Sommaire

Préface 13

COURS

Chapitre 1 17

1) Réservoirs 17

a) Le réservoir mécanique 17

b) Le réservoir thermique 17

c) Le réservoir de masse 18

2) Systèmes 18

3) Grandeurs thermodynamiques 19

4) État d'équilibre 19

Zéro principe 19

a) S'il n'y a pas équilibre 19

b) S'il y a équilibre 19

Chapitre 2 20

Le premier principe de la thermodynamique 20

Gaz parfait 21

Chapitre 3 22

Second principe de la thermodynamique : nombre des transformations réversibles et irréversibles 22

Énoncé de Kelvin du second principe 23

Chapitre 4 27

Fonctions caractéristiques 27

Potentiels thermodynamiques 29

Travail maximal 33

Chapitre 5 34

Expression de l'énergie d'un système ouvert 35

Relation de Gibbs Duhem dans la représentation entropique 35

Variance ou nombre des variables indépendantes dans un système 36

Chapitre 6 37

Paradoxe de Gibbs 37

Théorème de Gibbs 37

Détente de Joule Kelvin 38

EXERCICES ET CORRIGÉS

Exercices partie 1 43
Problème I – Application second principe, système adiabatiques 43
Problème II – Fonction caractéristique U(S,V,n) 44
Solutions partie 1 45
Exercices partie 2 48
Problème I – Interprétation géométrique du rendement 48
Problème II – Système liquide-vapeur 49
Problème III – Système isolé ΔS>0 50
Solutions partie 2 51
Exercices partie 3 55
Problème I – Condition nécessaire pour un cycle possible 55
Problème II – Premier principe et Jacobien 56
Solutions partie 3 57
Exercices partie 4 60
Problème I – Interprétation géométrique du rendement 60
Problème II – Fonction caractéristique G d'un mélange 60
Problème III – Second principe, transformation monotherme 61
Problème IV – Gaz réel de Van der Waals, liquide-vapeur 62
Solutions partie 4 62
Exercices partie 5 66
Problème I – Équation d'état et Jacobien 66
Problème II – Équation d'état, grandeurs expérimentales 66
Problème III – Second principe, système à trois chambres 66
Problème IV – Second principe, application monotherme 67
Solutions partie 5 68
Exercices partie 6 71
Problème I – Gaz paramagnétique, désaimantation adiabatique 71
Problème II – Visualisation du second principe, système adiabatique 71
Solutions partie 6 73
Exercices partie 7 76
Problème I – Gaz des photons 76
Problème II – Énergie interne et équation d'état 76
Problème III – États de système adiabatique de N corps 76
Solutions partie 7 77
Exercices partie 8 79
Problème I – Signe des inégalités et conditions de stabilité 79
Problème II – Fonction caractéristique et température d'inversion 79
Problème III – Choix de fonction caractéristique 79

Problème IV – Rendement d'un mélange 80
Problème V – Second principe et cycle possible 80
Solutions partie 8 80
Exercices partie 9 83
Problème I – Système non thermodynamique 83
Problème II – Équation d'état réduite 84
Problème III – Processus irréversibles dans un système isolé 84
Solutions partie 9 85
Exercices partie 10 88
Problème I – Signe des pentes dans plusieurs plans 88
Problème II – Principe Zéro 88
Problème III – Système isolé, gaz réel 89
Problème IV – Cas général d'un système adiabatique 90
Solutions partie 10 90
Exercices partie 11 93
Problème I – Premier principe 93
Problème II – Relation entre les pentes 93
Problème III – Rapport chaleurs spécifiques et compressibilités 93
Problème IV – Équation réduite de Dieterici 93
Problème V – Adiabatique et énergie interne 94
Problème VI – Potentiel thermique et travail maximal 94
Problème VII – Détente de Joule-Thomson 94
Solutions partie 11 94
Exercices partie 12 97
Problème I – Conditions de stabilité 97
Problème II – Énergie interne, isochore et adiabatique 98
Problème III – Passage à une fonction caractéristique 98
Problème IV – Mélange des gaz dans un système isolé 98
Solutions partie 12 99
Exercices partie 13 101
Problème I – Relations de Maxwell 101
Problème II – Fonction caractéristique S(U, V) 101
Problème III – Adiabatiques et monotherme couplées 102
Solutions partie 13 103
Exercices partie 14 105
Problème I – Potentiel thermique et travail maximal 105
Problème II – Fonctions mathématiques acceptables 105
Problème III – Propriétés de gaz selon Van Der Waals 106
Solutions partie 14 106

Exercices partie 15 109
Problème I – Comparaison avec le cycle de Carnot 109
Problème II – Relation de Gibbs dans la représentation entropique 109
Problème III – Passage de (T, S) à (P, V) 110
Problème IV – Fonction caractéristique dérivant de l'entropie 110
Solutions partie 15 111
Exercices partie 16 114
Problème I – Rapport spécifique pour un mélange 114
Problème II – Températures d'inversion de plusieurs systèmes 114
Problème III – Chaleurs spécifiques 115
Problème IV – L'importance des conditions de stabilité 115
Solutions partie 16 116
Exercices partie 17 119
Problème I – Étude générale des gaz parfaits sans second principe 119
Problème II – Rendement mathématique et physique 119
Problème III – Fluctuation d'Einstein 120
Solutions partie 17 121
Exercices partie 18 127
Problème I – Sens d'un cycle moteur 127
Problème II – Système isolé, trois chambres 128
Problème III – Fonction caractéristique S(U, V, n) 128
Problème IV – Lecture graphique de l'état du système 129
Solutions partie 18 129
Exercices partie 19 131
Problème I – Équation d'état et coefficients expérimentaux 131
Problème II – Fonctions caractéristiques F(T, V) 132
Problème III – Relation entre rendement et rapport spécifique 132
Problème IV – Théorème de Gibbs 132
Problème V – Intervalle acceptable par critères de stabilité 133
Solutions partie 19 133
Exercices partie 20 136
Problème I – Isotherme, isobare, isochore 136
Problème II – Dieterici et courbe d'inversion 136
Problème III – Changement de plans 137
Problème IV – Travail maximal et réservoir thermique 137
Solutions partie 20 138
Exercices partie 21 140
Problème I – Second principe, cycle possible 140
Problème II – Cycle : Adiabatique, isobare, isochore 141
Problème III – Système isolé complexe 142

Problème IV – Visualisation de la nature du gaz 142
Solutions partie 21 144
Exercices partie 22 146
Problème I – Cycles et transformation de (P, V) à (T, S) 146
Problème II – Transformations adiabatiques couplées 146
Problème III – Couplage de deux machines 147
Problème IV – Système non thermodynamique dans le plan (T, V) 148
Solutions partie 22 148
Exercices partie 23 150
Problème I – Variation de l'énergie interne 150
Problème II – Équilibre mécanique et équilibre thermique 151
Problème III – Détente de Joule Thomson bien définie 152
Solutions partie 23 153
Exercices partie 24 155
Problème I – Transformations réversibles et irréversibles 155
Problème II – Fonction caractéristique G(T, P) 155
Problème III – Comparaison capacités calorifiques, système ouvert 156
Problème IV – Appareil de Joule 156
Solutions partie 24 157
Exercices partie 25 160
Problème I – Chaleurs spécifiques, système fermé 160
Problème II – De U(T, V) et l'adiabatique à l'équation d'état 161
Problème III – Relation de Maxwell entropique 161
Problème IV – Travail maximal et réservoir mécanique 161
Solutions partie 25 162
Exercices partie 26 164
Problème I – Cycle : isothermes, isobares dans (T, P) 164
Problème II – Paradoxe de Gibbs 165
Problème III – L'initiale de l'irréversibilité dans un cycle 165
Problème IV – Fonction de Massieu 166
Solutions partie 26 166
Exercices partie 27 168
Problème I – Cycle double boucles 168
Problème II – Jacobien, sens moteur 169
Problème III – Détente de Joule avec plusieurs systèmes 170
Solutions partie 27 171
Exercices partie 28 175
Problème I – Cycle : deux isobares, deux isochores 175
Problème II – Signe de pentes, cas général 175

Problème III – Critères de possibilité d'un cycle réversible 175
Problème IV – Travail maximal de trois corps 176
Solutions partie 28 177
Exercices partie 29 180
Problème I – Cycle ditherme, agent non défini 180
Problème II – Deux corps, une source, échauffement du plus chaud 180
Problème III – Trois corps, échauffement du plus chaud 181
Problème IV – Cycle possible : une droite et une adiabatique 181
Solutions partie 29 182
Exercices partie 30 186
Problème I – Cycle, passage de (S, V) à (V, T) 186
Problème II – Passage de fonction d'état à fonction caractéristique 187
Problème III – Vitesse du son dans l'air 188
Problème IV – Allure des fonctions Thermodynamiques 188
Solutions partie 30 188
Exercices partie 31 192
Problème I – Adiabatique d'un mélange de gaz parfait 192
Problème II – Sens moteur, chaleur globale positive 192
Problème III – Tension superficielle 193
Problème IV – Adiabatiques couplées sous réservoir mécanique 193
Solutions partie 31 194
Exercices partie 32 199
Problème I – Processus historiquement irréversible 199
Problème II – Critères de stabilité, fonction U(T, V) acceptable 199
Problème III – Travail maximal de trois corps isolés 200
Problème IV – Cycle réversible : isotherme, isochore et adiabatique 200
Problème V – Limite d'une transformation réelle 201
Solutions partie 32 202
Exercices partie 33 204
Problème I – Fonction caractéristique d'un mélange binaire 204
Problème II – Chaleur indépendante du chemin 205
Problème III – Passage de H(S, P) à U(S, V) 205
Problème IV – Cycle dans le plan (H, P) 205
Problème V – Loi de Raoult 206
Solutions partie 33 206
Exercices partie 34 209
Problème I – Apparence de rendements 209
Problème II – L'enthalpie, produit de variables naturelles séparées 210
Problème III – Travail maximal, sources mécaniques et thermiques 211
Solutions partie 34 212

Exercices partie 35 215
Problème I – Application directe, mélange d'un gaz parfait 215
Problème II – Moteur entre deux corps 216
Problème III – Divergence au point critique 216
Problème IV – De CV et adiabatiques à la fonction caractéristique 216
Solutions partie 35 217
Exercices partie 36 219
Problème I – Application directe du Premier principe 219
Problème II – Cycle circulaire à centre variable 219
Problème III – Un système et réservoir thermique 220
Problème IV – Concentration molaire d'un mélange 220
Problème V – U, produit de variables naturelles séparées 220
Solutions partie 36 220
Exercices partie 37 222
Problème I – Fonction caractéristique u(s, v) 222
Problème II – Système non thermodynamique dans le plan (T, P) 222
Problème III – Théorème de Gibbs 222
Problème IV – Cycle à une ou plusieurs boucles 222
Problème V – Critère de sens moteur d'une seule boucle 223
Solutions partie 37 224
Exercices partie 38 227
Problème I – Cycles : isobares, adiabatiques et un isochore 227
Problème II – Application directe, mélange de gaz parfaits 228
Problème III – Relation de Maxwell entropique et Massieu 228
Solutions partie 38 229
Exercices partie 39 231
Problème I – Calcul d'une équation d'état 231
Problème II – Différence équation d'état - fonction caractéristique 231
Problème III – Mélange de trois gaz parfaits 231
Problème IV – Cycle double boucles 232
Solutions partie 39 233
Exercices partie 40 234
Problème I – Lois de Joule, le débit de la thermodynamique 234
Problème II – Mesure de grandeurs physiques adaptées 235
Problème III – Fonction caractéristique, mélange binaire 235
Solutions partie 40 236
Appendice 239