

Juliette Faburé
Christian Mougin
Dorothée Rivet
David Siaussat

Écotoxicologie

2^e édition

DUNOD

© Dunod, 2022, 2026
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-089437-6



Table des matières

Avant-propos	VIII
Liste des abréviations	IX
1 Les pollutions	1
1. Qu'est-ce qu'une pollution ?	1
2. Diversité des pollutions	4
2.1 Pollutions sonores	4
2.2 Pollutions thermiques	5
2.3 Pollutions lumineuses	6
2.4 Pollutions biologiques	6
2.5 Pollutions radioactives ou par rayons ionisants	7
2.6 Pollutions naturelles	7
2.7 Pollutions chimiques d'origine anthropique	7
3. Les grandes familles de pollutions chimiques	8
3.1 Les ions inorganiques	8
3.2 Les polluants organiques	9
3.3 Les polluants gazeux	16
2 Dynamique des contaminants dans la biosphère	17
1. Biodisponibilité des contaminants dans la biosphère	18
1.1 Caractéristiques intrinsèques d'un contaminant	19
1.2 Caractéristiques du milieu qui influencent le devenir et les effets des contaminants	26
2. Voies d'exposition et toxicocinétique des contaminants	28
3. L'absorption	29
3.1 Transfert par simple diffusion	31
3.2 Transfert par des transports membranaires passifs	31
3.3 Transfert par des transports membranaires actifs	32
4. La distribution	33
4.1 En fonction du type d'appareil circulatoire	33
4.2 En fonction de la spéciation chimique du contaminant	34
5. Biotransformation et détoxification	35
5.1 Contaminants inorganiques	36
5.2 Contaminants organiques	37

6. Excrétion et stockage	38
7. Bioaccumulation, bioconcentration et bioamplification	39
8. Toxicodynamique des contaminants	42
8.1 Influence de la dose d'exposition	42
8.2 Influence de la durée d'exposition à un toxique	44
3 Effets des contaminants : des molécules aux organismes	45
1. Effet dose et effet hormétique	47
2. Effets moléculaires et biomarqueurs	48
2.1 Les mécanismes de biotransformation/détoxification des contaminants organiques	49
2.2 Les métallothionéines	51
2.3 Les protéines de stress	51
2.4 Réponse au stress oxydant	52
2.5 Génotoxicité	53
2.6 Les cibles neuronales	54
2.7 Les récepteurs hormonaux	54
2.8 Les métabolites	55
3. Effets à l'échelle cellulaire, tissulaire et organique	55
3.1 Cytotoxicité, nécrose et apoptose	55
3.2 Inflammation	56
3.3 Granules cellulaires	56
3.4 Hyperplasie	56
3.5 Lésions de l'ADN, aberrations chromosomiques et micronoyaux	57
3.6 Cancer	57
4. Effets à l'échelle de l'individu	57
4.1 Physiologie	57
4.2 Immunologie	58
4.3 Croissance et développement	59
4.4 Caractéristiques sexuelles, reproduction et comportements	60
4 Effets des contaminants : des populations aux communautés	61
1. Effets toxiques à l'échelle de la population	62
1.1 Modification de la structure de la population	62
1.2 Modification de la structure génétique	62
1.3 Modification de la dynamique de la population	64

2. Effets toxiques à l'échelle de la communauté	66
2.1 Effets sur la structure des communautés	67
2.2 Effets indirects au sein d'une communauté	68
3. Conclusions	73

5 Facteurs biotiques et abiotiques influençant la toxicocinétique et la toxicodynamique 75

1. Facteurs abiotiques	75
1.1 Température	76
1.2 pH	76
1.3 Hygrométrie	76
1.4 Salinité	77
1.5 Bruit	77
1.6 Lumière	77
1.7 Rythmes circadiens ou saisonniers	78
1.8 Interactions multiples	78
2. Facteurs biotiques	78
2.1 Différences entre les espèces	78
2.2 Différences entre souche ou sous-population d'une même espèce	80
2.3 Différences en fonction de l'âge	80
2.4 Différences en fonction du sexe	80
2.5 Effet de la nutrition	81
2.6 Influence des pathologies et parasites	81
3. Influence des interactions : cocontaminants ou effet cocktail	81
3.1 Additivité	82
3.2 Synergie	83
3.3 Potentialisation	84
3.4 Antagonisme	85

6 Méthodologie et outils d'évaluation des risques écotoxicologiques 87

1. Courbes dose-réponse	88
1.1 Courbes monotones	88
1.2 Courbes non monotones	90
2. Tests de toxicité aiguë et tests de toxicité chronique	90
3. Tests standardisés	92
3.1 Essais sur les organismes aquatiques	93
3.2 Essais sur les organismes terrestres	97

4. Microcosmes, mésocosmes, macrocosmes et approches <i>in natura</i>	100
5. Les outils en développement à des fins réglementaires	104
5.1 L'analyse dirigée par l'effet	104
5.2 L'écotoxicologie prédictive	104
5.3 Utilisation des méthodes <i>in vitro</i>	105
5.4 Les « omiques »	105
5.5 Les AOP	106
5.6 Le read-across	107
5.7 Les méthodes de modélisation	107
7 Surveillance de la qualité des milieux	109
1. Analyses chimiques	110
1.1 De l'échantillonnage à la purification	110
1.2 Séparation et détection	111
1.3 Les techniques immunologiques et microfluidiques	111
2. Analyses biologiques	112
2.1 Biomarqueurs	113
2.2 Bioindicateurs	128
2.3 Bioaccumulateurs	135
8 Cas particuliers : les perturbateurs endocriniens, PFAS, médicaments, nanomatériaux, et microplastiques	139
1. Les perturbateurs endocriniens	140
1.1 Diversité et présence des perturbateurs endocriniens (PE) dans l'environnement	142
1.2 Caractéristiques intrinsèques et mode d'action d'un PE	143
1.3 Effets non conventionnels des PE sur les organismes	147
2. Les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS)	151
3. Les médicaments : une problématique environnementale émergente	153
4. Les micro- et nanoplastiques	154
5. Les nanomatériaux	157
6. Les défis de la législation face à ces molécules	160

9	Interactions complexes et multistress	163
1.	Les interactions entre contaminants chimiques	164
2.	Les interactions entre les sons et les contaminants chimiques	166
3.	Les interactions « lumière, rythme biologique et contaminants chimiques »	166
4.	Les interactions entre les radiations et contaminants chimiques	168
5.	Les interactions entre « pollutions biologiques » et les contaminants chimiques	169
6.	Les interactions des contaminants chimiques avec la température	170
7.	Limites et défis actuels en lien avec les multiples stress	172
10	L'écotoxicologie et le concept One Health	175
1.	Intégration de l'écotoxicologie dans le concept One Health	175
1.1	Définition du concept One Health	175
1.2	Intérêts de l'écotoxicologie et convergence avec le concept One Health	177
1.3	Limites de l'écotoxicologie dans le concept One Health	178
2.	Exemples de situations croisées entre santé de l'écosystème et...	179
2.1	... l'alimentation humaine (Cd, Pb, mercure, PCB, etc.)	179
2.2	... la santé animale	180
2.3	... la santé des plantes (biodiversité et cultures agricoles)	180
3.	Enjeux de l'écotoxicologie dans le concept One Health	181
3.1	L'humain : juge et partie	181
3.2	Gestion des risques intégrée dans les politiques publiques	181
3.3	Besoins de développement (Fronts de science) en écotoxicologie au XXI ^e siècle	182
	Bibliographie	183
	Glossaire	205
	Index	215
	Crédits iconographiques	224

Avant-propos

Depuis plus d'un siècle, les activités humaines ont généré et utilisé de nombreux composés chimiques. Ces composés ont été introduits dans l'environnement à la suite d'événements accidentels ou de façon chronique, en générant des pollutions diffuses ou localisées. Ces pollutions impactent depuis les années 1950 les organismes qui peuplent nos écosystèmes. L'écotoxicologie est née à la suite d'accidents de pollution touchant en premier lieu les écosystèmes aquatiques. Des alarmes ont été tirées de toutes parts au cours des années 1960 ; notamment par Rachel Carson, auteur du *Printemps Silencieux* (*Silent Spring*), un ouvrage paru en 1962 aux États-Unis qui éveilla les consciences.

C'est à Jean-Michel Jouany, scientifique français, que l'on doit le terme d'écotoxicologie, écrit pour la première fois en 1971 dans son article « Écologie et nuisances », et introduit par cette simple phrase : « L'étude de l'influence des nuisances sur les relations individu-environnement pourrait être simplement qualifiée d'Écotoxicologie ». René Truhaut diffusera au plan international les idées que J.-M. Jouany aura contribué à faire émerger (Vasseur *et al.*, 2021). Il parlera d'écotoxicologie dans une conférence donnée à Stockholm en juin 1969 à l'ICSU (Conseil International des Unions Scientifiques) ; ce qui lui vaudra d'organiser et de présider le Comité Scientifique des Problèmes d'Environnement, SCOPE, formé par l'ICSU. J.-M. Jouany et R. Truhaut définiront l'écotoxicologie, comme une science multidisciplinaire qui « étudie les effets délétères des agents chimiques, physiques et biologiques sur l'ensemble des êtres vivants, ainsi que leurs interrelations au sein des communautés et leur interaction avec l'environnement ». François Ramade, écologiste et zoologiste de renom, aura aussi un rôle actif dans le développement de l'écotoxicologie, non seulement par ses enseignements, mais aussi par ses ouvrages et ses recherches.

De nombreux scientifiques se sont intéressés à l'écotoxicologie au plan international, et ce champ interdisciplinaire s'est développé. Les échanges commerciaux internationaux ont également intégré la prise en compte des impacts des produits chimiques dans leurs exigences.

Dans cet ouvrage destiné aux étudiants et aux personnes concernées par l'écotoxicologie, nous souhaitons présenter les principaux concepts et applications majeures de cette discipline.

Cette nouvelle édition s'enrichit d'une analyse approfondie de la persistance et de la toxicité préoccupantes des PFAS (également appelés polluants éternels), aborde les interactions complexes entre les différents stressors et introduit le concept de One Health, qui met en lumière les liens étroits entre la santé humaine, la santé animale et l'état des écosystèmes.

Liste des abréviations

2,3,7,8-PCDD : 2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-p-dioxine

ABC : *ATP Binding Cassette*

AChE : acétylcholinestérase

ACP : analyse en composantes principales

ADN : acide désoxyribonucléique

Aquaref : laboratoire national de référence pour la surveillance des milieux aquatiques

ATP : adénosine triphosphate

AEC : allocation énergétique cellulaire

AFNOR : Association française de normalisation

AOP : *Adverse Outcome Pathway*

BMF : facteur de bioamplification

BPA : bisphénol A

CA : modèle d'addition des concentrations

CAT : catalase

CE10 : concentration efficace qui entraîne un effet de 10 % sur le paramètre mesuré par rapport à un témoin

CE50 : concentration efficace qui entraîne un effet de 50 % sur le paramètre mesuré par rapport à un témoin

CEC : capacité d'échange cationique

CEN : Comité européen de normalisation

CE_x : concentration efficace qui entraîne un effet de x % sur le paramètre mesuré par rapport à un témoin

CL50 : concentration létale médiane

CLP : classification (*Classification*) étiquetage (*Labelling*) emballage (*Packaging*)

CMEO : concentration minimale avec effets observables

COV : composés organiques volatils

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

COMET : test des comètes

CSEO : concentration sans effets observables

CYP : cytochrome P450

D : degré d'ionisation

DCE : directive cadre sur l'eau

DDT : dichloro diphenyl trichloroéthane

DE50 : dose efficace qui entraîne un effet de 50 % sur le paramètre mesuré par rapport à un témoin

Liste des abréviations

DEHP : di(2-ethylhexyl) phtalate
DL50 : dose létale médiane
DSEO : dose sans effet observable
DT50 : temps de demi-vie
EBI : inhibiteur de la biosynthèse d'ergostérol
EC50 : *Effective Concentration* ou CE50
ED50 : *Effective Dose* ou DE50
ECHA : Agence européenne des produits chimiques
EDA : analyse dirigée par l'effet
Elisa : méthode immuno-enzymatique (*Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay*)
ERO : espèces réactives à l'oxygène
EROD : ethoxyrésufurin-O-dééthylase
ES : somme arithmétique des effets
ETM : éléments traces métalliques
FBA : facteur de bioaccumulation
FBC : facteur de bioconcentration
FIAM : modèle de l'ion libre (*Free Ion Activity Model*)
FMO : flavine-monooxygénase
GABA : acide gamma-aminobutyrique
GC-MS : chromatographie gazeuse-spectrophotométrie de masse
GLUT : protéines transporteuses de glucose
GST : glutathion-S-transférase
H : constante de Henry
HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques
HPLC : chromatographie en phase liquide haute performance
HSP : *Heat Shock Protein*
IBM : modèle individu centré
ICP-MS : spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*)
ICSU : Conseil international des unions scientifiques (*International Council of Scientific Unions*)
INERIS : Institut national de l'environnement industriel et des risques
INRAE : Institut national de recherche en agriculture, alimentation et environnement
ISO : Organisation internationale de normalisation
Kd : coefficient d'adsorption
Kes : événements clés
KERs : relations entre les éléments clés
Koc : coefficient de partage carbone organique-eau

Kow : coefficient de partage n-octanol-eau
LC50 : *Median Lethal Concentration* ou CL50
LD50 : *Median Lethal Dose* ou DL50
LOEC : *Low Observed Effect Concentration* ou CME0
LOEL : *Low Observed Effect Level*
MEDPOL : programme de surveillance de la Méditerranée
MIX : effet mesurés de composés en mélange
MS : spectrophotométrie de masse
MIE : événement moléculaire initiateur (*Molecular Initiating Event*)
MRP : protéines de résistance aux drogues (*Multidrug Resistance Protein*)
MT : méthallothionéines
MXR : *Multi Xenobiotic Resistance*
NADH : nicotinamide adénine dinucléotide
NADPH : nicotinamide adénine dinucléotide phosphate
NOEC : *No Observed Effect Concentration* ou CSEO
NOEL : *No Observed Effect Level*
OATP : peptides transporteurs d'anions organiques
OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques
OIT : Organisation internationale du travail
OMS : Organisation mondiale de la santé
OSPAR : convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est
P : pression (*out tension*) de vapeur
P450 : cytochrome P450
PBDE : polybromodiphénylethers
PCB : polychlorobiphényles
PCDF : polychlorodibenzofuranes
PE : perturbateur endocrinien
PFAS : substances per- et polyfluoroalkylées
PgP : P-glycoprotéine
PICT : *Pollution-Induced Community Tolerance*
PIREN : programme interdisciplinaire de recherche sur l'eau et l'environnement
POP : polluants organiques persistants
p,p'-DDE : dichlorodiphényldichloréthylène
PPCP : produits pharmaceutiques et de soin personnel
PXR : récepteur aux xénobiotiques
QSAR : relation qualitative structure activité
REACH : enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques (*Registration Evaluation Authorization and restriction of CHemicals*)