

François Ramade

Introduction à l'écochimie

Les substances chimiques
de l'écosphère à l'homme

Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

Introduction à l'écochimie

Les substances chimiques
de l'écosphère à l'homme

François Ramade

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



11, rue Lavoisier
75008 Paris

Chez le même éditeur

Introduction à l'écotoxicologie

Ramade F., 2007

Métrologie en chimie de l'environnement

Quevauviller P., 2006

La chimie verte

Colonna P., 2006

Analyse chimique des sols – Méthodes choisies

Mathieu C., Pieltain F., 2003

Écologie – Approche scientifique et pratique

Faurie C., Ferra C., Médori F., Devaux J., 5^e édition, 2002

Introduction à l'écologie – Des écosystèmes naturels à l'écosystème humain

Angelier E., 2002

Utilisation des biomarqueurs pour la surveillance de la qualité de l'environnement

Lagadic L., Caquet T., Amiard-Triquet C., Ramade F., 1998



© LAVOISIER, 2011

ISBN : 978-2-7430-1316-8

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands Augustins – 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, d'autre part les analyses et courtes citations justifiées dans le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er} juillet 1992 – art. L. 122-4 et L. 122-5 et Code pénal art. 425).

Remerciements

Nous remercions chaleureusement notre beau-frère René Bertocchio, Ingénieur de Recherches Honoraire chez Elf Atochem et spécialiste de la synthèse organique, notre Fille, Isabelle Ramade, Maître de Conférence agrégée de Physico-chimie à la Faculté des Sciences d'Orsay (Université de Paris-Sud), et nos excellents amis et collègues André Picot, Toxicochimiste, Directeur de recherche Honoraire au CNRS, et Hélène Roche, Écotoxicologue, Ingénieur de Recherche au CNRS dans l'UMRE 9079 Écologie, Systématique, Évolution à l'Université de Paris-Sud, pour l'aide qu'ils nous ont apportée dans la rédaction de cet ouvrage au travers de la documentation qu'ils nous ont communiquée et/ou des informations qu'ils ont pu nous donner sur diverses questions de chimie générale, organique, ou encore concernant certains groupes de substances chimiques évoquées dans cet ouvrage.

Table des matières

Remerciements.....	III
Avant-propos.....	XVII

Chapitre 1

Qu'entend-on par écologie, écochimie et sciences de l'environnement ?

1. L'écologie : sa définition et ses concepts fondamentaux	2
1.1. Définition	2
1.2. Place de l'écologie parmi les autres disciplines biologiques	2
2. Qu'entend-on par sciences de l'environnement ?	5
2.1. Disciplines propres aux sciences environnementales.....	6
2.2. Chimie, écologie et sciences environnementales	7
3. Le développement durable.....	8
3.1. La notion de développement durable	8
3.2. Rôle de l'économie « moderne » dans la crise écologique globale	10
3.3. Industrie et développement durable	13
3.3.1. Actions des entreprises industrielles en faveur d'un développement durable	13
3.3.2. Place de l'écochimie dans une perspective de développement durable.....	14
3.3.3. Actions internationales et nationales dans l'industrie chimique pour un développement durable	15
4. Crise globale de l'environnement et ressources naturelles.....	16
4.1. Ressources naturelles et développement durable	16
4.1.1. Définition d'une ressource naturelle.....	17
4.1.2. Ressources non renouvelables et renouvelables	18
4.2. Principes relatifs à l'utilisation des ressources naturelles dans la perspective d'un développement durable	20

Chapitre 2

Origine, nature et évolution de l'écosphère

1. Structure et composition chimique de la Terre	25
1.1. Structure géophysique de la Terre	26
1.2. Constitution géochimique de la Terre	27

2. Écosphère et biosphère.....	29
2.1. La notion d'écosphère.....	29
2.2. La notion de biosphère.....	31
2.2.1. Définition de la biosphère.....	31
2.2.2. Structure de la biosphère.....	32
2.3. Écosphère et biogenèse.....	32
2.3.1. Conditions astrophysiques de la formation d'une écosphère ...	33
2.3.2. Formation de la biosphère.....	35
2.3.3. La biogenèse.....	43
2.4. La différenciation et l'évolution de la biosphère.....	45
2.4.1. L'apparition des eucaryotes.....	47
2.4.2. La différenciation des organismes supérieurs – plantes et animaux – et la colonisation des continents.....	48
2.5. Gaïa et l'avenir de la biosphère.....	53

Chapitre 3

Rappel des notions d'écologie structurale et fonctionnelle

1. La notion d'écosystème.....	55
1.1. Définition de l'écosystème.....	56
1.2. Organisation fonctionnelle des écosystèmes.....	58
1.2.1. Origine du flux d'énergie dans la biosphère : la photosynthèse.....	60
1.2.2. Flux de l'énergie et cycle de la matière dans les écosystèmes...	63
2. La notion de facteur écologique et de variable écologique fondamentale.....	64
2.1. Classification des facteurs écologiques.....	64
2.2. Notion de variable écologique fondamentale.....	66
2.2.1. La matière.....	66
2.2.2. L'énergie.....	68
2.2.3. L'espace.....	70
2.2.4. Le temps.....	72
2.2.5. La biodiversité.....	73

Chapitre 4

Causes et modalités de pollution de l'écosphère par les substances chimiques

1. Les substances chimiques dans les écosystèmes.....	79
1.1. Définition des substances chimiques.....	79
1.2. Comportement des substances dans les écosystèmes et risque chimique.....	79
2. Définition, principales causes et classification des pollutions.....	81
2.1. Qu'entend-on par pollution ?.....	83
2.2. Définition des pollutions.....	84
2.3. Pollutions et nuisances.....	85
2.4. Classification des pollutions.....	85
3. Causes et importance de la pollution de l'écosphère.....	88

3.1. Production d'énergie et pollutions	89
3.1.1. L'utilisation des combustibles fossiles, source majeure de pollutions	90
3.1.2. L'énergie nucléaire.....	95
3.1.3. Pollutions et nuisances associées à toute production d'énergie	97
3.2. Les activités industrielles.....	98
3.2.1. La métallurgie et les industries extractives afférentes	98
3.2.2. L'industrie chimique moderne	101
3.3. L'agriculture intensive	102
3.3.1. Les engrais chimiques	102
3.3.2. Les pesticides.....	104
3.4. Les déchets.....	105
3.4.1. Définition des déchets.....	106
3.4.2. Principaux types de déchets.....	107
4. La dispersion planétaire des polluants	111
4.1. Des pollutions régionales à une pollution globale	112
4.2. Pollutions et équilibres écologiques globaux.....	113

Chapitre 5

Dispersion et circulation des substances chimiques dans l'environnement

1. Circulation atmosphérique des substances chimiques.....	117
1.1. Structure physico-chimique de l'atmosphère	118
1.1.1. Structure altitudinale de l'atmosphère	118
1.1.2. Composition chimique de l'air	121
1.2. Processus de transfert des substances chimiques dans l'atmosphère	123
1.2.1. Mécanismes généraux de la circulation atmosphérique	123
1.2.2. Mécanismes physico-chimiques du passage dans l'air des substances naturelles et des polluants	127
1.2.3. Le transport à distance des aéropolluants.....	130
1.3. Devenir des substances chimiques dans l'atmosphère.....	132
1.3.1. Transformations physico-chimiques des substances introduites dans l'atmosphère.....	132
1.3.2. Temps de résidence.....	133
1.3.3. Mesure de la concentration des polluants de l'air	136
1.4. Pollutions et mésoclimats	139
1.4.1. Dôme de pollution urbaine.....	139
1.4.2. Inversion de température et <i>smogs</i>	140
2. Transfert des substances chimiques de l'atmosphère vers les sols et les eaux.....	142
2.1. Transfert des polluants de l'atmosphère vers la surface de l'écosphère	144
2.2. Transfert des polluants de l'atmosphère vers l'hydrosphère et les sols	145
2.2.1. Loi et constante de Henry	146

2.2.2. La notion de fugacité : modèles de dispersion dans l'environnement.....	148
2.2.3. Cycle de l'eau et transport des substances chimiques naturelles ou polluantes.....	152
3. Incorporation des polluants dans la biomasse	153
3.1. Influence de la dégradabilité.....	154
3.1.1. Principaux processus de dégradation des polluants	154
3.1.2. Exemples de processus de dégradation abiotiques.....	155
3.1.3. Mécanismes généraux des processus de dégradation biotiques	157
3.2. Bioaccumulation et bioconcentration.....	160
3.2.1. Notion de biodisponibilité	160
3.2.2. La bioaccumulation.....	162
3.2.3. La bioconcentration.....	162
3.2.4. Causes physico-chimiques de la bioconcentration : la notion de K_{ow}	163
3.3. Existence de concentrateurs biologiques.....	168
3.3.1. Bioconcentration dans les organismes terrestres	168
3.3.2. Bioconcentration dans les organismes aquatiques	169
3.4. Circulation des polluants dans les réseaux trophiques	170
3.4.1. Bioamplification dans les réseaux trophiques aquatiques	172
3.4.2. Bioamplification dans les réseaux trophiques terrestres	175
3.4.3. Principales modalités de circulation des polluants dans les réseaux trophiques	179

Chapitre 6

L'atmosphère

1. Principales substances naturelles et/ou polluantes présentes dans l'air	183
1.1. Les dérivés gazeux.....	186
1.1.1. Les dérivés du carbone	186
1.1.2. Les dérivés de l'azote.....	200
1.1.3. Les dérivés du soufre	206
1.2. Les « aérosols » : structure et rôle dans la pollution atmosphérique.	211
1.2.1. Origine des aérosols	211
1.2.2. Les particules solides.....	213
1.2.3. Les brouillards	215
1.2.4. Devenir des aérosols dans l'atmosphère	218
1.3. Les xénobiotiques dans l'air des locaux d'habitation et professionnels	219
1.3.1. L'amiante	221
1.3.2. Le monoxyde de carbone.....	223
1.3.3. Les COV.....	223
1.3.4. La fumée de tabac	224
1.3.5. Le peroxyde d'azote et le dioxyde de soufre.....	225
1.3.6. Les aéroallergènes particuliers	225
2. Physico-chimie des polluants atmosphériques.....	226
2.1. Processus conduisant à la formation de radicaux libres et d'ozone ...	226

2.1.1. Les radicaux libres dans l'atmosphère	227
2.1.2. Formation de l'ozone atmosphérique	228
2.2. Rôle des brouillards dans la formation de polluants secondaires et tertiaires	238
2.3. Exemples de réactions induisant la formation de polluants secondaires	240
2.3.1. Les photo-oxydants	240
2.3.2. Processus de formation des pluies acides	246
3. Pollutions atmosphériques d'échelle globale	249
3.1. Les précipitations acides	249
3.2. La destruction de la « couche » d'ozone	251
3.2.1. Importance et évolution dans le temps des « trous » d'ozone..	252
3.2.2. Mécanismes de formation du « trou » d'ozone	253
3.2.3. La destruction de l'ozone stratosphérique aux moyennes latitudes	259
3.2.4. L'accroissement du rayonnement ultraviolet au niveau du sol et ses conséquences	260
3.3. Gaz de serre et changements climatiques globaux	261
4. La lutte contre la pollution atmosphérique	261
4.1. Les normes de qualité de l'air	262
4.2. Prévention et lutte contre la pollution atmosphérique	262
4.2.1. Prévention de la pollution atmosphérique	263
4.2.2. La lutte contre la pollution atmosphérique	264

Chapitre 7

Les sols

1. Notions de physico-chimie des sols	269
1.1. Caractères physiques des sols	271
1.1.1. Texture des sols	271
1.1.2. Structure des sols	273
1.2. Facteurs chimiques des sols	274
1.2.1. Constitution chimique des sols	274
1.2.2. Hygrométrie des sols	278
1.2.3. pH des sols	280
1.2.4. Éléments minéraux	283
2. Principales causes d'altérations et de pollution des sols	288
3. Pollution des sols par les activités agricoles	290
3.1. Les engrais	290
3.1.1. Principaux types d'engrais chimiques	291
3.1.2. Importance de la pollution des sols par les fertilisants	292
3.1.3. Conséquences écologiques et toxicologiques de la pollution des sols par les fertilisants	294
3.2. Les pesticides	295
3.2.1. Les principaux groupes de pesticides	295
3.2.2. Importance de l'usage des pesticides dans le monde	323
3.2.3. Conséquences écologiques de la contamination des sols par les pesticides	327

4. Pollution des sols d'origine industrielle ou domestique.....	327
4.1. Les déchets et les décharges.....	328
4.1.1. La gestion des déchets	329
4.1.2. Le recyclage	346
4.2. Pollution des sols par les retombées d'aéropolluants.....	347
4.2.1. Retombées de particules produites par les activités industrielles et la circulation des véhicules à moteur	347
4.2.2. L'incinération des ordures et des déchets industriels.....	349
4.2.3. Nombre et localisation des sites de sols pollués par les activités industrielles	350
4.2.4. Le commerce international des déchets.....	354
5. Principales substances non pesticides polluant les sols	356
5.1. Les métaux dans les sols.....	356
5.1.1. Les éléments toxiques dans les sols et les écosystèmes terrestres	360
5.1.2. La contamination des réseaux trophiques terrestres par des éléments toxiques.....	369
5.1.3. La contamination des chaînes trophiques de l'homme par des éléments toxiques.....	371
5.2. Hydrocarbures et solvants chlorés dans les sols	371
5.2.1. Les hydrocarbures	371
5.2.2. Les solvants chlorés.....	373
5.3. Les POP dans les sols.....	374
6. La lutte contre la pollution des sols	375
6.1. Mesures réglementaires destinées à la protection des sols	375
6.2. La décontamination des sols pollués	377
6.2.1. Procédés passifs d'assainissement des sols.....	377
6.2.2. Procédés actifs de dépollution des sols.....	378
6.2.3. Procédés physico-chimiques.....	379
6.2.4. Procédés biologiques.....	382

Chapitre 8

Les eaux continentales et marines

1. Notions générales sur la physico-chimie des eaux naturelles	387
1.1. Structure et propriétés physiques de l'eau.....	387
1.1.1. Densité.....	388
1.1.2. Température.....	390
1.1.3. Tension superficielle et viscosité.....	392
1.1.4. Solubilité des substances chimiques dans l'eau	393
1.2. Caractéristiques chimiques des eaux naturelles.....	399
1.2.1. Salinité	399
1.2.2. pH des eaux.....	402
1.2.3. Teneur en oxygène dissous	408
1.2.4. Potentiel redox.....	412
2. Pollution des eaux continentales	417
2.1. Les principaux polluants des eaux.....	418
2.2. Pollution des eaux par des matières organiques fermentescibles.....	419
2.2.1. Notion de DBO.....	420

2.2.2. Notion de DCO	423
2.3. La pollution des eaux par les POP	424
2.3.1. Les polychlorobiphényles (PCB)	424
2.3.2. Les insecticides organochlorés	429
2.3.3. Les dibenzodioxines (PCDD) et les dibenzofurannes (PCDF) polychlorés	431
2.3.4. Pollution par les chlorophénols	439
2.3.5. Mesure générale de la pollution des eaux par les POP : la somme AOX.....	440
2.3.6. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	440
2.4. Pollution par les détersifs	444
2.4.1. Les savons	444
2.4.2. Les tensioactifs synthétiques	445
2.4.3. Impact écologique des détersifs	448
2.5. Pollution des eaux par les activités agricoles	449
2.5.1. La pollution par les engrais chimiques	449
2.5.2. La pollution des eaux par les pesticides.....	459
2.5.3. Conséquence écotoxicologique et pour l'hygiène publique de la pollution des eaux par les pesticides.....	465
2.6. Pollution des eaux par les métaux toxiques	465
2.6.1. Pollution des eaux par le mercure	465
2.6.2. Pollution des eaux par le plomb	469
2.6.3. Pollution des eaux par le cadmium	470
2.6.4. Pollution des eaux par les autres métaux toxiques	471
3. Les eaux océaniques	473
3.1. Composition chimique de l'eau de mer	473
3.2. Pollution de l'océan par les hydrocarbures.....	475
3.2.1. Modalités physico-chimiques de pollution des eaux marines par le pétrole.....	475
3.2.2. Impact écologique de la pollution de l'océan par le pétrole	479
3.3. Pollution de l'océan par les polluants xénobiotiques	485
3.4. Pollution des eaux marines côtières.....	488
3.4.1. Pollution par les MOF	488
3.4.2. Pollution par les nutriments : les proliférations d'algues	490
3.4.3. Pollution des eaux marines par les pesticides.....	491
3.4.4. Le problème des phycotoxines.....	491
3.4.5. Pollution par l'étain	493
4. Prévention et lutte contre la pollution des eaux	494
4.1. Mesures réglementaires destinées à la protection des eaux	494
4.1.1. Législation et réglementation relatives à la protection des eaux et des écosystèmes aquatiques	494
4.1.2. Normes de qualité des eaux.....	496
4.1.3. La protection des eaux destinées à la consommation humaine	498
4.2. Le traitement des eaux polluées continentales et littorales	502
4.2.1. L'épuration des eaux résiduelles des collectivités urbaines.....	503
4.2.2. La potabilisation	514
4.2.3. L'épuration des effluents industriels	522

Chapitre 9

**Les cycles biogéochimiques des éléments biogènes
et des xénobiotiques**

1. Le flux de l'énergie et le cycle de la matière dans les écosystèmes.....	529
2. Cycles biogéochimiques des éléments biogènes	532
2.1. Le cycle du carbone et ses perturbations anthropogéniques	535
2.1.1. Prévisions sur l'évolution de la teneur en CO ₂ atmosphérique au cours du XXI ^e siècle	539
2.1.2. Quantification du cycle du carbone et de ses perturbations par l'homme	540
2.1.3. Devenir de l'excès de CO ₂ rejeté dans l'atmosphère par l'homme	544
2.2. Le cycle de l'azote et ses perturbations anthropogéniques.....	547
2.2.1. Le cycle de l'azote dans les conditions naturelles	547
2.2.2. Perturbations anthropogéniques du cycle de l'azote	554
2.3. Le cycle du soufre	558
2.4. Le cycle du phosphore	561
2.4.1. Perturbation du cycle du phosphore.....	562
2.4.2. Causes de la perturbation du cycle du phosphore.....	564
2.5. Cycle de l'arsenic.....	564
2.5.1. Les sources et les flux naturels d'arsenic dans la biosphère	564
2.5.2. Perturbation du cycle de l'arsenic.....	565
2.5.3. Perturbation du cycle du zinc	567
3. Changements globaux induits par la perturbation des cycles biogéochimiques majeurs	570
3.1. L'effet de serre	570
3.1.1. Notion de gaz de serre	570
3.1.2. Effets des gaz de serre sur les températures globales	572
3.2. Autres facteurs atmosphériques contrôlant le climat au niveau du sol	574
3.2.1. La nébulosité.....	574
3.2.2. La turbidité atmosphérique	574
3.2.3. Les variations de l'activité solaire	575
3.3. Principales autres perturbations que les rejets de gaz de serre susceptibles d'agir sur les climats	576
3.3.1. Rejets dans l'atmosphère de particules accroissant l'absorption du rayonnement incident	576
3.3.2. Action sur l'albedo.....	577
3.3.3. La pollution thermique de la biosphère	577
3.4. Prévisions des modifications climatiques provoquées par l'action de l'homme	578
3.4.1. Les principaux modèles climatiques	579
3.4.2. Modifications climatiques prévisibles pour le XXI ^e siècle d'après les modèles climatiques.....	580
3.4.3. Effets régionaux du changement climatique	584
4. Cycles biogéochimiques des éléments xénobiotiques	585
4.1. Perturbation du cycle du plomb.....	585

4.1.1. Le cycle biogéochimique du plomb dans les conditions naturelles	585
4.1.2. Perturbations du cycle biogéochimique du plomb par l'action de l'homme	586
4.2. Perturbation du cycle du mercure	596
4.2.1. Flux naturels de mercure dans les principaux compartiments de la biosphère.....	597
4.2.2. Perturbations du cycle biogéochimique du mercure par l'action de l'homme	600
4.3. Perturbation du cycle du cadmium	608
4.3.1. Cycle biogéochimique du cadmium dans les conditions naturelles.....	608
4.3.2. Perturbations du cycle biogéochimique du cadmium par l'action de l'homme	610
4.3.3. Incorporation du cadmium dans les réseaux trophiques.....	611
5. Conséquences écologiques générales de la pollution par les éléments toxiques.....	614
6. Cycles biogéochimiques des polluants organiques persistants	616
6.1. Cycle biogéochimique des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	616
6.2. Cycles biogéochimiques des pesticides organochlorés.....	618
6.3. Cycle biogéochimique des dioxines (PCDD) et des polychlorodibenzofurannes (PCDF).....	621
6.3.1. Modalités de dispersion et persistance des PCDD et des PCDF dans l'environnement.....	622
6.3.2. Contamination des réseaux trophiques par les PCDD et les PCDF.....	622
6.3.3. Devenir des dioxines dans les biotopes terrestres et aquatiques	624

Chapitre 10

Les radionucléides dans l'environnement

1. Notions fondamentales sur les rayonnements.....	625
1.1. La radioactivité	625
1.1.1. Période d'un radioélément	628
1.1.2. Les unités de radioactivité.....	630
1.2. Caractéristiques physico-chimiques de la radioactivité et ses implications biologiques.....	630
1.3. La radioactivité naturelle dans l'environnement	634
2. Notions résumées de radiobiologie	636
2.1. Principaux types d'effets biologiques des radiations ionisantes	636
2.2. Radiosensibilité comparée des êtres vivants aux doses létales	638
2.3. Effets des doses sublétales.....	640
2.3.1. Effets sur la fécondité.....	641
2.3.2. Effets mutagènes et cancérogènes	642
2.3.3. Les doses d'exposition aux radiations des populations humaines	643
2.3.4. Le problème du radon dans l'environnement de l'homme.....	645

2.4. Comportement des radionucléides dans les écosystèmes.....	647
3. L'énergie nucléaire.....	650
3.1. L'énergie de fission.....	651
3.1.1. Les réacteurs nucléaires civils actuels.....	651
3.1.2. Le cycle du combustible.....	661
3.1.3. Le problème des déchets.....	664
3.2. L'énergie de fusion.....	667
3.2.1. Notions fondamentales propres à la fusion.....	667
3.2.2. Les réacteurs de fusion.....	669
4. L'accident de Tchernobyl.....	670
4.1. Causes et importance de l'accident.....	670
4.2. Conséquences pour les populations humaines de l'accident de Tchernobyl.....	671
4.3. Effets de l'accident de Tchernobyl sur les écosystèmes.....	674
5. Contexte environnemental et économique propre et développement de l'énergie nucléaire.....	677

Chapitre 11

Les alternatives aux combustibles fossiles

1. Les énergies naturelles renouvelables.....	684
1.1. L'énergie solaire.....	685
1.1.1. Intensité du flux solaire.....	686
1.1.2. Principales modalités de captation de l'énergie solaire.....	688
1.2. L'énergie éolienne.....	695
1.2.1. Puissance effective d'une éolienne.....	697
1.2.2. Limitations de l'énergie éolienne.....	699
1.2.3. État actuel de l'utilisation de l'énergie éolienne.....	703
1.3. Autres énergies renouvelables.....	704
1.3.1. L'énergie des mers.....	704
1.3.2. La biomasse naturelle.....	705
2. La géothermie.....	706
3. Les nouveaux carburants.....	709
3.1. Les supercarburants sans plomb.....	709
3.1.1. L'indice d'octane des carburants.....	709
3.1.2. Les nouveaux antidétonants.....	710
3.2. Gaz de pétrole et gaz naturel.....	712
3.2.1. Gaz de pétrole liquéfié (GPL).....	712
3.2.2. Gaz naturel comprimé.....	713
3.3. Les alcools carburants : méthanol et éthanol.....	714
3.3.1. Le méthanol.....	714
3.3.2. L'éthanol.....	716
3.4. Les gazoles « verts ».....	716
3.5. Les biocarburants.....	718
3.5.1. La production actuelle des biocarburants.....	718
3.5.2. Bilan écoénergétique et économique des biocarburants.....	719
3.5.3. Quel avenir pour les biocarburants ?.....	723

4. L'hydrogène	729
4.1. Production et stockage de l'hydrogène.....	729
4.2. Stockage et transport de l'hydrogène	731
4.3. Usage de l'hydrogène comme combustible	733
4.4. Usage de l'hydrogène comme source d'énergie dans les piles à combustibles	734
5. Les véhicules électriques.....	737
6. Les véhicules hybrides	741

Chapitre 12

La chimie « verte »

1. Origines et définition de la « chimie verte »	743
2. Approches fondamentales de la « chimie verte »	746
3. Évaluation et réduction de la production des substances nocives	748
3.1. Réglementations sur l'évaluation du risque chimique.....	748
3.1.1. Procédure d'estimation de l'impact environnemental potentiel des substances chimiques	749
3.1.2. La réglementation REACH.....	750
4. Réduction des quantités de matières utilisées et de la densité énergétique dans l'industrie chimique	751
4.1. Analyse du cycle de vie et gestion environnementale	753
4.2. Mise en œuvre de la « chimie verte » dans la gestion environnementale intégrée pour un développement durable.....	756
4.3. Principales démarches de « chimie verte » dans la synthèse industrielle de molécules	758
4.3.1. L'économie d'atomes	758
4.3.2. L'économie d'étapes	761
4.3.3. Recherche de réactions de synthèse réduisant l'impact environnemental.....	761
4.3.4. Élimination des solvants organiques dans les synthèses chimiques.....	761
4.4. Exemples concrets de synthèses fondées sur les principes de la chimie verte	762
5. Recyclage.....	766
5.1. Modalités de mise en œuvre du recyclage	767
5.2. Exemples de recyclage de matériaux prépondérants dans les déchets municipaux.....	771
5.2.1. Le recyclage des matières plastiques.....	771
5.2.2. Le recyclage des pneus usagés.....	775
5.2.3. Le recyclage du papier	775
Bibliographie.....	777
Index.....	791

Avant-propos

La pollution de la biosphère par d'innombrables substances chimiques, naturelles ou de synthèse, introduites dans ses divers compartiments et pour certaines même, bien au delà, dans l'écosphère, constitue de nos jours une des causes majeures de la crise globale de l'environnement.

La chimie et les sciences de la Terre sont concernées à juste titre par l'étude des modalités d'introduction des substances naturelles dans les biotopes terrestres ou aquatiques et éventuellement par celles de leur pollution. Elles sont aussi impliquées dans l'évaluation de l'importance quantitative des stocks et des flux de ces dernières dans et entre les compartiments de la biosphère, ainsi que dans celle des mécanismes par lesquels elles circulent à diverses échelles spatiales depuis le micro-habitat jusqu'à l'écosphère toute entière et y subissent d'éventuelles transformations et dégradations.

Toutefois les sciences biologiques sont aussi au moins autant partie prenante dans ces recherches dans la mesure où les communautés d'êtres vivants sont directement concernées par les substances naturelles et/ou affectées par les polluants.

Parmi ces dernières sciences, tel est plus particulièrement le cas de l'Écotoxicologie, car la quasi totalité des composés de synthèse et un très grand nombre de substances naturelles sont toxiques pour les êtres vivants. Ainsi l'Écotoxicologie correspond à la discipline biologique dont l'objet est l'étude de la pollution des écosystèmes par les substances toxiques et celle des conséquences qui en résultent pour les organismes, les populations et les communautés qui les peuplent ainsi que pour le fonctionnement des écosystèmes pris dans leur ensemble.

En amont de l'Écotoxicologie se place l'Écochimie qui, elle, étudie les origines, la présence et la dynamique des substances chimiques dans l'écosphère ainsi que les mécanismes physico-chimiques et/ou biotiques qui régissent leur circulation entre les divers compartiments des écosystèmes tant terrestres qu'aquatiques. Un des domaines particulièrement important et spécifique de l'Écochimie tient précisément dans l'écodynamique des contaminants, qu'il s'agisse de substances minérales, en particulier d'éléments trace ou de polluants organiques. L'Écochimie

est donc particulièrement concernée par la mise en évidence des variations des facteurs physico-chimiques dans les systèmes biologiques complexes et de leur interaction avec les processus biotiques qui contrôlent la dynamique réactionnelle, les transformations, la dispersion et la mobilité, enfin la biodisponibilité des substances chimiques qu'elles soient naturelles ou qu'il s'agisse de polluants artificiels. Il apparaît donc que le domaine le plus spécifique de l'Écochimie est l'étude de l'écodynamique des contaminants et que certaines de ses préoccupations, comme l'étude de la biodisponibilité, se placent à son interface avec l'Écotoxicologie.

À l'image de ce que l'on observe de façon générale dès que l'on aborde le problème de la place d'une discipline présentant une dimension écologique, une confusion s'installe entre écologie et environnement. En conséquence, l'Écochimie est donc très généralement prise, de façon selon nous impropre, comme synonyme de Chimie de l'environnement. Nous retrouvons ici une confusion de terme, mais aussi conceptuelle, analogue entre celle qui existe trop souvent entre Écotoxicologie¹ et Toxicologie de l'environnement.

En réalité, l'Écochimie occupe un domaine distinct de celui de la Chimie environnementale même s'il existe divers « recouvrements » entre ces deux disciplines, en particulier dans le domaine des applications, car elle emprunte nécessairement dans sa dimension chimique les concepts et les méthodologies propres à cette science.

La Chimie de l'environnement² a pour objet majeur de déterminer au plan quantitatif les concentrations dans les flux et les stocks des substances chimiques sensu lato – au delà même de la biosphère – dans l'écosphère prise dans son ensemble. Toutefois, elle porte une attention particulière aux polluants dans l'environnement de l'homme avec une part de variabilité importante dans les limites propres à ce dernier car l'échelle des approches environnementales, bien qu'elle concerne dans la majorité des cas le strict milieu urbano-industriel, peut aller jusqu'à celle de la planète toute entière ! Par ailleurs, la Chimie de l'environnement s'intéresse aux polluants dans l'environnement et aux modalités par lesquelles ils contaminent les êtres vivants aux divers niveaux d'organisation inférieurs, bien en deça de celui des systèmes écologiques, qui figurent parmi les plus réductionnistes de l'organisation biologique, y inclus l'échelle moléculaire.

La différence majeure de l'Écochimie avec la Chimie de l'environnement tient donc en ce que la première peut se définir très simplement comme l'étude des dimensions écologiques des problèmes découlant de la présence des substances chimiques naturelles ou synthétiques dans les écosystèmes. Sa définition est donc homologue par rapport à la Chimie de l'environnement de celle de l'Écotoxicologie versus la Toxicologie environnementale.

1. Nous avons largement analysé ces problématiques dans le chapitre introductif de notre ouvrage *Précis d'Écotoxicologie*, Masson, 1992 et de façon encore plus approfondie dans notre *Introduction à l'Écotoxicologie*, Lavoisier Tec & Doc, 2007.

2. Il existe de nombreux ouvrages de Chimie de l'environnement. Parmi ces derniers, nous conseillerons vivement l'excellent *Chimie de l'environnement* de C. Bliefert et R. Perraud, Ed. De Boeck, Bruxelles, 2009.

Les origines de l'Écochimie (autrefois dénommée Chimie écologique) se situent dans la première moitié du XX^e siècle avec une extension rapide de l'étude des substances naturelles tant minérales qu'organiques dans les habitats terrestres ou aquatiques. Il faut rappeler à ce sujet que la dimension chimique des recherches sur les grands cycles biogéochimiques est l'un des domaines majeurs spécifiques de l'Écochimie.

Un autre domaine de l'Écochimie qui a connu un grand développement au cours du siècle dernier a été celui des substances naturelles bioactives. Cette étude s'est placée tant au niveau de l'écophysiologie et de l'Écologie des populations (cas des phéromones par exemple), qu'à celui de la toxicologie (et parfois de l'écotoxicologie) dans le cas de substances pharmacologiques ou de poisons (alcaloïdes végétaux, venins animaux par exemple).

Ultérieurement, dans les années 1960, quand ont commencé à émerger les problématiques liées aux pollutions résultant de diverses activités industrielles, ces dernières, outre les questions qui relèvent de la chimie de l'environnement, ont bien naturellement été intégrées au domaine d'étude propre à l'Écochimie³. En effet, il est alors apparu que les émissions de polluants dans l'air, les eaux et les sols excédaient déjà largement les capacités naturelles d'auto-épuration spontanée des écosystèmes naturels et de l'espace rural, à tout le moins dans les pays industrialisés situés très majoritairement dans l'hémisphère Nord⁴ et que s'observait une contamination croissante des êtres vivants par ces dernières. Ces altérations ont donc provoqué des conséquences qui représentent une des dimensions majeures, mais pas unique, de la crise écologique globale. Il existe donc de nombreuses préoccupations communes entre Écochimie et Chimie de l'environnement. Ces dernières tiennent en ce que les pollutions ne se limitent pas au strict milieu urbain, où la majorité d'entre elles sont émises, mais affectent aussi l'espace rural⁵, donc les agro-écosystèmes, et bien au delà la biosphère toute entière. L'étude du comportement des polluants dans les écosystèmes relève donc intrinsèquement de l'Écochimie. En outre nous distinguerons une Écochimie environnementale du fait que cette dernière concerne de façon spécifique les dimensions écologiques propres au problème des substances chimiques polluantes dans les écosystèmes naturels ou modifiés par l'homme ainsi que dans les habitats artifi-

3. Ces problématiques n'avaient alors pas échappé à certains représentants des industries chimiques en particulier à des ingénieurs et des chercheurs auxquels il était apparu évident que l'interaction entre les rejets industriels et des sous-produits de synthèse et l'environnement de l'homme soulevait des problèmes pas seulement chimiques mais tout autant du domaine de l'Écologie. Ainsi, l'association « Chimie Écologie » avait été fondée au début des années 1970 par un ingénieur de Rhône-Poulenc, Pierre Rajot.

4. Rappelons que dans l'hémisphère sud, certes alors majoritairement sous-développé, l'Argentine, l'Australie et même la RSA figuraient déjà, et parfois de longue date, parmi les pays industrialisés.

5. Ces dernières sont soit spécifiques de l'espace rural telles celles dues à l'usage de substances agro-chimiques, soit importées comme l'ozone troposphérique généré à partir de polluants émis en milieu urbain.

ciels qu'il a créé, parfois dénommés « écosystème urbain », propres à la civilisation contemporaine.

Au cours des deux dernières décennies, l'Écochimie a connu un développement rapide, stimulée par les recherches sur les causes, les modalités et les conséquences des pollutions ainsi que sur la mise au point de techniques permettant d'y remédier et de les prévenir.

En conséquence, l'enseignement de cette discipline, bien qu'il soit très généralement inclus dans ceux de la Chimie de l'environnement ou de l'Écotoxicologie, a connu un développement important. Ce dernier est lié à la création de filières professionnalisantes dans la lutte contre les pollutions chimiques et de façon plus générale dans le domaine de la gestion de l'environnement.

Le présent ouvrage consiste en une synthèse des divers enseignements que nous donnons ou avons donnés depuis quatre décennies dans ce domaine tant dans des universités que dans des écoles d'ingénieurs. Il est plus particulièrement rédigé à partir de nos notes des cours que nous donnons à l'ex-DESS aujourd'hui option « Pollution chimique et Gestion de l'environnement » du Mastère Sciences de l'environnement de l'Université de Paris-Sud à Orsay, ainsi qu'à l'option « Risque chimique » de la licence de Chimie de cette université. Cette rédaction est aussi fondée sur la dimension Écochimie de nos enseignements au DEA national de Toxicologie de l'environnement de l'Université de Metz où nous avons enseigné depuis sa création jusqu'à sa transformation en Mastère 2 au milieu de la dernière décennie.

Nous avons inclus un chapitre de Radioécologie car le problème des radionucléides dans l'environnement présente aussi de façon incontestable une dimension écochimique que nous enseignons dans toutes les formations citées précédemment. Outre la description et l'analyse des phénomènes de pollution, plusieurs chapitres de l'ouvrage tels celui sur les alternatives aux combustibles fossiles, proposent des solutions au problème à la contamination par des polluants de l'air de l'eau ou des sols ainsi qu'à la crise de l'énergie qui lui est associée, qui constituent une cause primordiale de la crise écologique globale.

Cet ouvrage a été conçu comme un livre académique destiné en premier lieu à des étudiants ayant suivi un cursus en Biologie et qui ont intégré des filières de Mastère professionnalisantes en Sciences de l'environnement dans le domaine de la prévention des pollutions et nuisances et/ou dans celui de la lutte contre ces dernières, ainsi que dans la gestion environnementale du risque chimique. Cependant, nous considérons qu'il intéressera aussi un lectorat de chimistes, celui des responsables de l'hygiène et sécurité dans les entreprises et celui des responsables environnement de firmes industrielles et diverses collectivités territoriales. Au-delà, il est susceptible d'intéresser toute personne bénéficiant d'une formation scientifique supérieure qui se sent concernée par les problèmes propres à la pollution des divers habitats terrestres et aquatiques par des polluants de synthèse ou par des substances naturelles dont l'homme modifie la concentration et les flux.

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 polluants, en particulier des pesticides, aux divers niveaux d'organisation biologique. Il a été un expert du Programme des Nations Unies pour l'environnement dans le cadre de la réalisation du registre international des substances potentiellement toxiques. 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'Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources (UICN).

La civilisation industrielle moderne pollue par émission dans l'air, les eaux, et les sols, de substances chimiques naturelles en grandes quantités, mais aussi par rejet d'un nombre croissant de composés de synthèse parfois très toxiques pour le monde vivant. Cette pollution concerne non seulement l'environnement de l'homme, mais bien au-delà l'ensemble de l'écosphère, laquelle crée les conditions permettant l'existence de la vie à la surface de notre planète.

Introduction à l'écochimie – Les substances chimiques de l'écosphère à l'homme traite des problèmes liés à la pollution de l'écosphère et de l'environnement de l'homme, des risques qui en découlent, ainsi que des moyens scientifiques et techniques qui permettraient d'y remédier. L'ouvrage aborde à la fois le problème des polluants artificiels, substances de synthèse créées par la chimie moderne, et celui des substances naturelles (organiques ou inorganiques) par lesquelles l'homme contamine l'écosphère en modifiant par ses activités leur flux et leur distribution dans les écosystèmes terrestres et aquatiques. Sont ainsi successivement développés :

- le **comportement des polluants** dans l'écosphère ;
- leurs **modalités de circulation** ;
- les **transformations biogéochimiques** qu'ils y subissent ;
- les **voies par lesquelles ils contaminent les êtres vivants** (l'air, l'eau ou les sols).

Très complet, l'ouvrage propose ensuite la mise en place de **solutions plus respectueuses de l'environnement**, ceci à travers plusieurs objectifs :

- **préserver** la qualité et la pérennité des habitats terrestres et aquatiques ;
- **lutter** contre la contamination des milieux naturels ;
- **mettre en œuvre** des méthodes de prévention.

Véritable ouvrage de référence, *Introduction à l'écochimie – Les substances chimiques de l'écosphère à l'homme* s'adresse aux ingénieurs et techniciens concernés par la prévention des pollutions, aux responsables environnement des entreprises et collectivités, aux agronomes, aux professions biomédicales, ainsi qu'aux chercheurs et/ou enseignants concernés par les polluants. Il intéressera également les étudiants en sciences de l'environnement ou en écologie, et tous ceux qui s'intéressent aux problématiques scientifiques propres aux pollutions.

978-2-7430-1316-5



9 782743 013165