

François Ramade

Introduction à l'écotoxicologie

Fondements et applications

Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

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. Cancérogenèse | 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 cancérogènes | 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 |