

Sommaire

Préface	IX
Contributions	XI
Liste des figures et des tableaux	XIII

Partie 1 : Introduction	1
--------------------------------------	---

Partie 2 : Les différents types de circuits	3
2.1. Circuits ouverts ou en eau perdue	3
2.2. Circuits fermés	3
2.3. Circuits semi-ouverts	4
2.4. Principe du refroidissement évaporatif	4
✓ Exemple de calcul de la température humide de l'air à partir du diagramme de l'air humide	5
2.5. Consommation d'eau des circuits de refroidissement évaporatifs .	7
✓ L'évaporation	7
✓ L'entraînement vésiculaire	7
✓ Purges de déconcentration	8
✓ Exemple de calculs	8
✓ Incidence du facteur de concentration N	9
2.6. Les différents types de tours de refroidissement	9
2.6.1. Tour à circuit ouvert	9
✓ Type à nid d'abeille ou « packing »	9
✓ Type à gouttes ou « splash »	10
2.6.2. Tour à circuit primaire fermé	11
✓ Type à échangeur à l'intérieur de la tour	11

✓	Type à échangeur accolé à la tour	11
	2.6.3. <i>Tour hybride</i>	12
	2.7. Autres éléments des circuits : caractéristiques principales	13
	2.8. Eau d'appoint des circuits de refroidissement	13
✓	L'eau : généralités et caractéristiques	13
✓	Principales sources d'approvisionnement en eau	14
✓	Les sels dissous	15
✓	Bilan ionique	16
✓	Les principaux titres	16
✓	Les chlorures (Cl ⁻)	17
✓	La silice (SiO ₂)	17
✓	Le pH	19
✓	La conductivité (γ) et la résistivité (ρ)	19
✓	Les matières en suspension (M.E.S)	19

Partie 3 : Réglementations, normes 21

✓	Conception des tours	21
✓	Exploitation des circuits de refroidissement	21
✓	Obligations des fournisseurs de produits de traitement d'eau	21
✓	Analyse des circuits de refroidissement	22

Partie 4 : Pathologies des circuits semi-ouverts 23

	4.1. Entartrage	24
	4.2. Corrosion	25
✓	Conséquences de la corrosion	26
	4.2.1. <i>Métaux ferreux</i>	26
	4.2.2. <i>Cuivre et alliages de cuivre</i>	27
	4.2.3. <i>Autres matériaux</i>	27
	4.3. Encrassement	28
	4.3.1. <i>Origine de l'encrassement</i>	28
	4.3.2. <i>Mesure des matières en suspension (MES)</i>	30
	4.3.3. <i>Moyens mis en œuvre pour éviter l'encrassement</i>	30
	4.4. Dégradation des bétons	31
	4.4.1. <i>Béton armé et béton précontraint</i>	31

4.4.2.	<i>Les dégradations du béton.</i>	31
4.5.	Dégradation des polymères	32
4.5.1.	<i>ABS.</i>	32
4.5.2.	<i>Polyéthylène (PE).</i>	32
4.5.3.	<i>Polypropylène (PP).</i>	32
4.5.4.	<i>Polychlorure de vinyle (PVC).</i>	32
4.5.5.	<i>Résines époxydes</i>	33
4.6.	Prolifération des micro-organismes	33
4.6.1.	<i>Les bactéries</i>	33
✓	Les bactéries aérobies	34
✓	Les bactéries de la corrosion.	34
4.6.2.	<i>Les amibes, les ciliés.</i>	36
4.6.3.	<i>Les algues.</i>	36
4.6.4.	<i>Les champignons.</i>	37
4.6.5.	<i>Conditions de milieu et développements microbiens.</i>	37
4.7.	Biofilms	38
4.7.1.	<i>Définition.</i>	38
4.7.2.	<i>Composition</i>	38
4.7.3.	<i>Problèmes associés à la présence de biofilm</i>	39
4.8.	Gel	40

Partie 5 :	Traitement d'eau	43
5.1.	Prétraitement de l'eau d'appoint	43
5.1.1.	<i>Coagulation – Flocculation – Décantation</i>	43
5.1.2.	<i>Filtration</i>	43
✓	Filtre mécanique.	43
✓	Microfiltration, ultrafiltration, osmose inverse	44
5.1.3.	<i>Les traitements d'élimination d'éléments en solution.</i>	44
✓	Décarbonatation à la chaux	44
✓	Décarbonatation sur résines	44
✓	Adoucissement	45
✓	Procédés physiques.	45
5.2.	Conditionnement de l'eau du circuit.	46
5.2.1.	<i>Modification de l'équilibre calco-carbonique par contrôle du pH.</i>	47
5.2.2.	<i>Inhibiteurs d'entartrage</i>	47
5.2.3.	<i>Inhibiteurs de corrosion</i>	49
✓	Inhibiteurs anodiques.	49
✓	Inhibiteurs cathodiques	49

✓	Inhibiteurs organiques	49
	5.2.4. <i>Biocides</i>	53
✓	Notion de temps de demi-séjour	54
✓	Biocides oxydants et biocides non-oxydants	55
✓	Stratégies de traitement biocide et impact sur les rejets	55
	5.2.5. <i>Les biodétergents / biodispersants</i>	60
	5.2.6. <i>Traitements alternatifs</i>	61
	5.2.7. <i>Les contraintes liées au site : guide de choix</i>	61
	5.2.8. <i>Essais au laboratoire et/ou sur pilote de terrain</i>	63
	5.3. Mise en œuvre du conditionnement	64
	5.4. Les systèmes de déconcentration	64

Partie 6 : Suivi et contrôle de l'installation 65

	6.1. Relevés de consommation	65
	6.2. Analyses des eaux	65
	6.2.1. <i>Analyses liées à la réglementation</i>	66
	6.2.2. <i>Analyses de suivi</i>	67
	6.3. Facteur de concentration	67
	6.4. Analyse des dépôts	68
	6.5. Méthodes d'estimation et de contrôle de la corrosion	69
	6.5.1. <i>Méthode gravimétrique</i>	69
	6.5.2. <i>Méthodes électrochimiques</i>	71
	6.5.3. <i>Avantages et inconvénients de ces méthodes</i>	72
	6.6. Méthodes d'estimation de l'entartrage et de l'encrassement	72
	6.6.1. <i>Équilibre calco-carbonique : facteur de sursaturation et autres indices d'équilibre</i>	72
	6.6.2. <i>Mesure de l'encrassement minéral et de l'entartrage</i>	75
✓	Échangeur critique	75
✓	Boucle en parallèle	75
	6.6.3. <i>Mesure de l'encrassement biologique</i>	76
	<i>Détection du biofilm par méthode thermique</i>	79
	<i>Détection du biofilm par méthode électrochimique</i>	79

Partie 7 : Consignes d'exploitation 81

	7.1. Spécificités des périodes d'arrêt et de redémarrage des circuits industriels	81
--	--	----

7.2. Mise en service des circuits neufs et modifiés.	83
7.3. Maintenance et prévention	84
7.3.1. <i>Adoucisseur</i>	84
7.3.2. <i>Groupe de dosage</i>	85
7.3.3. <i>Régulation et mesure en ligne</i>	85
7.3.4. <i>Groupe frigorifique</i>	85
7.3.5. <i>Tour de refroidissement</i>	86
7.3.6. <i>Pompes de circulation</i>	86
7.3.7. <i>Filtration dérivée</i>	86

Annexe 1 : Réglementations, normes, certifications (situation en août 2017) 87

1. Conception des tours	87
2. Exploitation des circuits de refroidissement	87
3. Obligations des fournisseurs de produits de traitement d'eau	88
3.1. <i>Réglementation REACH</i>	88
3.2. <i>Règlement biocides</i>	89
3.3. <i>RSDE</i>	90
3.4. <i>« MTD » (Meilleures Techniques Disponibles) et BREF</i>	91

Annexe 2 : Analyses des circuits de refroidissement 93

Annexe 3 : L'entartrage 95

1. Conditions d'apparition du carbonate de calcium	95
1.1. <i>Aspect thermodynamique</i>	95
1.2. <i>Aspect cinétique</i>	96
1.3. <i>Interaction entre les germes de CaCO₃ et les parois</i>	99
1.4. <i>Croissance des dépôts sur les parois</i>	100
1.5. <i>Influence des matières en suspension et des algues</i>	100
1.6. <i>Influence des ions métalliques et des oxydants</i>	100
1.6.1. <i>Influence des ions Fe²⁺</i>	101
1.6.2. <i>Influence des ions Zn²⁺ et Cu²⁺</i>	101
1.7. <i>Influence du mode de chauffage de l'eau</i>	102

2. Principe des traitements antitartre	102
2.1. <i>Traitements chimiques</i>	102
2.2. <i>Traitements physiques</i>	103
2.3. <i>Évaluation de l'efficacité des traitements</i>	105
3. Exemples de traitements antitartre	107
4. Évaluation du pouvoir entartrant d'un circuit	108
5. Conclusion	110

Annexe 4 : La corrosion 111

1. Définition du terme « Corrosion » d'après la norme ISO 8044 :2015 [41]	111
2. Morphologie	112
3. Évaluation et mesure de la corrosion	113
4. Comportement des matériaux métalliques usuels	114
4.1. <i>Alliages ferreux</i>	114
4.2. <i>Nickel et alliages de nickel</i>	117
4.3. <i>Aluminium et alliages d'aluminium</i>	118
4.4. <i>Cuivre et alliages cuivreux</i>	119
4.5. <i>Titane et alliages de titane</i>	121

Annexe 5 : La dégradation des polymères. 125

1. Les différents types de vieillissement	125
1.1. <i>Vieillissement physique</i>	125
1.2. <i>Vieillissement chimique</i>	127
2. Les principaux polymères utilisés en tour de refroidissement	128
2.1. <i>Le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP)</i>	128
2.1.1. <i>Vieillissement physique</i>	128
2.1.2. <i>Vieillissement chimique</i>	128
2.2. <i>Le polychlorure de vinyle (PVC)</i>	129
2.2.1. <i>Vieillissement physique</i>	129
2.2.2. <i>Vieillissement chimique</i>	129
2.3. <i>Les résines époxy</i>	130
2.3.1. <i>Vieillissement physique</i>	131
2.3.2. <i>Vieillissement chimique</i>	131

Annexe 6 : La dégradation des bétons	133
1. Les matières premières	133
1.1. <i>Le ciment</i>	133
1.2. <i>L'eau de gâchage – les adjuvants</i>	134
1.3. <i>Les granulats</i>	135
1.4. <i>Les armatures métalliques</i>	135
2. Causes possibles de dégradation du béton	136
2.1. <i>Origine externe</i>	136
2.2. <i>Origine interne</i>	137
2.3. <i>Dégradation par corrosion</i>	138
3. Les solutions de réparation du béton	143
3.1. <i>Les produits pour la réparation du béton</i>	143
3.2. <i>Les solutions de réparation dites traditionnelles</i>	143
3.3. <i>Solution de remplacement général des enrobages altérés</i>	144
3.4. <i>Solutions de décontamination des enrobages altérés</i>	144
3.5. <i>Solutions de protection galvanique des armatures du béton aérien</i>	144
3.6. <i>Solutions de protection cathodique des armatures du béton aérien</i>	144

Annexe 7 : Traitements physico-chimiques des eaux	145
1. Coagulation – floculation – décantation – filtration	145
2. Techniques membranaires	147
3. Décarbonatation à la chaux	150
4. Élimination du fer et du manganèse	151
5. Traitement sur résines échangeuses d'ions	152
5.1. <i>L'adoucissement</i>	152
5.1.1. <i>Constitution de l'adoucisseur</i>	153
5.1.2. <i>Caractéristiques de l'eau adoucie</i>	153
5.1.3. <i>La régénération de l'adoucisseur</i>	153
5.1.4. <i>Dimensionnement d'un adoucisseur</i>	154
5.1.5. <i>Adoucisseurs fonctionnant en alternance</i>	155
5.1.6. <i>Contrôle du fonctionnement d'un adoucisseur</i>	155
5.2. <i>La décarbonatation sur résines</i>	155
5.3. <i>La déminéralisation</i>	157

Annexe 8 : Les systèmes d'injection des produits chimiques	159
---	-----

Annexe 9 : Exemples types de manuels d'entretien	161
---	-----

Annexe 10 : Références bibliographiques	167
--	-----
