

Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres

et autres procédés non conventionnels
d'approvisionnement en eau douce

Alain Maurel

2^e édition

Editions
TEC
& DOC

Lavoisier

Table des matières

Chapitre 1

Cycle de l'eau – Répartition de l'eau sur la planète – Adéquation entre ressources et besoins

1. Cycle de l'eau	1
2. Répartition de l'eau sur la planète.	2
3. Adéquation entre ressources et besoins en eau	3
3.1. Usages domestiques	5
3.2. Usages agricoles	5
3.3. Usages industriels	6
4. Indicateurs de ressources : seuil de tension, seuil de pénurie	7
5. Cas particulier de la France métropolitaine	9

Chapitre 2

Normes de qualité d'une eau en fonction de son usage

1. Critères de potabilité d'une eau destinée à la consommation	11
2. Normes pour les usages industriels	14
3. Critères de qualité d'une eau d'irrigation	15
3.1. Salinité totale	16
3.2. Teneur en sodium	17
3.3. Cas particulier de plantes résistantes en milieu salin	18

Chapitre 3

Différentes eaux salines – Généralités sur le dessalement

1. Différentes eaux salines	19
1.1. Composition et salinité de l'eau de mer	19
1.2. Salinité des eaux saumâtres	21
2. Dessalement – Généralités	22
2.1. Schéma général d'une installation de dessalement	22
2.2. Prise d'eau de mer	22
2.3. Problème des rejets de saumure	23
2.4. Différents procédés de dessalement	24
2.4.1. Procédés de distillation	24
2.4.2. Procédés à membranes	26

Chapitre 4

Procédés de distillation

1. Distillation à simple effet	27
1.1. Consommation d'énergie	28
1.2. Application numérique	29
2. Distillation à multiples effets	29
2.1. Consommation d'énergie d'une unité de distillation à multiples effets	31
2.2. Application numérique	31
2.3. Détermination du nombre d'effets	32
2.4. Différents types d'évaporateurs à multiples effets	32
3. Procédé par détente successives ou procédé Flash	36
3.1. Principe d'une installation de distillation Flash à cycle direct	37
3.1.1. Description du procédé	37
3.1.2. Production d'eau douce	38
3.1.3. Rendement thermique	38
3.1.4. Surface des condenseurs	39
3.2. Procédé Flash à recirculation	40
3.3. Disposition des tubes des condenseurs dans les chambres de détente	42
3.4. Température de tête de l'installation	42
3.5. Évolution de la taille des installations de distillation Flash	43
3.6. Comparaison des procédés de distillation Flash, et multiples effets à tubes horizontaux arrosés (HTME)	44
4. Distillation par compression de vapeur	47
4.1. Principe	47
4.2. Thermocompression et compression mécanique	48
4.3. Consommation d'énergie de la compression de vapeur	49
5. Compression de vapeur et multiples effets	51
5.1. Thermocompression et multiples effets	51
5.2. Compression mécanique et multiples effets	51
6. Problèmes spécifiques aux procédés de dessalement par distillation	52
6.1. Le problème des gaz incondensables	52
6.2. Problèmes des mousses	53
6.3. Problèmes d'encrassement	54
7. Perspectives de la distillation	55

Chapitre 5

Électrodialyse

1. Principe	59
2. Membranes d'électrodialyse	60
2.1. Caractéristiques générales	60
2.2. Sélectivité	61
2.3. Résistance électrique	62
3. Technologie d'un électrodialyseur	62
3.1. Description générale	62
3.2. Électrodes	64
3.3. Compartiments	65

3.3.1. Écoulement labyrinthe (<i>tortuous path</i>)	65
3.3.2. Écoulement en nappe (<i>sheet flow</i>)	65
4. Économie du procédé	67
4.1. Consommation d'énergie	67
4.1.1. Application numérique	67
4.2. Surface de membrane	68
5. Phénomène de polarisation	69
6. Problèmes de prétraitement	71
6.1. Élimination des matières en suspension	71
6.2. Élimination des matières organiques	71
6.3. Empoisonnement des membranes	71
6.4. Éléments entartrants (Ca, Mg)	72
7. Perspectives de l'électrodialyse	72
8. Application spécifiques de l'électrodialyse en traitement des eaux	74
8.1. Dénitration des eaux potables	74
8.2. Défluoration des eaux potables	75
8.3. Production d'eau ultrapure	76
8.4. Concentration de l'eau de mer pour la production de sel	77

Chapitre 6

Osmose inverse

1. Principe	79
2. Pression osmotique	80
3. Schéma général d'une installation d'osmose inverse	81
4. Caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse : taux de conversion, taux de rejet, débit spécifique	82
4.1. Taux de conversion	82
4.2. Sélectivité	82
4.3. Débit spécifique ou densité du flux volumique	83
5. Mécanismes de transfert	83
5.1. Influence de la pression sur le taux de rejet	85
5.2. Sélectivité entre différents ions	85
5.3. Influence de la température	86
6. Phénomène de polarisation	87
6.1. Nature du phénomène	87
6.2. Modélisation de la polarisation : théorie du film	88
7. Membranes d'osmose inverse	89
7.1. Généralités – Membranes asymétriques	89
7.2. Méthode de fabrication des membranes asymétriques	89
7.3. Membranes en acétate de cellulose	91
7.3.1. Avantages de l'acétate de cellulose	92
7.3.2. Inconvénients de l'acétate de cellulose	92
7.4. Membranes en polyamide	94
7.5. Membranes en polysulfone	95
7.6. Membranes composites	96
7.7. Membranes dynamiques	99
7.8. Performances des membranes commerciales	100
7.9. Résistance au pH, à la température, à la pression et au chlore	101

7.10	Durée de vie des membranes	102
8.	Modules d'osmose inverse	103
8.1.	Modules tubulaires	104
8.1.1.	Avantages	104
8.1.2.	Inconvénients	104
8.2.	Modules fibres creuses	106
8.2.1.	Avantages	107
8.2.2.	Inconvénients	107
8.3.	Modules plans	108
8.3.1.	Avantages	108
8.3.2.	Inconvénients	108
8.4.	Modules spirales	109
8.4.1.	Avantages	109
8.4.2.	Inconvénients	109
9.	Phénomène de compactage	111
10.	Mise en œuvre de la technologie – Conditions de fonctionnement	113
10.1.	Choix du type de procédé	113
10.2.	Choix de la pression de fonctionnement	114
10.2.1.	Considérations techniques	115
10.2.2.	Considérations économiques	115
10.3.	Choix de la température	116
10.4.	Choix du taux de conversion	116
11.	Consommation d'énergie	118
11.1.	Énergie consommée en osmose inverse en l'absence de système de récupération	118
11.2.	Récupération d'énergie	120
11.3.	Différents systèmes de récupération d'énergie	121
11.3.1.	Les turbopompes intégrées	121
11.3.2.	Les turbines Pelton	123
11.3.3.	Les systèmes dits « échangeurs de pression »	124
12.	Prétraitement de l'eau avant osmose inverse	128
12.1.	Chloration	128
12.2.	Clarification de l'eau brute	129
12.2.1.	Procédés classiques : coagulation, floculation, décantation, filtration	129
12.2.2.	Procédés membranaires : ultrafiltration, microfiltration ou même nanofiltration	129
12.3.	Prévention de l'entartrage	130
12.4.	Déchloration	131
12.5.	Filtration de sécurité sur cartouches	131
13.	Moyens d'élimination des dépôts : nettoyage chimique	131
13.1.	Fréquence de nettoyage	132
13.2.	Solutions de nettoyage	132
14.	Post-traitement	133
14.1.	Correction de l'agressivité de l'eau	133
14.2.	Correction de la corrosivité	133
14.3.	Désinfection finale	134
14.4.	Le problème du bore	134
15.	Développement industriel de l'osmose inverse	135

Chapitre 7

**Problèmes techniques rencontrés en dessalement :
entartrage, colmatage, corrosion**

1. Problèmes d'entartrage	139
1.1. Généralités sur la théorie de l'entartrage	139
1.1.1. Aspect thermodynamique : la sursaturation	139
1.1.2. Aspect cinétique : nucléation et croissance cristalline	140
1.2. Principaux dépôts de tartre rencontrés en dessalement	143
1.2.1. Le carbonate de calcium	143
1.2.2. Le sulfate de calcium	145
1.3. Différents moyens de lutte contre l'entartrage	149
1.3.1. Précipitation à la chaux	149
1.3.2. Décarbonatation à l'acide	150
1.3.3. Germination ou ensemencement	150
1.3.4. Inhibiteurs d'entartrage	150
1.3.5. Adoucissement sur résines de l'eau de mer	152
2. Problèmes de colmatage ou <i>fouling</i>	153
2.1. Matière organique dans les eaux	154
2.2. <i>Biofouling</i>	154
2.3. Chloration, <i>fouling</i> et <i>biofouling</i>	155
2.4. Électrochloration de l'eau de mer	156
2.5. Encrassement dans les procédés de distillation	156
2.6. Encrassement dans le procédé d'osmose inverse	159
3. Problèmes de corrosion	160
3.1. Rappels sur la corrosion en milieu marin	160
3.2. Corrosion galvanique	161
3.3. Corrosion généralisée	161
3.4. Corrosion par piqûres	162
3.5. Corrosion par crevasses	163
3.6. Corrosion intergranulaire	163
3.7. Matériaux envisageables pour le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse	163
3.7.1. Aciers austénitiques	164
3.7.2. Les alliages super-austénitiques	165
3.7.3. Aciers austéno-ferritiques (duplex)	165
3.7.4. Aciers ferritiques	165
3.7.5. Alliages non ferreux ou à faible teneur en fer	165
3.7.6. Comparaisons des différents matériaux du point de vue résistance à la piqûre	165
3.8. Matériaux envisageables pour le dessalement de l'eau de mer par distillation	166
3.8.1. Alliages cuivreux	166
3.8.2. Titane	168
3.8.3. Alliages d'aluminium	168
3.8.4. Aciers faiblement alliés	169
3.8.5. Exemple de matériaux utilisés sur les unités de distillation Flash	169

*Chapitre 8***Comparaison technique et économique
des différents procédés de dessalement**

1. Qualité de l'eau obtenue par les différents procédés.	171
1.1. Qualité de l'eau obtenue par distillation	171
1.2. Qualité de l'eau obtenue par les procédés à membranes.	171
1.2.1. Électrodialyse	171
1.2.2. Osmose inverse	171
2. Énergie de dessalement	172
2.1. Énergie minimale de dessalement	172
2.2. Quantité pratique d'énergie nécessaire	174
2.3. Cas général du Flash	174
2.4. Installations autonomes et installations à double fin.	175
2.4.1. Couplage avec un moteur diesel	176
2.4.2. Couplage avec une turbine à gaz	176
2.4.3. Couplage avec une turbine à vapeur	177
2.4.4. Coût à attribuer à la vapeur BP dans une usine double fin.	177
2.5. Ordre de grandeur des consommations d'énergie	178
3. Coûts du dessalement	178
3.1. Coûts des investissements	180
3.2. Coût de l'eau dessalée	181
3.3. Influence de la salinité de l'eau à traiter sur les coûts.	182
4. Coût de l'eau dessalée et agriculture.	184
4.1. Cas de la culture de céréales telles que le blé	184
4.2. Cas de cultures à fort rapport économique	185
5. Dessalement de l'eau de mer : osmose inverse ou distillation ?	185
6. Installations hybrides	187

*Chapitre 9***Dessalement nucléaire**

1. Généralités.	189
2. Les complexes agro-industriels	190
3. L'installation de dessalement nucléaire de Chevtchenko	192
3.1. Réacteur nucléaire BN 350	194
3.2. Unités de dessalement	194
4. Situation actuelle et perspectives	194

*Chapitre 10***Distillation solaire directe**

1. Généralités.	199
2. Principe	200
3. Historique	200
4. Performances des appareils.	201
5. Réalisations pratiques	202
5.1. Technologie de la couverture.	204

5.2. Technologie du bassin	204
6. Exploitation des distillateurs solaires	204
6.1. Alimentation en eau saline du distillateur	204
6.2. Problèmes d'exploitation	205
7. Variante du distillateur serre	205
7.1. Emploi des surfaces réfléchissantes	206
7.2. Distillateur solaire incliné à cascades	206
7.3. Distillateur solaire incliné à mèche	206
8. Serre à distillation solaire	207
8.1. Principe	207
8.2. Performances	208
8.3. Perspectives	209
9. Perspectives de la distillation solaire directe	209

Chapitre 11

Association des énergies renouvelables avec des procédés de dessalement conventionnels

1. Généralités	211
2. Procédés de distillation et énergie solaire	212
2.1. Un distillateur à effets multiples adapté à l'énergie solaire	212
2.2. Description d'une installation de dessalement solaire	214
3. Osmose inverse et énergie solaire	216
4. Association de l'osmose inverse avec des photopiles	220
4.1. Unité d'El Hamrawin (Égypte)	220
4.2. Unité d'Hassi-Khebi (Algérie)	221
5. Association de l'osmose inverse avec l'énergie éolienne	222
6. Station expérimentale de Borj-Cédria (Tunisie)	225
7. Conclusions sur le dessalement par énergies renouvelables	227

Chapitre 12

Autres procédés de dessalement

1. Congélation	231
1.1. Dessalement par congélation naturelle	232
1.2. Congélation directe sous vide	232
1.3. Congélation avec fluide caloporteur intermédiaire	234
2. Dessalement par résines échangeuses d'ions	235
2.1. Généralités	235
2.2. Limites du procédé	235
2.3. Procédé Sirotherm	236
3. Dessalement par thermo-osmose	236
4. Dessalement par piézodialyse	237
5. Dessalement par déionisation capacitive	238

*Chapitre 13***Recyclage des eaux usées**

1. Recyclage des eaux usées en irrigation	239
2. Recyclage des eaux grises et/ou des eaux usées en immeubles	240
3. Recyclage des eaux usées dans l'industrie	242
4. Production directe et indirecte d'eau potable	242
5. Aspects économiques du recyclage des eaux usées	244

*Chapitre 14***Autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce de zones arides**

1. Transport d'eau sur longues distances	247
1.1. Le projet franco-espagnol d'aqueduc Rhône-Catalogne	247
1.2. Le projet libyen <i>The great man-made river project</i>	248
1.3. Transport d'eau par voie maritime	249
2. La pluie provoquée	250
3. Récupération de la vapeur d'eau atmosphérique	251
3.1. Les filets à brouillard	251
3.2. Les condenseurs de rosée	252
4. Le captage d'eau douce en mer	253
5. Transport d'icebergs ?	255

*Chapitre 15***Situation et évolution du marché du dessalement**

1. Capacité installée	257
2. Répartition géographique	257
3. Procédés utilisés	260
4. Usages de l'eau dessalée	262

*Chapitre 16***Conclusion**

1. L'eau un défi pour le XXI ^e siècle	265
2. Techniques dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres	266
2.1. Procédés de distillation	266
2.2. Procédés à membranes	267
2.3. Consommation d'énergie des différents procédés	267
2.4. Dessalement de l'eau de mer : osmose inverse ou distillation ?	268
3. Couplage eau – énergie	269
4. Coût de l'eau dessalée	270
5. Un marché en expansion	270
6. Dessalement et énergies renouvelables	271
7. Autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce	271
7.1. Recyclage des eaux usées	271
7.2. Captage d'eau douce en mer	272

7.3. Exploitation de réserves « fossiles »	272
7.4. Transport d'eau sur longues distances	272
8. Perspectives	272

Chapitre 17

Pour en savoir plus

1. Publications de l'auteur	275
2. Autres publications du CEA	278
3. Ouvrages généraux sur le dessalement	282
4. Actes de congrès spécialisés et revue	283
5. Quelques sites Internet	284
5.1. Sites généraux sur le dessalement	284
5.2. Site de sociétés	284
Index	285