

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 résiduaires des collectivités urbaines	503
4.2.2. La potabilisation	514
4.2.3. L'épuration des effluents industriels	522

**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