

François Ramade

# Introduction à l'écotoxicologie

*Fondements et applications*



053449

Editions  
**TEC**  
& **DOC**

*Lavoisier*

053449

ECL 77



2

# Introduction à l'écotoxicologie

## Fondements et applications

François Ramade

*Professeur émérite d'écologie et de zoologie  
à l'université de Paris-Sud*



053449

**Editions**  
**TEC**  
& **DOC**

11, rue Lavoisier  
F-75008 Paris

# Table des matières



Avant-propos .....	III
Liste des sigles et abréviations .....	V
Introduction .....	XVII

## Chapitre 1

### Définition de l'écotoxicologie, place parmi les sciences biologiques

1. Écologie et écotoxicologie .....	1
2. Écotoxicologie et toxicologie environnementale .....	3
2.1. Bases conceptuelles relatives aux dimensions écologiques de l'écotoxicologie .....	5
2.1.1. Le concept d'échelle en écotoxicologie .....	5
2.1.2. Les différents contextes propres à l'approche écotoxicologique des problèmes de pollution de l'environnement .....	7
2.2. Écotoxicologie rétrospective et prédictive .....	10
2.2.1. Écotoxicologie rétrospective .....	10
2.2.2. L'écotoxicologie prédictive .....	10
3. Écotoxicologie et protection environnementale .....	11

## Chapitre 2

### Causes et importance de la pollution de l'écosphère

1. Qu'entend-on par pollution ? .....	13
1.1. Définition des pollutions .....	14
1.2. Pollutions et nuisances .....	14
2. Classification des pollutions .....	15
3. Historique des pollutions .....	17
4. Causes et importance de la pollution de l'écosphère .....	18
4.1. Les principales sources de pollution .....	20
4.1.1. La production d'énergie, source majeure de pollution .....	20
4.1.2. Les activités industrielles .....	29
4.1.3. L'agriculture intensive .....	32
4.2. La dispersion planétaire des polluants .....	34
4.2.1. Des pollutions régionales à une pollution globale .....	34
4.2.2. Pollutions et équilibres écologiques globaux .....	36

## Chapitre 3

### Dispersion et circulation des polluants dans l'écosphère

1. Circulation atmosphérique des polluants .....	39
1.1. Structure de l'atmosphère .....	39
1.2. Passage des polluants dans l'atmosphère .....	41

1.2.1. Lois générales de la circulation atmosphérique.....	41
1.2.2. Le transport à distance des aéropolluants.....	45
1.3. Devenir des polluants dans l'atmosphère.....	47
1.3.1. Le temps moyen de résidence.....	47
1.3.2. Modifications physico-chimiques des polluants atmosphériques..	48
1.4. Pollutions et mésoclimats.....	50
1.4.1. Dôme de pollution urbaine.....	50
1.4.2. Inversion de température et smogs.....	50
2. Transfert des polluants de l'atmosphère dans les sols et les eaux.....	52
2.1. Transfert des polluants de l'atmosphère vers la surface de l'écosphère..	55
2.2. Transfert des polluants de l'atmosphère vers l'hydrosphère.....	56
2.3. Réaction entre polluants induisant la formation de polluants secondaires.	56
2.3.1. Formation des photo-oxydants.....	57
2.3.2. Polluants secondaires donnant lieu aux pluies acides.....	59
3. Incorporation des polluants dans la biomasse.....	60
3.1. Influence de la dégradabilité.....	61
3.1.1. Principaux processus de dégradation des polluants.....	61
3.1.2. Exemples de processus de dégradation abiotique.....	62
3.2. Bioaccumulation et bioconcentration.....	64
3.2.1. Notion de biodisponibilité.....	64
3.2.2. La bioaccumulation.....	65
3.2.3. La bio-concentration.....	65
3.3. Existence de concentrateurs biologiques.....	66
3.3.1. Bioconcentration dans les organismes terrestres.....	66
3.3.2. Bioconcentration dans les organismes aquatiques.....	67
3.4. Circulation des polluants dans les réseaux trophiques.....	68
3.4.1. Bioamplification dans les réseaux trophiques aquatiques.....	70
3.4.2. Bioamplification dans les réseaux trophiques terrestres.....	73
3.4.3. Principaux types de circulation des polluants dans les réseaux trophiques.....	79
3.4.4. Modalités et mécanismes de transfert dans les réseaux trophiques.....	82
3.4.5. Modélisation du transfert des polluants dans les réseaux trophiques.....	85
4. Résumé et conclusion.....	87

## Chapitre 4

### Notion de toxique et implications écologiques

1. Définition de la toxicologie.....	91
2. Mode d'exposition et de pénétration des toxiques dans l'organisme.....	92
3. Les diverses manifestations de la toxicité.....	93
3.1. La toxicité aiguë.....	93
3.2. La toxicité subaiguë.....	94
3.3. La toxicité à long terme.....	94
3.4. Problèmes de manifestation de la toxicité particuliers à l'écotoxicologie.....	94
3.4.1. Antagonisme.....	95
3.4.2. Potentiation.....	95
4. Principaux effets physiotoxicologiques induits par l'exposition à des polluants.....	96
4.1. Altérations somatiques.....	97
4.1.1. Effets sur les plantes vertes et autres organismes autotrophes.....	97
4.1.2. Effets sur les animaux.....	105
4.2. Altérations germinales.....	121
4.2.1. Effets sur le potentiel biotique.....	121

4.2.2. Effets embryotoxiques et tératogènes.....	122
4.3. Génotoxicité et cancérogénicité.....	123
4.3.1. Mutagenèse.....	123
4.3.2. Nature et causes de la mutagenèse.....	124
4.3.3. Cancérogénèse.....	132

## Chapitre 5

### Détermination des principaux paramètres écotoxicologiques quantitatifs

1. Détermination des paramètres caractéristiques de l'écotoxicité.....	141
1.1. Évaluation de la toxicité d'un polluant.....	141
1.1.1. Tests de toxicité et/ou d'écotoxicité.....	141
1.1.2. Principaux paramètres écotoxicologiques et leur détermination.....	142
1.2. Relations dose ou concentration-réponse non monotone : le cas des substances hormétiques.....	149
1.3. Méthodes statistiques d'estimation de la toxicité.....	150
1.3.1. Transformation de probit.....	150
1.3.2. Limites de la méthode de probit.....	157
1.4. Principales méthodes de tests de toxicité.....	158
1.4.1. Principaux types de bio-essais en toxicologie de l'environnement.....	158
1.4.2. Bioessais d'effets mutagènes et tératogènes.....	162
2. Indices quantitatifs de préservation de la santé publique et environnementale.....	165
2.1. Indices d'évaluation de la contamination.....	166
2.2. Facteurs d'équivalence de toxicité.....	166
2.3. Seuils de sécurité (éco)toxicologiques.....	168
2.3.1. Établissement des seuils de sécurité environnementaux.....	169
2.3.2. Autres indicateurs de seuils de sécurité.....	171
2.3.3. Limites des notions de seuil et d'indicateurs de sécurité (éco)toxicologique.....	173
3. Dimensions scientifiques et éthiques de la protection écotoxicologique.....	176

## Chapitre 6

### Effets des polluants sur les populations

1. Principaux types d'effets démo-écologiques des polluants.....	180
1.1. Effets sur la mortalité.....	180
1.1.1. Effets de la mortalité sur des populations végétales.....	180
1.1.2. Effets sur des populations animales.....	181
1.1.3. Effets létaux des pollutions sur des populations d'espèces marines.....	183
1.1.4. Effets létaux des radiations ionisantes.....	184
2. Effets des polluants sur le potentiel biotique des populations contaminées.....	186
2.1. Effets sur la reproduction.....	187
2.1.1. Diminution de potentiel biotique des populations aviennes exposées à des composés organochlorés.....	187
2.1.2. Autres exemples d'effets des polluants sur le potentiel biotique des populations exposées.....	192
2.2. Effets sur la mortalité embryonnaire et néonatale.....	196
2.2.1. Embryotoxicité.....	196
2.2.2. Diminution du potentiel biotique due à la perturbation de l'embryogenèse.....	196
2.2.3. Mortalité néonatale.....	197
3. Effets sur la croissance.....	198

4. Conséquences démo-écologiques des perturbations comportementales induites par les polluants .....	200
5. Effets des polluants sur l'interaction entre les populations de deux espèces ...	204
5.1. Modifications de la pression de prédation due à la pollution de l'environnement .....	204
5.2. Autre type d'effets sur les relations interspécifiques des polluants .....	207
6. Adaptation des populations aux polluants : tolérance et résistance .....	213
6.1. Tolérance aux métaux lourds .....	213
6.2. Résistance aux pesticides .....	216
6.2.1. Résistance des insectes aux insecticides .....	217
6.2.2. Résistance des plantes aux herbicides .....	220
6.2.3. Autres exemples de résistance aux polluants .....	222
6.2.4. Résistance aux multixénobiotiques .....	222

## Chapitre 7

### Effets des polluants sur les écosystèmes

1. Effets des polluants sur la structure des écosystèmes .....	228
1.1. Réduction d'abondance et de richesse spécifique .....	228
1.1.1. Effets des polluants sur les espèces-clefs de voûte des peuplements .....	232
1.1.2. Effets sur la dominance .....	233
1.2. Effets sur la diversité spécifique .....	234
1.3. Effets des polluants sur la distribution d'abondance des peuplements ...	238
1.4. Effets sur la succession .....	239
2. Effets sur le fonctionnement des écosystèmes .....	241
2.1. Effets sur la biomasse et la productivité primaires .....	242
2.1.1. Effets sur la productivité des écosystèmes terrestres .....	242
2.1.2. Effets sur la productivité des écosystèmes aquatiques .....	249
2.1.3. Effets des polluants sur la productivité primaire des récifs coralliens et des écosystèmes marins côtiers annexes .....	255
2.1.4. Effet de la pollution des océans par le pétrole .....	265
2.2. Effets sur la productivité secondaire des écosystèmes .....	267
2.3. Action des polluants sur le cycle de la matière .....	271
2.3.1. Effets sur les décomposeurs .....	272
2.3.2. Effets sur la régulation fonctionnelle du cycle de la matière par les consommateurs .....	276
2.3.3. Conséquences sur le recyclage des éléments minéraux nutritifs dans les écosystèmes .....	279
3. Descripteurs des effets des polluants sur la régulation du fonctionnement des écosystèmes .....	279

## Chapitre 8

### Perturbation des cycles biogéochimiques par les polluants Conséquences écologiques

1. Perturbation des cycles biogéochimiques d'éléments biogènes .....	288
1.1. Perturbation du cycle du carbone .....	290
1.1.1. Monoxyde de carbone .....	291
1.1.2. Hydrocarbures .....	292
1.2. Perturbation du cycle biogéochimique de l'azote .....	294
1.2.1. Principaux polluants gazeux dérivés de l'azote .....	295
1.3. Perturbation du cycle biogéochimique du soufre .....	301

1.3.1. Cycle biogéochimique du soufre dans les conditions naturelles ...	301
1.3.2. Action de l'homme sur le cycle du soufre .....	305
1.4. Interactions entre aéropolluants à l'échelle globale .....	307
2. Perturbation des cycles biogéochimiques d'éléments xénobiotiques toxiques ...	309
2.1. Perturbation du cycle du plomb .....	309
2.1.1. Cycle biogéochimique du plomb dans les conditions naturelles ...	310
2.1.2. Perturbations du cycle biogéochimique du plomb par l'action de l'homme .....	310
2.2. Perturbation du cycle de l'arsenic .....	318
2.2.1. Sources et flux naturels d'arsenic dans la biosphère .....	319
2.2.2. Perturbations du cycle biogéochimique de l'arsenic par l'action de l'homme .....	319
2.3. Perturbation du cycle du mercure .....	321
2.3.1. Flux naturels de mercure dans les principaux compartiments de la biosphère .....	321
2.3.2. Perturbations du cycle biogéochimique du mercure par l'action de l'homme .....	324
2.4. Perturbation du cycle du cadmium .....	332
2.4.1. Cycle biogéochimique du cadmium dans les conditions naturelles .....	332
2.4.2. Perturbations du cycle biogéochimique du cadmium par l'action de l'homme .....	332
2.5. Conséquences de la pollution par les éléments toxiques .....	336
3. Cycles biogéochimiques des polluants organiques persistants .....	338
3.1. Cycle biogéochimique des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) .....	338
3.1.1. Passage des HAP dans les réseaux trophiques .....	341
3.2. Cycle biogéochimique des composés organochlorés .....	342
3.2.1. Passage des composés organochlorés dans les réseaux trophiques .....	342
3.3. Cycle biogéochimique des dioxines (PCDD) et des polychlorodibenzofuranes (PCDF) .....	345
3.3.1. Modalités de dispersion et persistance des PCDD et des PCDF dans l'environnement .....	346
3.3.2. Contamination des réseaux trophiques par les PCDD et les PCDF .....	348

## Chapitre 9

### Écotoxicologie nucléaire

1. Nature des rayonnements .....	351
2. Radioactivité – Notions de radioécologie .....	354
2.1. Période physique et période biologique .....	354
2.2. Importance radioécologique des radio-isotopes .....	356
2.3. Unités de radioactivité et d'irradiation .....	359
3. Principaux types d'effets démo-écologiques des radiations ionisantes .....	360
3.1. Radiosensibilité comparée des êtres vivants aux doses létales .....	360
3.2. Effets des doses sublétales .....	361
3.2.1. Effets physiologiques .....	362
3.2.2. Effets sur le potentiel biotique .....	363
3.2.3. Effets mutagènes et cancérigènes .....	365
4. Principales causes de pollution nucléaire .....	369
4.1. Cycle du « combustible » .....	370
4.2. Pollution par les retombées des tests atmosphériques d'armes nucléaires .....	372
4.3. Pollution de l'environnement par l'industrie nucléaire .....	374
4.3.1. Effluents rejetés par l'industrie nucléaire .....	374

4.3.2. Problème du stockage des déchets .....	377
5. Conséquences écologiques de la pollution nucléaire .....	379
5.1. Comportement des radionucléides produits par l'industrie nucléaire dans les écosystèmes .....	379
5.1.1. Contamination des eaux continentales .....	379
5.1.2. Contamination radioactive des eaux marines .....	385
5.1.3. Contamination radioactive des écosystèmes terrestres .....	390
5.2. Risques d'accidents dans l'industrie nucléaire et conséquences radioécologiques .....	396
5.2.1. Scénario de référence d'un accident affectant une centrale nucléaire .....	396
5.2.2. L'accident de Tchernobyl .....	397
5.2.3. Études des conséquences de l'exposition aux radiations pour les communautés .....	406

## Chapitre 10

### Monitoring des polluants

1. <i>Monitoring</i> des polluants dans les écosystèmes .....	411
1.1. Contamination des organismes – Les bio-indicateurs de contamination ..	413
1.1.1. Caractéristiques requises d'un bio-indicateur .....	413
1.1.2. Facteurs qui influencent la fiabilité des bio-indicateurs .....	414
1.2. Utilisation des indicateurs biologiques d'accumulation .....	420
1.2.1. Utilisation d'espèces bioaccumulatrices dans les biotopes aquatiques .....	420
1.2.2. Utilisation d'espèces bioaccumulatrices dans les biotopes terrestres .....	428
2. Biomarqueurs .....	436
2.1. Définition des biomarqueurs .....	437
2.2. Réaction des organismes à une contamination par des xénobiotiques toxiques .....	437
2.2.1. Notion de xénobiotique .....	437
2.2.2. Étapes de la réaction d'un organisme contaminé par un xénobiotique .....	438
2.3. Principaux types de biomarqueurs .....	440
2.3.1. Identification des biomarqueurs en fonction de la phase concernée de l'action d'un xénobiotique .....	440
2.3.2. Classification des biomarqueurs .....	441
2.4. Niveaux d'organisation concernés et spécificité des biomarqueurs .....	443
2.4.1. Niveaux d'organisation .....	443
2.4.2. Spécificité des biomarqueurs .....	444
2.5. Principales applications des biomarqueurs .....	445
2.6. Biomarqueurs d'exposition .....	447
2.6.1. Biomarqueurs d'exposition aux métaux et métalloïdes toxiques ..	447
2.6.2. Biomarqueurs d'exposition aux insecticides organophosphorés et aux carbamates .....	449
2.6.3. Biomarqueurs d'exposition aux HAP .....	450
2.6.4. Biomarqueurs d'exposition aux composés organochlorés .....	451
2.6.5. Biomarqueurs d'exposition aux polluants génotoxiques .....	452
3. Monitoring des changements produits par les polluants .....	454
3.1. Biomarqueurs d'effets .....	454
3.1.1. Biomarqueurs d'effets marqués par des inhibitions enzymatiques ..	455
3.1.2. Biomarqueurs de stress chimique .....	455
3.1.3. Biomarqueurs associés au métabolisme énergétique .....	457
3.1.4. Biomarqueurs d'effets cytologiques et histologiques .....	459
3.1.5. Biomarqueurs d'effets comportementaux .....	460

3.2. Bio-indicateurs d'effets : <i>monitoring</i> d'espèces « sentinelles » .....	461
3.2.1. Principaux groupes taxonomiques donnant lieu à un usage comme bio-indicateurs d'altération des communautés par des polluants .....	462
3.3. Évaluation de la richesse spécifique et des indices de diversité dans le <i>monitoring</i> écotoxicologique .....	471
3.3.1. Évaluation de la richesse spécifique .....	471
3.3.2. Utilisation des indices de diversité dans le <i>monitoring</i> écotoxicologique ..	473
3.3.3. Usage des indices biotiques dans le <i>monitoring</i> écotoxicologique ..	474
3.3.4. Usage d'indices factoriels et de l'analyse multivariée dans le <i>monitoring</i> des polluants .....	478

## Chapitre 11

### Prévision des effets et évaluation du risque environnemental

1. Réglementation européenne relative au risque pour l'environnement des substances chimiques .....	481
1.1. Caractéristiques des substances chimiques et biotests exigés pour l'homologation .....	482
1.1.1. Substances soumises à déclaration .....	482
1.1.2. Substances soumises à un dossier de notification complet .....	483
1.2. Importance et limites de la réglementation européenne de l'évaluation du risque chimique .....	486
2. Prévision du comportement d'un polluant dans un écosystème .....	487
2.1. Prévision du potentiel de bioamplification d'une substance chimique ...	487
2.2. Prévision de la concentration d'une substance chimique dans un biotope terrestre ou aquatique à la suite d'une pollution .....	491
2.2.1. Loi et constante de Henry .....	492
2.2.2. Modèles de dispersion dans l'environnement .....	494
3. Prévision des effets des polluants sur les individus et les populations .....	495
3.1. Évaluation de la relation quantitative structure-activité (QSAR) .....	495
3.2. Usage des biomarqueurs dans la prévision des effets .....	497
4. Prévision des effets sur les écosystèmes .....	499
4.1. Mésocosmes .....	500
4.1.1. Mésocosmes aquatiques .....	500
4.1.2. Mésocosmes terrestres .....	516
4.2. Enclos .....	518
4.2.1. Enclos limniques .....	518
4.2.2. Enclos en milieu marin .....	520
4.3. Recherches effectuées sur des fractions d'écosystèmes naturels .....	522
5. Évaluation du risque écotoxicologique .....	524
5.1. Évaluation du risque fondée sur des modèles simplifiés de populations ou de communautés .....	524
5.2. Évaluation du risque fondée sur des modèles écosystémiques .....	525
Annexe .....	529
Bibliographie .....	549
1. Ouvrages généraux .....	549
2. Autres ouvrages, publications originales et mises au point .....	550
Index général .....	585
Index taxonomique .....	609

L'adoption par l'Union européenne en décembre 2006 de la directive REACH va contraindre les firmes industrielles et les services publics à réévaluer d'ici 2018 les risques pour la santé humaine et pour l'environnement de 30 000 substances chimiques majeures. Il en résulte de considérables besoins en recherche écotoxicologique, discipline née voici plus de trois décennies et qui a pour objet l'étude des polluants toxiques dans les écosystèmes.

Dans ce contexte brûlant et face à l'inquiétude croissante liée à la pollution de la biosphère, y compris dans les zones les plus reculées de la planète, **Introduction à l'écotoxicologie** dresse une synthèse de l'ensemble des problématiques en jeu.

Y sont analysés les modalités et mécanismes de la pollution des habitats terrestres et aquatiques, les implications écologiques des toxiques et les méthodes d'évaluation de l'écotoxicité. Les conséquences des pollutions sont examinées à des niveaux croissants de complexité biologique (populations, écosystèmes et biosphère). Les contraintes de la surveillance permanente des polluants dans l'environnement et les principales méthodes d'évaluation et de prévision de leurs effets sont enfin évoquées au regard de leur actualité.

Cet ouvrage s'adresse aux ingénieurs et techniciens concernés par la prévention des pollutions, par la protection de l'environnement ou par l'évaluation des risques, aux agronomes et aux professions biomédicales. Il s'adresse également aux étudiants des universités et des grandes écoles dont le cursus intègre une formation aux sciences de l'environnement.

**François Ramade** est professeur émérite d'écologie à l'université de Paris-Sud (Orsay). Tout au long de sa carrière scientifique, il a mené à bien un vaste spectre de recherches écotoxicologiques sur les effets des pollutions



aux divers niveaux d'organisation biologique. Il est aujourd'hui président d'honneur de la Société française d'écologie, de la Société nationale de protection de la nature et membre d'honneur de l'Alliance mondiale pour la nature (ex-Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources, organisme lié au PNUE et à l'Unesco).

978-2-7430-0944-1



9 782743 009441