

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

ENERGÉTIQUE

Machines à froid et pompes à chaleur

De la théorie à la pratique
Cours et problèmes corrigés

André LALLEMAND

ellipses

2-621-2-1

2-621-2-1

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

ENERGÉTIQUE



Machines à froid et pompes à chaleur

De la théorie à la pratique
Cours et problèmes corrigés

André LALLEMAND

Professeur émérite
INSA de Lyon



SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	V
NOMENCLATURE.....	X
Chapitre I. CONVERSION DE L'ÉNERGIE – MACHINES THERMIQUES.....	1
1. Rappels de thermodynamique	1
1.1. Définitions et conventions	1
1.2. Conservation de l'énergie en systèmes fermés ou ouverts – Bilan enthalpique	4
1.3. Qualité de l'énergie - Entropie – Irréversibilités - Bilan entropique	7
2. Cycles thermodynamiques – Convertisseurs thermomécaniques – Rendements.....	10
2.1. Cycles d'évolution – Moteurs et générateurs thermomécaniques	10
2.2. Rendements	11
2.3. Convertisseurs de Carnot	13
2.4. Convertisseurs à cycles quelconques	14
3. Exergie – Anergie – Bilans exergetiques	15
3.1. Définition de l'exergie	15
3.2. Exergie et irréversibilités	16
3.3. Transferts thermiques et flux exergetiques	17
3.4. Bilans exergetiques et anergétiques	19
3.5. Application à un convertisseur thermique	20
Chapitre II. CARACTÉRISTIQUES DES FLUIDES, ÉVOLUTIONS, TRANSFERTS	22
1. Variation des fonctions d'état des fluides purs	22
1.1. Expressions des échanges thermiques - Coefficients calorimétriques	22
1.2. Expressions des variations des fonctions d'état	23
2. Caractéristiques des fluides - Diagrammes	24
2.1. Gaz parfait	24
2.2. Gaz réels et vapeurs	27
2.3. Liquides	31
2.4. Fluides diphasiques	33
2.5. Diagrammes complets	36
2.6. Cas des mélanges	37

3. Polytropes et autres évolutions particulières	40
3.1. Évolutions polytropiques	41
3.2. Énergies mises en œuvre - Rendements	42
3.3. Laminage	43
3.4. Compressions refroidies et étagées	43
4. Transferts de masse, de chaleur et de quantité de mouvement.....	45
4.1. Bilan de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique	45
4.2. Bilan de l'énergie – Énergie thermique	48
4.3. Similitude et analyse dimensionnelle	50
Chapitre III. CYCLES DE BASE DES GÉNÉRATEURS À COMPRESSEURS	53
1. Générateurs thermiques à gaz.....	53
1.1. Générateurs à cycles de Stirling ou d'Ericsson	53
1.2. Générateurs à cycle de Joule	60
1.3. Applications des cycles à gaz	67
2. Générateurs à compression de vapeur	67
2.1. Cycle de base – cycle de Carnot	67
2.2. Cycle modifié – Cycle de Hirn inversé	68
2.3. Cycle réel à surchauffe et sous-refroidissement	70
2.4. Cycles particuliers	74
3. Bilans énergétiques et exergetiques.....	85
3.1. Cas d'une machine frigorifique	85
3.2. Cas d'une pompe à chaleur	89
Chapitre IV. FLUIDES FRIGORIGÈNES, CALOPORTEURS, FRIGOPORTEURS	92
1. Fluides frigorigènes	92
1.1. Historique et contraintes environnementales	92
1.2. Nomenclature	94
1.3. Caractéristiques et critères de choix	95
1.4. Fluides préconisés pour les divers domaines d'application	97
1.5. Cas particuliers d'utilisation des mélanges zéotropiques et du CO ₂	98
2. Fluides caloporteurs.....	100
2.1. Cas des pompes à chaleur (PAC)	100
2.2. Cas des machines frigorifiques (MAF)	101
3. Fluides frigoporteurs	101
3.1. Cas des PAC	101
3.2. Cas des MAF	103
3.3. Critères de choix d'un frigoporteur	112

Chapitre V. MACHINES TRITHERMES	113
1. Couplage moteur-générateur thermiques	113
1.1. Machines quadrithermes	113
1.2. Machines trithermes	114
2. Machines trithermes mécaniques	117
2.1. Machines trithermes à motocompresseur	117
2.2. Machines à éjectocompression	118
3. Machines à sorption.....	123
3.1. Machines à absorption	123
3.2. Machines à résorption	135
3.3. Machine à adsorption	136
Chapitre VI. MACHINES ET PROCÉDÉS PARTICULIERS.....	140
1. Thermofrigopompes	140
2. Machines hybrides.....	141
2.1. Machines à compression-absorption	141
2.2. Machines à compression-éjection	141
3. Recompression mécanique de vapeurs (RMV)	145
4. Systèmes basés sur des phénomènes physiques particuliers	146
4.1. Machines à gaz permanent	146
4.2. Production de froid ou de chaleur par effet thermoélectrique	151
Chapitre VII. MACHINES CRYOGÉNIQUES.....	157
1. Couplage de machines dithermes	157
1.1. Machines à cycles polyétagés et fluide unique	157
1.2. Machines en cascade	159
2. Liquéfaction des gaz.....	162
2.1. Méthode par refroidissement externe	163
2.2. Méthode par compression et détente	163
3. Couplage de machines en cascade et de machines de liquéfaction	172
4. Effets thermomagnétiques	175
Chapitre VIII. COMPRESSEURS FRIGORIFIQUES	178
1. Compresseurs volumétriques.....	178
1.1. Compresseurs alternatifs	178
1.2. Compresseurs rotatifs	184
1.3. Particularités de fonctionnement et dispositifs	188
2. Compresseurs dynamiques	190
2.1. Présentation générale - Utilisation	190

2.2. Principe de fonctionnement - Caractéristiques	190
2.3. Fonctionnements semblables	197
2.4. Application aux machines à froid	197
Chapitre IX. ÉCHANGEURS THERMIQUES	199
1. Types d'échangeurs	199
2. Échangeurs sans changement de phase	201
2.1. Coefficient d'échange thermique global	201
2.2. Coefficients de transfert convectif	203
2.3. Pertes de charge	204
2.4. Moyenne logarithmique des différences de température (DTLM)	204
2.5. Efficacité d'un échangeur	208
2.6. Nombre d'unités de transfert (NUT)	211
2.7. Utilisation des diverses méthodes de calcul	212
3. Échangeurs avec changements de phase	213
3.1. Condensation	213
3.2. Ébullition	214
3.3. Condenseurs et évaporateurs	216
4. Analyse exergetique des échangeurs	217
Chapitre X. PROBLÈMES D'APPLICATIONS	221
1. Générateurs thermiques à gaz	221
1.1. Machine frigorifique à air à deux étages de compression : axial et centrifuge	221
1.2. Pompe à chaleur à air à compresseur axial à quatre étages	224
2. Générateurs thermiques à compression de vapeur	228
2.1. Réfrigération d'une chambre froide par une machine frigorifique au R1234yf	228
2.2. Machine frigorifique à ammoniac et compresseur à piston mono-étagé	231
2.3. Pompe à chaleur au butane - Compresseur à piston - Condenseur, évaporateur	233
2.4. Machine frigorifique utilisant de l'isobutane et un compresseur centrifuge	236
2.5. Machine frigorifique au CO ₂ et compresseur à piston	240
3. Machines multi-étagées à refroidissement intermédiaire	242
3.1. Machine frigorifique à compresseur à pistons bi-étagé et refroidissement intermédiaire	242
3.2. Climatiseur au CO ₂ - Compresseur centrifuge bi-étagé à aubages normaux	244
3.3. Machine frigorifique bi-étagée avec un échangeur intermédiaire à mélange	246
3.4. Machine frigorifique à compression et détente étagées - Compresseur à pistons - Influence du volume mort	249
3.5. Pompe à chaleur à compression et détente bi-étagées, échangeur intermédiaire à surface d'échange et ballon séparateur de phases	252

4. Comparaison générateur à gaz /générateur à vapeur	256
4.1. Machine frigorifique au propane avec compresseur à pistons différentiels	256
4.2. Pompe à chaleur à très haute température - Cycles à vapeur en cascades	259
5. Machines trihermes	263
5.1. Machine frigorifique à absorption – Couple ammoniac-eau	263
5.2. Transformateur thermique à absorption – Couple eau/bromure de lithium – Calcul d'un échangeur thermique	266
5.3. Machine de climatisation solaire à éjectocompresseur	271
6. Machines particulières.....	274
6.1. Thermofrigopompe à deux étages avec un compresseur à vis	274
6.2. Concentration d'un lactosérum par compression mécanique de vapeur (CMV).....	276
6.3. Réfrigération par effet Peltier	279
7. Machines cryogéniques	280
7.1. Machine de congélation à air - Compresseur centrifuge et turbine de détente	280
7.2. Production frigorifique à -140 °C à l'aide de trois machines en cascade – Étude des irréversibilités composant par composant	286
7.3. Liquéfaction – Comparaison entre machine de Hampton et machine de Claude.....	292
Chapitre XI. ANNEXES	301
1. Tables thermodynamiques	301
2. Figures et diagrammes.....	303
3. Références bibliographiques	332
INDEX.....	334