

# Table des matières

<b>Chapitre 10. Élimination des micropolluants</b> . . . . .	<b>1</b>
10.1. Introduction . . . . .	1
10.2. Les pesticides . . . . .	2
10.3. Les produits pharmaceutiques et les résidus industriels . . . . .	4
10.4. Technologies d'élimination des pesticides et des micropolluants émergents . . . . .	12
10.4.1. L'adsorption sur charbon actif . . . . .	13
10.4.1.1. Charbon actif en poudre et charbon actif en micrograin . . . . .	14
10.4.1.2. Paramètres de dimensionnement : choix du charbon . . . . .	17
10.4.2. Ozonation . . . . .	51
10.4.2.1. Cas des pesticides . . . . .	55
10.4.2.2. Cas des résidus de médicaments . . . . .	58
10.4.3. Combinaison ozone-charbon actif . . . . .	66
10.4.3.1. Ozone-charbon actif en poudre (CAP) . . . . .	66
10.4.3.2. O <sub>3</sub> – Charbon actif en grain . . . . .	69
10.4.4. Oxydation chimique avancée . . . . .	71
10.4.4.1. Couplage ozone-péroxyde d'hydrogène (O <sub>3</sub> – H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) . . . . .	72
10.4.4.2. Couplage O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -filtre CAG . . . . .	75
10.4.4.3. Combinaison O <sub>3</sub> – UV et O <sub>3</sub> – H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> – UV . . . . .	76
10.4.4.4. Couplage UV – H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> . . . . .	77
10.4.5. Membranes de nanofiltration et osmose inverse . . . . .	80
10.4.5.1. Corrélation diamètre des pores et réjection . . . . .	81
10.4.5.2. Cas des pesticides . . . . .	83
10.4.5.3. Mécanismes incluant l'exclusion de taille et de charges . . . . .	88
10.4.5.4. Cas des résidus de médicaments . . . . .	90
10.5. Frogbox® : un outil efficace de surveillance et de contrôle . . . . .	95

10.6. Le devenir des micropolluants dans les usines d'eau potable . . . . .	97
10.7. Bibliographie . . . . .	99

## **Chapitre 11. Élimination des composés perfluorés . . . . . 105**

11.1. Propriétés physico-chimiques . . . . .	106
11.2. Présence dans les eaux . . . . .	107
11.3. Réglementation dans les eaux potables . . . . .	108
11.4. Les traitements . . . . .	108
11.4.1. Coagulation-floculation-décantation (ou flottation) . . . . .	108
11.4.2. Oxydation chimique. . . . .	108
11.4.3. Oxydation aux UV . . . . .	109
11.4.4. Charbon actif. . . . .	109
11.4.4.1. Charbon actif en grain (CAG) . . . . .	110
11.4.4.2. Charbon actif en poudre et en micrograin. . . . .	113
11.4.5. Membranes haute pression : nanofiltration et osmose inverse . .	115
11.5. Conclusion . . . . .	120
11.6. Bibliographie . . . . .	121

## **Chapitre 12. Élimination biologique de l'ammoniaque . . . . . 125**

12.1. Principe de la nitrification biologique . . . . .	125
12.2. Paramètres de dimensionnement . . . . .	127
12.2.1. Oxygène dissous. . . . .	127
12.2.2. Vitesse de filtration . . . . .	129
12.2.3. Concentration en $\text{NH}_4^+$ éliminée en fonction de la température ( $^{\circ}\text{C}$ ) . . . . .	129
12.2.4. Charge volumique applicable . . . . .	129
12.2.5. Temps de contact . . . . .	131
12.2.6. Hauteur de matériau. . . . .	131
12.3. Facteurs limitant l'oxygène. . . . .	131
12.3.1. Carbone minéral . . . . .	131
12.3.2. pH . . . . .	132
12.3.3. Température . . . . .	132
12.3.4. Autres éléments . . . . .	133
12.3.5. Lavage des filtres biologiques. . . . .	133
12.4. Mise en œuvre . . . . .	134
12.4.1. Filtration sur sable. . . . .	134

12.5. Biofiltres (procédé Biocarbonate®) . . . . .	137
12.6. Filières de traitement . . . . .	140
12.6.1. Filières avec filtration conventionnelle sable, bicouche ou charbon actif en grain . . . . .	140
12.6.1.1. Cas d'une eau sans micropolluant . . . . .	140
12.6.1.2. Cas d'une eau contenant des micropolluants . . . . .	143
12.6.2. Filières avec des filtres Biocarbonate® . . . . .	143
12.7. Bibliographie . . . . .	146

## **Chapitre 13. Élimination des nitrates . . . . . 149**

13.1. Le traitement biologique . . . . .	150
13.1.1. Les réactions biochimiques . . . . .	151
13.1.2. Formation de nitrites . . . . .	153
13.1.3. Aspect bactériologique . . . . .	154
13.1.4. Description du biofiltre (procédé Biodénit®) . . . . .	154
13.1.4.1. Modalités de lavage des filtres . . . . .	157
13.1.4.2. Dépotage et extraction du biodagène . . . . .	158
13.1.4.3. Réoxygénation . . . . .	158
13.1.4.4. Affinage par filtration . . . . .	158
13.1.5. Les filières de traitement incluant la dénitrification biologique . . . . .	159
13.1.5.1. Cas d'une eau peu turbide comportant des nitrates et des micropolluants . . . . .	159
13.1.5.2. Cas d'une eau peu turbide comportant des nitrates, de la dureté et des micropolluants . . . . .	159
13.1.5.3. Cas d'une eau peu turbide comportant des nitrates et de l'ammoniaque . . . . .	159
13.1.6. Facteurs affectant la dénitrification biologique . . . . .	163
13.1.6.1. pH . . . . .	163
13.1.6.2. Substrat carboné . . . . .	166
13.1.6.3. Phosphore . . . . .	166
13.1.6.4. Température . . . . .	166
13.1.6.5. Matériau . . . . .	166
13.1.7. Paramètres de dimensionnement : charge volumique applicable . . . . .	166
13.1.8. Paramètres de dimensionnement : temps de contact minimum ( $t_c$ min) . . . . .	167
13.1.9. Paramètres de dimensionnement : hauteur du matériau biodagène (m) . . . . .	167

13.1.10. Paramètres de dimensionnement : volume de matériau (m <sup>3</sup> ) . .	168
13.1.11. Traitement partiel . . . . .	168
13.1.12. Boues de lavage des filtres Biodénit® . . . . .	170
13.1.13. Les réactifs . . . . .	170
13.1.13.1. Éthanol . . . . .	170
13.1.13.2. Acide acétique . . . . .	171
13.1.13.3. Phosphore. . . . .	172
13.1.14. Mise en œuvre et exploitation de la dénitrification biologique . .	174
13.2. Le traitement par résines échangeuses d'ions . . . . .	175
13.2.1. Mécanisme général d'échange (procédé Écodénit®) . . . . .	176
13.2.1.1. Phase d'épuisement. . . . .	177
13.2.1.2. Phase de régénération . . . . .	177
13.2.2. Technologie du procédé Écodénit® . . . . .	180
13.2.2.1. Paramètres de dimensionnement : capacité totale utile de la résine (CTU) . . . . .	181
13.2.2.2. Paramètre de dimensionnement : volume minimum de résine . . . . .	182
13.2.2.3. Paramètre de dimensionnement : charge volumique de l'échangeur . . . . .	182
13.2.2.4. Phase de régénération . . . . .	183
13.2.2.5. Volume des éluats . . . . .	184
13.2.2.6. Traitement partiel. . . . .	184
13.2.2.7. Performances . . . . .	185
13.2.2.8. Concentration en chlorures dans l'eau traitée . . . . .	186
13.2.3. Intégration dans une filière de traitement . . . . .	187
13.2.4. Solutions packagées. . . . .	188
13.3. L'élimination des nitrates par les membranes haute pression. . . . .	188
13.4. Bibliographie . . . . .	194

## **Chapitre 14. Élimination des perchlorates . . . . . 199**

14.1. Généralités . . . . .	200
14.2. Principaux procédés d'élimination des ions perchlorates . . . . .	200
14.2.1. Résines échangeuses d'ions . . . . .	201
14.2.1.1. Dispositif expérimental . . . . .	202
14.2.1.2. Résultats des essais en laboratoire . . . . .	205
14.2.1.3. Essais pilotes . . . . .	206
14.2.2. Membranes de nanofiltration . . . . .	208
14.2.2.1. Dispositif expérimental . . . . .	208

14.2.2.2. Résultats . . . . .	210
14.3. Conclusions relatives à l'élimination des perchlorates. . . . .	211
14.4. Bibliographie . . . . .	212

## **Chapitre 15. Décarbonatation . . . . . 215**

15.1. La dureté de l'eau . . . . .	215
15.2. L'alcalinité . . . . .	216
15.3. Indice de Langelier (IL ou LSI) . . . . .	219
15.4. Objectifs de dureté pour l'eau potable . . . . .	220
15.5. Principes généraux de la décarbonatation . . . . .	220
15.5.1. Les principales réactions chimiques avec la chaux et la soude . . . . .	223
15.5.1.1. Avec la chaux . . . . .	223
15.5.1.2. Avec la soude . . . . .	228
15.5.1.3. Avec le carbonate de sodium . . . . .	230
15.5.1.4. Neutralisation du CO <sub>2</sub> . . . . .	231
15.6. Les procédés chimiques de décarbonatation . . . . .	232
15.6.1. Limites du processus et considérations empiriques . . . . .	233
15.7. Les technologies Veolia de décarbonatation. . . . .	234
15.7.1. Clarifloculateur . . . . .	234
15.7.2. Actiflo® Softening . . . . .	237
15.7.2.1. Performances : élimination de la dureté. . . . .	238
15.7.2.2. Élimination du carbone organique dissous . . . . .	239
15.7.3. Multiflo® Softening . . . . .	242
15.7.4. La décarbonatation catalytique . . . . .	247
15.7.4.1. Principe de la nucléation du carbonate de calcium sur un support . . . . .	247
15.7.4.2. Vitesse dans le réacteur . . . . .	253
15.7.4.3. Hauteur de matériau au repos (cas du sable) . . . . .	253
15.7.4.4. Hydraulique des réacteurs . . . . .	254
15.7.4.5. Paramètres dimensionnant pour une décarbonatation catalytique à la chaux . . . . .	256
15.7.4.6. Paramètres dimensionnant pour une décarbonatation catalytique à la soude . . . . .	260
15.7.4.7. Paramètres communs aux deux réactifs alcalins . . . . .	264
15.7.4.8. Facteurs influençant la décarbonatation catalytique. . . . .	267
15.7.4.9. Place de la décarbonatation chimique dans une filière de traitement . . . . .	269

15.7.4.10. Performances et niveaux de garanties . . . . .	271
15.7.4.11. Cas du mitigeage . . . . .	272
15.7.4.12. Élimination du magnésium . . . . .	273
15.7.4.13. Éléments de technologie et équipements du procédé Actina® . . . . .	273
15.7.4.14. Paramètres de fonctionnement et de suivi. . . . .	278
15.8. Procédé Saphira® . . . . .	281
15.9. Décarbonatation à l'aide de membranes haute pression . . . . .	284
15.10. Décarbonatation à l'aide de résines échangeuses d'ions . . . . .	284
15.10.1. Résistance des résines : précautions d'utilisation. . . . .	285
15.10.2. Élimination du $\text{Ca}^{2+}$ et du $\text{Mg}^{2+}$ . . . . .	286
15.10.3. Élimination des bicarbonates. . . . .	287
15.10.3.1. Échange d'ions. . . . .	287
15.10.4. Capacité utile des résines. . . . .	288
15.10.5. Paramètres de fonctionnement. . . . .	288
15.11. Comparatif entre les quatre solutions de décarbonatation présentées . . . . .	290
15.11.1. Avantages et inconvénients des différentes solutions . . . . .	290
15.12. Bibliographie . . . . .	292

## **Chapitre 16. Élimination des métaux . . . . . 295**

16.1. Élimination du fer et du manganèse : généralités . . . . .	295
16.1.1. Présence de fer et de manganèse au niveau de la ressource . . . . .	295
16.1.2. Présence de fer et de manganèse au niveau de la production. . . . .	297
16.1.2.1. Présence de fer et de manganèse au niveau de la distribution . . . . .	297
16.1.2.2. Incidences de ces deux métaux . . . . .	298
16.1.2.3. Au niveau économique. . . . .	298
16.1.3. Aspects réglementaires du fer et du manganèse . . . . .	299
16.1.4. Les traitements du fer et du manganèse . . . . .	300
16.1.4.1. Le traitement du fer : potentiel d'oxydo-réduction – pH . . . . .	301
16.1.4.2. Le traitement du manganèse . . . . .	327
16.2. Élimination de l'arsenic . . . . .	353
16.2.1. Chimie de l'arsenic . . . . .	354
16.2.2. Les traitements de l'arsenic . . . . .	357
16.2.2.1. Les traitements par adsorption sur floes d'hydroxydes . . . . .	357
16.2.2.2. Précipitation à la chaux . . . . .	367
16.2.2.3. Élimination de l'arsenic par adsorption sur matériau solide . . . . .	368
16.2.2.4. Autres traitements. . . . .	380

16.2.2.5. Facteur influençant le choix du procédé : rapport Fe/As dans l'eau brute . . . . .	383
16.2.2.6. Avantages et inconvénients des diverses solutions techniques . . . . .	384
16.3. Élimination du sélénium (Se) . . . . .	386
16.3.1. Chimie du sélénium . . . . .	387
16.3.1.1. Sélénium (6+) . . . . .	387
16.3.1.2. Sélénium (4+) . . . . .	388
16.3.2. Traitements d'élimination du sélénium . . . . .	389
16.3.2.1. Élimination de Se par les traitements de coprécipitation (Fe, Al, Ca(OH) <sub>2</sub> ) . . . . .	389
16.3.2.2. Traitement par adsorption sur support solide. . . . .	391
16.3.2.3. Autres traitements. . . . .	394
16.3.2.4. Traitement biologique . . . . .	395
16.4. Élimination du nickel . . . . .	397
16.4.1. La chimie du nickel . . . . .	397
16.4.2. Traitement d'élimination du nickel (Ni) . . . . .	398
16.4.2.1. Coagulation/floculation et précipitation : électrocoagulation . . . . .	398
16.4.2.2. Décarbonatation et élimination du Ni <sup>2+</sup> . . . . .	399
16.4.2.3. Adsorption sur matériaux . . . . .	401
16.4.2.4. Techniques membranaires. . . . .	402
16.4.2.5. Le procédé Metclean® (Veolia) . . . . .	402
16.5. Bibliographie . . . . .	407
<b>Index . . . . .</b>	<b>415</b>
<b>Sommaire de <i>Traitement de l'eau potable 1</i> . . . . .</b>	<b>417</b>
<b>Sommaire de <i>Traitement de l'eau potable 2</i> . . . . .</b>	<b>419</b>
<b>Sommaire de <i>Traitement de l'eau potable 4</i> . . . . .</b>	<b>421</b>
<b>Sommaire de <i>Traitement de l'eau potable 5</i> . . . . .</b>	<b>423</b>