

# Table des matières

<b>Chapitre 1. Élimination biologique de l'azote . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1. Origines de l'azote. . . . .	2
1.2. Mécanismes biochimiques d'utilisation de l'azote . . . . .	4
1.2.1. Ammonification . . . . .	4
1.2.2. Nitrification . . . . .	7
1.2.3. Dénitritification . . . . .	9
1.2.3.1. Dénitritification hétérotrophe . . . . .	9
1.2.3.2. Dénitritification autotrophe. . . . .	14
1.3. Facteurs influençant la nitrification. . . . .	17
1.3.1. Température . . . . .	18
1.3.2. Taux de croissance . . . . .	19
1.3.3. Oxygène . . . . .	20
1.3.4. pH et alcalinité . . . . .	20
1.3.5. Nutriments . . . . .	21
1.3.6. Oxygène dissous et substrat azoté . . . . .	21
1.4. Nitrification en système à boues activées . . . . .	23
1.4.1. Influence de la charge massique . . . . .	23
1.4.2. Influence de la concentration en MES/MVS dans le bassin . . .	25
1.4.3. Influence de la charge volumique . . . . .	25
1.4.4. Influence de l'âge des boues . . . . .	25
1.4.5. Vitesse de nitrification . . . . .	26
1.4.6. Besoins en O <sub>2</sub> . . . . .	26
1.4.6.1. Bilan azote. . . . .	27
1.4.6.2. Âge des boues minimum nécessaire à la nitrification . . . . .	28

1.4.7. Modèle dynamique de la nitrification . . . . .	29
1.4.7.1. Relations empiriques. . . . .	31
1.5. Dénitrification en boues activées et vitesse de dénitrification . . . . .	32
1.5.1. Zone anoxie spécifique pour une dénitrification . . . . .	36
1.5.2. Estimation de la production de boues en excès. . . . .	37
1.5.3. Ajout de carbone . . . . .	38
1.6. Procédés de nitrification et dénitrification en boues activées. . . . .	39
1.6.1. Pré-dénitrification. . . . .	39
1.6.2. Post-dénitrification . . . . .	39
1.7. Dénitrification autotrophe sur boues activées. . . . .	42
1.7.1. Mécanisme de dénitrification autotrophe sur soufre. . . . .	43
1.7.2. Dénitrification autotrophe en culture libre (boues activées) . . . . .	45
1.7.2.1. Température. . . . .	45
1.7.2.2. pH. . . . .	46
1.7.2.3. Oxygène dissous . . . . .	46
1.7.2.4. Influence du rapport S/N . . . . .	46
1.7.2.5. Influence du rapport S°/X. . . . .	47
1.7.2.6. Influence de l'alcalinité et du rapport TAC/S° . . . . .	48
1.7.2.7. Influence de la température . . . . .	48
1.7.3. Dénitrification autotrophe en biofiltre . . . . .	48
1.7.3.1. Biofiltre immergé. . . . .	48
1.7.3.2. Influence de la charge volumique . . . . .	51
1.7.3.3. Influence de l'alcalinité . . . . .	51
1.7.3.4. Influence du rapport soufre/calcaire. . . . .	51
1.8. Traitement de l'azote par les bactéries anammox . . . . .	55
1.8.1. Caractéristiques d'anammox . . . . .	56
1.8.2. Caractéristiques microbiologiques . . . . .	56
1.8.3. Biochimie de l'oxydation anaérobie de l'ammonium . . . . .	58
1.8.4. Facteurs influençant la croissance des bactéries anammox. . . . .	59
1.8.5. Salinité . . . . .	59
1.8.6. Présence de matière organique et/ou de nutriment. . . . .	60
1.8.7. <i>Candidatus Brocadia</i> et <i>Kuenenia</i> . . . . .	60
1.8.8. Oxygène . . . . .	62
1.8.9. Température . . . . .	62
1.8.10. Concentrations en substrat . . . . .	62
1.8.11. Nitrite . . . . .	63
1.8.12. Ion ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) . . . . .	63
1.8.13. Mécanismes d'inhibition et pH . . . . .	64

---

1.8.14. Mise en œuvre à l'aide des bactéries anammox . . . . .	64
1.8.14.1. Influence du rapport C/N . . . . .	68
1.8.14.2. Influence de la température . . . . .	69
1.8.14.3. Inhibition des réactions des bactéries anammox . . . . .	69
1.8.14.4. Influence du pH . . . . .	69
1.8.15. Procédés d'élimination de l'azote à l'aide des anammox . . . . .	70
1.8.15.1. Procédé DEMON® . . . . .	71
1.8.15.2. Procédé Anita™ Mox . . . . .	72
1.8.15.3. Procédé Paques . . . . .	77
1.8.15.4. Procédé Sharon® . . . . .	77
1.8.16. Applications . . . . .	78
1.8.16.1. Configuration sur la file principale ( <i>mainstream</i> ) . . . . .	78
1.8.16.2. Configuration sur la file secondaire ( <i>sidestream</i> ) . . . . .	80
1.9. MABR : une nouvelle opportunité . . . . .	81
1.10. Conclusion . . . . .	82
1.11. Bibliographie . . . . .	83
<b>Chapitre 2. Élimination du phosphore . . . . .</b>	<b>93</b>
2.1. Le cycle du phosphore . . . . .	93
2.2. Eutrophisation . . . . .	95
2.3. Formes minérales oxydées du phosphore dans les eaux usées . . . . .	96
2.4. Procédés d'élimination du phosphore . . . . .	100
2.4.1. Généralités . . . . .	100
2.4.2. Élimination biologique du phosphore . . . . .	101
2.4.2.1. Système à boues activées . . . . .	102
2.4.2.2. Dimensionnement de la déphosphatation biologique . . . . .	115
2.5. Filières de traitement intégrant la déphosphatation biologique . . . . .	116
2.5.1. Boues activées . . . . .	117
2.5.1.1. Procédé Bardenpho modifié . . . . .	117
2.5.1.2. Procédé Phoredox modifié I . . . . .	117
2.5.1.3. Procédé Phoredox modifié II . . . . .	117
2.5.1.4. Procédé UCT . . . . .	122
2.5.1.5. Procédé UCT modifié . . . . .	122
2.5.1.6. Procédés A/O et A <sup>2</sup> /O (Veolia) . . . . .	122
2.5.1.7. Procédé Biodeniphoph™ . . . . .	123
2.5.2. Biofiltres : introduction de réactifs dans le décanteur primaire . . . . .	125
2.5.3. Autres technologies d'élimination biologique du phosphore . . . . .	125
2.5.3.1. Bioréacteur à membrane (BRM) . . . . .	127
2.5.3.2. Zones humides artificielles . . . . .	128
2.5.3.3. Microalgues/champignons . . . . .	128

2.6. Sélecteurs . . . . .	130
2.6.1. Sélecteur aérobie . . . . .	131
2.6.2. Sélecteur anoxique . . . . .	131
2.6.3. Sélecteur anaérobie . . . . .	132
2.7. Traitement physicochimique. . . . .	134
2.7.1. Bases fondamentales de la précipitation du phosphore . . . . .	135
2.7.1.1. Coagulants métalliques . . . . .	135
2.8. Mise en œuvre des réactifs chimiques . . . . .	153
2.8.1. Points d'injection . . . . .	153
2.8.2. Régulation de l'injection. . . . .	153
2.9. Autres solutions techniques d'élimination du phosphore . . . . .	157
2.9.1. Supports actifs pour l'élimination du phosphore. . . . .	157
2.9.1.1. Les matériaux naturels. . . . .	157
2.9.1.2. Les matériaux de synthèse . . . . .	158
2.9.1.3. Les sous-produits industriels . . . . .	159
2.9.2. Zones humides artificielles . . . . .	160
2.9.3. Échange d'ions . . . . .	160
2.10. Performances générales d'élimination du phosphore. . . . .	161
2.11. Bibliographie . . . . .	162
 <b>Chapitre 3. Clarification . . . . .</b>	 <b>171</b>
3.1. Généralités . . . . .	171
3.1.1. Principe . . . . .	171
3.1.2. Types de clarificateurs . . . . .	172
3.1.2.1. Formes . . . . .	172
3.1.2.2. Reprise des boues . . . . .	172
3.2. Vitesse de sédimentation des particules dans un liquide . . . . .	173
3.2.1. Suspensions diluées. . . . .	173
3.2.2. Particules floculées . . . . .	176
3.2.3. Suspensions concentrées. . . . .	177
3.2.4. Courbes de sédimentation . . . . .	178
3.3. Théorie de la sédimentation . . . . .	180
3.3.1. Loi fondamentale : théorie de Kynch . . . . .	181
3.3.1.1. Relation hauteur/concentration en particules . . . . .	181
3.3.1.2. Autre démonstration (hauteur/concentration) . . . . .	184
3.3.1.3. Détermination géométrique de la surface unitaire. . . . .	185
3.4. Interprétation mathématique des différents types de sédimentation . . . . .	187
3.4.1. Sédimentation libre ou coalescente (zone B, figure 3.2) . . . . .	187

---

3.4.2. Décantation freinée (zone C, figure 3.2) . . . . .	193
3.4.2.1. Méthode de Coe et Clevenger . . . . .	195
3.4.3. Zone de compaction . . . . .	198
3.5. Dimensionnement des clarificateurs . . . . .	198
3.5.1. Différentes approches de dimensionnement . . . . .	202
3.5.2. Sédimentation coalescente (zone B, figure 3.13) . . . . .	203
3.5.3. Zone de sédimentation freinée et clarificateurs à lit de boues (zone C, figure 3.13) . . . . .	207
3.5.4. Zone de compaction des boues (zone D, figure 3.13). . . . .	208
3.5.5. Relation vitesse de sédimentation et hauteur de l'ouvrage . . . . .	212
3.6. Caractéristiques des clarificateurs classiques . . . . .	216
3.6.1. Clarificateurs horizontaux . . . . .	217
3.6.1.1. Dimensionnement . . . . .	220
3.6.1.2. Mise en œuvre . . . . .	221
3.6.2. Clarificateurs cylindriques. . . . .	222
3.6.3. Autres technologies. . . . .	225
3.6.4. Dimensionnement général des clarificateurs conventionnels . .	226
3.6.4.1. Surface . . . . .	226
3.6.4.2. Profondeur. . . . .	226
3.6.4.3. Taux de recirculation . . . . .	227
3.6.4.4. Concentration de la biomasse dans le bassin d'aération . .	228
3.6.4.5. Charge volumique au radier . . . . .	231
3.6.4.6. Charge massique au radier . . . . .	231
3.6.4.7. Temps de séjour de la boue. . . . .	232
3.7. Les clarificateurs lamellaires . . . . .	233
3.7.1. Théorie et principe . . . . .	234
3.7.2. Bases de dimensionnement des clarificateurs lamellaires . . .	237
3.7.2.1. Cas des plaques lamellaires alvéolées (type nid d'abeille) .	237
3.7.2.2. Cas des plaques lamellaires planes . . . . .	238
3.7.2.3. Applications sur les boues activées . . . . .	242
3.8. Dysfonctionnements des clarificateurs. . . . .	244
3.9. Technologies . . . . .	246
3.9.1. Clarificateur Clariflo® (Veolia) . . . . .	246
3.9.2. Clarificateur Rim-Flo® . . . . .	249
3.9.3. Racleur TowBro® . . . . .	250
3.9.4. Décanteur lamellaire : Multiflo® (Veolia) . . . . .	251
3.10. Bibliographie . . . . .	257

<b>Index . . . . .</b>	<b>261</b>
------------------------	------------

<b>Sommaire de <i>Traitement biologique des eaux usées urbaines 1</i> . .</b>	<b>265</b>
---	------------

<b>Sommaire de <i>Traitement biologique des eaux usées urbaines 2</i> . .</b>	<b>267</b>
---	------------

<b>Sommaire de <i>Traitement biologique des eaux usées urbaines 4</i> . .</b>	<b>269</b>
---	------------