

Écotoxicologie

Juliette Faburé
Christian Mougin
Dorothee Rivet
David Siauxsat

Écotoxicologie

DUNOD

Illustration de couverture : © mivod – shutterstock.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2022

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-081816-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.



Table des matières

Avant-propos	IX
Liste des abréviations	X
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	5
2.4 Pollutions biologiques	5
2.5 Pollutions radioactives ou par rayons ionisants	5
2.6 Pollutions naturelles	5
2.7 Pollutions chimiques d'origine anthropique	6
3. Les grandes familles de pollutions chimiques	6
3.1 Les ions inorganiques	6
3.2 Les polluants organiques	8
3.3 Les polluants gazeux	14
2 Dynamique des contaminants dans la biosphère	15
1. Biodisponibilité des contaminants dans la biosphère	16
1.1 Caractéristiques intrinsèques d'un contaminant	17
1.2 Caractéristiques du milieu qui influencent le devenir et les effets des contaminants	23
2. Voies d'exposition et toxicocinétique des contaminants	26
3. L'absorption	27
3.1 Transfert par simple diffusion	27
3.2 Transfert par des transports membranaires passifs	27
3.3 Transfert par des transports membranaires actifs	29
4. La distribution	31
4.1 En fonction du type d'appareil circulatoire	31
4.2 En fonction de la spéciation chimique du contaminant	31
5. Biotransformation et détoxification	32
5.1 Contaminants inorganiques	33
5.2 Contaminants organiques	34

6. Excrétion et stockage	35
7. Bioaccumulation, bioconcentration et bioamplification	36
8. Toxicodynamique des contaminants	39
8.1 Influence de la dose d'exposition	40
8.2 Influence de la durée d'exposition à un toxique	41
3 Effets des contaminants : des molécules aux organismes	43
1. Effet dose et effet hormétique	45
2. Effets moléculaires et biomarqueurs	46
2.1 Les mécanismes de biotransformation/détoxification des contaminants organiques	47
2.2 Les métallothionéines	49
2.3 Les protéines de stress	49
2.4 Réponse au stress oxydant	50
2.5 Génotoxicité	51
2.6 Les cibles neuronales	52
2.7 Les récepteurs hormonaux	52
2.8 Les métabolites	53
3. Effets à l'échelle cellulaire, tissulaire et organique	53
3.1 Cytotoxicité, nécrose et apoptose	53
3.2 Inflammation	54
3.3 Granules cellulaires	54
3.4 Hyperplasie	54
3.5 Lésions de l'ADN, aberrations chromosomiques et micronoyaux	55
3.6 Cancer	55
4. Effets à l'échelle de l'individu	55
4.1 Physiologie	55
4.2 Immunologie	56
4.3 Croissance et développement	57
4.4 Caractéristiques sexuelles, reproduction et comportements	58
4 Effets des contaminants : des populations aux communautés	59
1. Effets toxiques à l'échelle de la population	60
1.1 Modification de la structure de la population	60
1.2 Modification de la structure génétique	60
1.3 Modification de la dynamique de la population	62

2. Effets toxiques à l'échelle de la communauté	64
2.1 Effets sur la structure des communautés	65
2.2 Effets indirects au sein d'une communauté	66
3. Conclusions	71
5 Facteurs biotiques et abiotiques influençant la toxicocinétique et la toxicodynamique	73
1. Facteurs abiotiques	73
1.1 Température	74
1.2 pH	74
1.3 Hygrométrie	74
1.4 Salinité	74
1.5 Bruit	75
1.6 Lumière	75
1.7 Rythmes circadiens ou saisonniers	76
1.8 Interactions	76
2. Facteurs biotiques	76
2.1 Différences entre les espèces	76
2.2 Différences entre souche ou sous-population d'une même espèce	78
2.3 Différences en fonction de l'âge	78
2.4 Différences en fonction du sexe	78
2.5 Effet de la nutrition	79
2.6 Influence des pathologies parasites	79
3. Influence des interactions : cocontaminants ou effet cocktail	79
3.1 Additivité	80
3.2 Synergie	81
3.3 Potentialisation	82
3.4 Antagonisme	83
6 Méthodologie et outils d'évaluation des risques écotoxicologiques	85
1. Courbes dose-réponse	86
1.1 Courbes monotones	86
1.2 Courbes non monotones	88
2. Tests de toxicité aiguë et tests de toxicité chronique	88
3. Tests standardisés	90
3.1 Essais sur les organismes aquatiques	91
3.2 Essais sur les organismes terrestres	95

4. Microcosmes, mésocosmes, macrocosmes et approches <i>in natura</i>	98
5. Les outils en développement à des fins réglementaires	102
5.1 L'analyse dirigée par l'effet	102
5.2 L'écotoxicologie prédictive	102
5.3 Utilisation des méthodes <i>in vitro</i>	103
5.4 Les « omiques »	103
5.5 Les AOP	104
5.6 Le read-across	105
5.7 Les méthodes de modélisation	105
7 Surveillance de la qualité des milieux	107
1. Analyses chimiques	108
1.1 De l'échantillonnage à la purification	108
1.2 Séparation et détection	109
1.3 Les techniques immunologiques et microfluidiques	109
2. Analyses biologiques	110
2.1 Biomarqueurs	111
2.2 Bioindicateurs	126
2.3 Bioaccumulateurs	134
8 Cas particuliers : les perturbateurs endocriniens, nanomatériaux, et microplastiques	139
1. Les perturbateurs endocriniens	139
1.1 Diversité et présence des perturbateurs endocriniens (PE) dans l'environnement	141
1.2 Caractéristiques intrinsèques et mode d'action d'un PE	142
1.3 Effets non conventionnels des PE sur les organismes	145
2. Les médicaments : une problématique environnementale émergente	148
3. Les micro- et nanoplastiques	149
4. Les nanomatériaux	151
5. Les défis de la législation face à ces molécules	154
Bibliographie	157
Glossaire	171
Index	181
Crédits iconographiques	189

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.

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
- AND** : 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

- 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** : ethoxyrésoufurin-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

Liste des abréviations

- 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 CMEO
- 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
- 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*)
- RMQS** : réseau de mesure de la qualité des sols

RPSI : *Relative Penis Size Index*

SCGE : *Single Cell Gel Electrophoresis*

SCOPE : comité scientifique des problèmes de l'environnement (*Scientific Committee of Problems of the Environment*)

SHGB : *Sex Hormone Binding Protein*

SLGT : protéines transporteuses de glucose

SLC : protéines transporteuses de support de soluté

SN : système nerveux

SOD : superoxyde dismutase

TBT : trybutylétain

TMF : facteur d'amplification trophique

TTR : transthyrétine

UGT : UDP-glucuronosyltransferase

UT : unité toxique

VTG : vitellogénine

Introduction

L'écotoxicologie est une science pluridisciplinaire qui vise à étudier l'impact des pollutions sur les écosystèmes et donc à corriger ou prévenir les risques environnementaux liés à ces pollutions. Mais qu'est qu'une pollution ? Un polluant ? Quelle est la différence entre polluant et contaminant ? Ces termes sont utilisés dans divers contextes, parfois mal utilisés ou mal compris, voire débattus car tout le monde n'est pas d'accord sur les définitions. Ce chapitre vise donc à définir les termes essentiels, expliquer les différences entre certains termes de la littérature, et à lister les différentes pollutions majeures qu'on connaît actuellement sur notre planète.

Objectifs

- Connaître les pollutions
- Comprendre la distinction entre polluants et contaminants

Plan

- 1 Qu'est-ce qu'une pollution ?
- 2 Diversité des pollutions
- 3 Les grandes familles de pollutions chimiques

1 Qu'est-ce qu'une pollution ?

DÉFINITION

Une **pollution** est définie comme une altération de l'environnement par des substances (naturelles, chimiques ou radioactives), des déchets (ménagers ou industriels) ou des nuisances diverses (sonores, lumineuses, thermiques, biologiques, etc.).

Une pollution est en premier lieu associée à l'apparition ou l'augmentation d'une ou plusieurs sources polluantes. Cette notion implique donc de façon sous-jacente une dimension temporelle qui montre une différence entre un temps de référence et le

moment du constat de cette pollution. Une pollution fait donc référence à un élément qui est mesuré à des niveaux jugés supérieurs à ceux qui seraient normalement présents naturellement dans l'environnement. Avec le temps, la notion de pollution a aussi intégré une connotation négative du fait d'effets **toxiques** qu'elle induit sur les écosystèmes et/ou les organismes.

Encart 1.1

L'utilisation du mot pollution dans notre langage du quotidien

Le terme pollution est de nos jours employés dans différents contextes de la vie quotidienne. Dans cet ouvrage, nous associons ce terme à des altérations de l'environnement par des activités humaines et parfois naturelles (volcanisme, etc.). Mais le fait de polluer est également associé au sens de profaner ou souiller. Et de ce fait, on le rencontre au sens figuré dans des contextes pour décrire l'effet d'une action négative d'une personne sur une autre ou la perception négative des effets qu'à une personne sur une autre. Nous avons ainsi tous entendu des expressions du type « il/elle me pollue l'air, mon espace, mon esprit » ou encore « les actions de cette personne polluent la profession ou l'atmosphère de l'entreprise ».

De ce fait, il est parfois fait une différence entre la notion de **polluants** et celle de **contaminants** [environnementaux]. Les deux termes désignent des éléments dont la **concentration** environnementale est anormalement haute par rapport à une référence ou des éléments présents alors qu'ils ne l'étaient pas avant. Mais il y a une différence dans leurs impacts sur l'environnement. En effet, le terme « polluant » est utilisé pour indiquer que l'élément induit des dommages réels à l'environnement, tandis que le terme « contaminant » implique que l'élément est anormalement présent sans nécessairement avoir d'effet nocif.

Cette distinction est importante pour plusieurs raisons. Elle montre qu'il est nécessaire de démontrer la toxicité du contaminant sur les écosystèmes et/ou les organismes. Pour pouvoir parler de risque environnemental d'une pollution, on ne peut pas juste se baser sur la démonstration d'une **exposition** de l'écosystème au contaminant, c'est-à-dire sa présence dans l'environnement étudié. Il faut également évaluer sa dangerosité ou toxicité (voir chapitre 6). Et elle n'est pas nécessairement ou systématiquement démontrée. Cette toxicité est souvent associée à des fortes **doses** ou concentrations. La plupart des polluants ont un effet dose ou concentration dépendante (voir chapitre 6). Ainsi, en fonction des concentrations environnementales mesurées, un élément peut être qualifié de polluant dans certaines situations car le contaminant induit des effets toxiques, ou reste qualifié de contaminant quand il n'y a pas d'effets délétères. Certains effets mettent aussi longtemps à apparaître, notamment lorsque l'écosystème est exposé à de petites quantités ou de faibles concentrations de contaminants. Une toxicité dite chronique peut alors être démontrée plusieurs mois voire années après, amenant à qualifier un contaminant de polluant. Enfin, il peut y avoir des avis divergents sur ce qu'est un effet délétère