

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

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 déteintes 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

8. Economie du procédé	6
8.1. Consommation d'énergie	6
8.1.1. Application numérique	6
8.2. Surface de membrane	6
9. Phénomène de polarisation	6
10. Problèmes de prétraitement	7
10.1. Élimination des matières en suspension	7
10.2. Élimination des matières organiques	7
10.3. Empoisonnement des membranes	7
10.4. Éléments entartrants (Ca, Mg)	7
11. Perspectives de l'électrodialyse	7
12. Application spécifiques de l'électrodialyse en traitement des eaux	7
12.1. Dénitration des eaux potables	7
12.2. Défluoruration des eaux potables	7
12.3. Production d'eau ultrapure	7
12.4. Concentration de l'eau de mer pour la production de sel	7

Chapitre 6

Osmose inverse

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

8.1. Modules urinaires	107
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. Prétreatment 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

Problèmes d'entartrage	13
1.1. Généralités sur la théorie de l'entartrage	13
1.1.1. Aspect thermodynamique : la sursaturation	13
1.1.2. Aspect cinétique : nucléation et croissance cristalline	14
1.2. Principaux dépôts de tartre rencontrés en dessalement	14
1.2.1. Le carbonate de calcium	14
1.2.2. Le sulfate de calcium	14
1.3. Différents moyens de lutte contre l'entartrage	14
1.3.1. Précipitation à la chaux	15
1.3.2. Décarbonatation à l'acide	15
1.3.3. Germination ou ensemencement	15
1.3.4. Inhibiteurs d'entartrage	15
1.3.5. Adoucissement sur résines de l'eau de mer	15
2. Problèmes de colmatage ou <i>fouling</i>	15
2.1. Matière organique dans les eaux	15
2.2. <i>Biofouling</i>	15
2.3. Chloration, <i>fouling</i> et <i>biofouling</i>	15
2.4. Electrochloration de l'eau de mer	15
2.5. Encrassement dans les procédés de distillation	15
2.6. Encrassement dans le procédé d'osmose inverse	15
3. Problèmes de corrosion	15
3.1. Rappels sur la corrosion en milieu marin	15
3.2. Corrosion galvanique	15
3.3. Corrosion généralisée	15
3.4. Corrosion par piqûres	15
3.5. Corrosion par crevasses	15
3.6. Corrosion intergranulaire	15
3.7. Matériaux envisageables pour le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse	15
3.7.1. Aciers austénitiques	15
3.7.2. Les alliages super-austénitiques	15
3.7.3. Aciers austéno-ferritiques (duplex)	15
3.7.4. Aciers ferritiques	15
3.7.5. Alliages non ferreux ou à faible teneur en fer	15
3.7.6. Comparaisons des différents matériaux du point de vue résistance à la piqûre	15
3.8. Matériaux envisageables pour le dessalement de l'eau de mer par distillation	15
3.8.1. Alliages cuivreux	15
3.8.2. Titane	15
3.8.3. Alliages d'aluminium	15
3.8.4. Aciers faiblement alliés	15
3.8.5. Exemple de matériaux utilisés sur les unités de distillation Flash	15

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 Chevetchenko.....	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

Exploitation des distillateurs solaires.....

4.1. Alimentation en eau saine du distillateur.....	.....
4.2. Problèmes d'exploitation.....	.....
5. Variante du distillateur serre.....	.....
7.1. Emploi des surfaces réfléchissantes.....	.....
7.2. Distillateur solaire incliné à cascades.....	.....
7.3. Distillateur solaire incliné à meche.....	.....
8. Serre à distillation solaire.....	.....
8.1. Principe.....	.....
8.2. Performances.....	.....
8.3. Perspectives.....	.....
Perspectives de la distillation solaire directe.....	.....

Chapitre 11

Association des énergies renouvelables avec des procédés de dessalement conventionnels

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

Chapitre 12

Autres procédés de dessalement

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

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	268
2.4. Dessalement de l'eau de mer : osmose inverse ou distillation ?	269
3. Couplage eau - énergie	270
4. Coût de l'eau dessalée	270
5. Un marché en expansion	271
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. Caplage d'eau douce en mer	272

Index

Chapitre 17

Pour en savoir plus

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

Index