Les changements dans l'acidité de l'eau peuvent augmenter la bioaccumulation de substances toxiques telles que le cadmium chez les bivalves marins.^[233]

Le changement climatique augmente également la bioaccumulation chez les poissons et autres organismes marins des neurotoxines, du méthylmercure (MeHg) et des PCB^[5], qui sont parmi les contaminants les plus répandus et les plus toxiques de la chaîne alimentaire marine. Le réchauffement des températures peut également accroître l'exposition humaine au MeHg, en augmentant la production, la bioaccumulation et le transfert trophique du MeHg dans les chaînes alimentaires marines.^[55]

Le changement climatique a d'autres effets indirects sur la qualité de l'eau. Par exemple, l'augmentation significative de l'activité des incendies a entraîné une utilisation accrue des ignifugeants tels que le Phos-Chek. Cela a entraîné l'application de produits chimiques dangereux dans les bassins versants, car certaines de ces substances sont connues pour être toxiques pour les poissons à différents stades de leur cycle de vie.^[54] Les cendres des incendies se déversent également dans les rivières et peuvent provoquer des épisodes de désoxygénation aiguë qui nuisent encore davantage à la vie aquatique.

ÉTUDE DE CAS

LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FORÊTS DE VARECH

Les forêts de varech sont des puits de carbone dynamiques, qui absorbent plus de CO₂ de l'atmosphère que les forêts tropicales humides terrestres. Elles fournissent également un habitat et constituent un élément essentiel du réseau trophique océanique.

Malheureusement, le réchauffement des océans a un impact sur la capacité des forêts de varech à survivre et à absorber le carbone. Les forêts de varech situées dans les eaux plus chaudes subissent un stress important dû à la hausse des températures océaniques.^[174] Les vagues de chaleur océaniques ont déjà tué plus de 100 kilomètres (km) de forêts de varech et ont eu un impact sur 500 km supplémentaires le long de la côte sud de l'Australie-Occidentale.^[235]

En 2016, l'ormeau rouge est mort en masse dans l'écosystème marin du nord de la Californie en raison des températures et persistantes de l'océan dues à la conjonction de plusieurs événements. En 2011, une prolifération d'algues toxiques au large de la côte de Sonoma en Californie a tué de nombreux invertébrés marins, y compris l'ormeau. Puis, en 2013, une maladie de dépérissement a sérieusement affecté les étoiles de mer, qui étaient

responsables du contrôle des populations d'oursins.

La mort des étoiles de mer a déclenché une explosion d'oursins violets qui ont à leur tour ravagé les forêts de varech, laissant les ormeaux restants mourir de faim. Les forêts de varech déjà stressées ont ensuite été soumises à *Le Blob*, une vague de chaleur marine de 2014-2016. L'environnement chaud et pauvre en nutriments causé par *Le Blob* a rendu les conditions de vie des forêts de varech insupportables et elles sont mortes en même temps que l'ormeau.^[190]

En Asie, les algues cultivées sont soumises au stress des eaux chaudes et de la pollution, ce qui leur fait produire une substance qui attire les bactéries à sa surface, puis durcit les tissus et les rend blancs – une maladie appelée *ice-ice*. La production d'algues marine diminue avec l'assaut de la glace, mais comme il ne s'agit pas d'une maladie contagieuse, déplacer la culture des algues marines vers des eaux plus froides et plus profondes pourrait être une façon de résoudre le problème.^[217]



4. SOURCES ET CONTRIBUTIONS DE POLLUANTS

Il existe de nombreuses sources de polluants dans les écosystèmes frais et marins. On estime que 80 % de la pollution chimique marine provient de la terre ferme.^[226] La combustion des déchets, les centrales électriques au charbon et la production de combustibles fossiles rejettent des tonnes d'émissions dangereuses dans l'atmosphère chaque année.^[161] La combustion de carburants dans les automobiles, les usines et les fonderies introduit les hydrocarbures et les métaux dans l'environnement.

Beaucoup de ces polluants finissent par se retrouver dans nos océans et nos lacs par le biais de dépôts atmosphériques. Cela se produit lorsque les contaminants, une fois en suspension dans l'air (soit sous forme de vapeur ou fixés à des particules de poussière), sont emportés par la pluie ou la neige, ou retombent sur la terre dans les climats plus froids.

Les installations industrielles, telles que la fabrication de produits chimiques, les usines de pâtes et papiers, ainsi que les rejets d'eaux usées, les égouts pluviaux, l'agriculture et les activités minières contribuent toutes au ruissellement des produits chimiques toxiques directement dans le milieu aquatique. Des milliers de produits pharmaceutiques, de produits de soins personnels, de plastifiants et de nouveaux matériaux industriels (par exemple, les nanoparticules artificielles) pénètrent régulièrement dans les lacs, les rivières, les estuaires et les milieux marins proches du rivage.

Ces contaminants chimiques peuvent être toxiques pour certains organismes marins et aquatiques, avec des effets qui s'amplifient et affectent des populations, des espèces, des communautés et des écosystèmes entiers. Les polluants interagissent également avec d'autres facteurs de stress chimiques et non chimiques et peuvent les exacerber.^[197]

Historiquement, les préoccupations et la réglementation des polluants de l'eau se sont largement concentrées sur les rejets en bout de chaîne, ou ce que l'on appelle *les sources ponctuelles*, en particulier en ce qui concerne les permis de rejet de nutriments, de sédiments et de déchets. Pourtant, les produits chimiques toxiques ont d'autres voies plus diffuses de dépôt et de ruissellement terrestre. Les émissions diffuses de polluants sont plus répandues et difficiles à détecter, à surveiller ou à réglementer. Leur déplacement dans les écosystèmes aquatiques est complexe et souvent difficile à prévoir de manière fiable par modélisation.

4.1 LES REJETS INDUSTRIELS

Les installations industrielles continuent à rejeter chaque année des millions de kilogrammes de produits chimiques toxiques dans les rivières, les ruisseaux, les lacs et les eaux océaniques. Par exemple, en 2010, les installations industrielles américaines ont déversé 226 millions de livres (environ 102,5 millions de kilogrammes) de produits chimiques toxiques dans les cours d'eau américains. Selon l'inventaire des rejets toxiques du gouvernement fédéral, des produits chimiques toxiques ont été déversés dans plus de 1 900 cours d'eau dans les 50 États. Environ 1,5 million de livres de ces produits étaient associées au cancer, tandis que 619 000 livres de ces produits chimiques étaient associées à des troubles du développement, et environ 342 000 livres étaient toxiques à la reproduction.^[63] Les industries des pâtes et papiers, du fer et de l'acier, de l'approvisionnement en énergie, des métaux non ferreux et des produits chimiques sont parmi celles qui rejettent le plus directement dans l'eau.^[66]

4.2 INSTALLATIONS DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES

En Europe, le rejet de polluants directement dans les masses d'eau par les grandes industries a diminué, mais les polluants industriels transférés par les réseaux d'égouts vers les stations d'épuration des eaux usées (SEEU) ont augmenté.^[66] De nombreux contaminants ne peuvent pas être captés ou détruits dans les SEEU et se retrouvent donc dans les boues d'épuration et les effluents. Les produits chimiques halogénés industriels et de consommation tels que les PBDE^[154, 85] et le PFAS^[92, 3], se retrouvent dans les effluents des stations d'épuration^[3] et contaminent les océans, les rivières et les lacs du monde entier.

Les pesticides sont également des contaminants des eaux usées traitées. Aux États-Unis, les pesticides imidaclopride, acétamipride et clothianidine ont été identifiés comme des « constituants récalcitrants des eaux usées » qui persistent tout au long du traitement des eaux usées pour pénétrer dans les cours d'eau avec des charges importantes, potentielle-



LES PRODUITS PHARMACEUTIQUES DANS L'ENVIRONNEMENT

Les stations d'épuration des eaux usées ne sont pas conçues pour éliminer les résidus pharmaceutiques. On trouve des produits pharmaceutiques et des produits chimiques de soins personnels dans les eaux marines et côtières, ainsi que dans les rivières et les cours d'eau. Des données provenant de plus de 71 pays ont permis d'identifier 631 agents pharmaceutiques différents (y compris leurs métabolites et produits de transformation) dans l'environnement, dont des antibiotiques, des anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS), des analgésiques, des hypolipidémiants, des œstrogènes, des médicaments d'autres groupes thérapeutiques^[13], ainsi que les médicaments génotoxiques utilisés dans la chimiothérapie et comme immunosuppresseurs.

Une étude mondiale menée en 2019 sur les antibiotiques a analysé l'eau de 165 rivières dans 72 pays.^[236] Dans 66 % des sites, au moins un antibiotique a été trouvé, tandis que beaucoup en avaient plus d'un et qu'environ 15 % contenaient des niveaux d'antibiotiques dangereux. Le plus souvent, il s'agissait de la triméthoprime, utilisé pour traiter les infections des voies urinaires. Au Bangladesh, le métronidazole a été détecté à des niveaux 300 fois supérieurs aux niveaux considérés comme sûrs, et des niveaux élevés d'antibiotiques ont également été relevés dans plusieurs rivières en Afrique.

Le Danube était le fleuve le plus pollué d'Europe, contenant sept antibiotiques, dont la clarithromycine à un taux près de quatre fois supérieurs au niveau considéré comme sûr. La rivière Thames, généralement considérée comme l'une des rivières les plus propres d'Europe, a été contaminée dans certains sites bien au-delà des niveaux considérés comme sûrs. Huit pour cent des sites testés en Europe dépassaient les limites de sécurité.

ment nocives pour les invertébrés aquatiques sensibles. Les données de 13 stations d'épuration des eaux usées américaines suggèrent des rejets annuels de 1000 à 3400 kilogrammes d'imidaclopride par an dans les effluents traités rejetés dans les rivières et les lacs.^[191]

4.3 LA POLLUTION PAR LES PRODUITS PHARMACEUTIQUES

Les produits pharmaceutiques peuvent avoir des effets nocifs sur les organismes aquatiques, tels que des altérations métaboliques et sexuelles ou l'induction d'une résistance aux antibiotiques chez les micro-organismes aquatiques. Au moins 10 produits pharmaceutiques se sont avérés très toxiques ou extrêmement toxiques pour différentes espèces aquatiques (alendronate, amitriptyline, carvédilol, éthinylestrodiol, fluticasone, fluoxétine, fluvoxamine, midazolam, paclitaxel et thioridazine).^[24]

Les poissons peuvent accumuler des produits pharmaceutiques et des produits chimiques de soins personnels (PCSP). Dans le plasma de poissons rouges en cage exposés aux effluents d'eaux usées municipales ayant subi un traitement tertiaire, 15 PCSP ont été détectés. Les concentrations les plus élevées concernaient l'antidépresseur fluoxétine, et les anxiolytiques diazépam et oxazepam.^[156]

Les produits pharmaceutiques sont souvent conçus pour être actifs à de faibles concentrations. L'exposition chronique de têtes-de-boule dans un lac d'eau douce à de faibles concentrations (5–6 ng/l) de l'œstrogène synthétique 17 α -éthinylestrodiol (EE2), présent dans la pilule contraceptive, a entraîné un échec de la reproduction et l'effondrement de la population de petits poissons dans le lac.^[125] Après l'arrêt de l'ajout EE2, il a fallu 4 ans pour que la population revienne à la normale.^[21]

La carbamazépine, un médicament antiépileptique, était répandue dans les eaux côtières et extracôtières de la mer Baltique.^[20] L'exposition d'embryons de poisson à la carbamazépine et à d'autres médicaments antiépileptiques, à des concentrations écologiquement pertinentes, perturbe leur croissance normale et nuit à leur développement et à leur comportement. Ces effets peuvent avoir des répercussions considérables sur les populations de poissons.^[179]

Certaines lotions solaires et certains produits de soins personnels contiennent des ingrédients toxiques pour la vie marine. L'exposition des coraux au filtre UV oxybenzone peut favoriser les infections virales^[48], provoquer des déformations chez les bébés coraux et endommager l'ADN. L'effet de perturbation endocrinienne fait que les bébés coraux s'enferment dans leur propre squelette, ce qui entraîne leur mort.^[59] Entre 6000

tonnes (environ 5400 tonnes) et 14000 tonnes (environ 12700 tonnes) de lotion de protection solaire font leur chemin sur les récifs coralliens chaque année, avec environ 10% des récifs mondiaux à haut risque d'exposition aux dommages causés par la protection solaire.^[108]

4.4 LA POLLUTION PAR LES HYDROCARBURES

La pollution pétrolière avec ses constituants toxiques, tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), est l'une des formes de pollution aquatique les plus visibles et les plus dommageables. Pénétrant dans les milieux d'eau douce et marins par les égouts pluviaux, les rejets industriels, l'élimination des déchets non traités et l'exploitation minière, ainsi que par les accidents de navigation et la navigation de plaisance, la pollution pétrolière cause des dommages importants aux biotes aquatiques et à la pêche côtière.

L'exposition au pétrole brut peut perturber la fonction cardiaque et provoquer des malformations cardiaques chez les poissons en développement.^[157, 29] L'exposition au pétrole et son ingestion peuvent également endommager les systèmes reproducteurs des poissons, modifier leur taux de croissance et altérer leurs comportements.^[163] L'exposition aux déversements de pétrole peut causer une immunodépression chez les poissons les rendant plus vulnérables aux agents pathogènes. L'immunosuppression était évidente chez le hareng du Pacifique exposé au pétrole brut.^[35]

Après des marées noires importantes, des espèces importantes sur le plan commercial comme les huîtres, les crevettes et le thon peuvent subir un déclin de leur population et devenir trop contaminées pour être capturées et consommées en toute sécurité.

4.4.1 LES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES

La catastrophe pétrolière de Deepwater Horizon de 2010 dans le golfe du Mexique a déversé 5 millions de barils de pétrole et a libéré d'énormes quantités de mélanges complexes d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) directement dans les habitats essentiels de reproduction pour le thon, les poissons à bec et d'autres prédateurs supérieurs.^[29] Environ 47000 barils des dispersants Corexit 9500 et 9527 ont également été utilisés.^[87] Basés sur le solvant hydrocarboné éthylène glycol monobutyl éther combiné avec des tensioactifs non ioniques et anioniques^[153], ces dispersants sont toxiques pour les systèmes immunitaire, neurologique, cardiovasculaire et respiratoire.^[41]

Le déversement massif a entraîné la mort de minuscules foraminifères sur le chemin du panache non immergé, mais ceux-ci ont démontré une cer-

taîne récupération dans les années suivantes.^[200] Il y avait également des preuves de lésions cutanées anormales chez les poissons^[158] et une baisse apparente de la population de certaines espèces de poissons. Des échantillons de fruits de mer de la côte du golfe du Mississippi touchés par la marée noire de Deepwater Horizon ont été recueillis environ un mois après la première fuite, et des niveaux élevés de HAP totaux ont été détectés dans les quatre types d'échantillons de fruits de mer.^[238]

Les HAP sont très persistants et sont restés dans les sédiments côtiers des décennies après la catastrophe de l'Exxon Valdez en 1989 au large des côtes de l'Alaska.^[97] Les HAP ne se dissolvent pas facilement dans l'eau et ont tendance à s'accumuler ou à se fixer sur les particules de sédiments. C'est un problème grave dans les sédiments des lacs et des rivières, où de nombreux poissons pondent leurs œufs, où leurs embryons se développent et où résident de nombreuses ressources alimentaires de poissons invertébrés.

Certains HAP et leurs produits de dégradation sont très toxiques, provoquant des cancers, des mutations et des malformations congénitales chez les poissons et d'autres animaux.^[183] L'exposition des embryons de poissons à des mélanges d'HAP et à des sédiments contaminés a entraîné une mortalité, des anomalies, telles que des malformations cardiaques et des modifications locomotrices et comportementales à long terme.^[32, 157]

4.5 LES DÉCHETS MINIERES - ÉLIMINATION DES RÉSIDUS MINIERES EN HAUTE MER

L'industrie minière est l'un des plus grands producteurs de déchets au monde.^[57] Les résidus de déchets miniers se composent de particules de limon, de métaux (notamment le zinc, le cuivre, l'arsenic, le cadmium, le mercure et le plomb), de produits chimiques de traitement (par exemple, des agents de flottation) et de grandes quantités de sulfures. La difficulté et les coûts liés à la gestion de ces déchets miniers ont suscité un intérêt pour l'élimination des résidus miniers en haute mer. Le placement des résidus en haute mer implique habituellement le rejet des déchets sous forme de boue de roche finement broyée via un conduit à des profondeurs inférieures à 1 000 mètres. Les métaux lourds dissous des résidus sont susceptibles d'avoir une influence durable sur l'environnement des grands fonds marins pendant 60 à 70 ans.^[234]

Le placement des résidus en haute mer représente des risques importants pour toute une série d'écosystèmes et leurs habitants^[155], mais le placement des résidus en haute mer provenant des mines terrestres est déjà en cours. Sur les sites échantillonnés autour de la Papouasie-Nouvelle-Guinée, les dépôts de résidus ont eu de graves répercussions sur les commu-



nautés d'animaux benthiques vivant dans le substrat d'une masse d'eau, en particulier dans les fonds marins mous. L'abondance de ces habitants des sédiments (par exemple, les palourdes, les vers tubicoles et les crabes fouisseurs) est considérablement réduite dans la gamme des profondeurs échantillonnées (800–2020 m).^[109]

4.6 DRAGAGE ET SÉDIMENTS

Le dragage consiste à enlever ou à déplacer des sédiments pour créer des chenaux plus profonds afin d'améliorer l'accès aux ports maritimes ou aux rivières. Le dragage est également utilisé pour l'assainissement des sédiments contaminés et pour la mise en valeur des terres. Les sédiments sont inévitablement remis en suspension dans la colonne d'eau, ce qui augmente la turbidité. Cette pollution sédimentaire a un effet étouffant sur les herbiers marins et les bancs de mollusques et crustacés, l'excès de sédiments remplissant également l'habitat critique des poissons en eau profonde. Les larves de poissons peuvent confondre les particules de sédiments avec de la nourriture, ce qui a un impact sur leur nutrition et leur survie.^[171]

Le processus de dragage mobilise également les contaminants hérités du passé tels que les métaux, les hydrocarbures, les nutriments et l'acide, dans le plan d'eau.^[52] Dans les ports, à proximité des zones urbanisées ou industrialisées, les sédiments peuvent contenir des niveaux élevés de contaminants organiques et inorganiques, notamment les POP, les pesticides, les hydrocarbures pétroliers et des HAP, ainsi que des métaux lourds, notamment le cuivre, le plomb, le chrome, le cadmium, le mercure et l'arsenic.^[64] La remise en suspension de ces polluants a entraîné de nouvelles lésions, une augmentation du parasitisme, des rougeurs de la peau et des ulcérations chez les poissons et les crabes, tandis que les tortues peuvent tomber malades et mourir en mangeant des herbes marines contaminées par des métaux lourds.^[73]

L'EXPLOITATION MINIÈRE PÉLAGIQUE DANS LE PACIFIQUE

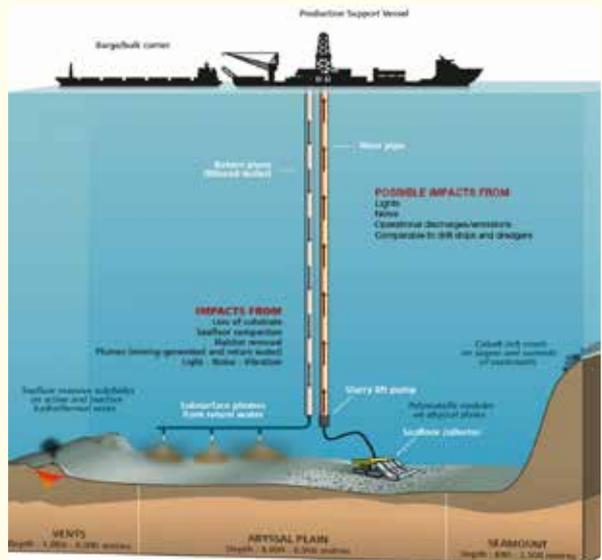
« Personne ne prend en compte les impacts potentiels des substances et des déchets toxiques produits lors de l'exploitation minière pélagique (en eaux profondes) ... On sait si peu de choses sur le fonctionnement des courants océaniques à cette profondeur, et il est probable que les sédiments contenant des toxines seront brassés en un panache lorsque le dispositif de vide télécommandé extrait les nodules, puis un deuxième panache sera créé lorsque les eaux usées sont retournées à cette profondeur ... Dans la plupart des pays, il existe des réglementations pour s'assurer que la société minière remet le terrain dans son état antérieur, mais comment restaurer le fond marin situé à 6 000 mètres sous la surface de l'océan? »

- Imogen Ingram, Chercheuse Environnementaliste et propriétaire foncier traditionnelle dans les Îles Cook, au sujet de l'exploitation minière pélagique dans la zone économique exclusive des Îles Cook.

L'exploitation minière pélagique est le processus qui consiste à récupérer des gisements de minéraux dans les profondeurs de la mer, à moins de 200 mètres. Il existe trois types de gisements: les nodules polymétalliques, constitués d'oxydes de fer et de manganèse avec des métaux associés, par exemple, le gisement des Îles Cook; les sulfures polymétalliques qui sont des gisements concentrés de minéraux sulfurés résultant de l'activité hydrothermale sur le fonds marin, par exemple les gisements de Papouasie-Nouvelle-Guinée; et les croûtes polymétalliques.^[47]

L'exploitation minière en haute mer affecte inévitablement les communautés d'organismes vivants à proximité des sites miniers. Le bruit, la lumière et la perturbation des sédiments

et des habitats des fonds marins, les panaches de sédiments, les fuites de boue de minerai, la pollution, l'interaction avec les autres utilisateurs des océans (par exemple, les bateaux de pêche ou les baleines) risquent tous de nuire à la biodiversité et aux écosystèmes uniques.^[176] Les invertébrés comme les vers, les



crustacés, les éponges, les mollusques, les concombres de mer, les étoiles de mer, les ophiures et les oursins sont particulièrement menacés.^[176]

Les monts sous-marins connus pour contenir des niveaux élevés de cobalt précieux sont également des points chauds de la biodiversité avec des centaines d'espèces de poissons associées et dominés par des filtreurs tels que les coraux et les éponges fixées sur les substrats durs. Ces derniers forment des jardins marins riches en espèces qui attirent à leur tour d'autres crustacés, mollusques et échinodermes. L'élimination des nodules ou croûtes polymétalliques aurait de graves répercussions sur ces écosystèmes marins.^[176]

La perturbation des sédiments du fond marin crée des panaches de particules en suspension qui peuvent affecter l'environnement marin bien au-delà du site d'exploitation. Des études de modélisation^[23] suggèrent que le rejet de sédiments pourrait être largement dispersé jusqu'à 10 kilomètres du site. Cela peut à la fois étouffer les organismes et répandre des métaux toxiques et d'autres contaminants. Les panaches rejetés en profondeur à la suite de l'assèchement peuvent également transporter des contaminants toxiques.

Ces impacts affecteront non seulement les communautés benthiques, mais aussi les espèces pélagiques, compromettant l'alimentation, la croissance et la reproduction. Les changements dans les communautés benthiques pourraient persister pendant de longues périodes et affecter

la disponibilité des aliments et provoquer des altérations à long terme dans la composition des communautés marines et des réseaux trophiques, entraînant à terme une perte de biodiversité.^[43]

Si l'exploitation minière pélagique (en eaux profondes) aura des répercussions importantes sur l'environnement des grands fonds marins, la nature et l'ampleur de ces effets ne sont pas connues. C'est pourquoi, la Banque Mondiale recommande, « compte tenu de l'immense incertitude », que les pays fassent preuve de la plus haute prudence pour éviter des dommages irréversibles à l'écosystème.^[237]

Néanmoins, il existe un intérêt commercial croissant pour les gisements de cuivre, d'aluminium, de cobalt et d'autres métaux des grands fonds marins, qui sont utilisés pour produire des applications de haute technologie, telles que les Smartphones et les batteries d'accumulateurs électriques. Alors que la législation n'en est qu'à ses débuts, en mai 2018, l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) avait émis 29 contrats pour l'exploration de gisements de minéraux des grands fonds marins. Alors que Fidji, la Papouasie-Nouvelle-Guinée, les Îles Salomon, les Tonga et Vanuatu ont accordé des permis pour l'exploration minière en eaux profondes, et que les Îles Cook ont récemment entrepris un processus d'appel d'offres pour l'exploration minière^[47], jusqu'à présent, seule la Papouasie-Nouvelle-Guinée a accordé une licence pour l'exploitation minière des fonds marins.

Les machines d'exploitation minière pélagiques de gigantesques moissonneuses-batteuses robotisées aussi grandes qu'un bus.





ÉTUDE DE CAS

DRAGAGE D'ENTRETIEN DU PORT DE GLADSTONE

En 2010, la plus grande opération de dragage d'Australie a commencé dans le port de Gladstone, dans la zone du patrimoine mondial de la Grande Barrière de corail. Sur une période de trois ans, entre 2010 et 2013, plus de 23 millions de mètres cubes de fonds marins ont été enlevés, ce qui a entraîné la destruction de vastes zones de prairies sous-marines de l'intérieur du port, et coïncidé avec une maladie multi-espèces de poissons, de mollusques et de crustacés marins.^[52]

Le projet de dragage du port de Gladstone devrait permettre aux grands navires d'accéder à un nouveau port d'exportation de gaz naturel liquéfié (GNL). Le port a accueilli un large éventail d'industries depuis les années 1950, notamment une fonderie d'alumine, un port de charbonnier et une centrale électrique au charbon, une grande cimenterie et une usine chimique de cyanure. Cela a entraîné la contamination des sédiments dans les zones côtières lorsque la vitesse de l'eau ralentit et que l'échange d'eau océanique est réduit. Des métaux lourds, y compris le cuivre, l'arsenic, le nickel, le chrome, l'aluminium, le manganèse et le zinc, ainsi que les HAP et le TBT, ont été mesurés dans le milieu aquatique et le biote du port.^[52]

Le port de Gladstone abrite également la plus grande zone d'herbe marine côtière du Queensland et fait partie de la zone du patrimoine mondial du parc marin de la Grande Barrière de Corail, qui abrite un large éventail de poissons, de crustacés et d'animaux marins protégés. Avant le dragage, il existait une pêche commerciale viable, notamment des crabes de vase, des crevettes et des coquilles Saint-Jacques au chalut, ainsi qu'une série de pêches au filet pour les espèces de poissons côtiers.

L'évaluation environnementale du projet de dragage, estimée à 5 millions de dollars australiens, a identifié la faune « à risque » selon la législation australienne, notamment les dugongs, les tortues et les dauphins, qui étaient tous des résidents du port. Il y avait également un récif corallien dans l'empreinte du projet. Il était prévu que seules de petites quantités d'herbes marines seraient perdues dans une zone où il était proposé de jeter les déblais de dragage, au-dessus d'une prairie d'herbe marine. Le reste des impacts prévus se sont limités à l'empreinte du dragage et du chenal.

Ce qui s'est finalement produit est un impact qui s'est étendu sur plus de 50

kilomètres. Les déblais de dragage ont été contaminés par des métaux lourds et des sédiments acides-sulfatés, qui, lorsqu'ils sont mobilisés, peuvent activer les métaux sous une forme plus toxique qui a un impact biologique plus important. Plusieurs millions de tonnes de boues de dragage ont été déposées en mer pour être éliminées dans l'océan à un kilomètre seulement de la limite du parc marin de la Grande Barrière de Corail.

D'autres sédiments plus toxiques étaient censés être contenus dans une zone de mur de retenue construit, mais pour des raisons économiques, les conceptions ont été modifiées et le mur de retenue modifié s'est avéré poreux. En conséquence, de grandes quantités de boue de sédiments draguées sont sorties du mur de protection. Les sédiments étaient assez acides et contenaient des charges métalliques très élevées qui ont été mobilisées dans l'écologie locale et les chaînes alimentaires locales.

Après une importante inondation due à un cyclone, le port d'eau salée a connu un afflux d'eau douce. Alors qu'une élévation temporaire de la turbidité était attendue, une turbidité excessive est restée pendant plus d'un an en raison des activités de dragage et d'élimination des déblais. Cela a fait disparaître une grande partie des prairies sous-marines et a causé des

pertes importantes de prairies sous-marines.

Les niveaux de référence pour les niveaux de turbidité acceptables ont été modifiés, ce qui a permis de poursuivre le projet de dragage même si les niveaux étaient excessifs et associés à une diminution des prairies sous-marines. Ceci a été fait dans un contexte de perte globale de 30% des prairies sous-marines, une perte qui s'accélère à environ 7% par an.^[232]

Le dragage a coïncidé avec un épisode de maladies des poissons, mollusques et crustacés marins de plusieurs espèces. Des maladies et des mortalités ont été observées chez les espèces aquatiques du port, notamment les poissons osseux, les requins et les raies, les crustacés, les mollusques, les tortues, les dauphins et les dugongs.^[52]

On a constaté un taux très élevé de maladies de la peau chez toutes les espèces de poissons du port et une prévalence significativement plus élevée de parasitisme chez une série d'espèces. Les niveaux élevés de parasites suggèrent que les poissons sont immunodéprimés à cause de la dégradation de la qualité de l'eau.

Des niveaux élevés de parasitisme ont été constatés chez les tortues marines vertes moribondes et décédées de la côte de Gladstone.^[72] Au début de 2011, le taux de





Île Curtis, Gladstone Australie, où le développement de trois usines de compression de gaz a nécessité le dragage d'une vaste zone du patrimoine mondial, et a tué une grande partie de la faune avec des sédiments, des métaux, des acides et des nutriments polluants.

mortalité des tortues marines de la région était environ 5 fois plus élevé que les années précédentes. Des niveaux élevés de métaux, notamment le cadmium, le cobalt, le mercure et l'arsenic, ont été retrouvés dans leur sang.^[37] Il est probable qu'elles aient mangé de l'herbe de mer, qui avait agrégé certains des métaux mobilisés et qui, en passant de leur estomac à leur sang, les a rendues malades à cause d'une intoxication aux métaux lourds. Le taux de mortalité d'autres espèces sauvages a également augmenté en conséquence.

Les crabes de boue présentaient une prévalence beaucoup plus élevée de lésions de la carapace.^[52] On sait que des niveaux excessifs de cuivre et d'aluminium et d'autres métaux interfèrent avec leur processus de mue et leur capacité à recalcifier leur carapace. Un grand nombre de crabes ont développé des trous dans leurs carapaces ou des taches de rouille, ce qui signifie qu'ils étaient invendables comme prises commerciales et présentaient un taux de mortalité plus élevés. La zone

couverte par les dégâts était considérable et a causé l'effondrement de la pêche locale de la coquille Saint-Jacques, car les coquilles Saint-Jacques sont très sensibles aux sédiments.

Le dragage est très perturbateur pour le milieu aquatique. Par la remise en suspension des fonds marins, les contaminants présents dans les sédiments, tels que les métaux lourds et les POP, sont remobilisés et deviennent plus biodisponibles pour le biote marin. Dans ce cas, la maladie chez les animaux marins correspondait clairement à la distribution des sédiments remis en suspension par le dragage et l'élimination, d'après les mesures directes de la turbidité ainsi que l'interprétation des images satellites correspondante.^[52]

Une action collective est maintenant en cours, les pêcheurs commerciaux poursuivent la Gladstone Ports Corporation, qui était les promoteurs du projet. Ils réclament des pertes de plusieurs millions de dollars suite à l'opération de dragage.

4.7 LES PESTICIDES

Les pesticides, qui comprennent les insecticides, les fongicides, les herbicides, les raticides, sont utilisés dans l'agriculture et la lutte antiparasitaire urbaine. Ils pénètrent dans les milieux aquatiques et marins par les stations d'épuration des eaux usées et les systèmes d'eaux pluviales, les rivières et les cours d'eau, sous forme de ruissellement direct, de vapeur et de dérive de pulvérisation provenant de l'agriculture, de la sylviculture, de l'aquaculture, des terrains de golf, des parcs et jardins, des terrains de sport, des services publics, de l'entretien de la végétation en bordure de route, et des propriétés résidentielles.

Les différentes catégories de pesticides ont des effets différents sur la vie aquatique, et d'autres facteurs de stress tels que l'augmentation de la température, les niveaux d'oxygène, le pH/acidification, les agents pathogènes et les niveaux de nutriments influencent tous les effets que l'exposition aux pesticides peut avoir sur un environnement aquatique.

L'histoire de la fabrication et de l'utilisation des pesticides synthétiques au cours des quatre-vingts dernières années révèle un manège de classes de pesticides — organochlorés, organophosphorés et carbamates, pyréthroïdes synthétiques et néonicotinoïdes — chacun proclamé comme étant plus sûr que le précédent, mais donc il est invariablement démontré qu'ils causent des dommages « non intentionnels » une fois utilisés à l'échelle commerciale.

Par exemple, les insecticides pyréthroïdes se sont avérés être systématiquement plus toxiques pour les macroarthropodes aquatiques (écrevisses et punaises d'eau) que les organophosphates.^[86] Les nouvelles alternatives aux insecticides à base de néonicotinoïdes se révèlent maintenant très persistantes et extrêmement toxiques pour les organismes non ciblés (voir la section 4.7.2).





L'ENDOSULFAN CONTAMINE LE KRILL

L'endosulfan, un insecticide POP organochloré, a été largement utilisé dans la culture du coton dans le monde entier. Il est très toxique pour les invertébrés aquatiques et les poissons, son produit de dégradation, le sulfate d'endosulfan était encore plus persistant et toxique. L'endosulfan persiste dans l'atmosphère, dans l'eau et les sédiments, et on le trouve dans 40 % des échantillons de krill de l'antarctique.^[224] Au Groenland, l'endosulfan a été mesuré dans les poissons d'eau douce, les oiseaux de mer, les organismes marins comme les crevettes et les crabes, et dans les mammifères marins. Bien que sa sécurité ait été vantée pendant des décennies, en 2011, sa fabrication, son utilisation et son exportation ont été interdites au niveau mondial dans le cadre de la Convention de Stockholm après qu'il ait été finalement reconnu comme étant génotoxique, neurotoxique et un perturbateur endocrinien.

Les réglementations en matière de pesticides diffèrent d'un pays à l'autre. Si des améliorations ont été apportées à la toxicologie, aux méthodes de détection en laboratoire et à la réglementation des pesticides au cours des décennies d'utilisation, il n'en demeure pas moins que de nombreux pesticides dont on sait qu'ils sont nocifs pour les organismes aquatiques sont encore largement utilisés et sont encore détectés à des niveaux dangereux dans les milieux aquatiques.

La plupart des formulations commerciales de pesticides sont des mélanges complexes de substances actives et d'autres ingrédients. Les informations concernant les « autres ingrédients » sont généralement considérées

LES HERBICIDES ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE—UNE COMBINAISON LÉTALE POUR LA SURVIE DES MANGROVES

Les mangroves et les marais salants sont des écosystèmes importants sur le plan écologique qui fournissent un habitat aux organismes marins et terrestres. Ils sont essentiels à la productivité biologique et aux chaînes alimentaires des eaux côtières et constituent des zones de pépinière essentielles pour de nombreux poissons et crustacés, y compris des espèces importantes sur le plan commercial et récréatif. Ils piègent, traitent et stockent également de grandes quantités de sédiments et de matière organique, et filtrent les polluants tels que les engrais et les pesticides.^[83]

Dans le nord-est de l'Australie, les herbicides, en particulier le diuron, ont été associés à un grave dépérissement des mangroves.^[61] Observé pour la première fois au début des années 1990, avant 2002, plus de 30 kilomètres carrés de mangroves avaient été touchés. Au cours de la même période, la population et l'agriculture s'étaient développées dans la région et l'utilisation accrue de produits chimiques agricoles a permis à de nombreux herbicides de se frayer un chemin dans les estuaires, les eaux et les sédiments du littoral.

Une conséquence du dépérissement est la baisse de la qualité des eaux côtières, notamment une turbidité accrue, des dépôts de nutriments et de sédiments, ainsi qu'une nouvelle propagation de pesticides toxiques. La grave détérioration des mangroves affecte la reproduction des poissons et leur habitat. Elle peut également avoir des effets directs et indirects sur d'autres habitats estuariens et marins, notamment les herbiers marins et les récifs coralliens de la Grande Barrière de Corail. La stabilité côtière peut être perdue avec la mort des mangroves, ce qui entraîne une augmentation des taux de l'érosion côtière. On sait également que le ruissellement d'herbicides est un facteur de stress supplémentaire pour les coraux.^[162]

Les mangroves sont déjà gravement menacées par le changement climatique qui, combiné à El Niño, a provoqué la pire mort de mangrove de l'histoire, s'étendant sur 700 km dans le golfe de Carpentaria en Australie.^[60] Cette mort massive a coïncidé avec un événement mondial catastrophique de blanchiment de corail, lorsque près d'un quart du corail de la Grande Barrière de Corail a été tué et que près de 100 km d'importantes forêts de varech au large de la côte de l'Australie occidentale sont mortes.



comme des informations commerciales exclusives et ne sont souvent pas accessibles au public. De nombreux ingrédients des formulations actuelles de pesticides sont potentiellement toxiques pour les organismes marins, y compris les composants actifs, ainsi que les produits chimiques de formulation comme les tensioactifs, les impuretés et les métabolites. Les tensioactifs tels que les alkylphénols-éthoxylates sont couramment appliqués conjointement avec les herbicides et autres pesticides pour augmenter leur absorption par les mauvaises herbes visées, mais leur présence pourrait également augmenter la biodisponibilité des insecticides.

L'impact des résidus de pesticides sur l'écologie passe largement inaperçu à moins qu'une surveillance et des recherches spécifiques ne soient menées pour le détecter. Les cas d'empoisonnement aigu tels que la mort massive de poissons sont très visibles et suscitent la publicité et la spéculation. Bien qu'il puisse être difficile d'attribuer la mort massive de poissons aux pesticides, elle se produit certainement. Par exemple, une base de données sur les mortalités de poissons tenue par les gouvernements des États australiens, a montré que les mortalités de poissons étaient plus souvent signalées dans les zones de culture du coton et pendant la saison de culture du coton, avec plus de la moitié des 98 poissons morts enregistrés associés aux pesticides.^[159]

4.7.1 LES IMPACTS ÉCOLOGIQUES CUMULÉS DES PESTICIDES

Nos connaissances sur la façon dont les écosystèmes aquatiques réagissent à l'exposition aux pesticides et s'en remettent sont insuffisantes, malgré l'importance de ces informations pour des évaluations réalistes et efficaces de l'impact écologique des pesticides.

L'exposition aux pesticides a un impact sur les communautés de macroinvertébrés et des micro-organismes dans les milieux aquatiques. Dans 24 sites de cours d'eau du sud-est de l'Australie, des macroinvertébrés et des micro-organismes sélectionnés (bactéries, flagellés, ciliés, amibes, nématodes et gastrostrates) ont été échantillonnés avec 97 pesticides. L'étude a clairement démontré que les insecticides et les fongicides utilisés actuellement peuvent affecter les communautés de macroinvertébrés dans des mélanges complexes à faibles doses d'exposition.^[196]

De même, en France, une étude des impacts des pesticides sur les étangs a révélé que, quels que soient les pesticides utilisés, ou le nombre de traitements et le taux d'application, il y avait toujours des effets négatifs directs importants sur divers groupes d'invertébrés, en particulier les *Gammarus pulex*, une espèce de crustacé amphipode d'eau douce. Les amphipodes ont un rôle fonctionnel important dans la décomposition des plantes et autres matières biotiques dans les étangs. L'insecticide bifenthrine et le fongicide cyprodinil ont été identifiés comme les principaux responsables de leur disparition.^[12]

4.7.2 LES NÉONICOTINOÏDES

Les néonicotinoïdes (« néonics ») sont devenus la classe d'insecticides qui connaît la croissance la plus rapide à l'échelle mondiale. Développés pour remplacer les insecticides organophosphorés et carbamates, ils sont structurellement similaires à la nicotine. Lorsqu'ils ont été mis en circulation pour la première fois, on a supposé qu'ils présenteraient une grande spécificité vis-à-vis des insectes en raison de leur mode d'action spécifique. Cependant, diverses études ont maintenant révélé que d'autres arthropodes, y compris les crustacés, sont tout aussi vulnérables car ils partagent un système nerveux similaire.

Des néonicotinoïdes ont été trouvés dans de nombreux plans d'eau, par exemple, des néonicotinoïdes largement utilisés; L'imidaclopride, le thiamethoxam et la clothianidine ont été détectés dans la majorité des sites d'eau de surface dans l'Ontario, au Canada.^[7] On trouve de plus en plus de néonicotinoïdes dans les rivières Australiennes, l'imidaclopride étant détecté dans tous les bassins versants sauf deux sur la côte nord-est de l'Australie. Il a également été mesuré dans 12 des 13 échantillons



prélevés dans les rivières de la région de Sydney après des précipitations importantes.^[93]

Cinq néonicotinoïdes et l'insecticide fipronil ont été identifiés dans 193 échantillons provenant de quatre sites estuariens de la mer intérieure de Seto au Japon. Le dinotéfuran a été le plus fréquemment détecté (98 % des échantillons) avec la plus forte concentration, suivi de l'imidaclopride et de la clothianidine (35 % chacun), du thiaméthoxame (19 %) et de l'acétamipride et du fipronil (12 % chacun). Le métabolite de l'imidaclopride, le desnitro-imidaclopride, a également été détecté.^[88]

L'imidaclopride est très persistant dans les échantillons d'eau et ne se biodégrade pas facilement dans les milieux aquatiques.^[215]

**LES NÉONICOTINOÏDES
(« NÉONICS ») SONT
DEVENUS LA CLASSE
D'INSECTICIDES
QUI CONNAÎT LA
CROISSANCE LA PLUS
RAPIDE AU NIVEAU
MONDIAL.**

Un examen de 150 études a révélé des effets toxiques et indirects (par exemple sur la chaîne alimentaire) sur la faune vertébrée, notamment les poissons, les amphibiens et les reptiles.^[80] Deux néonicotinoïdes, l'imidaclopride et la clothianidine, ainsi que le fipronil, qui agit également de la même manière sur le plan systémique, ont fait l'objet de cet examen.

L'imidaclopride et le fipronil se sont avérés toxiques pour de nombreux oiseaux et la plupart des poissons, respectivement. Ils ont exercé des effets sublétaux, allant d'effets génotoxiques et cytotoxiques (toxiques pour les

cellules), à une altération de la fonction immunitaire, une réduction de la croissance et du succès de la reproduction, souvent à des concentrations bien inférieures à celles associées à la mortalité. La toxicité des néonicotinoïdes est encore compliquée par leurs mélanges, dont la toxicité ne peut être prédite en utilisant l'hypothèse commune de la toxicité additive.^[142]

L'imidaclopride a perturbé l'alimentation du crustacé d'amphipode d'eau douce *Gammarus pulex* à des concentrations inférieures de deux ordres de grandeur à celles causant la mortalité et similaires aux niveaux trouvés dans l'environnement.^[2] La croissance de la crevette myside marine *Americamysis bahia* a également été altérée à des niveaux très faibles (0,163 µg/L) d'imidaclopride.^[228]

Les effets indirects des néonics comprennent la réduction des proies invertébrées, ce qui peut entraîner un ralentissement de la croissance des poissons qui en dépendent pour leur alimentation. L'imidaclopride a le potentiel de causer indirectement la létalité dans les populations d'invertébrés aquatiques à de faibles concentrations sublétales en entravant les mouvements et donc l'alimentation.^[164]

4.7.3 LES NÉONICOTINOÏDES MENACENT L'AQUACULTURE DES CREVETTES

Les espèces de crevettes et de langoustines commercialement importantes sont extrêmement sensibles aux insecticides néonicotinoïdes, mais la plupart des élevages de crevettes sont situées à proximité d'estuaires qui ont de multiples utilisations des terres en amont, comme la culture de la canne à sucre, la banane, le macadamia, le bétail et l'urbanisation. Les utilisations et la mobilité des pesticides qui y sont associées ont un impact sur la qualité de l'eau des rivières et des estuaires.

En conséquence, des néonics ont été détectés dans les eaux de prise d'eau des élevages commerciaux de crevettes en Australie. Certaines concentrations étaient probablement suffisamment élevées pour avoir des effets négatifs sur la croissance et la survie, d'après des études en laboratoire sur les crevettes tigrées noires (*Penaeus monodon*).^[93]

Les crevettes larvaires et post-larvaires sont particulièrement sensibles aux effets des pesticides en raison de leur rapport surface/volume élevé et de leurs besoins de croissance rapide. De plus, les crevettes juvéniles et adultes s'enfouissent dans les sédiments, et peuvent donc être particulièrement sensibles aux contaminants liés aux sédiments comme le fipronil. Les pesticides qui s'accumulent dans les sédiments des bassins d'aquaculture peuvent présenter un risque pour l'aquaculture des crevettes plus



important que ce que l'on pourrait prévoir en mesurant simplement les pesticides dans la colonne d'eau.^[93]

Les herbicides présents dans les mélanges de contaminants auxquels sont exposées les crevettes de ferme peuvent modifier la sensibilité des crustacés à divers insecticides. Par exemple, les larves de crevettes de graminées sont relativement insensibles à l'herbicide atrazine, mais une exposition simultanée à l'atrazine et à l'imidaclopride néonique, ou à l'atrazine et au fipronil est plus toxique que l'exposition à l'imidaclopride et au fipronil seuls.^[93]

4.7.4 LES HERBICIDES À BASE DE GLYPHOSATE

Les herbicides à base de glyphosate (HBG) sont les herbicides les plus utilisés dans le monde, en partie en raison de l'introduction de cultures génétiquement modifiées tolérant le glyphosate et de nouvelles utilisations pour dessécher les cultures avant la récolte.

Les HBG agissent sur l'enzyme qui bloque la production de certains acides aminés causant la mort des plantes. Cette voie biochimique n'existe que dans les organismes végétaux, cependant, malgré le mode d'action ciblé, les HBG ont été associés à des effets toxiques chez les invertébrés, les poissons, les amphibiens, les reptiles, les oiseaux et les mammifères, y compris les êtres humains.^[82]

Les herbicides à base de glyphosate ont démontré une perturbation endocrinienne^[144] et peuvent modifier la diversité microbienne et la composition des communautés.^[206] Les HBG peuvent également favoriser la prolifération des algues.^[180, 173]

La plupart des HBG ne sont pas approuvés pour une utilisation dans le milieu aquatique, mais des quantités mesurables de la matière active et

LES PESTICIDES DANS LA ZONE DU PATRIMOINE MONDIAL DE LA GRANDE BARRIÈRE DE CORAIL



Le ruissellement agricole est un facteur de stress important pour les estuaires et les écosystèmes marins de la Zone du patrimoine mondial de la Grande Barrière de Corail (GBR), notamment les prairies sous-marines et les systèmes de mangroves. Le ruissellement agricole dans la GBR contient des engrais, des sédiments et des pesticides qui atteignent le milieu marin par les rivières. Il s'agit d'un facteur de stress important dans le déclin de la couverture corallienne dans de grandes parties de la GBR.^[126] Les herbicides persistants sont considérés comme l'un des plus grands risques pour les écosystèmes et les organismes de la zone du patrimoine mondial de GBR.^[118] Les pesticides peuvent affecter la reproduction, la croissance et d'autres processus physiologiques des coraux. Les herbicides, en particulier, peuvent affecter les algues symbiotiques en endommageant leur partenariat avec les coraux et en entraînant le blanchiment.

Les résidus de pesticides détectés dans les rivières et les ruisseaux de GBR lors des inondations comprennent les herbicides diuron, atrazine (et les produits de dégradation associés deséthyle et de desisopropyl atrazine), hexazinone, ametryne, tébutthiuron, simazine, métolachlore, bromacil, le 2,4-D et MCPA, ainsi que les insecticides imidaclopride, endosulfan, et le malathion. Le diuron, l'atrazine, l'hexazinone et l'amétrine ont été fréquemment détectés à de fortes concentrations sur les sites de drainage de la canne à sucre.^[131] Les poissons côtiers des rivières et des fleuves qui se déversent dans la lagune de GBR sont exposés aux composés œstrogènes associés au ruissellement des pesticides provenant de l'utilisation des plantations de canne à sucre dans le bassin versant de la GBR.^[128]

des tensioactifs sont détectés dans les eaux de surface. Des résidus de HBG ont également été trouvés dans le sol, l'air et les eaux souterraines^[110] ainsi que dans les sédiments marins.^[10, 206] Le glyphosate est modérément ou extrêmement persistant dans l'eau de mer selon les conditions de luminosité.

Il a été signalé que les tensioactifs et les agents mouillants des formulations commerciales de glyphosate sont eux-mêmes plus toxiques et augmentent la biodisponibilité et la toxicité du glyphosate pour les espèces non ciblées.^[186] Il existe une variété de tensioactifs, mais le plus commun est l'amine polyéthoxylée (POEA). L'acide aminométhylphosphonique (AMPA) est l'un des principaux produits de dégradation microbienne du glyphosate, et la toxicité de l'AMPA est comparable à celle du glyphosate lui-même.

L'effet des herbicides sur les plantes aquatiques non ciblées est une question émergente dans la conservation de la biodiversité aquatique. Le glyphosate dans le milieu aquatique provoque la mort de la communauté des macrophytes (plantes aquatiques qui poussent dans ou près de l'eau), qui sert de micro habitat aux communautés planctoniques (bactéries, archées, algues, protozoaires et animaux à la dérive ou flottants qui habitent les océans, les mers ou l'eau douce).

Ils sont importants à la fois pour servir de refuge et de nourriture aux poissons.

4.7.5 LES INSECTICIDES ORGANOPHOSPHORÉS ET LES CARBAMATES

Les organophosphates et les carbamates sont utilisés dans les milieux urbains et agricoles. Ils présentent une toxicité aiguë et leur mode d'action consiste à bloquer l'enzyme acétylcholinestérase (AChE), qui est essentielle au fonctionnement des neurotransmetteurs, les messagers chimiques de l'organisme.

Les impacts des pesticides organophosphorés sur la santé écologique des poissons se sont produits même avec de courtes expositions à de très faibles concentrations. L'exposition sublétales à l'ethoprophos organophosphoré a entraîné une réduction significative (54%) de l'activité de cholinestérase cérébrale (ChE) chez les poissons exposés. Cela a modifié leur réaction de fuite et leur capacité à éviter la détection, les poissons exposés étant plus lents à s'échapper et à se cacher d'une attaque simulée.^[194]

L'exposition au sumithion organophosphoré a considérablement réduit la densité des invertébrés benthiques dans les bassins traités au su-

LES PESTICIDES ET LES MALADIES DANS L'AQUACULTURE DE CREVETTES

L'aquaculture intensive de crevettes a commencé en Asie dans les années 1980, et l'Asie est aujourd'hui responsable d'environ 85 % de la production mondiale de crevettes d'aquaculture, les cinq premiers producteurs mondiaux étant la Chine, l'Inde, le Vietnam, l'Équateur et l'Indonésie.^[69] Les crevettes représentent un gros marché avec une production mondiale évaluée à 38 milliards de dollars en 2015, l'aquaculture représentant environ deux tiers.^[68]

Comme toutes les créatures, les crevettes ont leur propre spectre de virus et de bactéries. Peu après l'intensification de l'aquaculture de crevettes, d'importantes maladies virales ont commencé à apparaître. Malgré près de quarante ans de recherche et de développement, ces maladies continuent de se produire et causent d'énormes pertes dans le secteur de l'élevage des crevettes. Au Brésil, troisième pays producteur de crevettes, l'élevage des crevettes a été dramatiquement touché principalement par cinq virus (virus de la nécrose hypodermique et hématopoïétique infectieuse, virus de la tête jaune, virus du syndrome de Taura, virus du syndrome des taches blanches et virus de la myonécrose infectieuse).^[201]

Le succès de l'aquaculture dépend de la disponibilité d'une eau de bonne qualité, mais la pollution de l'environnement continue à avoir un impact sur la santé et la résilience des crevettes. Le problème est si répandu qu'il n'est

pratiquement pas géré. L'accent est plutôt mis sur l'agent pathogène responsable de la maladie, sans comprendre le rôle important que joue l'environnement pollué dans lequel vivent les animaux dans les épidémies en cours.

Alors que de nombreux facteurs contribuent à la baisse de la production de crevettes, il a été spécifiquement démontré que les insecticides augmentent l'incidence des maladies.^[33] Les recherches ont montré que la mortalité chez les crevettes à pattes blanches (*Penaeus vannamei*) était significativement plus élevée après une exposition combinée à l'insecticide organophosphoré, le méthylque parathion, et à la bactérie *Vibrio parahaemolyticus*, qu'elle ne l'était pour l'un ou l'autre des facteurs de stress individuellement.^[129]

Comme l'aquaculture continue de s'étendre sur les terres dans les zones agricoles traditionnelles, le risque d'exposition aux pesticides est encore plus grand. L'exposition des crevettes aux pesticides induit une réaction au stress^[195], réduit l'énergie disponible pour la survie et la croissance^[6], et augmente la possibilité de maladie.^[80]

Les aliments aquacoles, qui comprennent des ingrédients cultivés commercialement comme le blé, le soja et les lupins, représentent également une autre voie d'exposition aux pesticides pour les crevettes et les poissons d'élevage. Dans un autre



élevage de riz et de crevettes au Vietnam, l'utilisation de produits chimiques agricoles provenant du riz peut générer des résidus persistants dans les cultures de crevettes ultérieures, tandis que les antibiotiques utilisés dans l'aquaculture des crevettes ont été détectés dans les produits agricoles ultérieurs, ce qui augmente le risque d'exposition humaine indésirable.^[27]

Les pesticides sont présents dans l'environnement à la suite de la dérive des pulvérisations, du ruissellement des cultures et des sols, de la lixiviation et des dépôts foliaires. Au Pakistan, des organochlorés persistants ont été étudiés^[209] dans les eaux d'ingestion de l'aquaculture et les crevettes provenant d'un bassin versant agricole. Au total, 36 pesticides organochlorés ou leurs métabolites ont été détectés dans des échantillons d'eau et de crevettes. Tous les échantillons d'eau contenaient du 4-DDT, de la dieldrine et du méthoxychlore, dont l'accumulation dans les crevettes a également été démontrée *Penaeus merguianensis* et *P. penicillatus*.

L'échantillonnage en Australie^[93] a révélé des concentrations élevées de pesticides dans les eaux de prise en aquaculture provenant de sept bassins versants à usages multiples le long de la côte nord-est de l'Australie. Un mélange d'insecticides, d'herbicides, de fongicides et d'adjuvants, dont les néonicotinoïdes (imidaclopride et clothianidine), un pyréthroïde (bifenthrine), un organophosphate (chlorpyrifos), un phényl-pyrazole (fipronil) et du DEET, ont été détectés. Les élevages de crevettes en Australie sont principalement situés à côté des estuaires qui sont touchés par les multiples utilisations agricoles des terres en amont.

Auparavant, l'Australie était généralement exempte de virus de la crevette en raison de son éloignement géographique et de ses élevages de crevettes relativement bien gérés. Toutefois, en 2016, le virus du syndrome des taches blanches est arrivé dans la rivière Logan, dans le Queensland, par le biais de crevettes décortiquées non cuites et congelées importées. Les pêcheurs de récréation utilisaient les crevettes importées comme appâts et les déposaient dans la rivière Logan et

dans les canaux d'entrée des élevages de crevettes où ils aimaient pêcher au large des berges.

Le virus était arrivé sur les côtes Australiennes parce qu'il y avait des brèches dans la frontière de biosécurité. Les crevettes importées étaient censées être exemptes de virus, mais elles ne l'étaient pas. Par la suite, de nombreuses détections ont été faites dans des crevettes importées au détail dans des supermarchés Australiens.^[1]

Les programmes de surveillance des pesticides dans la rivière Logan immé-

diatement avant l'apparition du virus des taches blanches ont détecté des résidus de néonicotinoïdes, de pyréthroïdes et d'organophosphates dans les eaux de la rivière Logan. Le mélange d'expositions sublétales a pu compromettre la santé des crevettes exposées, comme l'ont montré des invertébrés terrestres mieux étudiés^[25], facilitant ainsi l'expression et la propagation de la maladie. Les interactions entre les mélanges de pesticides et l'immunité et la résilience des crevettes à l'expression de la maladie nécessitent des recherches plus approfondies afin d'élucider plus clairement les mécanismes.

mithion^[218], tandis que l'azinphos-méthyle, le malathion, le fenitrothion et le diméthoate ont été identifiés comme potentiellement préoccupants dans le milieu marin. Les mélanges de pesticides carbamate et organophosphorés ont le même mode d'action, de sorte que leurs effets toxiques peuvent être additifs ou parfois synergiques.

Le chlorpyrifos est un organophosphate largement utilisé et, en tant que PE^[240], il présente de graves risques pour les organismes et les écosystèmes aquatiques.^[81] Il affecte le comportement des crustacés et des poissons avec des effets sublétaux sur les poissons mesurés par les changements de la perception olfactive et du comportement.

Le chlorpyrifos se bioaccumule dans les organismes aquatiques et ses résidus ont été mesurés dans les poissons du réservoir de Tono, au Ghana^[4], dans les poissons d'élevage^[210], dans les échantillons de poissons de marché provenant de différentes régions du Punjab, en Inde^[160], et dans le sang de loutres de mer en liberté en Alaska et en Californie.^[116]

**LE CHLORPYRIFOS A ÉTÉ
INTERDIT EN THAÏLANDE
EN 2020 EN RAISON DE
SES EFFETS TOXIQUES SUR
L'HOMME.**





5. UNE VOIE À SUIVRE

L'un des plus grands défis à relever pour lutter contre le déclin de la pêche et le changement climatique est l'impact insidieux de la pollution sur l'écosystème marin. Il ne s'agit pas seulement de la mort évidente des poissons avec des cadavres flottant à la surface, mais aussi des impacts invisibles sur les générations futures, qui se manifestent par une diminution de leur résistance, de leur succès en matière de reproduction, de leurs ressources alimentaires et de leur survie en raison de leur exposition aux polluants.

Il y a près de deux décennies, les gouvernements du monde entier ont convenu de réduire au minimum les effets nocifs des produits chimiques et des déchets sur notre santé et notre environnement. Ils se sont engagés à « *produire et utiliser les produits chimiques de manière à réduire au minimum les effets néfastes importants sur la santé humaine et l'environnement* » d'ici 2020.^[102]

Bien qu'il y ait eu quelques progrès vers une utilisation plus durable des produits chimiques, avec l'interdiction mondiale de quelques polluants persistants, les gouvernements n'ont pas, dans l'ensemble, fait de progrès significatifs vers cet objectif.

On estime qu'il existe aujourd'hui entre 100 000 et 350 000 substances chimiques commercialement disponibles^[250], dont beaucoup n'ont pas encore été évaluées quant à leur impact et pourraient être potentiellement toxiques pour les milieux aquatiques. Quelques 5 000 substances chimiques produites en volumes dépassant un million de tonnes par an. Dans l'ensemble, la production de produits chimiques continue de croître régulièrement, à raison d'environ 4 % par an.^[107]

La pollution des cours d'eau et des océans par les déchets industriels, les produits chimiques de consommation, les pesticides et les plastiques se poursuit sans relâche. L'agriculture industrielle, qui dépend fortement des engrais et des pesticides, a non seulement épuisé les réserves de carbone

des sols, les libérant dans l'atmosphère, mais elle est également responsable de la diffusion de grandes quantités de polluants, notamment des nutriments et des pesticides, dans le milieu aquatique par le biais du ruissellement. Elle a également introduit des résidus chimiques dans les matières premières utilisées dans l'alimentation des aquaculteurs, dont l'innocuité pour les espèces aquatiques d'élevage n'a généralement pas été testée.

Nos cours d'eau et nos océans sont également confrontés à de nouvelles menaces dues à des groupes de produits chimiques qui pourraient ne jamais se décomposer, ainsi qu'à l'exploitation minière toxique en haute mer et aux pressions continues de la croissance démographique, de l'urbanisation accrue et de l'urgence climatique.

5.1 L'AGRICULTURE RÉGÉNÉRATRICE

Si les défis auxquels sont confrontés nos cours d'eau et nos océans sont nombreux, il est rassurant de savoir que des solutions efficaces sont facilement accessibles. L'agriculture régénératrice a un rôle majeur à jouer pour relever les défis combinés du changement climatique et des charges polluantes dans les milieux aquatiques.

Comme son nom l'indique, l'agriculture régénératrice vise à restaurer la santé des écosystèmes en se concentrant sur des pratiques qui séquestrent le carbone, augmentent le stockage de l'eau dans le sol, accroissent la biodiversité, stabilisent les sols et contribuent à rétablir la santé des sols et des océans en améliorant la qualité de l'eau provenant de ces paysages.

Sur terre, les pratiques d'agriculture régénératrice utilisent diverses cultures de couverture, la fertilité des sols, les rotations des cultures, des méthodes sans labour, et l'absence de pesticides ou d'engrais synthétiques.

La réduction des émissions de carbone est essentielle pour atténuer les effets du changement climatique et l'agriculture régénératrice est considérée comme l'une des plus grandes possibilités pour y remédier. Selon les estimations, l'agriculture régénératrice pourrait séquestrer jusqu'à 60 tonnes de carbone par acre, avec une augmentation de la productivité des cultures, une meilleure absorption des éléments nutritifs, une meilleure rétention de l'eau dans le sol, une meilleure résistance aux parasites et une meilleure viabilité financière pour les agriculteurs.^[104] Les produits végétaux plus propres sont également susceptibles de constituer les matières premières améliorées pour l'alimentation des aquaculteurs, sans la présence de résidus de pesticides.



5.2 LES APPROCHES ÉCOSYSTÉMIQUES DE L'AQUACULTURE

L'agriculture régénérative n'est pas seulement nécessaire sur terre, il est également essentiel de repenser la façon dont l'agriculture aquacole est pratiquée. Dans la plupart des cas, l'aquaculture n'est essentiellement qu'une autre forme d'agriculture industrielle utilisant la monoculture des espèces, des aliments non durables, des produits pharmaceutiques et des pesticides, chacun d'entre eux créant des déchets et polluant l'environnement.

Le développement rapide de l'aquaculture dans le monde est souvent concentré géographiquement dans des eaux déjà polluées, ce qui pose des problèmes importants pour la santé des poissons et des autres espèces d'élevage.

Les stratégies d'aquaculture régénératrice pourraient contribuer à lutter contre la pollution et fournir un résultat positif pour l'écosystème et à la communauté marine. Des modèles tels que l'aquaculture multitrophique intégrée (AMTI) ont le potentiel d'atteindre ces objectifs et de fournir une alimentation saine, tout en contribuant à la propreté et au maintien de la santé des océans.



Grâce à l'AMTI, une partie des aliments non consommés et des déchets, des nutriments et des sous-produits sont récupérés et transformés en fruits de mer sains et exploitables à des fins commerciales, tandis que la bio-atténuation permet d'éliminer les nutriments et le CO₂ tout en fournissant de l'oxygène.^[42]

Une étude^[74] portant sur les impacts de l'élevage du saumon en cage en pleine mer dans l'Atlantique a conclu que jusqu'à 60 % de l'azote alimentaire et 70 % du phosphore alimentaire sont rejetés dans l'océan en tant que déchets métaboliques. Cela équivaut à déverser 52 000 tonnes d'azote et 10 000 tonnes de phosphore par an sur la côte norvégienne. Cette accumulation peut entraîner la croissance du phytoplancton et l'eutrophisation des écosystèmes pélagiques.

L'une des méthodes possibles pour atténuer ces impacts est la co-culture du saumon avec des espèces de niveaux trophiques inférieurs. Environ deux tiers des déchets azotés issus de l'élevage du saumon sont de l'ammoniac inorganique, qui est absorbé par les producteurs primaires tels que le phytoplancton et les macroalgues. Les macroalgues cultivées à proximité des élevages de saumon pourraient utiliser les nutriments inorganiques dissous libérés par les élevages de saumons dans les systèmes d'aquaculture multitrophiques intégrés en eau libre.

Il existe également un potentiel pour la polyculture, les systèmes d'élevage en mer verticale utilisant des macroalgues et des mollusques pour aider à attirer le dioxyde de carbone et à tamponner l'acidité des océans tout en produisant des récoltes viables.^[105]

Dans le monde, environ 12 millions de tonnes d'algues sont cultivées et récoltées chaque année, la Chine produisant environ les trois quarts de l'approvisionnement. Les algues poussent très vite, à des taux plus de 30 fois supérieurs à ceux des plantes terrestres. L'augmentation des taux de production d'algues par le biais du boisement de macroalgues marines (OMA)^[50] sur de grandes surfaces a le potentiel de réduire les concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, de réduire l'acidité des océans et d'améliorer les populations de poissons.

Des systèmes aquaponiques terrestres innovants^[202] sont également utilisés pour fermer les boucles de nutriments, réduire les besoins en eau des cultures, éliminer les effluents dans les cours d'eau et générer des volumes importants de produits sans utiliser des pesticides.

L'aquaponie est un système de production alimentaire qui utilise l'aquaculture et la culture hydroponique pour cultiver des poissons et des plantes sans terre. Il s'agit d'un cycle symbiotique peu coûteux entre le poisson et la plante. Les déchets des poissons (ammoniaque) sont introduits dans le lit de la plante, qui agit comme un filtre biologique et prend le nitrate essentiel à la croissance de la végétation. L'eau douce nouvelle est ensuite renvoyée dans l'enclos des poissons pour relancer le cycle ou est transpirée par les plantes comme un rejet propre.^[9]

Alors que les écosystèmes aquatiques en équilibre sont étonnamment résistants et productifs, la pollution, les besoins de la population humaine et le changement climatique menacent cet équilibre et mettent en péril la croissance durable de la production aquacole et de la pêche sauvage dans le monde entier. De nombreux cours d'eau et milieux côtiers ont déjà besoin d'être restaurés de toute urgence.

L'industrie mondiale des produits de la mer, ainsi que les moyens de subsistance et la survie de millions de pêcheurs artisanaux et de communautés qui dépendent des fruits de mer, sont à la croisée des chemins. La situation exige une action mondiale immédiate et des ressources prioritaires ainsi que l'acceptation du fait que nous vivons dans un monde précaire où le statu quo n'est plus une option.

**L'INDUSTRIE MONDIALE
DES PRODUITS DE LA MER,
AINSI QUE LES MOYENS
DE SUBSISTANCE ET LA
SURVIE DE MILLIONS DE
PETITS PÊCHEURS ET
DES COMMUNAUTÉS QUI
DÉPENDENT DES FRUITS DE
MER, SONT À LA CROISÉE
DES CHEMINS.**

RÉFÉRENCES

- [1] ABC Report. "Prawns carrying white spot virus discovered in Queensland supermarkets" <https://www.abc.net.au/news/2018-07-02/prawns-carrying-white-spot-discovered-in-queensland-supermarkets/9914610>
- [2] Agatz, Annika et al., (2014) Imidacloprid perturbs feeding of *Gammarus pulex* at environmentally relevant concentrations, *Environmental Toxicology and Chemistry* 33(3) DOI 10.1002/etc.2480
- [3] Ahrens, Lutz et al., Source tracking and impact of per and polyfluoroalkyl substances at Svalbard – FluoroImpact – *Department of Aquatic Sciences and Assessment, Swedish University of Agricultural Sciences April 2016*. <https://www.syssemmannen.no/globalassets/svalbards-miljo-vernfond-dokument/prosjekter/rapporter/2016/14-103-sluttrapport.pdf>
- [4] Akoto, Osei et al., Pesticide residues in water, sediment and fish from Tono Reservoir and their health risk implications. *SpringerPlus vol. 5,1 1849. 22 Oct. 2016*, doi:10.1186/s40064-016-3544-z
- [5] Alava J.J. et al., Projected amplification of food web bioaccumulation of MeHg and PCBs under climate change in the Northeastern Pacific. *Sci Rep.* 2018;8(1):13460. doi:10.1038/s41598-018-31824-5
- [6] Ali Abdulameer Al-Badran et al., Effects of insecticides, fipronil and imidacloprid, on the growth, survival, and behavior of brown shrimp *Farfantepenaeus aztecus* *PLOS ONE October 10, 2019* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223641>
- [7] Anderson, J.C. et al., (2015) Neonicotinoids in the Canadian aquatic environment: A literature review on current use products with a focus on fate, exposure, and biological effects, *Science of The Total Environment, Vol. 505*, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.090.
- [8] Annunziato, K., et al., Subtle morphometric, behavioral and gene expression effects in larval zebrafish exposed to PFHxA, PFHxS and 6:2 FTOH, *Aquatic Toxicology, Vol. 208*, 2019 DOI: 10.1016/j.aquatox.2019.01.009
- [9] Aquaponics Food Production Systems Combined Aquaculture and Hydroponic Production *Technologies for the Future*, Eds Simon Goddek et al., <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
- [10] ARC, Emerging Environmental Concern in Auckland's Aquatic Sediments. ARC Technical Report 2009/021. Prepared by National Institute of Water and Atmosphere for Auckland Regional Council, Auckland https://www.researchgate.net/publication/256498161_Field_Analysis_of_Chemicals_of_Emerging_Environmental_Concern_in_Auckland%27s_Aquatic_Sediments_Prepared_by_NIWA_for_Auckland_Regional_Council_Auckland_Regional_Council_Technical_Report_2009021
- [11] Ashauer R, et al., (2017) Toxic Mixtures in Time-The Sequence Makes the Poison. *Environ Sci Technol. Mar 7;51(5):3084-3092*. doi: 10.1021/acs.est.6b01613.
- [12] Auber et al., (2011). Structural and functional effects of conventional and low pesticide input crop-protection programs on benthic macroinvertebrate communities in outdoor pond mesocosms. *Ecotoxicology (London, England)*. 20. 2042-55. 10.1007/s10646-011-0747-5.
- [13] Aus der Beek T. et al., Pharmaceuticals in the environment-Global occurrences and perspectives. *Environ Toxicol Chem.* 2016 Apr;35(4):823-35. doi: 10.1002/etc.3339.
- [14] Avio, C. G. et al., (2015) Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels. *Environmental Pollution* 198 211-222 DOI: 10.1016/j.envpol.2014.12.021
- [15] Bakir A. et al. (2014) Transport of persistent organic pollutants by microplastics in estuarine conditions, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 140
- [16] Barni M.F.S et al., (2016) Persistent organic pollutants (POPs) in fish with different feeding habits inhabiting a shallow lake ecosystem. *Sci Total Environ.* 15;550:900-909. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.01.176.

- [17] Barton A. et al., The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, shows negative correlation to naturally elevated carbon dioxide levels: Implications for near-term ocean acidification effects. *Limnol. Oceanogr.*, 57(3), 2012, 698–710 doi:10.4319/lo.2012.57.3.0698
- [18] Besseling, E. et al., (2014) Nanoplastic Affects Growth of *S. obliquus* and Reproduction of *D. magna*. *Environmental Science and Technology* 48(20):12336-12343 DOI 10.1021/es503001d
- [19] Bigot, M. et al., (2016) Air–Seawater Exchange of Organochlorine Pesticides in the Southern Ocean between Australia and Antarctica. *Environ. Sci. Technol.* 50(15) 8001–8009 DOI: 10.1021/acs.est.6b01970
- [20] Björlenius, Berndt et al., Pharmaceutical residues are widespread in Baltic Sea coastal and offshore waters – Screening for pharmaceuticals and modelling of environmental concentrations of carbamazepine. *Science of The Total Environment Volume 633, 15 August 2018, 1496–1509.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.276>
- [21] Blanchfield P. et al., Recovery of a Wild Fish Population from Whole-Lake Additions of a Synthetic Estrogen. *Environ. Sci. Technol.* 2015,49,5 pp. 3136–3144, <https://doi.org/10.1021/es5060513>
- [22] Blazer V. S. et al., Intersex (Testicular Oocytes) in Smallmouth Bass from the Potomac River and Selected Nearby Drainages], Vol. 19, Issue 4, December 2007, pp. 242–253, <https://doi.org/10.1577/H07-031.1>
- [23] Boschen R.E. et al., (2013) Mining of deep-sea sea floor massive sulfides: A review of the deposits, their benthic communities, impacts from mining, regulatory frameworks and management strategies. *Ocean & Coastal Management. Vol. 84*, pp. 54–67.
- [24] Bottoni, P et al., (2010) Pharmaceuticals as priority water contaminants, *Toxicological & Environmental Chemistry*, 92:3, pp. 549–565, DOI: 10.1080/02772241003614320
- [25] Brandt, A. et al., The neonicotinoids thiacloprid, imidacloprid, and clothianidin affect the immunocompetence of honey bees (*Apis mellifera* L.). *Journal of Insect Physiology Vol. 86, March 2016*, pp. 40–47 doi: 10.1016/j.jinsphys.2016.01.001
- [26] Bråte, I. L. N. et al., (2017) Micro-and macro-plastics in marine species from Nordic waters. *Nordic Council of Ministers. (TemaNord; No.2017:549)*. DOI: 10.6027/TN2017-549
- [27] Braun, M. et al., Pesticides and antibiotics in permanent rice, alternating rice-shrimp and permanent shrimp systems of the coastal Mekong Delta, *Vietnam Environment International, Vol. 127, June 2019*, pp. 442–451, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.038>
- [28] Breitburg D. et al., (2018) Declining oxygen in the global ocean and coastal waters, *Science, Vol. 359*, Issue 6371, DOI: 10.1126/science.aam7240
- [29] Brette, Fabien et al., A Novel Cardiotoxic Mechanism for a Pervasive Global Pollutant. *Scientific Reports* 7:41476, DOI: 10.1038/srep41476
- [30] Broadhurst C.L. et al., Rift Valley lake fish and shellfish provided brain-specific nutrition for early Homo. *British Journal of Nutrition, 1998 Jan;79(1):3–21*.
- [31] Browde, Joan A. et al., (1993) A major developmental defect observed in several Biscayne Bay, Florida, fish species, *Environmental Biology of Fishes* 37: 181–188, DOI: 10.1007/BF00000593
- [32] Brown D.R. et al., (2016) Developmental exposure to a complex PAH mixture causes persistent behavioral effects in naive *Fundulus heteroclitus* (killifish) but not in a population of PAH-adapted killifish *Neurotoxicol Teratol.* pp. 53: 55–63, DOI: 10.1016/j.ntt.2015.10.007
- [33] Butcherine, Peter et al., (2018). The risk of neonicotinoid exposure to shrimp aquaculture. *Chemosphere* 217:329–348. DOI:10.1016/j.chemosphere.2018.10.197
- [34] Carbery M. et al., Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health. *Environ Int.* 2018 Jun;115:400–409. DOI:10.1016/j.envint.2018.03.007
- [35] Caris, M.G. et al., Expression of viral hemorrhagic septicemia virus in prespawning Pacific herring (*Clupea pallasii*) exposed to weathered crude oil, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55 (10). DOI: 10.1139/cjfas-55-10-2300

- [36] Carnevali O. et al., Endocrine-disrupting chemicals in aquatic environment: what are the risks for fish gametes? *Fish Physiol Biochem.* 2018 Dec;44(6):1561-1576. DOI: 10.1007/s10695-018-0507-z
- [37] Caroline Gaus et al., National Research Centre for Environmental Toxicology, Final Report Investigation Of Contaminant Levels In Green Turtles From Gladstone, 31 March 2012. Available at <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:344347>
- [38] Chae, Y., et al., (2018) Trophic transfer and individual impact of nano-sized polystyrene in a four-species freshwater food chain, *Scientific Reports* 8(1):284. DOI:10.1038/s41598-017-18849-y
- [39] Chang-Bum Jeong et al., (2017) Adverse effects of microplastics and oxidative stress-induced MAPK/Nrf2 pathway-mediated defense mechanisms in the marine copepod (*Paracyclopsina nana*). *Scientific Reports volume 7*, Article number: 41323. DOI:10.1038/srep41323
- [40] Chen, J. et al., Early life perfluorooctanesulphonic acid (PFOS) exposure impairs zebrafish organogenesis, *Aquatic Toxicology, Vol. 150, 2014*. DOI: 10.1016/j.aquatox.2014.03.005
- [41] Chen, Y. & Reese D.H. (2016), Corexit-EC9527A Disrupts Retinol Signaling and Neuronal Differentiation in P19 Embryonal Pluripotent Cells, *PLoS One.* 2016; 11(9): e0163724. DOI: 10.1371/journal.pone.0163724
- [42] Chopin, T., Aquaculture, Integrated Multi-Trophic (IMTA), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Chapter: Aquaculture, Integrated Multi-Trophic (IMTA)*. Publisher: Springer, Dordrecht Editors: R.A. Meyers. DOI: 10.1007/978-1-4614-5797-8_173s
- [43] Christiansen, Bernd et al., Potential effects of deep seabed mining on pelagic and benthopelagic biota, *Marine Policy*, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.02.014>
- [44] Convention on Biological Diversity (2014). An Updated Synthesis of the Impacts of Ocean Acidification on Marine Biodiversity (Eds: S. Hennige, J.M. Roberts & P. Williamson). Montreal, *Technical Series No. 75*, p. 99. <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-75-en.pdf>
- [45] Costa, L.G. et al., (2007) Developmental neurotoxicity of polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants, *NeuroToxicology* 28(6):1047-1067. DOI:10.1016/j.neuro.2007.08.007
- [46] Couch, John A. and Courtney, L. Interaction of chemical pollutants and virus in a crustacean: a novel bioassay system, *1977 Report for Gulf Breeze Environmental Research Laboratory*, United States Environmental Protection Agency Sabine Island. Gulf Breeze, Florida 32561
- [47] Cuyvers, Luc et al., Deep seabed mining: a rising environmental challenge, IUCN, *Global Marine and Polar Programme, 2018*, DOI; 10.2305/IUCN.CH.2018.16.en
- [48] Danovaro, R. et al., (2008), Sunscreens Cause Coral Bleaching by Promoting Viral Infections, *Environ Health Perspect.* 116(4): 441-447. DOI: 10.1289/ehp.10966
- [49] Day R.D. et al., (2007) Relationship of Blood Mercury Levels to Health Parameters in the Loggerhead Sea Turtle (*Caretta caretta*), *Environ Health Perspect.* 115(10): 1421-1428. DOI: 10.1289/ehp.9918
- [50] De Ramon N'Yeurt et al., (2012), Negative Carbon Via Ocean Afforestation. *Process Safety and Environmental Protection.* 90. Pp. 467-474. DOI: 10.1016/j.psep.2012.10.008
- [51] De Wit, Cynthia et al., (2005), Effects of Persistent Organic Pollutants (POPs) in Arctic Wildlife. *Organohalogen Compounds Vol. 67*. <https://pdfs.semanticscholar.org/9488/7756c4c2bf2641fcee-7d6a14f61e91def301.pdf>
- [52] Dennis, M. et al., (2016), Pathology of finfish and mud crabs *Scylla serrata* during a mortality event associated with a harbor development project in Port Curtis, Australia, *Dis Aquat Org* 121: 173-188. DOI: 10.3354/dao03011
- [53] Devriese L.I. et al., (2015), Microplastic contamination in brown shrimp (*Crangon crangon*, Linnaeus 1758) from coastal waters of the Southern North Sea and Channel area. *Mar Pollut Bull.* 15;98(1-2):179-87. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.06.051.
- [54] Dietrich, J.P. et al., Toxicity of PHOS-CHEK LC-95A and 259F fire retardants to ocean- and stream-type Chinook salmon and their potential to recover before seawater entry. *Science of the Total Environment* 490 (2014) 610-621. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.05.038

- [55] Dijkstra J.A. et al., Experimental and natural warming elevates mercury concentrations in estuarine fish. *PLOS One*. 2013;8(3):e58401. DOI: 10.1371/journal.pone.0058401
- [56] Dixon, Danielle L., Ocean Acidification Effects Fish Behavior and Survival as a Consequence of Impaired Chemoreception, September 2011, Conference: American Fisheries Society 140th Annual Meeting https://www.researchgate.net/publication/267876820_Ocean_Acidification_Effects_Fish_Behavior_and_Survival_as_a_Consequence_of_Impaired_Chemoreception
- [57] Dold, Bernhard (2014) Submarine Tailings Disposal (STD) - A Review. *Minerals* 4, 642-666. DOI:10.3390/min4030642
- [58] Doo, S. S., Hamylton, S. & Byrne, M. (2012), Reef-scale assessment of intertidal large benthic foraminifera populations on one tree Island, great barrier reef and their future carbonate production potential in a warming ocean. *Zoological Studies*, 51 (8), 1298-1307
- [59] Downs, C.A. et al., (2016), Toxicopathological Effects of the Sunscreen UV Filter, Oxybenzone (Benzophenone-3), on Coral Planulae and Cultured Primary Cells and Its Environmental Contamination in Hawaii and the U.S. Virgin Islands Arch. Environ. Contam. Toxicol. 70: 265. <https://doi.org/10.1007/s00244-015-0227-7>
- [60] Duke N.C. et al., Large-scale dieback of mangroves in Australia, 2017, *Marine and Freshwater Research* 68(10):1816-1829. DOI:10.1071/MF16322
- [61] Duke, N.C. et al., Herbicides implicated as the cause of severe mangrove dieback in the Mackay region, NE Australia: consequences for marine plant habitats of the GBR World Heritage Area, *Marine Pollution Bulletin* 51 (2005) 308-324. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15757730>
- [62] Edyvane, K. (1995), Issues in the South Australian Marine Environment, State of the Marine Environment Report for Australia. South Australia Research & Development Institute, elibrary. gbrmpa.gov.au
- [63] Environment America Research & Policy Center, Wasting Our Waterways 2012. Toxic Industrial Pollution and the Unfulfilled Promise of the Clean Water Act. May 2012, <https://environmentamerica.org/sites/environment/files/reports/Wasting%20Our%20Waterways%20vUS.pdf>
- [64] *Environment Australia, National Ocean Disposal Guidelines for Dredged Material May 2002*, Commonwealth of Australia, <https://www.environment.gov.au/marine/publications/national-assessment-guidelines-dredging-2009>
- [65] EPA Victoria, PFAS National Environmental Management Plan January 2018, http://www.epa.vic.gov.au/-/media/Files/Your%20environment/Land%20and%20groundwater/PFAS%20in%20Victoria/PFAS%20NEMP/FINAL_PFAS-NEMP-20180110.pdf
- [66] European Environment Agency, EEA Report No 7/2018, European waters, Assessment of status and pressures. 2018 ISSN 1977-8449, <https://www.eea.europa.eu/themes/water/european-waters/water-quality-and-water-assessment/water-assessments/eea-2018-water-assessment>
- [67] Faira P.A. et al., Perfluoroalkyl substances (PFASs) in edible fish species from Charleston Harbor and tributaries, South Carolina, United States: Exposure and risk assessment. *Environmental Research Vol.171, April 2019*, 266-277
- [68] FAO, 2017. FAO Yearbook. Fishery and Aquaculture Statistics. 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations <http://www.fao.org/fishery/statistics/yearbook/en>
- [69] FAO, 2018. GLOBEFISH Highlights. A Quarterly Update on World Seafood Markets. January 2018 Issue, with Jan-Sept 2017 Statistics. Food and Agriculture Organization of the United Nations <http://www.fao.org>
- [70] FAO, 2018. The State of World Fisheries and Aquaculture. Meeting the Sustainable Development Goals. Food and Agriculture Organization of the United Nation, <http://www.fao.org/documents/card/en/c/19540EN/>
- [71] FAO Impacts of climate change on fisheries and aquaculture, Synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options, FAO Fisheries And Aquaculture Technical Paper ISSN 2070-7010627; <http://www.fao.org/3/I9705EN/I9705en.pdf>

- [72] Flint M. et al., (2015), Clinical and Pathological Findings in Green Turtles (*Chelonia mydas*) from Gladstone, Queensland: Investigations of a Stranding Epidemic. *Ecohealth*. 12(2):298-309. DOI: 10.1007/s10393-014-0972-5
- [73] Flint, M. et al., Monitoring the health of green turtles in northern Queensland post catastrophic events. *Science of The Total Environment*, 2019; 660: 586. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.065
- [74] Fossberg J. et al., (2018), The Potential for Upscaling Kelp (*Saccharina latissima*) Cultivation in Salmon-Driven Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA). *Front. Mar. Sci.* 5:418. DOI: 10.3389/fmars.2018.00418
- [75] Fossi, M.C. et al., (2012), Are baleen whales exposed to the threat of microplastics? A case study of the Mediterranean fin whale (*Balaenoptera physalus*), *Marine Pollution Bulletin Vol. 64, Issue 11*, 2374–2379. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2012.08.013.
- [76] Gallo, F. et al., Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures, *Environ. Sci. Eur* (2018), 30:13, <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0139-z>
- [77] Galloway, T.S. and Depledge, M.H., Immunotoxicity in Invertebrates: Measurement and Ecotoxicological Relevance: *Ecotoxicology Vol. 10*, no. 1, pp. 5-23. Feb 2001. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11227817>
- [78] Gardner, J., et al., (2018) Southern Ocean pteropods at risk from ocean warming and acidification, *Mar Biol.*165(1):8. DOI: 10.1007/s00227-017-3261-3
- [79] GESAMP (2015). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. (Kershaw, P. J., ed.). (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/LAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on, Rep. Stud. GESAMP No. 90, 96 p.
- [80] Gibbons, David et al., (2014). A review of the direct and indirect effects of neonicotinoids and fipronil on vertebrate wildlife. *Env. Science & Pollution Research International*. 22. 10. DOI: 1007/s11356-014-3180-5.
- [81] Giddings J.M. et al., (2014), Risks to Aquatic Organisms from Use of Chlorpyrifos in the United States. In: Giesy J., Solomon K. (eds), *Ecological Risk Assessment for Chlorpyrifos in Terrestrial and Aquatic Systems in the United States. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology (Continuation of Residue Reviews), Vol 231*. Springer, Cham
- [82] Gonçalves, Bruno Bastos et al., *Ecotoxicology of Glyphosate-Based Herbicides on Aquatic Environment*, 2019 ONLINE FIRST. DOI:0.5772/intechopen.85157
- [83] Goudkamp, K. and Chin, A., June 2006, “Mangroves and Saltmarshes” in Chin, A. (ed) *The State of the Great Barrier Reef On-line*, Great Barrier Reef Marine Park Authority, Townsville. http://www.gbrmpa.gov.au/publications/sort/mangroves_saltmarshes
- [84] Guo, F. et al., (2012) Acute and Chronic Toxicity of Polychlorinated Biphenyl 126 to *Tigriopus Japonicus*: Effects on Survival, Growth, Reproduction and Intrinsic Rate of Population Growth; *Environmental Toxicology and Chemistry, Vol. 31*, No. 3, pp. 639–645. DOI: 10.1002/etc.1728
- [85] Hale, R.C. et al., (2003), Polybrominated diphenyl ether flame retardants in the North American environment. *Environ Int* 29:771-779, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12850095>
- [86] Halstead N.T. et al., (2015), Comparative toxicities of organophosphate and pyrethroid insecticides to aquatic macroarthropods, *Chemosphere* 135:265-271. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.03.091
- [87] Hamdan, Leila J. et al., (2018), The impact of the Deepwater Horizon blowout on historic shipwreck-associated sediment microbiomes in the northern Gulf of Mexico. *Scientific Reports Vol. 8*, Article: 9057 <https://www.nature.com/articles/s41598-018-27350-z>
- [88] Hano, Takeshi et al., Occurrence of neonicotinoids and fipronil in estuaries and their potential risks to aquatic invertebrates, *Environmental Pollution 252 (2019)* 205-215, *Environmental Pollution 252(Pt A)*. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.05.067
- [89] Hayes T.B. et al., Demasculinization and feminization of male gonads by atrazine: Consistent effects across vertebrate classes, *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology, Vol. 127, Issues 1–2*, 2011. DOI: 10.1016/j.jsbmb.2011.03.015

- [90] Hertzberg, Richie, "California's disappearing sea snails carry a grim climate warning", <https://www.nationalgeographic.com/environment/2019/08/red-abalone-closure-kelp-die-off-documentary-environment/>
- [91] Herzke D. et al., (2005), Brominated flame retardants and other organobromines in Norwegian predatory bird eggs. *Chemosphere* 61: 441-449. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.01.066
- [92] Higgins CP, Field JA, Criddle CS, & Luthy RG., (2005), Quantitative determination of perfluorochemicals in sediments and domestic sludge. *Environ Sci Technol. June 1;39 (11):3946-56*, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15984769>
- [93] Hook S. et al., (2018), The impacts of modern-use pesticides on shrimp aquaculture: An assessment for north eastern Australia, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 148, doi. org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.028.
- [94] http://ntp.niehs.nih.gov/ntp/about_ntp/monopeer/vw/2016/july/draftsystematicreviewimmunotoxicityassociatedpfoa_pfos_508.pdf.
- [95] <http://www.antarctica.gov.au/news/2010/krill-face-deadly-cost-of-ocean-acidification>
- [96] <http://www.defence.gov.au/Environment/PFAS/docs/Albatross/Reports/20171116HMASAlbatrossHHERAFullReport.pdf>
- [97] <http://www.enr.gov.nt.ca/files/polycyclic-aromatic-hydrocarbons-pahs-fact-sheet>
- [98] http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/contaminants/mercur/q47-q56_e.html
- [99] <http://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/>
- [100] https://aces.nmsu.edu/pubs/_circulars/CR647/welcome.html
- [101] <https://environmentamerica.org/sites/environment/files/reports/Wasting%20Our%20Waterways%20vUS.pdf>
- [102] <https://sustainabledevelopment.un.org/topics/chemicalsandwaste>
- [103] https://usrtk.org/wp-content/uploads/2018/05/NTP_GBF-paper.pdf
- [104] <https://www.drawdown.org/solutions/food/regenerative-agriculture>
- [105] <https://www.greenwave.org>
- [106] https://www.ospar.org/site/assets/files/7413/ospar_assessment_sheet_cemp_imposex_2014.pdf
- [107] <https://www.statista.com/statistics/272157/chemical-production-forecast-worldwide/>
- [108] <https://www.theguardian.com/travel/2018/may/03/hawaii-becomes-first-us-state-to-ban-sunscreen-harmful-to-coral-reefs>
- [109] Hughes, D. J. et al., (2015), Ecological impacts of large-scale disposal of mining waste in the deep sea *Scientific Reports* 5:9985. DOI: 10.1038/srep09985
- [110] IARC Monographs, Some organophosphate and insecticides and herbicides, Vol. 112 2017. <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/mono112.pdf>
- [111] IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner et al., (eds.)]. <https://www.ipcc.ch/srocc/home/>
- [112] *IPEN Global Mercury Hotspots*. A Publication by the Biodiversity Research Institute and IPEN Updated: October 2014, <https://ipen.org/dummy/hgmonitoring>
- [113] IPEN Mercury monitoring in women of child-bearing age in Asia and the Pacific Region April 2017, Lee Bell, IPEN Mercury Adviser, <https://ipen.org/Mercury-Monitoring-in-Women>
- [114] Jamieson, A.J. et al., (2017), Bioaccumulation of persistent organic pollutants in the deepest ocean fauna. *Nature Ecology & Evolution* 1, 0051. DOI: 10.1038/s41559-016-0051, www.nature.com/natecolevol

- [115] Jantzen, C. E. et al., Behavioral, morphometric, and gene expression effects in adult zebrafish (*Danio rerio*) embryonically exposed to PFOA, PFOS, and PFNA, *Aquatic Toxicology*, Volume 180, 2016
- [116] Jessup, D.A. et al., (2010), Persistent organic pollutants in the blood of free-ranging sea otters (*Enhydra lutris*ssp.) in Alaska and California. *J. Wildlife Dis* 46(4):1214-33. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20966272>
- [117] Johnson, L., et al., (2013), Effects of Legacy Persistent Organic Pollutants (POPs) in Fish-Current and Future Challenges, *Fish Physiology* 33:53-140. DOI: 10.1016/B978-0-12-398254-4.00002-9
- [118] Kefford, B.J. et al., (2014), Biomonitoring effects of pesticides in rivers draining on to the Great Barrier Reef. Final report for project number RRRD058: A novel biological method of monitoring herbicides. Report to the Reef Rescue Water Quality Research & Development Program. Reef and Rainforest Research Centre Limited, Cairns (109pp.). ISBN: 978-1-925088-18-2
- [119] Keiter, S., et al., (2012), Long-term effects of a binary mixture of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and bisphenol A (BPA) in zebrafish (*Danio rerio*). *Aquatic toxicology (Amsterdam, Netherlands)* 118-119:116-29
- [120] Kelly, D. et al., (2009), Trematode infection causes malformations and population effects in a declining New Zealand fish. *Journal of Animal Ecology*. 79(2):445-52. DOI: 10.1111/j.1365-2656.2009.01636.x
- [121] Kelly, D. W. et al., (2010), Synergistic effects of glyphosate formulation and parasite infection on fish malformations and survival. *Journal of Applied Ecology*, 47: 498-504. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2010.01791.x
- [122] Kelly, D.W. et al., Synergistic effects of glyphosate formulation and parasite infection on fish malformations and survival, *Journal of Applied Ecology*, Vol. 47: 2 April 2010, pp. 498-504, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01791.x>
- [123] Khezri, A. et al., A Mixture of Persistent Organic Pollutants and Perfluorooctanesulfonic Acid Induces Similar Behavioral Responses, but Different Gene Expression Profiles in Zebrafish Larvae. *Int. J. Mol. Sci.* 2017, 18, 291. DOI: 10.3390/ijms18020291
- [124] Kidd, K. A. et al., (2014), Direct and indirect responses of a freshwater food web to a potent synthetic oestrogen. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2014, Nov 19;369(1656). pii: 20130578. DOI: 10.1098/rstb.2013.0578.
- [125] Kidd, K. et al., (2007). Collapse of a Fish Population After Exposure to a Synthetic Estrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 104. 8897-901. DOI: 10.1073/pnas.0609568104.
- [126] King, J., et al., (2013), Regulation of pesticides in Australia: The Great Barrier Reef as a case study for evaluating effectiveness, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 180, 54-67 DOI: 10.1016/j.agee.2012.07.001
- [127] Knudsen L.B. et al., Temporal trends of brominated flame retardants, cyclododeca-1,5,9-triene, and mercury in eggs of four seabird species from Northern Norway and Svalbard, Norwegian Polar Institute, Tromsø University Museum, National Veterinary Institute of Norway, Norwegian School of Veterinary Science. SPFO-Report 942/2005, December 2005, <https://www.semanticscholar.org/paper/Temporal-trends-of-brominated-flame-retardants%2C-and-Knudsen-Gabrielsen/eaafc9156af75c64fa299f8b434abb4da29da8dd>
- [128] Kroon, F.J., et al., (2015), Altered transcription levels of endocrine associated genes in two fisheries species collected from the Great Barrier Reef catchment and lagoon, *Marine Environmental Research* 104C:51-61. DOI: 10.1016/j.marenvres.2015.01.00
- [129] Labrie, L. et al., (2003), Effect of methyl parathion on the susceptibility of shrimp *Litopenaeus vannamei* to experimental vibriosis. *Dis. Aquat. Org.* 57 (3), 265-270. DOI: 10.3354/dao057265
- [130] Lagarde, Fabien et al., (2015), Non-monotonic dose-response relationships and endocrine disruptors: a qualitative method of assessment. *Environ Health* 2015 Feb 11;14:13. DOI: 10.1186/1476-069X-14-13.

- [131] Lewis S.E. et al., (2009), Herbicides: A new threat to the Great Barrier Reef, *Environmental Pollution* 157 2470-2484. DOI: 10.1016/j.envpol.2009.03.006
- [132] Li L. et al., (2018), Perfluoroalkyl acids in surface seawater from the North Pacific to the Arctic Ocean: Contamination, distribution and transportation. *Environ Pollut.* 16;238:168-176. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.03.018.
- [133] Lin Sun P. et al., Morphological Deformities as Biomarkers in Fish from Contaminated Rivers in Taiwan. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2009, 6, 2307-2331. DOI: 10.3390/ijerph6082307
- [134] Lin Zhu et al., Microplastic ingestion in deep-sea fish from the South China Sea. *Science of The Total Environment Volume 677*, 10 August 2019, pp. 493-501. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.380>
- [135] Li-Peng Zhang et al., Levels of endocrine disrupting compounds in South China Sea, *Marine Pollution Bulletin, Volume 85*, Issue 2, 2014. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.12.040
- [136] Liu, Y. et al., (2018), Nontarget Mass Spectrometry Reveals New Perfluoroalkyl Substances in Fish from the Yangtze River and Tangxun Lake, *China Environ. Sci. Technol.* DOI: 10.1021/acs.est.8b00779
- [137] Liu, Y. et al., (2016) Uptake and Accumulation of Polystyrene Microplastics in Zebrafish (*Danio rerio*) and Toxic Effects in Liver. *Environ. Sci. Technol.*, 50(7): 4054-4060.
- [138] Luna-Acosta, A. et al., Detection of early effects of a single herbicide (diuron) and a mix of herbicides and pharmaceuticals (diuron, isoproturon, ibuprofen) on immunological parameters of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) spat. *Chemosphere, Volume 87, Issue 11, 2012*
- [139] Lusher, A. and Mendoza-Hill, J. 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, Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 2017
- [140] Lusher, A. et al., (2013), Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel, *Marine Pollution Bulletin, Vol. 67*, Issues 1-2, 2013. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2012.11.028
- [141] Lyche, Jan L. et al., (2010), Natural Mixtures of Persistent Organic Pollutants (POP) Increase Weight Gain, Advance Puberty, and Induce Changes in Gene Expression Associated with Steroid Hormones and Obesity in Female Zebrafish, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 73:15, 1032-1057. DOI: 10.1080/15287394.2010.481618
- [142] Maloney, E. M., et al., (2017), Cumulative toxicity of neonicotinoid insecticide mixtures to *Chironomus dilutus* under acute exposure scenarios. *Environ. Toxicol. Chem.*, 36: 3091-3101. DOI: 10.1002/etc.3878
- [143] Markham, E. et al., (2018), Time Trends of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in *Antarctic Biota ACS Omega*, 3 (6), pp. 6595-6604. DOI: 10.1021/acsomega.8b00440
- [144] Marlise Guerrero Schimpf, et al., (2017), Neonatal exposure to a glyphosate based herbicide alters the development of the rat uterus, *Toxicology*, 1;376:2-14. DOI: 10.1016/j.tox.2016.06.004.
- [145] Maryoung L.A. et al., Sublethal toxicity of chlorpyrifos to salmonid olfaction after hypersaline acclimation. *Aquat. Toxicol.* 2015 Apr;161:94-101. DOI: 10.1016/j.aquatox.2015.01.026..
- [146] Masashi Hirano et al., (2009), Effects of environmentally relevant concentrations of nonylphenol on growth and 20-hydroxyecdysone levels in mysid crustacean, *Americamysis bahia*, *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 149(3):368-73. DOI: 10.1016/j.cbpc.2008.09.005
- [147] Matthew Savoca et al., (2016), Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Science Advances; Vol. 2*, no. 11, e1600395. DOI: 10.1126/sciadv.1600395
- [148] Mercurio P. et al., (2014), Glyphosate persistence in seawater, *Marine Pollution Bulletin, Vol. 85*, Issue 2, 385-390. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.021>
- [149] Milazzo, M. et al., 2016, Ocean acidification affects fish spawning but not paternity at CO₂ seeps. *Proc. R. Soc. B*283:20161021. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2016.1021>

- [150] Milesi, M., et al., Perinatal exposure to a glyphosate-based herbicide impairs female reproductive outcomes and induces second-generation adverse effects in Wistar rats. *Archives of Toxicology August 2018*, Volume 92, Issue 8, pp 2629–2643. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00204-018-2236-6>
- [151] Mingxin Wang et al., (2017), Short-term toxicity of polystyrene microplastics on mysid shrimps *Neomysis japonica* IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci.*61 012136
- [152] Mishra B.P. et al., Bioclinical stress of Rogor pesticide in the fish *Amphipnous cuchia*. *Int J Clin Trials*. 2016 Aug;3(3):159-164. <http://www.ijclinicaltrials.com>
- [153] Mitchell, F. and Holdway, D., (2000), The Acute and Chronic Toxicity of the Dispersants Corexit 9527 and 9500, Water Accommodated Fraction (WAF) of Crude Oil, And Dispersant Enhanced Waf (DEWAF) To Hydra Viridissima (Green Hydra). *Wat. Res. Vol. 34*, No. 1, pp. 343-348. DOI: 10.1016/S0043-1354(99)00144-X
- [154] Moche, W. and Thanner G., Federal Environment Agency of Austria, Vienna, Austria. Levels of PBDE in effluents and sludge from sewage treatment plants in Austria. Brominated Diphenyl Ether (BDE) Residues in Canadian Human Fetal Liver and Placenta. *Third International Workshop on Brominated Flame Retardants, University of Toronto, Ontario, Canada, June 6-9, 2004*
- [155] Morello, E.B. et al., (2016), The Ecological Impacts of Submarine Tailings Placement. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 54, 315-366. DOI: 10.1201/9781315368597-7
- [156] Muir, Derek et al., Bioaccumulation of pharmaceuticals and personal care product chemicals in fish exposed to wastewater effluent in an urban wetland. *Scientific Reports* 7(1). DOI: 10.1038/s41598-017-15462-x
- [157] Muncaster S.P. et al., (2016), Effects of MV Rena heavy fuel oil and dispersed oil on yellowtail kingfish early life stages, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 50:1, 131-143. DOI: 10.1080/00288330.2015.1078821
- [158] Murawski S. et al., (2014), Prevalence of External Skin Lesions and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Concentrations in Gulf of Mexico Fishes, Post-Deepwater Horizon. *Transactions of the American Fisheries Society*, 143:4, 1084-1097. DOI: 10.1080/00028487.2014.911205
- [159] Napier, G.M. et al., Records of Fish Kills in Inland Waters of NSW & QLD in Relation to Cotton Pesticides, *Wetlands (Australia)* 17 (2) 1998.
- [160] Nasir Hafiz Zargar & Jatinder Paul Singh Gill, Studies on Levels of Pesticides Residues in Market Fish of Punjab (India). *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci* (2018)7(8): 2899-2905. <https://doi.org/10.20546/ijemas.2018.708.307>
- [161] National Pollutant Inventory, <http://www.npi.gov.au>
- [162] Negri, A.P. et al., Herbicides increase the vulnerability of corals to rising sea surface temperature, *American Society of Limnology and Oceanography*, 56 (1), 2011
- [163] NOAA, Oil spills: A major marine ecosystem threat, <http://www.noaa.gov/explainers/oil-spills-major-marine-ecosystem-threat>
- [164] Nyman A M et al., (2013), The Insecticide Imidacloprid Causes Mortality of the Freshwater Amphipod *Gammarus pulex* by Interfering with Feeding Behavior. *PLOS ONE* 8(5): e62472. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062472>
- [165] Oliveira, M. et al., Single and combined effects of microplastics and pyrene on juveniles (0+ group) of the common goby *Pomatoschistus microps* (Teleostei, Gobiidae). *Ecological Indicators Vol. 34*, 2013 pp. 641-647. DOI: 10.1016/j.ecolind.2013.06.019
- [166] Olivero-Verbel, J. et al., (2006), Perfluorooctanesulfonate and related fluorochemicals in biological samples from the north coast of Colombia. *Environmental Pollution*, 142(2):367-372. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16303219>
- [167] Olsson, M. et al., (1994), Disease and environmental contaminants in seals from the Baltic and the Swedish west coast. *Sci. Total Environ.* 154, 217-227. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(94\)90089-2](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90089-2)

- [168] Ongley, E. D. Control of water pollution from agriculture - FAO irrigation and drainage paper 55, Chapter 4: Pesticides as water pollutants, *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1996*, <http://www.fao.org/3/w2598e/w2598e07.htm>
- [169] Ostrach, D. J. et al., Maternal transfer of xenobiotics and effects on larval striped bass in the San Francisco Estuary. *PNAS December 9, 2008* vol. 105 no. 49 pp. 19354–19359. www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0802616105
- [170] Palm, H. W. Fish Parasites as Biological Indicators in a Changing World: Can We Monitor Environmental Impact and Climate Change? Chapter 12 H. Mehlhorn (ed.), *Progress in Parasitology, Parasitology Research Monographs 2*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-21396-0_12
- [171] Partridge, G.J. and R.J. Michael, Direct and indirect effects of simulated calcareous dredge material on eggs and larvae of pink snapper *Pagrus auratus*, *Journal of Fish Biology* (2010) 77, 227-240. DOI: 10.1111/j.1095-8649.2010.02679.x
- [172] Patra R.W. et al., Interactions between water temperature and contaminant toxicity to freshwater fish (2015). *Environmental Toxicology* 34(8). <https://doi.org/10.1002/etc.2990>
- [173] Pérez, G.L. et al., (2007), Effects of the herbicide Roundup on freshwater microbial communities: a mesocosm study. *Ecol. Appl.* 17(8):2310-22. <https://doi.org/10.1890/07-0499.1>
- [174] Pessarrodona, A. et al., Carbon assimilation and transfer through kelp forests in the NE Atlantic is diminished under a warmer ocean climate. *Glob Change Biol.* 2018; 24: 4386–4398. <https://doi.org/10.1111/gcb.14303>
- [175] Petrou, K. et al., (2019), Acidification diminishes diatom silica production in the Southern Ocean. *In Nature Climate change* 462, p. 346. DOI: 10.1038/s41558-019-0557-y.
- [176] Petterson, M.G. & Tawake, A. The Cook Islands (South Pacific) experience in governance of seabed manganese nodule mining. *Ocean and Coastal Management* 167 (2019), pp. 271–287. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2018.09.010
- [177] Phinney, L., Air Quality Sciences, Meteorological Service of Canada, Environment Canada, “Environmental Impacts of Air Pollution,” Presentation to 2004 Canadian Acid Deposition Science Assessment. <https://novascotia.ca/nse/air/docs/Phinney-EnvironmentallImpacts.pdf>
- [178] Potapowicz, J. et al., The influence of global climate change on the environmental fate of anthropogenic pollution released from the permafrost Part I. *Case study of Antarctica. Science of the Total Environment* 651 (2019), pp. 1534–1548. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.16
- [179] Qiang L et al., Environmental concentration of carbamazepine accelerates fish embryonic development and disturbs larvae behavior. *Ecotoxicology.* 2016 Sep;25(7):1426-37. DOI: 10.1007/s10646-016-1694-y.
- [180] Qiu H et al., (2013), Physiological and biochemical responses of *Microcystis aeruginosa* to glyphosate and its Roundup® formulation. *J Hazard Mater* 248-249:172- 6. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.12.033.
- [181] Ray M. et al., Density shift, morphological damage, lysosomal fragility and apoptosis of hemocytes of Indian molluscs exposed to pyrethroid pesticides. *Fish Shellfish Immunol.* 2013 Aug;35(2):499-512. DOI: 10.1016/j.fsi.2013.05.008
- [182] Rejinders, Peter J.H., (1994), Toxicokinetics of chlorobiphenyls and associated physiological responses in marine mammals, with particular reference to their potential for ecotoxicological risk assessment. *Sci. Total Environ.* 154, pp. 229-236. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7973609>
- [183] Rengarajan, T. et al., (2015), Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons with special focus on cancer *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine Vol. 5*, Issue 3, pp. 182-189. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(15\)30003-4](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(15)30003-4)
- [184] Reymond, Claire E. et al., Decline in growth of foraminifer *Marginopora rossi* under eutrophication and ocean acidification scenarios. *Global Change Biology* (2013) 19, pp. 291–302. DOI: 10.1111/gcb.12035

- [185] Rice DC., The US EPA reference dose for methylmercury: sources of uncertainty. *Environ. Res.* 2004 Jul;95(3):406-13. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15220074>
- [186] Rice, J. et al., Effects Of Glyphosate And Its Formulations On Markers Of Oxidative Stress And Cell Viability In HepaRG And HaCaT Cell Lines. *U.S. National Toxicology Program, 2018*
- [187] Ripley, J. et al., Utilization of protein expression profiles as indicators of environmental impairment of smallmouth bass (*Micropterus dolomieu*) from the Shenandoah River, Virginia, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(8):1756-67. DOI: 10.1897/07-588
- [188] Rist SE et al., Suspended micro-sized PVC particles impair the performance and decrease survival in the Asian green mussel *Perna viridis*. *Mar Pollut. Bull.* 2016 Oct 15;111(1-2):213-220. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.07.006.
- [189] Rochman CM et al., (2014), Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in fish tissue may be an indicator of plastic contamination in marine habitats. *Sci. Total Environ.* 1;476-477:622-33. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.01.058.
- [190] Russo, Renato et al., (2018), Sequential exposure to low levels of pesticides and temperature stress increase toxicological sensitivity of crustaceans. *Science of The Total Environment* 610-611:563-569. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.08.073)
- [191] Sadaria, Akash et al., (2016). Mass Balance Assessment for Six Neonicotinoid Insecticides During Conventional Wastewater and Wetland Treatment: Nationwide Reconnaissance in U.S. Wastewater. *Environmental Science & Technology*. 50. DOI: 10.1021/acs.est.6b01032.
- [192] Sajjad Abbasi et al., (2018), Microplastics in different tissues of fish and prawn from the Musa Estuary, Persian Gulf. *Chemosphere Vol. 205*, pp. 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.076>
- [193] Sánchez-Bayo, F. et al., Review Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation Volume 232, April 2019*, pp. 8-27. doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020
- [194] Sandoval-Herrera N. et al., (2019), Neurotoxicity of organophosphate pesticides could reduce the ability of fish to escape predation under low doses of exposure. *Scientific Reports Volume 9*, Article number: 10530
- [195] Saravana Bhavan P. & Pitchairaj Geraldine (2001). Biochemical Stress Responses in Tissues of the Prawns *Macrobrachium malcolmsonii* on Exposure to Endosulfan. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 70(1):27-41. DOI:10.1006/pest.2001.2531
- [196] Schäfer, Ralf Bernhard et al., (2011). Effects of Pesticides Monitored with Three Sampling Methods in 24 Sites on Macroinvertebrates and Microorganisms. *Environmental science & technology*. 45. DOI: 10.1021/es103227q.
- [197] Scholz N. L. et al., A Perspective on Modern Pesticides, Pelagic Fish Declines, and Unknown Ecological Resilience in Highly Managed Ecosystems. *BioScience, Volume 62, Issue 4, April 2012*, pp. 428-434. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.4.13>
- [198] Schug T.T. et al., Endocrine disrupting chemicals and disease susceptibility. *J. Steroid Biochem Mol Biol.* 2011;127(3-5):204-215. DOI: 10.1016/j.jsbmb.2011.08.007
- [199] Schultz, M.M. et al., (2012), Effects of Triclosan and Triclocarban, Two Ubiquitous Environmental Contaminants, on Anatomy, Physiology, and Behavior of the Fathead Minnow (*Pimephales promelas*). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 63(1):114-24. DOI: 10.1007/s00244-011-9748-x
- [200] Schwing P., et al., (2018), Resilience of benthic foraminifera in the Northern Gulf of Mexico following the Deepwater Horizon event (2011-2015). *Ecological Indicators* 84:753-764. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.09.044
- [201] Seibert, Ca. H. and Aguinaldo R. Pinto, Challenges in shrimp aquaculture due to viral diseases: distribution and biology of the five major penaeid viruses and interventions to avoid viral incidence and dispersion. *Braz J Microbiol.* 2012 Jul-Sep; 43(3): pp. 857-864. DOI: 10.1590/S1517-83822012000300002

- [202] Shafahi, M. and Woolston, D. Aquaponics: A Sustainable Food Production System, November 2014. Proceedings of Conference, *ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Montreal, Canada Volume 3*. DOI: 10.1115/IMECE2014-39441
- [203] Shane, D. et al., Marine Heatwave, Harmful Algae Blooms and an Extensive Fish Kill Event During 2013 in South Australia. *Front. Mar. Sci.*, 09 October 2019. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00610>
- [204] Sisman, T. Dichlorvos-induced developmental toxicity in Zebrafish. *Toxicol. Ind. Health* 2010 Oct;26(9):pp. 567-73. DOI: 10.1177/0748233710373089.
- [205] Smith, Madeleine et al. Microplastics in Seafood and the Implications for Human Health. *Current environmental health reports vol. 5,3* (2018): pp. 375-386. DOI: 10.1007/s40572-018-0206-z
- [206] Stachowski-Haberhorn S. et al., (2008), Impact of Roundup on the marine microbial community, as shown by an in situ microcosm experiment. *Aquat. Toxicol.* 89(4): pp. 232-41. DOI: 10.1016/j.aquatox.2008.07.004
- [207] Strobel, A. et al., (2016), Persistent organic pollutants in tissues of the white-blooded Antarctic fish *amsocephalusgunnari* and *Chaenocephalus aceratus*. *Chemosphere* 161:pp. 555-562. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.089>
- [208] Struger, J. et al., (2017), Factors influencing the occurrence and distribution of neonicotinoid insecticides in surface waters of southern Ontario, Canada. *Chemosphere, Vol. 169*. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.036.
- [209] Sultana, R. et al., 2012. Accumulation of pesticide residues by shrimp, fish and brine shrimp during pond culture at ghorabari (district Thatta). *J. Chem. Soc. Pakistan* 34 (3), 541e549. <https://jcsop.org.pk/ArticleUpload/4398-20726-1-CE.pdf>
- [210] Sun F. & Chen HS., Monitoring of pesticide chlorpyrifos residue in farmed fish: investigation of possible sources. *Chemosphere. 2008 May*;71(10):1866-9. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.01.034.
- [211] Sunderland, E. M. et al., (2009), Mercury sources, distribution, and bioavailability in the North Pacific Ocean: Insights from data and models, *Global Biogeochem. Cycles*, 23, GB2010. DOI: 10.1029/2008GB003425.
- [212] Taylor, C. M. et al., A review of guidance on fish consumption in pregnancy: is it fit for purpose? (2018). *Public Health Nutrition, Volume 21*, Issue 11, pp. 2149-2159. DOI: 10.1017/S1368980018000599
- [213] Taylor, M.D. et al., Do conventional cooking methods alter concentrations of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in seafood? *Food and Chemical Toxicology, Volume 127, May 2019*, pp. 280-287. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.03.032>
- [214] Thompson N.P. et al., (1974), Polychlorinated biphenyls and p,p' DDE in green turtle eggs from Ascension Island, South Atlantic Ocean. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 11(5):399-406. DOI: 10.1007/bf01685294
- [215] Tisler et al., (2009), Hazard identification of imidacloprid to aquatic environment. *Chemosphere*. 76, pp. 907-14. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2009.05.002
- [216] Tomy, Gregg T. et al., (2004), Fluorinated Organic Compounds in an Eastern Arctic Marine Food Web. *Environ. Sci. Technol.*, 38 (24), pp. 6475-6481. <https://doi.org/10.1021/es049620g>
- [217] Tumampos, S. "Seaweed farming face dilemma with ice-ice disease" <https://businessmirror.com.ph/2019/06/09/seaweed-farming-face-dilemma-with-ice-ice-disease/>
- [218] Uddin, Md. Hanif et al., Impacts of organophosphate pesticide, sumithion on water quality and benthic invertebrates in aquaculture ponds. *Aquaculture Reports Vol.3, May 2016*, pp. 88-92. DOI: 10.1016/j.aqrep.2016.01.002
- [219] UNEP 2011. Climate Change and POPs: Predicting the Impacts. Report of the UNEP/AMAP Expert Group. <https://www.amap.no/documents/doc/climate-change-and-pops-predicting-the-impacts/753>

- [220] UNEP State of the Science of Endocrine Disrupting Chemicals 2012, United Nations Environment Programme and the World Health Organization, 2013. <http://www.who.int/ceh/publications/endocrine/en/>
- [221] UNEP/POPS/POPRC.10/10/Add.2, Risk profile on decabromodiphenyl ether (commercial mixture, c-decaBDE), Nov.2014. <http://www.pops.int>
- [222] UNEP/POPS/POPRC.2/17/Add.1, Risk profile on commercial pentabromodiphenyl ether, Nov. 2006. <http://www.pops.int>
- [223] UNEP/POPS/POPRC.3/20/Add.6, Commercial Octabromodiphenyl Ether Risk Profile, Dec 2007. <http://www.pops.int>
- [224] UNEP/POPS/POPRC.5/10/Add.2, Risk profile on endosulfan, Oct. 2009. <http://www.pops.int>
- [225] UNEP/POPS/POPRC.8/16/Annex V, Annex V Guidance for drafters of risk profiles on consideration of toxicological interactions when evaluating chemicals proposed for listing, Qualitative literature-based approach to assessing mixture toxicity under Annex. www.pops.int/TheConvention/POPsReviewCommittee/Guidance/
- [226] US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, What is the biggest source of pollution in the ocean? www.oceanservice.noaa.gov.
- [227] US NIEHS 2016 National Toxicology Program. Systematic Review of Immunotoxicity Associated With Exposure To Perfluorooctanoic Acid (PFOA) Or Perfluorooctane Sulfonate (PFOS), https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/ohat/pfoa_pfos/pfoa_pfosmonograph_508.pdf
- [228] USEPA 2017 Preliminary Aquatic Risk Assessment to Support the Registration Review of Imidacloprid. Office of Chemical Safety and Pollution Prevention. Washington DC, <https://www.epa.gov/pesticides/epa-releases-neonicotinoid-assessments-public-comment>
- [229] USGS, Tackling Fish Endocrine Disruption U.S. Geological Survey Environmental Health - Toxic Substances Hydrology Program. https://toxics.usgs.gov/highlights/fish_endocrine_disruption.html
- [230] Vadja, A.M. et al, (2008), Reproductive Disruption in Fish Downstream from an Estrogenic Wastewater Effluent, *Environ. Sci. Technol.* 42(9):3407-14. DOI: 10.1021/es0720661
- [231] van de Merwe, Jason P. et al., (2009), Chemical Contamination of Green Turtle (*Chelonia mydas*) Eggs in Peninsular Malaysia: Implications for Conservation and Public Health. *Environ. Health Perspect.* Sep; 117(9):1397-1401. DOI: 10.1289/ehp.0900813
- [232] Waycott M et al., (2009), Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA *PNAS* July 28, 2009 106 (30) 12377-12381; <https://doi.org/10.1073/pnas.0905620106>
- [233] Wei Shi et al., (2016), Ocean acidification increases cadmium accumulation in marine bivalves: a potential threat to seafood safety. *Scientific Reports* 6:20197. DOI: 10.1038/srep20197
- [234] Wenbin Ma et al., (2017), A New Procedure for Deep Sea Mining Tailings Disposal Minerals, 7, 47. DOI: 10.3390/min7040047 www.mdpi.com/journal/minerals
- [235] Wernberg, T. et al., (2016), Climate-driven regime shift of a temperate marine ecosystem. *Science*. 353. 169-172. DOI: 10.1126/science.aad8745
- [236] Wilkinson, J. and Boxall, A., The first global study of pharmaceutical contamination in riverine environments. *SETAC Europe 29th Annual Meeting, Helsinki, Finland. May 28, 2019.*
- [237] World Bank Report Urges Caution in Deep Sea Mining in the Pacific, PRESS RELEASE April 28, 2016. <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2016/04/28/world-bank-report-urges-caution-in-deep-sea-mining-in-the-pacific>
- [238] Xia, K., et al., (2012), Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Mississippi Seafood from Areas Affected by the Deepwater Horizon Oil Spill. *Environ. Sci. Technol.*, 46 (10), pp. 5310-5318. DOI: 10.1021/es2042433.

- [239] Xiaodong Ju et al. (2008), Perfluorinated Surfactants in Surface, Subsurface Water and Microlayer from Dalian Coastal Waters in China, *Environmental Science and Technology* 42(10):3538-42. DOI: 10.1021/es703006d
- [240] Yu, K., et al., (2015), Chlorpyrifos is estrogenic and alters embryonic hatching, cell proliferation and apoptosis in zebrafish. *Chem. Biol. Interact.* Sep 5;239:26-33. DOI: 10.1016/j.cbi.2015.06.010
- [241] Zelikoff, Judith T. Metal Pollution-Induced Immunomodulation In Fish. *Annual Rev. of Fish Diseases*, pp. 305-325, 1993. [https://doi.org/10.1016/0959-8030\(93\)90041-9](https://doi.org/10.1016/0959-8030(93)90041-9)
- [242] Wurl O, Obbard JP. A review of pollutants in the sea-surface microlayer (SML): a unique habitat for marine organisms. *Mar. Pollut. Bull.* 2004 Jun;48(11-12):1016-30.
- [243] Defarge, N., Spiroux de Vendômois, J., Séralini, G.E. Toxicity of formulants and heavy metals in glyphosate-based herbicides and other pesticides. *Toxicology Reports*, Volume 5, 2018.
- [244] Yanna Liu, et al., Hundreds of Unrecognized Halogenated Contaminants Discovered in Polar Bear Serum. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018. DOI: 10.1002/anie.201809906
- [245] Fish Consumption Advice for Alaskans; A Risk Management Strategy To Optimize the Public's Health, Alaska Scientific Advisory Committee for Fish Consumption, Section of Epidemiology Division of Public Health, Department of Health and Social Services, State of Alaska Updated July 21, 2014. <http://dhss.alaska.gov/dph/Epi/eph/Documents/fish/FishConsumptionAdvice2014.pdf>
- [246] von Hippel FA, et al. Endocrine disruption and differential gene expression in sentinel fish on St. Lawrence Island, Alaska: health implications for indigenous residents. *Environ. Pollut.* 2018 Mar;234:279-287.
- [247] Ortiz-Delgado et al. The organophosphate pesticide-OP malathion inducing thyroidal disruptions and failures in the metamorphosis of the Senegalese sole, *Solea senegalensis*. *BMC Veterinary Research* (2019). <https://doi.org/10.1186/s12917-019-1786-z>
- [248] Kate L. Crump and Vance L. Trudeau (2009). Mercury-Induced Reproductive Impairment In Fish. *Toxicology and Chemistry*, Vol. 28, No. 5, pp. 895–907.
- [249] Pereira, P., et al., (2015), Inorganic mercury accumulation in brain following waterborne exposure elicits a deficit on the number of brain cells and impairs swimming behavior in fish (white seabream *Diplodus sargus*). *Aquat. Toxicol.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquatox.2015.11.031>
- [250] Wang et al., Toward a Global Understanding of Chemical Pollution: A First Comprehensive Analysis of National and Regional Chemical Inventories. *Environ. Sci. Technol.* 2020, 54, 5, 2575-2584. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06379>

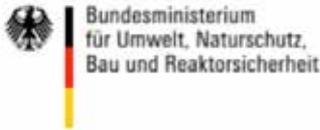
REMERCIEMENTS

IPEN reconnaît avec gratitude le soutien financier apporté par:

- Le Gouvernement allemand
- Le Gouvernement suédois
- La Société Suédoise pour la Conservation de la Nature
- et d'autres donateurs qui ont rendu possible la production de ce document.

Les opinions et interprétations exprimées ici ne doivent pas nécessairement être considérées comme le reflet de l'opinion officielle de l'une ou l'autre des institutions ayant apporté un appui financier. La responsabilité du contenu incombe entièrement à IPEN.

Ce guide est un outil éducatif de la campagne de l'IPEN Sur les Objectifs de Développement Durable sans Toxiques.





pour un avenir sans toxiques

www.ipen.org

ipen@ipen.org

[@ToxicsFree](#)