

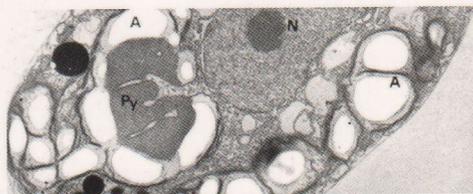
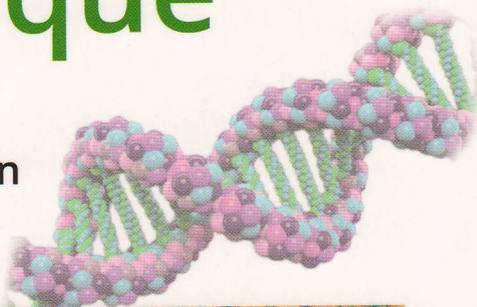
INDUSTRIELS, INGÉNIEURS, TECHNICIENS

JEAN-CLAUDE AMIARD, CLAUDE AMIARD-TRIQUET
COORDONNATEURS



Biomarqueurs en écotoxicologie aquatique

2^e édition



Lavoisier
TEC & DOC

SOMMAIRE

Liste des auteurs	III
Abréviations et sigles	V
CHAPITRE 1	
Les biomarqueurs : trois décennies de recherche et développement	
Jean-Claude Amiard, Claude Amiard-Triquet	1
1. Grandes catégories de biomarqueurs	2
1.1. Biomarqueurs proposés pour les principales classes de contaminants classiques de l'environnement	2
1.2. Biomarqueurs de défense <i>versus</i> biomarqueurs de dommage	4
1.3. Signification écotoxicologique des réponses à différents niveaux d'organisation biologique	6
2. Perturbations de la reproduction	7
2.1. Perturbations endocriniennes	8
2.2. Perturbations du comportement	9
2.3. Allocation de l'énergie	9
2.4. Réponses génétiques	10
3. Opérationnalité des biomarqueurs	12
3.1. Spécificité des biomarqueurs	12
3.2. Facteurs de confusion	13
3.3. Signification écologique des biomarqueurs	15
3.4. Valeur ajoutée de la modélisation des populations dans l'évaluation du risque écologique	16
4. Surveillance environnementale intégrée	16
4.1. Quelles espèces comme supports pour la détermination des biomarqueurs et pourquoi ?	17
4.2. Complémentarité des biomarqueurs classiques et écologiques	17
4.3. Un pas de plus vers l'intégration	18
CHAPITRE 2	
Biomarqueurs de défense	
Claude Amiard-Triquet, Christophe Minier	23
1. Mécanismes de défense à l'égard des métaux	23
2. Biotransformation des contaminants organiques	27
2.1. Phase I de la biotransformation	28
2.2. Phase II de la biotransformation	29
3. Export des contaminants	30
3.1. Phase III suivant la biotransformation/phase 0	31
3.2. Les systèmes de transport en tant que biomarqueurs	32
4. Défenses antioxydantes	33
5. Protéines de stress	37
6. Conclusion	38
CHAPITRE 3	
Conclusion	
des perturbations comportementales	720
Conclusion	725

CHAPITRE 3

Biomarqueurs de dommage

Jean-Claude Amiard, Claude Amiard-Triquet, Laure Giambérini	46
1. Immunotoxicité	46
1.1. Système immunitaire	46
1.2. Immunotoxicité	48
1.3. Opérationnalité	54
1.4. Marqueurs immunotoxiques comme biomarqueurs écologiques	55
2. Stress oxydant et peroxydations lipidiques	55
3. Cholinestérases	57
3.1. Variations de l'activité de l'ACHé induites par des expositions au laboratoire ou <i>in situ</i>	57
3.2. Diverses isoformes des cholinestérases	58
3.3. Variabilité interspécifique des cholinestérases	59
3.4. Facteurs de confusion	60
3.5. Liens entre les dérèglements du comportement et les dysfonctionnements neurologiques	61
3.6. Inhibition de l'activité de l'ACHé et les effets populationnels	62
4. Perturbations du rétinol	63
4.1. Rôle du rétinol	63
4.2. Utilisation du rétinol comme biomarqueur	64
5. Stabilité de la membrane lysosomale	65
5.1. Rôle des lysosomes	65
5.2. Utilisation des réponses lysosomales comme biomarqueurs	65
5.3. Réponses lysosomales à différents contaminants et scénarios d'exposition	67
5.4. Facteurs de confusion	69
6. Biomarqueurs histologiques	69
6.1. Réponses aux accidents pétroliers et aux pollutions par les HAP	71
6.2. Réponses aux contaminations métalliques	72
6.3. Réponses aux nanoparticules	74
6.4. Réponses aux mélanges de contaminations	74
6.5. Avantages et inconvénients des biomarqueurs histologiques	77
7. Conclusion	78

CHAPITRE 4

Marqueurs de génotoxicité et effets *in situ*, individuels et populationnels

Paule Vasseur, Franck Atienzar, François Rodius, Carole Cossu-Leguille, Sébastien Lemière	93
1. Biomarqueurs d'exposition <i>in situ</i> à des polluants génotoxiques	94
1.1. Adduits à l'ADN	94
1.2. Études cytogénétiques et micronoyaux	99
1.3. Test Comet	103
1.4. Mutations	108
1.5. Techniques de biologie moléculaire d'analyse du génome	109
1.6. Techniques d'analyse du transcriptome	111
2. Effets de génotoxicité, effets physiologiques et populationnels	113
2.1. Accident de l'Exxon Valdez	114
2.2. Génotoxicité, génétique des populations et contaminations environnementales	116
3. Seuils d'exposition aux HAP acceptables pour la faune piscicole	119
4. Conclusion	121

CHAPITRE 5 Facteurs de confusion

La protéomique dans l'évaluation de l'état écologique des milieux aquatiques

Thomas Knigge, Tiphaine Monsinjon	132
1. Découverte de biomarqueurs	134
1.1. Conception de l'étude, échantillonnage, composition de l'échantillon et analyse : de multiples sources de biais pouvant conduire à de fausses découvertes	135
1.2. Analyse de données et validation	139
2. Réponse aux chocs thermiques et défense antioxydante : étude de cas de protéomique fonctionnelle appliquée à la recherche en écotoxicologie	145
3. Mécanismes de toxicité	151
4. Conclusion	154

CHAPITRE 6

Perturbations des fonctions endocrines : causes et conséquences

Jean-Claude Amiard, Mickaël Couderc, Benoît Xuereb	163
1. Système endocrinien	163
1.1. Système endocrinien et ses rôles	163
1.2. Les divers systèmes endocriniens dans le monde animal	164
2. Perturbations endocrines, un défi pour l'écotoxicologie	164
2.1. Définitions d'une perturbation endocrine	164
2.2. Des modes d'action variés	165
2.3. Beaucoup de perturbateurs endocriniens potentiels	166
2.4. Distribution et comportement des perturbateurs dans les milieux aquatiques	167
2.5. Présence des perturbateurs endocriniens dans le biote	167
2.6. Des dommages à faibles doses et des voies d'exposition variées	168
2.7. Des relations dose-réponse non linéaires	168
2.8. Interactions des perturbateurs endocriniens dans les mélanges	169
2.9. Quelques cas évidents de perturbations endocrines	170
3. Biomarqueurs pour évaluer les perturbations endocrines	174
3.1. Biomarqueurs des altérations de la fonction de la reproduction	174
3.2. Les biomarqueurs des altérations des fonctions thyroïdiennes	179
3.3. Les biomarqueurs des altérations des fonctions de la mue chez les crustacés	182
3.4. Les biomarqueurs des altérations des fonctions du système nerveux	185
3.5. Les outils intégrés pour quantifier les perturbations endocrines	186
4. Les altérations endocrines représentent-elles un risque pour les populations et les communautés ?	186
5. Conclusion	189

CHAPITRE 7

Écotoxicologie du comportement

Claude Amiard-Triquet	205
1. Mécanismes physiologiques responsables de l'altération du comportement	206
1.1. Perturbations sensorielles	206
1.2. Mécanismes neuraux et hormonaux du comportement	208
1.3. Perturbations du métabolisme énergétique	211
2. Effets comportementaux des polluants aquatiques	212
3. Pertinence écologique des biomarqueurs comportementaux	218
3.1. Réalisme environnemental des perturbations du comportement	219
3.2. De l'individu à la communauté : effets en cascade des perturbations comportementales	220
4. Conclusion	225

CHAPITRE 8

Origine des perturbations du métabolisme énergétique

Odile Dedourge-Geffard, Alain Geffard, Frédéric Palais et Claude Amiard-Triquet	240
1. Disponibilité et qualité de la nourriture en milieu pollué	241
2. Réponse des activités enzymatiques digestives à un stress chimique	244
3. Réponses des activités enzymatiques digestives à des facteurs autres que contaminants	252
3.1. Modulation selon la qualité / quantité de la ressource alimentaire	252
3.2. Modulation selon l'ontogénèse, le stade du cycle de vie ou le sexe des organismes	255
3.3. Modulation selon les propriétés physico-chimiques de l'eau : lumière, salinité, température	257
4. Intérêt des activités enzymatiques digestives en écotoxicologie et en biosurveillance	258
5. Conclusion	261

CHAPITRE 9

Conséquences des perturbations du métabolisme énergétique

Catherine Mouneyrac, Alexandre Péry	270
1. Biomarqueurs en relation avec le métabolisme énergétique et la bioénergétique	270
1.1. Charge énergétique en adénylates	271
1.2. Réserves énergétiques	272
1.3. Allocation énergétique cellulaire	278
1.4. Allocation énergétique à la croissance et à la reproduction	279
1.5. Indices de condition	281
2. Les biomarqueurs bioénergétiques : des prédicteurs pour un changement d'échelle ?	284
3. Modélisation des effets fondée sur l'atteinte de l'énergie	288
4. Recommandations, conclusions et perspectives	290

CHAPITRE 10

Espèces sentinelles

Brigitte Berthet	297
1. Concept d'espèce sentinelle	298
1.1. Évolution des espèces utilisées	299
1.2. Espèces sentinelles couramment utilisées	300
2. Contraintes et limites liées à l'utilisation des espèces sentinelles	308
2.1. Complexes d'espèces, écotypes et morphotypes	308
2.2. Variabilité intraspécifique, tolérance et micro-évolution	309
2.3. Variabilités interspécifiques et extrapolation entre taxons	311
2.4. Approche conceptuelle des écosystèmes	313
3. Conclusion	315

CHAPITRE 11

Opérationnalité des biomarqueurs

Claude Amiard-Triquet, Brigitte Berthet	323
1. Approches multibiomarqueurs	324
1.1. Indices intégratifs	324
1.2. Système expert	326
1.3. Méthodes de statistiques multidimensionnelles	327
2. Facteurs de confusion	328
2.1. Température, salinité, taille/poids/âge	328
2.2. Variabilité saisonnière	330

2.3. Autres facteurs de confusion	331
2.4. Stratégies de manipulation	332
3. Surveillance active et passive	333
4. Acceptabilité réglementaire des biomarqueurs	335
4.1. Biomarqueurs actuellement utilisés en biosurveillance	335
4.2. Comment composer avec les facteurs de confusion	337
4.3. Standardisation et contrôle de qualité	338
5. Conclusion	339

CHAPITRE 12

Incorporation des biomarqueurs dans l'évaluation du risque écologique

Claude Amiard-Triquet	350
1. Effets en cascade	351
1.1. Biomarqueurs écologiques	352
1.2. De la cascade au réseau	355
2. Construction et mise en œuvre du concept de l'AOP (<i>adverse outcome pathway</i>)	357
2.1. Le concept de l'AOP et ses déclinaisons	357
2.2. Exemples d'application de l'AOP	360
2.3. Intégration de l'AOP dans les perspectives des recherches écotoxicologiques	362
3. Conclusion	365

CHAPITRE 13

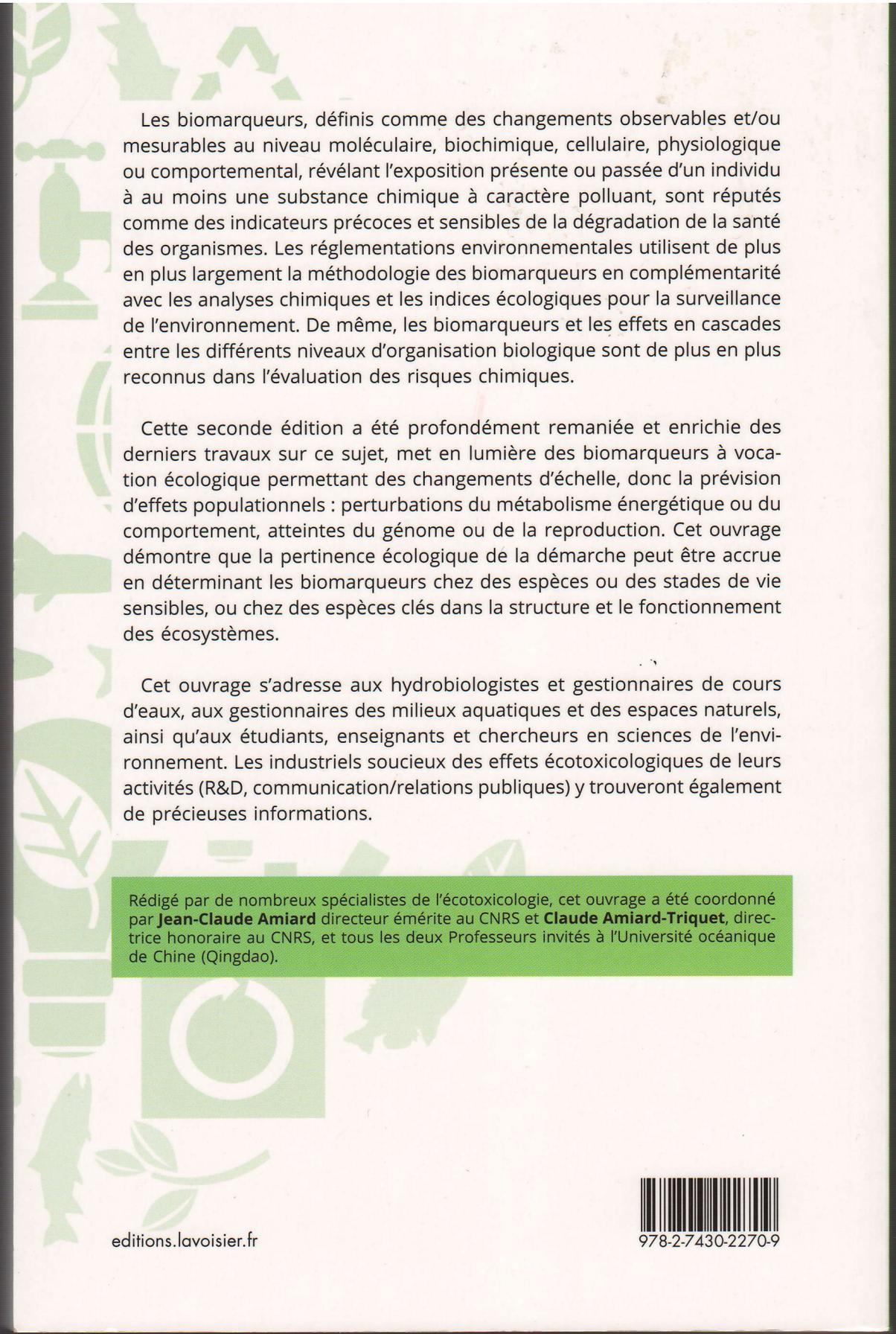
Utilisation de modèles intégrateurs des effets biologiques en écotoxicologie aquatique

Gaëll Dur, Sami Souissi	372
1. Nécessité d'intégration des réponses à différentes échelles	373
1.1. Informations disponibles à différentes échelles	373
1.2. Difficulté d'extrapolation des mesures apicales classiques	375
2. Approche AOP	376
3. Approche IBM	379
3.1. Généralités et avantages	379
3.2. Application en écotoxicologie	380
3.3. Combinaison IBM-DEB	382
3.4. Application dans un contexte adaptatif/évolutif	383
4. Conclusion et perspectives	384

CHAPITRE 14

Conclusion : de la recherche à l'acceptabilité opérationnelle

Jean-Claude Amiard, Claude Amiard-Triquet	390
1. Une décennie de recherche et développement	390
1.1. Biomarqueurs classiques	391
1.2. Lever le verrou des facteurs de confusion	392
1.3. Biomarqueurs à vocation écologique	393
2. Les biomarqueurs pour répondre aux défis de l'écotoxicologie au XXI ^e siècle	394
2.1. Révolution des « omiques »	395
2.2. Potentiel des données de masse (<i>big data</i>)	398
3. Approche intégrée chimie-écotoxicologie-écologie	399
3.1. Amélioration de l'évaluation du risque environnemental à l'aide des biomarqueurs	401
3.2. Intégration des biomarqueurs dans les programmes de biosurveillance	402
Index	411



Les biomarqueurs, définis comme des changements observables et/ou mesurables au niveau moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique ou comportemental, révélant l'exposition présente ou passée d'un individu à au moins une substance chimique à caractère polluant, sont réputés comme des indicateurs précoces et sensibles de la dégradation de la santé des organismes. Les réglementations environnementales utilisent de plus en plus largement la méthodologie des biomarqueurs en complémentarité avec les analyses chimiques et les indices écologiques pour la surveillance de l'environnement. De même, les biomarqueurs et les effets en cascades entre les différents niveaux d'organisation biologique sont de plus en plus reconnus dans l'évaluation des risques chimiques.

Cette seconde édition a été profondément remaniée et enrichie des derniers travaux sur ce sujet, met en lumière des biomarqueurs à vocation écologique permettant des changements d'échelle, donc la prévision d'effets populationnels : perturbations du métabolisme énergétique ou du comportement, atteintes du génome ou de la reproduction. Cet ouvrage démontre que la pertinence écologique de la démarche peut être accrue en déterminant les biomarqueurs chez des espèces ou des stades de vie sensibles, ou chez des espèces clés dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes.

Cet ouvrage s'adresse aux hydrobiologistes et gestionnaires de cours d'eau, aux gestionnaires des milieux aquatiques et des espaces naturels, ainsi qu'aux étudiants, enseignants et chercheurs en sciences de l'environnement. Les industriels soucieux des effets écotoxicologiques de leurs activités (R&D, communication/relations publiques) y trouveront également de précieuses informations.

Rédigé par de nombreux spécialistes de l'écotoxicologie, cet ouvrage a été coordonné par **Jean-Claude Amiard** directeur émérite au CNRS et **Claude Amiard-Triquet**, directrice honoraire au CNRS, et tous les deux Professeurs invités à l'Université océanique de Chine (Qingdao).

