

Table des matières

Chapitre 17. Microfiltration et ultrafiltration	1
17.1. L'ultrafiltration et la microfiltration : seuil de coupure	2
17.2. L'ultrafiltration et la microfiltration : matériaux	6
17.2.1. Acétate de cellulose	7
17.2.2. PP (polypropylène)	7
17.2.3. PAN (polyacrylonitrile)	7
17.2.4. PES (et PS) (polyéther sulfone/polysulfone)	7
17.2.5. PVDF (polyvinylidène fluoride)	8
17.3. L'ultrafiltration et la microfiltration : types de membrane	9
17.4. L'ultrafiltration et la microfiltration : mise en œuvre des membranes sous pression	11
17.4.1. Configuration horizontale-verticale	12
17.4.2. Les membranes immergées	17
17.5. Modes de filtration : frontal ou tangentiel	19
17.5.1. Fonctionnement discontinu : filtration-contrelavages	21
17.5.2. Sens de filtration	21
17.5.2.1. Sens de filtration interne-externe	22
17.5.2.2. Sens de filtration externe-interne	22
17.6. Paramètres de dimensionnement : choix de la membrane	22
17.7. Paramètres de dimensionnement : configuration horizontale ou verticale	24
17.8. Paramètres de dimensionnement : flux	25
17.8.1. Flux instantané et flux net	26
17.8.2. Pression transmembranaire (PTM)	31
17.8.2.1. Application aux membranes sous-pression	32
17.8.2.2. Application aux membranes immergées	32

17.8.3. Résistance	33
17.8.4. Perméabilité	33
17.8.5. Principe du calcul de la surface membranaire et des pertes en eaux	35
17.8.6. Les préfiltres	37
17.9. Paramètres de fonctionnement	37
17.9.1. Évolution de la perméabilité	37
17.9.2. Le colmatage	38
17.9.2.1. La polarisation de concentration	39
17.9.2.2. La formation d'un dépôt	39
17.9.2.3. Blocage des pores	39
17.9.2.4. Adsorption	40
17.9.2.5. <i>Feed Fouling Index</i> (FFI)	45
17.9.3. Fréquence et conditions des contrelavages hydrauliques et chimiques	45
17.9.3.1. Contrelavages hydrauliques (air et eau)	46
17.9.3.2. Contrelavages chimiques	49
17.9.4. Fréquence et conditions des nettoyages en place (NEP)	51
17.9.4.1. Nettoyages en place (NEP)	51
17.9.5. L'intégrité des membranes	55
17.9.5.1. Le suivi indirect de l'intégrité	55
17.9.5.2. Le suivi direct de l'intégrité	55
17.10. La place de la microfiltration et de l'ultrafiltration dans une filière de traitement	60
17.10.1. Turbidité et MES	61
17.10.2. COT (et UV254)	61
17.10.3. Algues	62
17.10.4. Fer et manganèse	62
17.10.4.1. Traitement des eaux faiblement turbides exemptes de pesticides, micropolluants et matières organiques	62
17.10.4.2. Traitement des eaux faiblement turbides faiblement chargées en pesticides, micropolluants matière organique (COD < 2,5-3 mg.L ⁻¹)	63
17.10.4.3. Traitement des eaux faiblement turbides fortement chargées en pesticides, micropolluants et/ou matières organiques	64
17.10.4.4. Traitement des eaux fortement turbides fortement chargées en pesticides, micropolluants et MO (COT : 3-14 mg.L ⁻¹)	64
17.10.4.5. Traitement des eaux fortement turbides (ou algues) moyennement chargées en pesticides, micropolluants et/ou MO (COD < 3 mg.L ⁻¹)	66

17.10.4.6. Traitement des eaux à turbidité variable (2-500 NTU) non chargées en pesticides ou MO	67
17.10.4.7. Traitement des eaux faiblement turbides (< 10 NTU en moyenne et < 30 NTU en pointe) faiblement chargées en pesticides ou MO (COD < 3 mg.L ⁻¹)	67
17.11. Combinaison coagulation et membranes d'ultrafiltration	69
17.12. Combinaison charbon actif en poudre et ultrafiltration.	73
17.13. Performances et garanties	74
17.13.1. Turbidité.	74
17.13.1.1. Impact des algues et rendement d'élimination	76
17.13.1.2. Chloration en aval.	80
17.13.1.3. Réduction des pertes en eau	80
17.13.1.4. Abattement des micro-organismes	81
17.13.1.5. Performances et garanties sur les micro-organismes	83
17.13.1.6. Performances attendues avec les membranes immergées.	83
17.13.2. Garanties du fournisseur sur la durée de vie des membranes	84
17.14. Avantages de la microfiltration et de l'ultrafiltration.	85
17.15. L'expérience de Veolia	85
17.16. Annexe : fiches	90
17.17. Bibliographie	105

Chapitre 18. Nanofiltration et osmose inverse 109

18.1. Les membranes	110
18.1.1. Matériaux	110
18.1.1.1. Acétate de cellulose	112
18.1.1.2. Polyamides aromatiques	112
18.1.2. Configurations des éléments de membrane	113
18.2. Principes de fonctionnement et de séparation	117
18.2.1. Principe conceptuel	117
18.2.2. Seuil de coupure du poids moléculaire (MWCO, <i>Molecular Weight Cut-Off</i>)	122
18.3. Filière de traitement incluant des membranes haute pression et paramètres à prendre en compte	125
18.3.1. Les particules et MES.	125
18.3.2. Le comptage de particules	126
18.3.3. La conductivité.	126
18.3.4. Le SDI ou MFI : indices de colmatage.	126
18.3.5. Le SDI.	126
18.3.6. Le MFI	128
18.3.7. Les sels et les métaux.	129

18.3.8. Le colmatage biologique	130
18.3.9. Substances indésirables.	131
18.3.10. Valeurs limites des composés en entrée des membranes haute pression	131
18.4. Paramètres de dimensionnement	132
18.4.1. Température	132
18.4.2. Configuration de mise en œuvre	133
18.4.3. Calcul de la pression osmotique.	135
18.4.4. Diagramme des flux massiques	136
18.4.5. Passage en sels	136
18.4.6. Facteur de concentration	137
18.4.7. Perte de pression hydraulique	137
18.4.8. Tubes de pression et nombre de modules par tube.	138
18.5. Conditionnement chimique de l'eau prétraitée	139
18.5.1. Calcul des indices de saturation et dosage du séquestrant	140
18.5.2. Choix et mise en œuvre du séquestrant	142
18.5.3. Ajustement du pH à l'entrée de membranes	143
18.5.4. Choix et mise en œuvre de l'acide	143
18.5.5. Influence des sulfates	144
18.6. Conception et mise en œuvre.	144
18.6.1. Le prétraitement	144
18.6.2. Les filières de traitement	145
18.6.3. Le poste membranes	148
18.6.3.1. Préfiltration	148
18.6.3.2. Équipements du poste de membranes	149
18.6.3.3. Pompes haute pression	150
18.6.3.4. Configuration des membranes	150
18.6.4. Le post-traitement	154
18.6.4.1. Désinfection UV en aval des membranes.	154
18.6.5. Postes de nettoyage en place.	155
18.6.5.1. Rejet des solutions de nettoyage usages et des rinçages de membranes, préfiltres et divers circuits	156
18.7. Paramètres de fonctionnement et d'exploitation	158
18.7.1. Principes de base	158
18.7.2. Perméabilité	162
18.7.3. Chute de pression longitudinale (ΔP_{fc})	162
18.7.4. Résistance hydraulique	163
18.7.5. Énergie	163
18.7.6. SDI.	164
18.7.7. Les nettoyages chimiques	164

18.7.8. Le devenir des concentrats et des solutions de lavage usées . . .	164
18.7.9. Les méthodes d'évaluation de l'impact des rejets du concentrat en milieu naturel.	166
18.8. Performances des membranes haute pression	170
18.8.1. Matières organiques.	170
18.8.2. Pesticides, résidus de médicaments, perturbateurs endocriniens, résidus industriels	171
18.8.3. Substances toxiques et indésirables diverses	172
18.8.4. Sels.	173
18.8.5. Micro-organismes	174
18.8.6. Performances globales	174
18.9. Garanties de durée de vie	175
18.10. Paramètres affectant les performances des membranes NF	175
18.10.1. Prise en compte du colmatage	177
18.11. Paramètres de suivi et de contrôle : normalisation des données brutes.	178
18.12. L'expérience de Veolia : exemples de filière de traitement	180
18.12.1. Eau de surface n° 1	180
18.12.1.1. Suivi du fonctionnement et performances.	182
18.12.1.2. Caractérisation des dépôts	184
18.12.2. Eau de surface n° 2	185
18.12.3. Eau souterraine n° 1	190
18.12.4. Eau souterraine n° 2	192
18.13. Bibliographie	197

Chapitre 19. Dessalement par osmose inverse 201

19.1. Caractérisation des eaux à traiter	201
19.1.1. Caractéristiques physiques.	203
19.1.1.1. Densité de l'eau de mer	203
19.1.1.2. Matières en suspension (MES)	204
19.1.1.3. Température	204
19.1.1.4. Turbidité	204
19.1.1.5. Indices de colmatage	204
19.1.2. Composition chimique : contenu ionique	210
19.1.2.1. Total des sels dissous.	210
19.1.2.2. Ions spécifiques : fer et manganèse	213
19.1.3. Composition chimique : substances organiques	220
19.1.3.1. Chromatographie en phase liquide.	221
19.1.3.2. Hydrocarbures et produits chimiques industriels	230

19.2. Domaines d'applications	230
19.3. Principe de fonctionnement de l'osmose inverse	230
19.4. Les membranes utilisées en dessalement	233
19.5. Paramètres de dimensionnement	234
19.5.1. Flux	235
19.5.2. Polarisation de concentration	236
19.5.3. Taux de conversion	236
19.5.4. Taux de passage et taux de réjection en sels	237
19.5.5. Influence de la température	238
19.5.6. Détermination du nombre de modules et de tubes de pression.	239
19.6. Mise en œuvre	240
19.6.1. Membranes	240
19.6.2. Tube de pression.	241
19.6.3. Pass	242
19.7. Le prétraitement	243
19.7.1. Sélection du prétraitement	243
19.7.2. Les filières de prétraitement	246
19.7.2.1. Eau de surface faiblement turbide (< 10 NTU), SDI < 25, COT < 2 mg.L ⁻¹ , pas d'algues, pas d'hydrocarbures	246
19.7.2.2. Eau moyennement turbide (< 15 NTU), SDI > 30, COT < 3 mg.L ⁻¹ , peu d'algues, pas d'hydrocarbures.	246
19.7.2.3. Eau moyennement turbide (< 30 NTU), fortement chargée en algues (> 5-200 millions.L ⁻¹), COT > 3 mg.L ⁻¹ , SDI > 33,3, potentiellement des hydrocarbures (1 mg.L ⁻¹).	248
19.7.2.4. Eau fortement turbide (> 50 NTU avec des pointes à 100 NTU), SDI > 33,3, COT > 3 mg.L ⁻¹ , algues (5-20 millions.L ⁻¹)	249
19.8. Préchloration	250
19.8.1. Préchloration et développement de micro et macro-organismes	250
19.8.2. Mise en œuvre de la chloration	253
19.8.2.1. Chloration continue.	254
19.8.2.2. Chloration intermittente ou chloration choc	256
19.8.2.3. Déchloration	256
19.8.2.4. Dioxyde de chlore (ClO ₂)	257
19.8.2.5. Conclusions sur la préchloration	258
19.8.3. Ajustement du pH	259
19.8.4. Filtration directe	259
19.8.4.1. Filtration directe en monocouche ou en bicouche	260
19.8.4.2. Filtration en deux étages.	267
19.8.4.3. Filtres gravitaires ou filtres sous pression.	269
19.8.5. Conditions chimiques de mise en œuvre.	270

19.8.6. Flottation	272
19.8.6.1. Performances du Spiflow® appliqué comme prétraitement en eau de mer	275
19.8.7. Décantation	278
19.8.8. Membranes (ultrafiltration et microfiltration)	279
19.8.8.1. Performances des membranes d’ultrafiltration et de microfiltration	283
19.8.9. Conclusions relatives au prétraitement avec des membranes UF	288
19.9. Consommation d’énergie	289
19.9.1. Consommation d’énergie sans récupération.	289
19.9.2. Consommation d’énergie avec récupération	290
19.9.3. Systèmes à échangeur hydraulique	290
19.9.3.1. Turbine Pelton.	290
19.9.3.2. Systèmes avec échangeurs de pression	292
19.9.3.3. Comparatif des trois principaux systèmes de récupération d’énergie	302
19.10. Paramètres de fonctionnement	302
19.10.1. Relation conductivité et concentration en sels	302
19.10.2. Contrôler le colmatage des membranes d’OI	303
19.11. Performances des membranes d’osmose inverse utilisées en dessalement.	304
19.11.1. Élimination du bore	304
19.11.1.1. Présence dans l’eau	305
19.11.1.2. Chimie du bore	305
19.11.1.3. Les traitements du bore.	306
19.11.1.4. Les membranes haute pression	307
19.11.1.5. Les résines échangeuses d’ions	310
19.12. Le post-traitement	312
19.12.1. Les indices caractérisant l’agressivité ou la corrosivité de l’eau	313
19.12.1.1. Indice de Langelier (IL ou LSI).	313
19.12.1.2. Indice de Ryznar (IR).	314
19.12.1.3. Indice de Larson (IL).	314
19.12.1.4. Indice de Leroy	315
19.12.1.5. CCPP (<i>Calcium Carbonate Precipitation Potential</i>)	315
19.12.2. Application à l’eau dessalée	316
19.12.2.1. Qualités d’eau requises après le post-traitement	317
19.12.3. Les traitements	318
19.12.3.1. Reminéralisation sur filtre calcaire	318
19.12.3.2. Reminéralisation avec réactifs en solution	331

19.13. Paramètres de suivi et de contrôle	332
19.13.1. Normalisation des données brutes	332
19.13.2. Les bromates	334
19.14. Les nouveaux procédés de Veolia appliqués au dessalement d'eau de mer	335
19.14.1. Flottation avec le procédé Spidflow®	335
19.14.2. Procédé Spidflow® Filter appliqué au dessalement d'eau de mer	340
19.14.3. BiopROtector®	346
19.14.4. Barrel® (SIDEM Veolia)	349
19.14.5. Hiprode®	352
19.15. Les solutions packagées en dessalement	354
19.16. L'expérience de Veolia (membranes haute pression)	356
19.17. Bibliographie	371
Index	379
Sommaire de <i>Traitement de l'eau potable 1</i>	381
Sommaire de <i>Traitement de l'eau potable 2</i>	383
Sommaire de <i>Traitement de l'eau potable 3</i>	385
Sommaire de <i>Traitement de l'eau potable 5</i>	387