

ÉMILIEEN PELLETIER



Précis d'écotoxicologie marine

Pour la suite de nos océans



Lavoisier
TEC & DOC

Précis d'écotoxicologie marine

Pour la suite de nos océans

Dans la même collection

Écologie de la biodiversité – Approches politiques et scientifiques de la connaissance et de la préservation des habitats naturels

J.-B. Bouzillé, 2021

Introduction à l'écologie de la conservation – La protection de la nature pour une humanité durable

F. Ramade, 2020

Les tourbières et la tourbe – Géographie, hydro-écologie, usages et gestion conservatoire

H. Cubizolle, 2019

Compostage et composts – Avancées scientifiques et techniques

A. de Guardia, 2018

Les milieux estuariens et littoraux – Une approche scientifique pour les préserver et les exploiter durablement

J.-P. Ducrottoy, 2018

Dictionnaire – Collectivités territoriales et développement durable

J.-L. Pissaloux, 2017

Biomarqueurs en écotoxicologie aquatique

J.-C. Amiard, C. Amiard-Triquet, 2e édition, 2017

Les risques chimiques environnementaux

J.-C. Amiard, 2016

Naturalité des eaux et des forêts

D. Vallauri, C. Chauvin, J.-J. Brun, M. Fuhr, N. Sardat, J. André, R. Eynard-Machet, M. Rossi, J.-P. De Palma, 2016

Déchets et économie circulaire

M.-A. Marcoux, F. Olivier, F. Théry, 2016

Écologie et aménagement des eaux marines – Le potentiel des océans et des mers

G. Barnabé, 2016

Droit de l'environnement – Comprendre et appliquer la réglementation

Ph. Malingrey, 2016

Changement climatique et cycle de l'eau – Impact, adaptation, législation et avancées scientifiques

I. la Jeunesse, Ph. Quevauvillier, 2015

La restauration écologique des estuaires

J.-P. Ducrottoy, 2010

Pour plus d'informations sur nos publications :



newsletters.lavoisier.fr/9782743026943

ÉMILIE N PELLETIER



Précis d'écotoxicologie marine

Pour la suite de nos océans

L*avoisier*
TEC & DOC

editions.lavoisier.fr

Illustrations de couverture : Émilien Pelletier

Direction éditoriale : Jean-Marc Bocabeille
Édition : Brigitte Peyrot
Composition et couverture : Patrick Leleux PAO

© 2023, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7430-2694-3

Cet ouvrage est dédié à Ellie, Camille, Sarah, Glen, Martin et Arlette

« Quelque chose à quoi tu ne peux pas échapper. La mer. La mer ensorcelle, la mer tue, émeut, terrifie, fait rire aussi, parfois, disparaît, par moments, se déguise en lac ou alors bâtit des tempêtes, dévore des bateaux, elle offre des richesses, elle ne donne pas de réponse, elle est sage, elle est douce, elle est puissante, elle est imprévisible. Mais surtout la mer appelle. Tu la découvriras Elisewin. Elle ne fait que cela, au fond : appeler. Jamais elle ne s'arrête, elle pénètre en toi, elle te reste collée après, c'est toi qu'elle veut. Tu peux faire comme si de rien n'était, c'est inutile. Elle continuera de t'appeler. Cette mer que tu vois, et toutes les autres que tu ne verras pas mais qui seront là, toujours, aux aguets, patientes, à deux pas de ta vie. Tu les entendras appeler, infatigablement. »

Alessandro Baricco, Océan mer
Traduit de l'italien par Françoise Brun

L'AUTEUR

Émilien Pelletier, Professeur émérite

Institut des sciences de la mer (ISMER). Université du Québec à Rimouski (UQAR), Canada. Titulaire de la Chaire de Recherche du Canada en *Écotoxicologie marine appliquée aux milieux côtiers des hautes latitudes* de 2001 à 2014. Récipiendaire de la distinction Acide C. Horth en 2008 et de la Médaille du cent-cinquantenaire du Sénat du Canada en 2017.

LES CONTRIBUTEURS AUX ENCADRÉS

Peter Campbell, Professeur émérite

Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), Québec, Canada. Directeur du réseau de recherche « MITE » (*Metals in the Environment*) de 1998 à 2004. Élu à l'Académie des sciences de la Société royale du Canada en 2002.

Claude Fortin, Professeur-chercheur

Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), Québec, Canada. Titulaire de la Chaire de Recherche du Canada en *Biogéochimie des éléments traces* de 2011 à 2021.

Adriano Magesky, Écotoxicologue

Biologiste spécialisé en écotoxicologie moléculaire marine. PhD en écotoxicologie marine, 2016, Université du Québec à Rimouski (UQAR), Canada.

Alfonso Mucci, Professeur émérite

Département des sciences de la terre et des planètes, Université McGill, Montréal, Canada. Élu à l'Académie des sciences de la Société royale du Canada en 2008.

Magella Pelletier, Sédimentologue

Environnement et changement climatique du Canada. Division du monitoring et de la surveillance de la qualité de l'eau.

Richard Saint-Louis, Professeur titulaire

Département de biologie, chimie et géographie, Université du Québec à Rimouski (UQAR), Canada. Codirecteur du regroupement ECOBIM.

Jonathan Verreault, Professeur titulaire

Département des sciences biologiques, Université du Québec à Montréal (UQAM), Canada. Membre du Centre de recherche en toxicologie de l'environnement (TOXEN). Membre du Centre de recherche en écotoxicologie du Québec (EcotoQ).

SOMMAIRE

Abréviations	XV
Avant-propos	XIX
Remerciements	XXI

CHAPITRE 1

Introduction aux sciences marines	1
1. Introduction aux bases de l'océanographie	2
2. Caractéristiques des océans, golfes, mers adjacentes, fjords et estuaires	3
2.1. Circulation globale des océans – Couplage atmosphère-océan	3
2.2. Distribution des salinités et températures dans les océans	8
2.3. Mers adjacentes et golfes	11
2.4. Estuaires et fjords	13
3. Éléments de chimie marine	14
3.1. Composition et propriétés de l'eau de mer	14
3.2. Le grand cycle du carbone	16
3.3. Cycle de l'azote	19
3.4. Cycle du phosphore	23
4. Sédimentologie et paléocéanographie	24
4.1. Notions de sédimentologie dans les bassins océaniques	25
4.2. Sédimentation dans la zone néritique	26
4.3. Notions de paléocéanographie et méthode du fractionnement isotopique	27
Encadré 1-1 Notions de base sur le fractionnement isotopique (<i>par l'auteur</i>)	28
5. Production biologique en milieu marin	31
5.1. Photosynthèse et notion de production primaire	31
5.2. Espèces phytoplanctoniques en milieu marin	33
5.3. Production secondaire	35
6. Notions d'écologie marine	36
6.1. Approche traditionnelle en écologie marine	36
6.2. Écologie fonctionnelle appliquée au milieu marin	39
6.3. Écologie fonctionnelle appliquée à l'écotoxicologie marine	40
7. Conclusion	42

CHAPITRE 2

Comportement physico-chimique des agents toxiques dans l'environnement marin	47
1. Introduction au comportement des agents toxiques en milieu marin	48
2. Notions de base de la chimie des surfaces appliquées à l'environnement aquatique	48
2.1. Approche théorique de l'interface solide-liquide	49
2.2. Adsorption des matières organiques dissoutes sur les particules en suspension	50
2.3. Rôles des agents tensioactifs et de la matière organique dissoute	53
2.4. Interactions solide-solide	54
2.5. Interactions liquide-liquide	55
3. Comportement des interfaces chargées en milieu naturel	57
3.1. Nature des particules en suspension en milieu aquatique	57
3.2. Effets du mélange estuarien sur les particules en suspension	59
3.3. Floculation et sédimentation de la matière organique dissoute	61
3.4. Adsorption des agents toxiques	61
4. Notions de compartiments environnementaux et dynamiques de distribution des agents toxiques	63

4.1. Définition et caractérisation des compartiments abiotiques et biotiques en milieu marin	64
4.2. Facteurs influençant la distribution des agents toxiques dans les compartiments	66
4.3. Modèles empiriques de distribution des espèces chimiques en milieu océanique	69
5. Exemples du devenir d'agents toxiques en milieu marin	71
5.1. Dispersion océanique des radionucléides : accident de Fukushima	72
5.2. Devenir des pathogènes dans un estuaire	75
5.3. Devenir d'agents toxiques dans la glace de mer	77
6. Conclusion	79

CHAPITRE 3

Introduction générale à l'écotoxicologie marine	83
1. Contexte historique et approches pour une nouvelle discipline	84
2. Concepts et principes appliqués à la toxicologie aquatique	86
2.1. Définition des agents causant des effets néfastes aux organismes aquatiques	86
2.2. Définir la toxicité et les effets toxiques	88
2.3. Relation structure-activité et modèle QSAR	90
2.4. Hypothèses et concepts en toxicologie aquatique et écotoxicologie	93
2.5. Notions de toxicocinétique et de toxicodynamie	95
2.6. Écotoxicité chez les populations et les communautés	99
3. Facteurs influençant la toxicité	102
3.1. Facteurs liés au mode d'exposition et à la biodisponibilité	103
3.2. Facteurs biotiques liés à l'organisme exposé	104
3.3. Facteurs liés à la matière organique dissoute et particulaire	107
4. Classes d'agents toxiques en milieu marin	107
4.1. Métaux, métalloïdes et organométaux	108
4.2. Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques	109
4.3. Composés organohalogénés	110
4.4. Produits pharmaceutiques et de soins personnels	111
4.5. Nanomatériaux et microplastiques	112
5. Écotoxicologie marine et changements globaux	113
6. Conclusion	114

CHAPITRE 4

Biomarqueurs et outils de diagnostic environnemental	119
1. Développements récents des marqueurs appliqués à l'écotoxicologie	120
2. Notions de biologie cellulaire appliquées aux biomarqueurs	121
2.1. Organisation interne de la cellule et compartiments intracellulaires	121
2.2. Nécrose et apoptose	125
3. Biomarqueurs de dommages cellulaires	125
3.1. Stabilité de la membrane lysosomale	126
3.2. Dommages à l'ADN	127
3.3. Induction de la vitellogénine	129
3.4. Peroxydation des lipides	130
3.5. Cholinestérases et dommages neurologiques	131
3.6. Enzyme ALA-D	131
4. Biomarqueurs de défense cellulaire	132
4.1. Enzymes dépendantes des cytochromes P450	132
4.2. Enzymes de conjugaison de phase II et métabolites	133
4.3. Protéines de résistance MRP et de transport de type MXR	133
4.4. Métallothionéines	134
4.5. Défenses antioxydantes contre les ROS	134

4.6. Protéines de stress de type HSP	135
4.7. Réponse immunitaire	136
5. Biomarqueurs physiologiques et écologiques	136
5.1. Marqueurs histopathologiques et anomalies des tissus	137
5.2. Modifications des fonctions endocrines : intersex et imposex	138
5.3. Variations du métabolisme énergétique et du potentiel de croissance	139
5.4. Marqueurs de la reproduction et du développement	140
5.5. Modifications du comportement des individus	141
Encadré 4-1 La valvométrie comme outil de mesure du comportement des bivalves exposés aux contaminants (<i>par R. Saint-Louis</i>)	142
6. Espèces modèles pour les bioessais marins	146
6.1. Définir les espèces modèles	146
6.2. Espèces modèles pour les zones de transition	146
6.3. Espèces modèles pour la toxicité des sédiments	148
7. Biosurveillance en milieu marin	149
7.1. Espèces sentinelles marines	149
7.2. Concept de biosurveillance en milieu marin	150
7.3. Facteurs influençant les résultats des bioessais et de la biosurveillance	151
8. Nouvelles approches sur les biomarqueurs	153
 CHAPITRE 5	
Métaux et organométaux en milieu marin	157
1. Présence des métaux dans l'eau de mer	158
2. Spéciation des métaux	159
2.1. Interactions du métal dissous avec son environnement aquatique	159
2.2. Influence du pH sur la spéciation	161
2.3. Modèle du ligand biotique	162
2.4. Interactions avec la matière organique dissoute	165
3. Bioaccumulation des métaux <i>via</i> l'alimentation	167
3.1. Mécanismes du transfert trophique	167
3.2. Accumulation des métaux par le phytoplancton	170
3.3. Mécanismes de biotransfert des métaux	172
3.4. Mécanismes d'élimination des métaux	178
3.5. Modèles biodynamiques à compartiments	179
Encadré 5-1 Le fractionnement subcellulaire : un outil pour mieux comprendre la gestion intracellulaire des contaminants métalliques et leur potentiel de transfert trophique (<i>par C. Fortin et P. G. C. Campbell</i>)	181
4. Mécanismes et effets toxiques des métaux	187
4.1. Mécanismes cellulaires de toxicité	188
4.2. Mécanismes biochimiques de défense intracellulaire	192
4.3. Impacts des métaux sur les groupes d'organismes	196
5. Contamination par le mercure en milieu marin	198
5.1. Biogéochimie du mercure et sources anthropiques	198
5.2. Neurotoxicité du mercure	201
5.3. Mercure chez les invertébrés et les poissons	203
5.4. Bioaccumulation et toxicité du mercure chez les mammifères marins	205
5.5. Le mercure dans l'écosystème arctique	207
6. Nature et toxicité des organométaux	209
6.1. Notions de base sur la chimie des organométaux	209
6.2. Cas des alkylétains et phénylétains	210
6.3. Cas des organoplombs	214
7. Conclusion sur la pollution par les métaux	215

CHAPITRE 6

Polluants organiques persistants et composés émergents	223
1. Découverte de la contamination anthropique des océans	224
2. Origines et propriétés chimiques des polluants organiques persistants	226
2.1. Petite histoire des organochlorés et autres molécules hétéroatomiques	226
2.2. Pesticides	227
2.3. Diphényles polyhalogénés	231
2.4. Dibenzodioxines et dibenzofuranes	234
2.5. HAP de combustion	235
2.6. Composés émergents	236
Encadré 6-1 Bioaccumulation des méthylsiloxanes volatiles dans le panache de dispersion de l'effluent de la ville de Montréal (<i>par M. Pelletier</i>)	239
2.7. Convention de Stockholm	243
3. Transformation des polluants organiques dans l'environnement	244
3.1. Modes de dégradation des composés organiques	244
3.2. Modes de biodégradation du DDT	250
3.3. Solubilité des composés organiques polaires et neutres	251
4. Assimilation, rétention et métabolisme des POP	253
4.1. Séquestration des POP par les particules en suspension et les sédiments	253
4.2. Bioaccumulation des POP chez les organismes marins	255
4.3. Modèles dynamiques de transfert et d'élimination des POP	259
4.4. Métabolisme des phases I et II	263
5. Mécanismes de toxicité des POP	268
5.1. Principaux mécanismes de toxicité des organohalogénés	268
5.2. Mécanismes moléculaires de toxicité des organohalogénés	272
5.3. Mécanismes de toxicité des HAP	273
6. Devenir à long terme des composés organiques persistants en milieu marin	276
6.1. POP dans les régions polaires	276
6.2. HAP dans les fjords nordiques	280
6.3. POP chez les mammifères marins et effets sur la reproduction	282
Encadré 6-2 Présence et effets des contaminants organiques chez le béluga de l'estuaire du Saint-Laurent (<i>par J. Verreault</i>)	283
7. Conclusion	288

CHAPITRE 7

Les hydrocarbures en milieu marin	297
1. Bref historique des accidents pétroliers en mer	298
2. Notions de base sur la composition et la chimie des hydrocarbures	300
2.1. Structure moléculaire des divers groupes d'hydrocarbures	300
2.2. Propriétés physico-chimiques des mélanges complexes d'hydrocarbures	304
3. Comportement du pétrole en présence d'eau de mer et de particules	306
3.1. Interactions entre pétrole et eau : dispersion et émulsion	307
3.2. Évaporation, dissolution et photooxydation des hydrocarbures	308
3.3. Agrégation, sédimentation, transport et enfouissement	311
3.4. Comportement du pétrole en présence de la glace de mer	311
3.5. Cas particulier des pétroles lourds et du dilbit	313
4. Biodégradation et produits de dégradation	315
4.1. Action des bactéries sur les hydrocarbures	315
4.2. Mécanismes biochimiques du métabolisme des hydrocarbures	316
4.3. Facteurs influençant l'action des bactéries	321
5. Toxicité des hydrocarbures pétroliers	322
5.1. Dispersion chimique	323
5.2. Phytoplancton et plantes aquatiques	325

5.3. Effets sur le zooplancton marin	327
5.4. Macro-invertébrés	331
5.5. Poissons	333
5.6. Effets chez les oiseaux	334
5.7. Effets chez les mammifères et les reptiles	335
6. Bioremédiation, bioaugmentation et biostimulation	336
7. Effets écotoxicologiques des grands accidents pétroliers	338
7.1. Échouage du pétrolier Exxon Valdez dans un environnement nordique	338
7.2. Explosion de la plateforme Deepwater Horizon dans un environnement tropical	342
7.3. Nouveaux paradigmes sur les effets à long terme des accidents pétroliers	344
8. Conclusion sur les hydrocarbures en mer	345
CHAPITRE 8	
Les plastiques dans les océans et les milieux côtiers	353
1. Introduction à la problématique des plastiques en milieu marin	354
2. Notions de base sur la chimie des plastiques et des résines	355
2.1. Préparation, structure et propriétés des polymères de synthèse	355
2.2. Additifs dans les plastiques	359
2.3. Identification des plastiques d'usage courant	360
Encadré 8-1 Codes de recyclage des plastiques (<i>par l'auteur</i>)	361
2.4. Microplastiques et nanoplastiques	362
2.5. Voies de dégradation des polymères de synthèse	363
3. Sources et devenir des plastiques dans l'environnement marin	368
3.1. Sources anthropiques terrestres et marines	368
3.2. Transport et devenir des débris de plastique en milieu côtier et océanique	372
3.3. <i>Biofouling</i> et sédimentation des plastiques	375
4. Nuisance et toxicité des plastiques	377
4.1. Nuisance des macroplastiques sur les côtes et en haute mer	377
4.2. Capture des contaminants organiques par les microplastiques	378
4.3. Adsorption des métaux dissous	380
4.4. Ingestion et excrétion des microplastiques par les prédateurs et les filtreurs	381
Encadré 8-2 Biofragmentation des microplastiques par un crustacé (<i>par l'auteur</i>)	382
4.5. Problème particulièrement lié aux nanoplastiques	384
4.6. Effets toxiques chez plusieurs espèces	386
4.7. Effets écologiques des plastiques en mer	388
5. Conclusion et perspectives sur l'enjeu des plastiques en milieu marin	389
CHAPITRE 9	
Nanomatériaux en milieu marin	397
1. Sources et composition des nanomatériaux	398
1.1. Définition et échelle comparative de taille	398
1.2. Sources naturelles	399
1.3. Sources anthropiques	401
2. Notions physico-chimiques sur les nanomatériaux	403
2.1. Comportements en milieu aquatique	403
2.2. Interactions avec la matière organique et mécanisme d'agrégation	404
2.3. Interactions ioniques et dissolution	408
2.4. Transformation et sédimentation en milieu marin	411
3. Émergence de la nanotoxicologie	412
3.1. Mécanisme général des interactions des nanoparticules avec les cellules	414
Encadré 9-1 Utilisation des nanoparticules d'argent de synthèse verte contre les bactéries pathogènes humaines (<i>par A. Magesky</i>)	416
3.2. Interactions avec les espèces pluricellulaires aquatiques	419

4. Toxicité aiguë et sous-létale des nanoparticules chez les organismes marins	421
4.1. Cas spécifiques des nanoparticules d'argent et d'or	422
4.2. Toxicité des nanotubes et nanosphères de carbone	426
4.3. Les autres cas connus de toxicité liée aux nanomatériaux	429
4.4. Mélange des nanomatériaux avec d'autres agents toxiques	431
4.5. Toxicité des nanoplastiques	432
4.6. Effets multigénérationnels et transgénérationnels des nanomatériaux	433
5. Naissance de la nano-écotoxicologie marine	434
5.1. Travaux en mésocosmes	435
5.2. Facteurs de développement de la nano-écotoxicologie	436
6. Conclusion sur les nanomatériaux en milieu marin	437

CHAPITRE 10

Désoxygénation des milieux côtiers et des océans	445
1. Introduction au rôle de l'oxygène dans le milieu marin	446
2. Dynamique des gaz à l'interface atmosphère/océan	447
2.1. Dissolution des gaz dans l'eau de mer	447
2.2. Échanges à l'interface atmosphère/océan	448
2.3. Facteurs déterminant la concentration de l'oxygène dans les océans	450
2.4. Désoxygénation des océans	452
3. Dynamique de l'oxygène à l'interface eau de mer/sédiment	453
3.1. Diffusion moléculaire de l'oxygène à l'interface	454
3.2. Facteurs influençant le profil de l'oxygène dans les sédiments	456
3.3. Développement de zones d'hypoxie/anoxie en milieu marin	457
4. Effets de la réduction de l'oxygène sur les écosystèmes marins	460
4.1. Effets sur la dynamique des communautés microbiennes	461
4.2. Effets sur la macrofaune	463
5. Exemples de zones marines appauvries en oxygène	468
5.1. Golfe du Mexique	468
5.2. Mer Baltique	472
Encadré 10-1 Utilisation de la microchimie des otolithes pour suivre la progression des zones hypoxiques (<i>par l'auteur</i>)	474
5.3. Estuaire et golfe Saint-Laurent	477
Encadré 10-2 Biogéochimie de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (<i>par A. Mucci</i>)	480
6. Conclusion sur la désoxygénation océanique	488

CHAPITRE 11

Acidification des océans	493
1. Émergence du problème de l'acidification des océans	494
2. Système des carbonates	496
2.1. Notions de pH et d'alcalinité	496
2.2. Équilibre des carbonates	498
Encadré 11-1 Neutralisation du dioxyde de carbone anthropique par les sédiments riches en carbonates (<i>par A. Mucci</i>)	503
2.3. Rôle de la biologie : calcification – photosynthèse – respiration	508
2.4. Processus océanique du système des carbonates	509
3. Évolution globale de l'acidification des océans	510
3.1. Changements de pH océanique dans l'histoire de la planète	511
3.2. Situation présente et évolution appréhendée de l'acidification des océans	513
4. Effets délétères de l'acidification des eaux marines	515
4.1. Effets sur les microorganismes hétérotrophes	515
4.2. Effets sur les espèces autotrophes	517

4.3. Effets sur les espèces zooplanctoniques	518
4.4. Effets sur les premiers stades de développement des macro-invertébrés marins	521
4.5. Effets sur les coraux durs	524
4.6. Effets sur les communautés benthiques	526
5. Effets sur la biodiversité marine et les fonctions d'écosystème océanique	528
5.1. Perte de biodiversité	528
5.2. Atteinte aux fonctions et services d'écosystèmes	530
5.3. Résumé des impacts attribuables à l'acidification océanique	531
6. Ampleur des effets de l'acidification et conclusion générale	533
CHAPITRE 12	
Restauration des milieux côtiers et aires marines protégées	539
1. Introduction à la restauration marine	540
1.1. Origine de la restauration des milieux marins côtiers	540
1.2. Types d'écosystèmes marins à restaurer	541
1.3. Fonctions et services d'écosystèmes marins	543
1.4. Principes de la restauration marine	544
1.5. Principales méthodes de restauration côtière	546
1.6. Restauration des récifs ostréicoles	549
1.7. Restauration des marais côtiers	551
2. Carbone bleu	556
3. Aires marines protégées	557
3.1. Définition et objectifs des catégories d'aires marines	557
3.2. Autres approches et classifications des AMP	559
3.3. Critères pour l'établissement d'une nouvelle AMP	561
4. Évaluation des AMP et réseaux d'AMP	563
5. Conclusion sur les actions de conservation des écosystèmes marins	565
Glossaire	571
Index	579

ABRÉVIATIONS

AChE	acétylcholinestérase
ADN	acide désoxyribonucléique
AE	efficacité d'assimilation
AFM	microscopie à force atomique
AgNP	nanoparticule d'argent
AHH	aryle hydrocarbure hydroxylase
AhR	récepteur aux hydrocarbures aromatiques
ALA-D	acide δ -aminolévulinique déshydrogénase
AMP	aire marine protégée
ARN	acide ribonucléique
ATP	adénosine triphosphate
AuNP	nanoparticule d'or
BAF	facteur de bioaccumulation <i>via</i> l'eau seulement
BCE	écosystème de carbone bleu
BCF	facteur de concentration <i>via</i> l'eau et la diète
BDP	bactérie dégradant de pétrole
BDPE	benzo[<i>a</i>]pyrène dihydrodiol diépoxyde
BLM	modèle du ligand biotique
BMF	facteur de biomagnification
BTEX	benzène, toluène, éthylbenzène, xylène
CAT	catalase
CCC	concentration critique de coagulation
CCD	seuil de compensation de la calcite
ChE	cholinestérase
CID	carbone inorganique dissous
CL ₅₀	concentration létale à 50 % de mortalité
CNS	système nerveux central
CNT	nanotube de carbone
COD	carbone organique dissous
COP	carbone organique particulaire
COT	carbone organique total
C/N	rapport massique carbone : azote
CYP	cytochrome
Da	dalton (unité de masse atomique)
DCE	double couche électrique
DDT	dichlorodiphényltrichloroéthane
DIN	azote inorganique dissous
DIP	phosphore inorganique dissous

DL ₅₀	dose létale à 50 % de mortalité
DMDA	diméthylbenz[<i>a</i>]anthracène
DON	azote organique dissous
DOP	phosphore organique dissous
EMSL	estuaire maritime du Saint-Laurent
ER	récepteur estrogène
EROD	éthoxyrésorufine-O-dééthylase
ES	erreur standard
FTT	facteur de transfert trophique
Ga	milliard d'années
GdM	golfe du Mexique
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GP _x	glutathion peroxydase
GSH	glutathion réduit
GSSG	glutathion disulfure
GST	glutathion S-transférase
GtC	gigatonne de carbone
HAP	hydrocarbure aromatique polycyclique
HgT	toutes les formes chimiques du mercure
HO•	radical hydroxyle
HPLC-MS	chromatographie liquide à haute pression couplée à un spectromètre de masse
HSP	protéine de stress thermique
K_a	constante de dissociation ou constante d'acidité
K_d	coefficient de partage
K_h	constante d'hydrolyse
K_{MX}	constante de formation métal-halogène
K_{oc}	constante de sorption d'une molécule organique dans un sol ou un sédiment, aussi appelée coefficient de partition carbone organique/eau
K_{ow}	constante de partage eau/éthanol
K_{ps}	coefficient du produit de solubilité
LDPE	polyéthylène basse densité
LT ₅₀	temps létal moyen
MDA	malondialdéhyde
MEB	microscopie électronique à balayage
MET	microscopie électronique à transmission
MFO	monoxygénase à fonctions mixtes
MMC	agrégat de mélano-macrophages
MNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
MO	matière organique

MOD	matière organique dissoute
MON	matière organique naturelle
MOP	matière organique particulaire
MPS	matière particulaire en suspension
MRP	protéine de multirésistance médicamenteuse
MT	métallothionéine
MXP	protéine multi-résistante aux xénobiotiques
MWCNT	nanotube de carbone à couches multiples
NADH	nicotinamide adénine dinucléotide réduite
NADPH	nicotinamide adénine dinucléotide phosphate
NO•	espèce réactive de l'azote
NOAEL	dose sans effet nocif observable
NOS	oxyde nitrique synthase
O ₂ ⁻	anion superoxyde
OHC	contenu thermique de l'océan
OMZ	zone d'oxygène minimum
OTU	unité taxonomique opérationnelle
P450 (CYPs)	superfamille des cytochromes P540
PBB	polybromobiphényle
PBDD	polybromodibenzodioxine
PBDE	polybromodiphényléther
PBDF	polybromodibenzofurane
PBPK	modèle pharmacocinétique physiologique
PCB	polychlorobiphényle
PCDD	polychlorodibenzodioxine
PCDF	polychlorodibenzofurane
PCR	amplification en chaîne par polymérase
PDMS	polydiméthylsiloxane
PE	polyéthylène
PFAS	substances polyfluoréalkylées
P-gp	glycoprotéine P
PON	azote organique particulaire
POP	polluant organique persistant
PP	polypropylène
ppmv	partie par million en volume
PPSP	produits pharmaceutiques et de soins personnels
PTFE	polytétrafluoroéthylène
QSAR	relation quantitative structure-activité
ROS	espèce réactive de l'oxygène
RSA	relation structure-activité
S	salinité (sans unité)
SNC	système nerveux central

SOD	superoxyde dismutase
SPFO	sulfonate de perfluorooctane
SSD	distribution de sensibilité des espèces
SWCNT	nanotube de carbone à simple couche
$T_{1/2}$	temps de demi-vie pour une substance chimique
TBBPA	tétrabromobisphénol A
TBT	tributylétain
TCDD	tétrachlorodibenzodioxine
TCDF	tétrachlorodibenzofurane
TEP	tétraéthylplomb
TgC	téragramme de carbone (équivalent à 10^6 tonnes métriques)
TI	taux d'ingestion
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature
VBNC	bactérie viable mais non cultivable
Vg	vitellogénine (VTG)
Σ DDT	somme du DDT et de ses métabolites DDD et DDE
Σ PCB	somme de tous les congénères PCB

AVANT-PROPOS

L'écotoxicologie marine est une très jeune science qui tire ses origines de la découverte de substances toxiques de fabrication industrielle dans des organismes marins au milieu des années 1960. La présence de polychlorobiphényles (PCB) et de résidus de DDT dans les tissus adipeux des mammifères marins en mer du Nord, puis en Méditerranée et ensuite le long des côtes américaines a poussé les chercheurs de l'époque à une difficile conclusion. Les activités anthropiques avaient un impact non seulement sur les oiseaux chanteurs, comme l'avait dénoncé Rachel Carson dans son livre *Silent Spring* en 1962, mais aussi sur les espèces marines qui habitaient les estuaires et les mers bordières. C'est à partir des années 1970 que les biologistes marins, les chimistes analystes, les écologues et les océanographes ont commencé à unir leurs savoirs et leurs techniques pour, dans un premier temps, déterminer l'ampleur du problème de la contamination des environnements marins et ensuite tenter d'en comprendre les conséquences pour les écosystèmes. C'est ainsi que l'écotoxicologie marine, une discipline qui étudie le comportement et les effets néfastes des composés chimiques anthropiques sur les organismes marins et leurs écosystèmes, a pris le large et a entraîné dans son sillage un grand nombre de scientifiques voués à la compréhension des effets de la pollution marine et à la protection des océans.

Sans aucune prétention de ma part, j'ai voulu rassembler en un ouvrage en français l'essentiel de ce que nous enseignent les spécialistes des sciences marines quant aux conséquences de l'activité humaine sur la physique et la chimie des océans et, surtout, sur les milliards d'organismes qui y vivent à tout instant. Il faut évidemment faire des choix difficiles et un seul ouvrage de synthèse comme celui-ci est très loin de couvrir l'ensemble des connaissances acquises sur l'état de santé des écosystèmes marins au cours des 60 dernières années. Mon objectif était donc de produire un ouvrage de référence en sciences marines s'adressant à un vaste lectorat francophone incluant les étudiants universitaires et leurs professeurs en sciences naturelles et génie, les chercheurs en sciences marines, les planificateurs et les gestionnaires de projets en milieu marin ainsi que les communicateurs scientifiques.

L'ouvrage est divisé en 12 chapitres, allant des notions de base en océanographie jusqu'aux grands projets d'aires marines protégées en développement dans un grand nombre de communautés riveraines autour du monde. Les chapitres 2, 3 et 4 couvrent les divers aspects de l'écotoxicologie appliquée aux environnements marins, incluant la biogéochimie des agents toxiques, le développement et l'application des biomarqueurs et un survol des mécanismes de toxicité. Suivent quatre chapitres qui traitent successivement des grandes familles de polluants marins que sont les métaux, les polluants organiques persistants, les hydrocarbures pétroliers et les plastiques. À ceux-ci s'ajoutent un chapitre sur les nanoparticules qui forment un groupe à part à cause de leurs propriétés physico-chimiques et toxicologiques tout à fait spécifiques à leur taille infime. Il aurait été difficile de publier un ouvrage en écotoxicologie marine sans aborder les grands enjeux des changements climatiques que sont la désoxygénation et l'acidification des océans. Ces deux thèmes sont rarement traités dans les ouvrages d'écotoxicologie, mais il n'y a pas de raison de les exclure car les effets néfastes de l'acidification et de la perte de l'oxygène des eaux océaniques et côtières résultent à l'évidence des activités anthropiques et viennent

souvent s'additionner aux effets des agents toxiques. J'ai voulu compléter l'ouvrage sur une note plus optimiste en présentant au 12^e chapitre les avancées récentes en restauration des milieux côtiers fragilisés comme les mangroves et les marais salés et surtout décrire le développement rapide des aires marines protégées, un signe évident de la prise de conscience de la communauté internationale face à la dégradation des mers et des océans.

Au fil des chapitres, le lecteur trouvera des encadrés, rédigés par de généreux collaborateurs, qui ont accepté de préparer de courts textes portant sur leurs résultats de recherche les plus récents et montrant l'avancement des connaissances sur quelques sujets spécialisés qui ne pouvaient pas être traités dans le texte de base. On y trouve des textes sur la synthèse verte des nanoparticules d'argent, le fractionnement subcellulaire pour l'analyse des métaux, la bioaccumulation des méthylsiloxanes, la valvométrie comme biomarqueur de comportement, la pollution par les organobromés chez les bélugas, la biogéochimie du CO₂ dans les fonds marins et la désoxygénation du golfe Saint-Laurent. Sont aussi placées en encadré quelques descriptions de mécanismes ou techniques très spécifiques comme le fractionnement isotopique, la microchimie des otolithes et la biofragmentation des microplastiques.

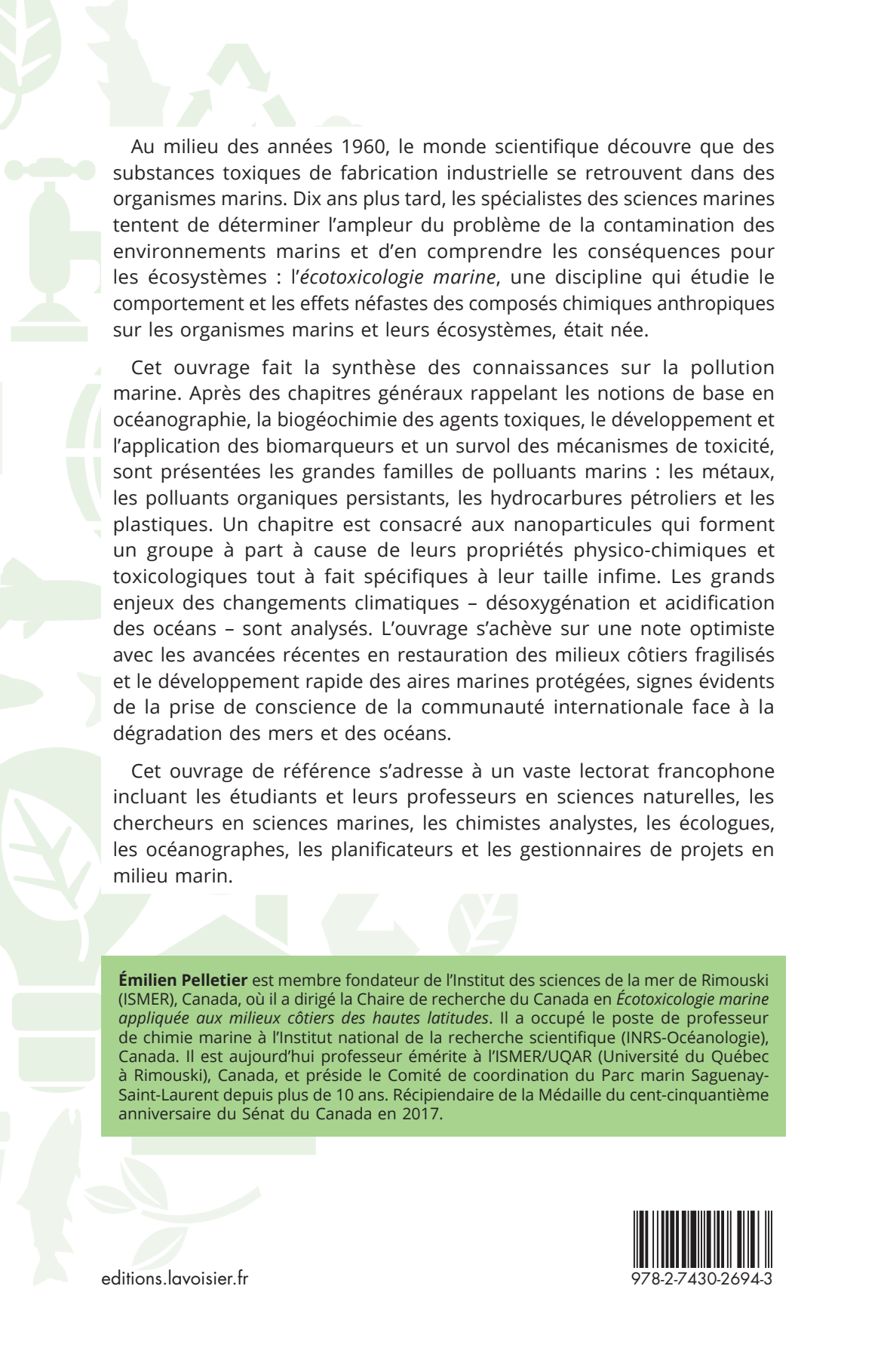
Pour faciliter la lecture, un nombre restreint de références, surtout des articles de synthèse et des ouvrages de référence, ont été intégrées dans le texte et sont regroupées à la fin de chaque chapitre sous le titre : *Documents cités*. Tous les autres documents consultés pour préparer les textes, mais qui ne sont pas directement cités, sont regroupés à la fin de chaque chapitre sous le titre : *Documents consultés*.

À la fin de l'ouvrage, un glossaire reprend la définition de plusieurs termes techniques importants. Pour éviter toute confusion entre des abréviations françaises et anglaises des termes techniques, l'abréviation anglaise a été conservée, à quelques exceptions près comme hydrocarbure aromatique polycyclique (HAP) et acide désoxyribonucléique (ADN) parce qu'elles sont bien connues et couramment utilisées en français.

REMERCIEMENTS

Pendant les cinq années de rédaction de cet ouvrage, j'ai reçu le support de mon institution universitaire et les encouragements de nombreux collègues qui ont manifesté leur intérêt pour les sujets traités, et plusieurs ont lu et commenté les chapitres proches de leurs spécialités de recherche. Je tiens à leur exprimer mes plus sincères remerciements pour l'aide apportée et pour leur patience à attendre le produit final. Mes remerciements les plus profonds vont à Arlette Lauzier pour sa révision méticuleuse des textes et ses précieux conseils sur l'utilisation du logiciel de gestion bibliographique et la mise en forme du document final.

Je tiens à remercier la direction des Éditions Lavoisier pour avoir accepté de publier mon texte, ainsi que madame Brigitte Peyrot et toute l'équipe éditoriale.



Au milieu des années 1960, le monde scientifique découvre que des substances toxiques de fabrication industrielle se retrouvent dans des organismes marins. Dix ans plus tard, les spécialistes des sciences marines tentent de déterminer l'ampleur du problème de la contamination des environnements marins et d'en comprendre les conséquences pour les écosystèmes : l'*écotoxicologie marine*, une discipline qui étudie le comportement et les effets néfastes des composés chimiques anthropiques sur les organismes marins et leurs écosystèmes, était née.

Cet ouvrage fait la synthèse des connaissances sur la pollution marine. Après des chapitres généraux rappelant les notions de base en océanographie, la biogéochimie des agents toxiques, le développement et l'application des biomarqueurs et un survol des mécanismes de toxicité, sont présentées les grandes familles de polluants marins : les métaux, les polluants organiques persistants, les hydrocarbures pétroliers et les plastiques. Un chapitre est consacré aux nanoparticules qui forment un groupe à part à cause de leurs propriétés physico-chimiques et toxicologiques tout à fait spécifiques à leur taille infime. Les grands enjeux des changements climatiques – désoxygénation et acidification des océans – sont analysés. L'ouvrage s'achève sur une note optimiste avec les avancées récentes en restauration des milieux côtiers fragilisés et le développement rapide des aires marines protégées, signes évidents de la prise de conscience de la communauté internationale face à la dégradation des mers et des océans.

Cet ouvrage de référence s'adresse à un vaste lectorat francophone incluant les étudiants et leurs professeurs en sciences naturelles, les chercheurs en sciences marines, les chimistes analystes, les écologues, les océanographes, les planificateurs et les gestionnaires de projets en milieu marin.

Émilien Pelletier est membre fondateur de l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER), Canada, où il a dirigé la Chaire de recherche du Canada en *Écotoxicologie marine appliquée aux milieux côtiers des hautes latitudes*. Il a occupé le poste de professeur de chimie marine à l'Institut national de la recherche scientifique (INRS-Océanologie), Canada. Il est aujourd'hui professeur émérite à l'ISMER/UQAR (Université du Québec à Rimouski), Canada, et préside le Comité de coordination du Parc marin Saguenay-Saint-Laurent depuis plus de 10 ans. Récipiendaire de la Médaille du cent-cinquantième anniversaire du Sénat du Canada en 2017.