

# Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres

et autres procédés non conventionnels  
d'approvisionnement en eau douce

Alain Maurel

2<sup>e</sup> 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
9.1. Problèmes de prétraitement	7
9.1.1. Élimination des matières en suspension	7
9.1.2. Élimination des matières organiques	7
9.1.3. Empoisonnement des membranes	7
9.1.4. Éléments entartrants (Ca, Mg)	7
9.2. Perspectives de l'électrodialyse	7
10. Application spécifiques de l'électrodialyse en traitement des eaux	7
10.1. Dénitration des eaux potables	7
10.2. Défluoruration des eaux potables	7
10.3. Production d'eau ultrapure	7
10.4. 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 .....	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

<b>Problèmes d'entartrage .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1. Généralités sur la théorie de l'entartrage .....</b>	<b>13</b>
1.1.1. Aspect thermodynamique : la sursaturation .....	13
1.1.2. Aspect cinétique : nucléation et croissance cristalline .....	14
<b>1.2. Principaux dépôts de tartre rencontrés en dessalement .....</b>	<b>14</b>
1.2.1. Le carbonate de calcium .....	14
1.2.2. Le sulfate de calcium .....	14
<b>1.3. Différents moyens de lutte contre l'entartrage .....</b>	<b>14</b>
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
<b>2. Problèmes de colmatage ou fouling .....</b>	<b>15</b>
2.1. Matière organique dans les eaux .....	15
2.2. Biofouling .....	15
2.3. Chloration, fouling et biofouling .....	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
<b>3. Problèmes de corrosion .....</b>	<b>15</b>
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 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

#### 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.....	.....
1.1. 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. Association 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 <sup>e</sup> 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