

collection dirigée par Jean-Claude Sabonnadière

Centrales électriques et production alternative d'électricité

les réseaux d'énergie électrique 3B

Valentin Crastan

hermes

Lavoisier

Table des matières

Partie II Centrales électriques

Conversion de l'énergie	1
Chapitre 4. Centrales hydroélectriques	3
4.1 Bases hydrologiques.....	3
4.2 Centrales au fil de l'eau.....	5
4.2.1 Aménagement des eaux.....	6
4.2.2 Exécution.....	6
4.2.3 Dimensionnement.....	8
4.3 Centrales à accumulation.....	8
4.3.1 Accumulation journalière et hebdomadaire.....	8
4.3.2 Accumulation annuelle (centrales saisonnières).....	10
4.3.3 Centrales de pompage-turbinage.....	14
4.4 Turbines hydrauliques.....	15
4.4.1 Turbine Pelton.....	16
4.4.1.1 Diamètre du jet et débit.....	18
4.4.1.2 Vitesse périphérique optimale.....	19
4.4.1.3 Diamètre, nombre de tours spécifique.....	19
4.4.2 Turbines à réaction.....	22
4.4.2.1 Phénomène de cavitation.....	24
4.4.2.2 Diagramme des énergies.....	25
4.4.2.3 Chiffres de débit et de pression.....	25
4.4.2.4 Relations entre η_q , φ_j et ψ	26
4.4.2.5 Dimensionnement de la turbine.....	27
4.4.2.6 Types de turbines à réaction et types de pompes.....	30
4.4.3 Choix de la turbine.....	31
4.5 Dynamique.....	34
4.5.1 Galerie en pression.....	34
4.5.2 Chambre d'équilibre.....	36
4.5.3 Conduite forcée rigide.....	37
4.5.4 Modèle complet du système hydraulique.....	38
4.5.4.1 Schéma fonctionnel non linéaire.....	38
4.5.4.2 Fonction de transfert.....	38
4.5.5 Onde de pression élastique (coup de bélier).....	40
4.5.5.1 Modèles de la conduite forcée avec élasticité.....	41
4.5.5.2 Fonction de transfert de la conduite forcée élastique.....	44

4.5.6	Modèle complet du système hydraulique avec élasticité . . .	45
4.5.6.1	Fonction de transfert.	45
4.5.6.2	Schéma fonctionnel non linéaire.	45
4.5.7	Modèle de la turbine et de la centrale hydroélectrique.	45
4.5.7.1	Equations <i>per unit</i> (p.u.).	46
4.5.7.2	Linéarisation des équations de la turbine.	48
4.5.7.3	Fonction de transfert de la turbine.	50
Chapitre 5. Centrales thermoélectriques, thermopompe.		53
5.1	Cycle de travail de la vapeur.	53
5.1.1	Cycles de Rankine et de Clausius-Rankine	54
5.1.2	Surchauffe intermédiaire et préchauffage de l'eau.	56
5.2	Cycles des turbines à gaz.	57
5.2.1	Turbine à gaz à cycle ouvert (cycle de Joule).	57
5.2.1.1	Cycle idéalisé.	58
5.2.1.2	Cycle réel.	58
5.2.1.3	Rendement, puissance.	61
5.2.2	Récupération.	62
5.2.3	Cycles à deux étages.	63
5.3	Installations à cycle combiné.	64
5.4	Cogénération.	67
5.4.1	Cogénération par soutirage de vapeur.	67
5.4.2	Cogénération par contre-pression.	69
5.4.3	Turbines à gaz.	70
5.4.4	Petites centrales à énergie totale.	71
5.4.5	Cogénération et rejets de CO ₂	71
5.5	Centrales à vapeur à combustible fossile.	72
5.5.1	Circuit air-combustible-fumées/cendres.	72
5.5.2	Circuit eau-vapeur, pertes.	72
5.5.3	Circuit de refroidissement.	74
5.5.4	Réglage de tranche (Heinrich Kleinen).	76
5.5.5	Dynamique.	79
5.6	Centrales nucléaires.	82
5.6.1	Energie provenant de la fission.	82
5.6.1.1	La fission de l'uranium.	82
5.6.1.2	Processus de conversion.	84
5.6.2	Types de réacteurs.	85
5.6.2.1	Réacteurs à eau légère (PWR, BWR).	85
5.6.2.2	Réacteurs à eau lourde.	87
5.6.2.3	Réacteurs modérés au graphite.	88
5.6.2.4	Réacteurs rapides surgénérateurs.	88
5.6.3	Cycle à vapeur et réglage.	89

5.6.4	Sécurité et cycle du combustible.....	89
5.6.4.1	Sécurité du réacteur.....	89
5.6.4.2	Cycle du combustible et gestion des déchets.....	89
5.6.5	Les risques du nucléaire.....	91
5.6.5.1	Sécurité de la centrale.....	92
5.6.5.2	Cycle du combustible.....	92
5.6.5.3	Gestion des déchets.....	93
5.6.5.4	Armes nucléaires.....	93
5.6.6	Effets de la radioactivité.....	94
5.6.6.1	Activité.....	95
5.6.6.2	Dose de rayonnement absorbé.....	95
5.6.6.3	Dose équivalente.....	95
5.6.6.4	Radioactivité naturelle.....	96
5.7	Centrales à cycle combiné (Heinrich Kleinen).....	97
5.7.1	Centrales à cycle combiné proprement dit.....	97
5.7.1.1	Généralités.....	97
5.7.1.2	Exécution technique.....	98
5.7.1.3	Fonctionnement.....	98
5.7.2	Cycle combiné avec combustion auxiliaire dans la chaudière de récupération.....	99
5.7.3	Centrale à cycle combiné charbon/turbine à gaz avec récupération.....	100
5.7.4	Centrale à charbon combinée avec turbine à gaz dont les gaz d'échappement sont utilisés pour la combustion du charbon.....	100
5.7.5	Centrales avec conversion du charbon sous pression.....	101
5.7.6	Comportement dynamique.....	103
5.8	La pompe à chaleur.....	104
5.8.1	Importance pour l'économie énergétique.....	104
5.8.1.1	Comparaison exergetique.....	104
5.8.1.2	Comparaison des degrés d'utilisation de l'énergie.....	107
5.8.2	Principe et structure de la thermopompe.....	110
5.8.2.1	Le cycle idéalisé.....	110
5.8.2.2	Le cycle réel.....	112
5.8.2.3	Efficacité énergétique.....	114
5.8.3	Applications.....	114
5.8.3.1	Aspects climatiques.....	115
5.8.3.2	Dimensionnement de la distribution de chaleur.....	116
Partie III Production alternative d'électricité.....		119
Chapitre 6. Energie éolienne.....		121
6.1	L'énergie cinétique du vent.....	121
6.1.1	Puissance théorique du vent.....	121
6.1.2	Vitesse du vent.....	122

X	Les réseaux d'énergie électrique	3B
6.1.3	Le potentiel énergétique.	123
6.1.4	La distribution de Weibull.	124
6.2	Types d'éoliennes et leur puissance.	126
6.3	Eoliennes à axe horizontal.	129
6.3.1	Théorie de Betz.	129
6.3.2	Théorie de l'aile portante.	131
6.4	Installations modernes à axe horizontal.	133
6.5	Autres types d'éoliennes.	134
6.5.1	L'éolienne Darrieus.	134
6.5.1.1	Géométrie du rotor.	134
6.5.1.2	Forces agissant sur les éléments de la pale.	136
6.5.1.3	Théorie de l'aile portante.	137
6.5.2	Le rotor Savonius.	138
6.5.2.1	Structure.	138
6.5.2.2	Puissance fournie.	138
6.5.2.3	Couple moteur.	140
6.6	Opération et réglage, conception de la centrale.	140
6.6.1	Puissance et mode de fonctionnement.	140
6.6.2	Réglage de la puissance.	142
6.6.3	Marche en parallèle avec le réseau.	142
6.6.4	Marche en îlot.	143
	Chapitre 7. Energie photovoltaïque.	145
7.1	Bases physiques, effet photoélectrique	145
7.1.1	La photoconduction.	146
7.1.2	La jonction P-N.	148
7.2	Effet photovoltaïque, courant photoélectrique.	149
7.3	Cellule solaire, rendement total.	156
7.3.1	Caractéristique et schéma équivalent.	156
7.3.2	Tension à vide.	158
7.3.3	Facteur de remplissage.	160
7.3.4	Rendement global.	161
7.3.5	Possibilités d'amélioration du rendement.	162
7.3.6	Types de cellules solaires.	163
7.4	Le Soleil comme source d'énergie.	165
7.4.1	Intensité de rayonnement extraterrestre.	165
7.4.2	Mouvement apparent du Soleil autour de la Terre.	166
7.4.3	Calcul de la position du Soleil.	169
7.4.4	Calcul de l'intensité de rayonnement.	169
7.4.5	Energie de rayonnement journalière.	171
7.4.6	Effet de l'atmosphère.	173
7.4.7	Intensité de rayonnement avec atmosphère.	174

7.5	Systèmes photovoltaïques.	177
7.5.1	Modules et générateurs solaires.	177
7.5.2	Systèmes PV en îlot.	177
7.5.3	Installations PV couplées au réseau.	178
7.5.4	Onduleur.	179
7.5.5	Modélisation des modules et générateurs solaires.	181
Chapitre 8. Piles à combustible.		185
8.1	Structure et types.	185
8.2	Principe et modèle.	187
8.2.1	Bases électro-chimiques.	187
8.2.2	Modèle linéaire.	189
8.3	Piles à combustible pour applications stationnaires.	190
8.3.1	Pile à combustible à l'acide phosphorique (PAFC).	190
8.3.2	Pile à combustible céramique (SOFC).	191
8.3.3	Systèmes et centrales à pile à combustible.	192
Chapitre 9. La fusion thermonucléaire.		193
9.1	Bases du processus de fusion.	193
9.1.1	Réacteurs à fusion.	193
9.1.2	Distribution de l'énergie.	194
9.2	Le réacteur à fusion.	195
9.2.1	Principe du réacteur (d-t).	195
9.2.1.1	Réaction de fusion dans le plasma.	197
9.2.1.2	Réactions dans la couverture.	198
9.2.2	Bilan énergétique du plasma.	198
9.2.3	Le problème du confinement.	201
9.2.3.1	Le confinement magnétique.	202
9.2.3.2	Le confinement inertiel.	205
9.3	Etat actuel et perspectives de la fusion nucléaire.	205
9.3.1	Programme international de recherche.	205
9.3.2	Avantages de la fusion, problèmes technologiques.	206
Annexes.		207
Annexe I Thermodynamique.		209
I.1	Notions de base.	209
I.1.1	Grandeurs d'état.	209
I.1.2	Transformations thermodynamiques.	210

XII	Les réseaux d'énergie électrique 3B	
I.1.3	Premier principe, bilan énergétique.....	211
I.1.3.1	Systèmes fermés.....	211
I.1.3.2	Ecoulements (systèmes ouverts).....	212
I.1.4	Entropie, deuxième principe.....	214
I.2	Cycles thermodynamiques.....	215
I.2.1	Cycle de Carnot.....	215
I.2.2	Exergie, rendements.....	216
I.2.3	Cycle thermodynamique général.....	217
I.3	Transformations partielles.....	218
I.3.1	Transformation isotherme.....	218
I.3.2	Transformation isobare.....	219
I.3.3	Transformation isochore.....	219
I.3.4	Transformation adiabate.....	220
I.3.4.1	Transformation isentropique (adiabate réversible).....	221
I.3.4.2	Transformation isoenthalpe (étranglement adiabate).....	221
I.3.5	Changement d'état polytrophe.....	222
I.4	Cycles thermodynamiques techniques.....	222
	Annexe II Eléments de physique nucléaire.....	225
II.1	Structure de l'atome et énergie de liaison.....	225
II.2	Isotopes.....	228
II.3	Radioactivité.....	229
II.4	Réactions nucléaires.....	230
II.5	Section efficace et taux de réaction.....	230
II.6	La fission nucléaire.....	232
II.6.1	La fission de l'uranium 235 (U^{235}).....	232
II.6.2	Matières fissiles et matières fertiles.....	234
	Annexe III Fonction gamma.....	237
	Annexe IV Diagramme de Mollier, fluides frigorigènes.....	239
	Annexe V Solutions des exercices.....	243
	Bibliographie.....	247
	Index.....	251

Coauteur du volume 3B : Heinrich Kleinen, Siemens, Erlangen, Allemagne.