

Alexandre Watzky

Thermodynamique macroscopique

À l'usage des étudiants
en sciences de l'ingénieur

Préface de Jean Coirier

**COURS, EXERCICES ET
PROBLÈMES CORRIGÉS**

LMD

Licence (L3) et Master (M1)
de Sciences et technologie,
écoles d'ingénieurs



de boeck

Table des matières

Préface	VII
Avant-propos.....	IX
Chapitre 1 Généralités.....	1
1. "Quelques" définitions.....	2
1.1. Système	2
1.1.1. Définition	2
1.1.2. Cas particuliers	2
1.1.3. Conventions.....	3
1.2. Approche macroscopique vs. approche microscopique.....	3
1.2.1. Les deux types d'approche.....	3
1.2.2. Milieu continu.....	4
1.2.3. Particule macroscopique.....	4
1.2.4. Champ matériel.....	4
1.3. État	4
1.3.1. Configuration, propriétés, état.....	4
1.3.2. Grandeurs extensives ou intensives.....	5
1.3.2.a. Grandeurs extensives.....	5
1.3.2.b. Grandeurs intensives.....	5
1.3.2.c. Grandeurs spécifiques ou densités.....	5
1.3.3. Variables d'état, fonctions d'état, variance	6
1.3.4. Choix des variables d'état	6
1.3.5. "Hypothèse" de l'état local.....	6
1.4. Évolution (ou non).....	7
1.4.1. Évolution.....	7
1.4.2. Équilibre.....	7
1.4.2.a. Équilibre thermodynamique.....	7
1.4.2.b. Hypothèse de l'équilibre local.....	8
1.4.2.c. État d'accompagnement local.....	8
1.5. Thermodynamique ou thermostatique ? (I).....	8
1.6. Source	8
1.7. Iso- et mono-.....	9
2. Rappels sur les fonctions de plusieurs variables.....	9
2.1. Transformations infinitésimales.....	9
2.2. Différentielle d'une fonction de plusieurs variables.....	10

2.2.1.	Forme différentielle.....	10
2.2.2.	Différentielle.....	10
2.2.3.	Conditions de Cauchy.....	10
2.3.	Notations.....	10
2.3.1.	Coefficients d'une forme différentielle et dérivées partielles.....	10
2.3.2.	Choix des variables.....	11
2.3.3.	Changement de variables.....	11
2.4.	Dérivées partielles, équations d'état et loi d'état	11
E 1.	Exercices sur le chapitre 1.....	13
	<i>Énoncés</i>	13
	<i>Solutions</i>	14
Chapitre 2 Éléments de mécanique des milieux continus.....		15
1.	Notations et rappels sur les opérateurs différentiels.....	16
1.1.	Convention de l'indice muet.....	16
1.2.	Opération sur les tenseurs	17
1.3.	Opérateurs différentiels	18
1.3.1.	Définitions.....	18
1.3.2.	Propriétés.....	18
1.3.3.	Matrice jacobienne.....	19
	1.3.3.a. Définition.....	19
	1.3.3.b. Application aux différentielles.....	19
	1.3.3.c. Jacobien.....	19
1.4.	Transformations d'intégrales.....	19
1.5.	Décompositions d'un tenseur du second ordre	20
	1.5.1. Parties symétrique et antisymétrique.....	20
	1.5.2. Vecteur dual.....	20
	1.5.3. Sphérique et déviateur.....	20
2.	Cinématique.....	21
2.1.	Les deux types de descriptions.....	21
	2.1.1. Description eulérienne	21
	2.1.2. Description lagrangienne.....	21
2.2.	Dérivée particulaire.....	21
2.3.	Hypothèses cinématiques	22
	2.3.1. Principe de non-interpénétrabilité de la matière	22
	2.3.2. Hypothèse de régularité.....	22
2.4.	Cinématique et déformations	23
	2.4.1. Description lagrangienne.....	23
	2.4.2. Description eulérienne	25
	2.4.3. Relations entre les deux descriptions.....	26
	2.4.4. Conditions de compatibilité de $\overline{\overline{D}}$	26
	2.4.5. Cas des petites perturbations (H.P.P.).....	26
2.5.	Dilatation volumique.....	27
2.6.	Transport d'un élément de surface matérielle	28

3.	Principe fondamental de la mécanique	28
3.1.	Les trois lois de Newton	28
3.1.1.	Référentiel galiléen	28
3.1.1.a.	Principe d'inertie (première loi de Newton)	29
3.1.1.b.	Référentiel galiléen	29
3.1.2.	Relation fondamentale de la dynamique (deuxième loi de Newton)	29
3.1.3.	Principe des actions réciproques (troisième loi de Newton)	29
3.2.	Remarques	29
3.2.1.	Galiléen ou non ?	29
3.2.2.	Sur le concept de force et la modélisation des efforts mécaniques	30
4.	Équations de bilan	30
4.1.	Expression générale	31
4.2.	Remarques	31
4.3.	Cas des systèmes géométriquement fixés	32
4.3.1.	Description eulérienne	32
4.3.2.	Description lagrangienne	32
5.	Conservation de la masse et dérivation matérielle	33
5.1.	Loi de Lavoisier	33
5.2.	Principe de conservation de la masse	33
5.2.1.	Description eulérienne	34
5.2.2.	Description lagrangienne	34
5.3.	Conservation de la masse et forme locale des équations de bilan	35
5.4.	Considérations matérielles	35
5.5.	Dérivée matérielle d'une intégrale de volume	35
5.6.	Cas des mélanges	36
5.6.1.	Dérivée particulière par rapport à un constituant	36
5.6.2.	Vitesse barycentrique	37
5.6.3.	Convection et diffusion	37
5.6.4.	Conservation de la masse des constituants	37
6.	Conservation de la quantité de mouvement	38
6.1.	Conservation de la quantité de mouvement	38
6.2.	Description eulérienne	38
6.2.1.	Tenseur des contraintes de Cauchy	38
6.2.2.	Forme locale de la conservation de la quantité de mouvement	39
6.3.	Description lagrangienne	40
6.3.1.	Premier tenseur des contraintes de Piola-Kirchhoff	40
6.3.2.	Conservation de la quantité de mouvement en description lagrangienne	41
6.3.3.	Second tenseur des contraintes de Piola-Kirchhoff	41
6.4.	Cas des petites perturbations (H.P.P.)	41
7.	Pression dans un fluide	41
7.1.	Pression	41
7.2.	Non-négativité de la pression	42
7.2.1.	Mise en évidence de la pression	42

7.2.2.	Interprétation microscopique	42
7.2.3.	Pression absolue.....	42
7.3.	Digression sur l'existence de la pression	43
7.3.1.	Contact entre deux systèmes	43
7.3.2.	Équilibre mécanique	43
7.3.3.	Existence de la pression	44
E 2.	Exercices sur le chapitre 2.....	44
	Énoncés	44
	Solutions	46
Chapitre 3	Principe zéro	51
1.	Température (I)	52
1.1.	Paroi adiabatique, équilibre thermique	52
1.1.1.	Contact entre deux systèmes	52
1.1.2.	Équilibre thermique	53
1.2.	Principe zéro et température empirique.....	53
1.2.1.	Principe zéro de la thermodynamique	53
1.2.2.	Température empirique.....	53
1.2.3.	Sur le principe zéro	54
1.2.4.	Reformulation du principe zéro.....	54
1.3.	Échelle(s) des températures	54
1.3.1.	Mesure de la température.....	54
1.3.2.	Échelles de températures classiques.....	55
1.3.2.a.	Échelle Celsius des températures.....	55
1.3.2.b.	Échelle Fahrenheit des températures.....	55
1.3.2.c.	Thermomètre de référence	56
1.3.3.	Températures absolues.....	56
1.3.3.a.	Échelle Kelvin.....	57
1.3.3.b.	Échelle de Rankine	58
1.4.	À propos du gaz idéal (I).....	58
2.	Gaz idéal	58
2.1.	À propos du gaz idéal (II).....	58
2.2.	Premières approches.....	58
2.3.	Loi d'Avogadro-Ampère	60
2.4.	Gaz idéal.....	60
E 3.	Exercices sur le chapitre 3.....	61
	Énoncés	61
	Solutions	62
Chapitre 4	Premier principe.....	65
1.	Énergies et puissances	66
1.1.	Concept d'énergie	66
1.2.	Énergies propres.....	66
1.2.1.	Énergie cinétique	66

1.2.2.	Énergie interne.....	67
1.2.3.	Énergie totale.....	67
1.2.4.	Sur les valeurs des énergies propres.....	67
1.3.	Énergies échangées.....	67
1.3.1.	Puissances.....	67
1.3.1.a.	Puissance mécanique.....	68
1.3.1.b.	Autres puissances macroscopiques.....	68
1.3.1.c.	Puissance calorifique.....	68
1.3.2.	Travail.....	69
1.3.3.	Chaleur.....	69
2.	Travail des efforts de pression uniforme.....	70
2.1.	Puissance des efforts de pression.....	70
2.2.	Cas d'une pression uniforme.....	70
2.3.	Diagramme de Clapeyron.....	71
2.3.1.	Interprétation graphique du travail.....	71
2.3.2.	Cas des cycles.....	72
2.3.3.	Remarques.....	72
3.	Théorème de l'énergie cinétique.....	72
3.1.	Théorème de la puissance cinétique.....	72
3.1.1.	Description eulérienne.....	72
3.1.2.	Description lagrangienne.....	73
3.2.	Variation d'énergie cinétique entre deux états.....	74
3.3.	Cas conservatif.....	75
3.3.1.	Force dérivant d'un potentiel, énergie potentielle.....	75
3.3.2.	Énergie mécanique.....	75
4.	Principe des puissances virtuelles.....	75
4.1.	Mouvement virtuel.....	75
4.2.	Principe des puissances virtuelles.....	76
4.2.1.	Puissances virtuelles.....	76
4.2.2.	Principe de d'Alembert.....	77
5.	Premier principe de la thermodynamique.....	77
5.1.	Conservation de l'énergie.....	77
5.2.	Principe d'équivalence.....	78
5.3.	Premier principe et énergie interne.....	79
5.4.	Sur le mouvement perpétuel (I).....	79
5.5.	Forme différentielle du premier principe.....	80
6.	Bilans d'énergie.....	80
6.1.	Conséquence du théorème de l'énergie cinétique.....	80
6.2.	Digression sur l'énergie potentielle.....	81
7.	Enthalpie.....	81
7.1.	Cas d'un système ouvert.....	81
7.1.1.	Bilan de puissance sur un système ouvert.....	81
7.1.2.	Dynalpie.....	83
7.1.3.	Application aux écoulements.....	83

7.1.3.a.	Cas général instationnaire.....	83
7.1.3.b.	Cas stationnaire.....	83
7.2.	Transformations monobares d'un système fermé.....	84
7.3.	Enthalpie généralisée.....	84
8.	Coefficients calorimétriques (I)	84
8.1.	Première approche : capacité calorifique.....	84
8.2.	Coefficients thermoélastiques.....	85
8.3.	Coefficients calorimétriques.....	86
8.3.1.	Chaleurs massiques.....	86
8.3.2.	Coefficients calorimétriques.....	86
8.4.	Relation de Reech.....	87
8.5.	Chaleurs massiques, énergie interne et enthalpie.....	88
9.	Signes des coefficients calorimétriques	88
9.1.	Stabilité mécanique.....	88
9.2.	Chaleur et température.....	89
9.2.1.	Signe des chaleurs massiques.....	89
9.2.2.	Stabilité thermique.....	89
9.3.	Valeur de γ	89
10.	Applications au gaz idéal	90
10.1.	Lois de Joule et coefficients calorimétriques.....	90
10.1.1.	Première loi de Joule.....	90
10.1.2.	Coefficients calorimétriques pour un gaz idéal.....	90
10.1.3.	Seconde loi de Joule.....	91
10.2.	Étude de quelques transformations.....	91
10.2.1.	Transformation isochore.....	91
10.2.2.	Transformation isobare.....	92
10.2.3.	Transformation isotherme.....	92
10.2.4.	Transformation adiabatique.....	92
10.2.5.	Transformation polytropique.....	93
E 4.	Exercices sur le chapitre 4	93
	Énoncés.....	93
	Solutions.....	99
Chapitre 5	Deuxième principe	111
1.	Réversibilité, irréversibilité	112
1.1.	Transformations réversibles, irréversibles.....	112
1.2.	Insuffisance du premier principe de la thermodynamique.....	113
1.3.	Nécessité et objectif d'un deuxième principe.....	113
1.4.	Forme du deuxième principe de la thermodynamique.....	114
1.5.	Sur la construction du deuxième principe.....	114
2.	Machines thermiques	114
2.1.	Définitions.....	114
2.1.1.	Source de chaleur.....	114

	2.1.2. Machine thermique.....	114
	2.1.3. Moteur thermique.....	115
	2.1.4. Machine frigorifique et pompe à chaleur.....	115
2.2.	Efficacité d'une machine thermique.....	115
3.	Premiers énoncés du deuxième principe.....	116
3.1.	Énoncé de Thomson (Kelvin).....	116
3.2.	Premier énoncé de Clausius.....	116
3.3.	Sur le sens de la chaleur.....	117
3.4.	Sur le mouvement perpétuel (II).....	117
3.5.	Équivalence des deux énoncés.....	117
4.	Principe de Carnot.....	118
4.1.	Cycle de Carnot.....	118
	4.1.1. Moteur de Carnot.....	118
	4.1.2. Machine frigorifique de Carnot.....	119
4.2.	Échanges d'énergie dans une machine de Carnot.....	119
	4.2.1. Machine de Carnot où le système est un gaz idéal.....	119
	4.2.2. Machine de Carnot quelconque.....	120
	4.2.3. Machines de Carnot et température (I).....	121
4.3.	Efficacité d'une machine de Carnot.....	121
	4.3.1. Rendement d'un moteur de Carnot.....	121
	4.3.2. Coefficient de performance frigorifique d'une machine de Carnot.....	121
	4.3.3. Coefficient de performance thermique d'une machine de Carnot.....	122
4.4.	Principe de Carnot.....	122
	4.4.1. Théorème de Carnot.....	122
	4.4.2. Conséquences.....	123
5.	Inégalités dans une machine ditherme.....	124
5.1.	Échanges d'énergie dans une machine ditherme.....	124
	5.1.1. Inégalité de Clausius.....	124
	5.1.2. Inégalité de Gouy.....	124
	5.1.3. Sur les températures.....	125
5.2.	Diagramme de Raveau.....	125
	5.2.1. Représentation dans le plan (Q_1, Q_2).....	125
	5.2.2. Point de fonctionnement d'une machine ditherme.....	126
6.	Machines thermiques quelconques.....	127
6.1.	Réversibilité et cycle de Carnot.....	127
6.2.	Échanges d'énergie dans une machine thermique quelconque.....	128
	6.2.1. Relations de Clausius.....	128
	6.2.2. Relations de Gouy.....	128
6.3.	Machines réelles.....	130
	6.3.1. Puissance d'une machine de Carnot.....	130
	6.3.2. Cycle réel.....	130
	6.3.3. Efficacité et irréversibilités.....	130
7.	Entropie.....	131
7.1.	Remarque préliminaire.....	131

7.2.	Entropie.....	131
7.2.1.	Définition.....	131
7.2.2.	Transformation irréversible.....	132
7.2.3.	Entropie et réversibilité.....	132
8.	Sur le deuxième principe de la thermodynamique.....	132
8.1.	Formulation entropique du deuxième principe.....	132
8.2.	Entropie de l'univers.....	133
8.3.	Taux d'irréversibilité.....	133
9.	Entropie et premier principe.....	133
9.1.	Forme différentielle de l'énergie interne.....	133
9.1.1.	Sans variation d'énergie cinétique.....	134
9.1.2.	Cas général.....	134
9.1.3.	Remarque.....	134
9.2.	Inégalité de Jouguet.....	134
10.	Bilan d'entropie.....	135
10.1.	Non-conservation de l'entropie.....	135
10.2.	Inégalité fondamentale et dissipation.....	136
11.	Diagramme entropique.....	136
11.1.	Représentation graphique de la chaleur.....	136
11.2.	Cycle de Carnot.....	138
E 5.	Exercices sur le chapitre 5.....	138
	Énoncés.....	138
	Solutions.....	141
Chapitre 6	Conséquences du deuxième principe.....	147
1.	Coefficients calorimétriques (II).....	148
1.1.	Nouvelles expressions des coefficients calorimétriques.....	148
1.1.1.	Chaleurs latentes de dilatation et de compression.....	148
1.1.2.	Coefficients thermoélastiques.....	148
1.1.3.	Chaleurs massiques : formules de Clapeyron.....	149
1.2.	Nouvelles relations sur γ	149
1.3.	Relation de Mayer généralisée.....	149
1.4.	Chaleurs massiques et diagramme entropique.....	150
2.	Température (II).....	150
2.1.	Température et machines de Carnot (II).....	150
2.2.	Température thermodynamique.....	151
2.2.1.	Température et entropie.....	151
2.2.2.	Définition de la température thermodynamique.....	152
2.2.3.	Sur les échelles de température.....	152
3.	Troisième principe de la thermodynamique.....	153
3.1.	Troisième principe.....	153
3.2.	Le zéro absolu comme une limite.....	153

	3.2.1. Conséquence du deuxième principe.....	153
	3.2.2. Conséquence du troisième principe.....	154
3.3.	Coefficients thermodynamiques aux très basses températures.....	154
	3.3.1. Chaleurs massiques.....	154
	3.3.2. Coefficients thermoélastiques.....	155
4.	Pression (II).....	155
	4.1. Pression thermodynamique.....	155
	4.2. Relation entre pressions thermodynamique et mécanique.....	155
5.	Deuxième principe et gaz idéal.....	156
	5.1. Coefficients calorimétriques et lois de Joule.....	156
	5.2. Entropie d'un gaz idéal.....	156
E 6.	Exercices sur le chapitre 6.....	157
	Énoncés.....	157
	Solutions.....	160
Chapitre 7 Potentiels thermodynamiques et équilibre... 165		
1.	Énergie libre.....	166
	1.1. Énergie utilisable de Helmholtz.....	166
	1.1.1. Transformation monotherme réversible.....	166
	1.1.2. Transformation monotherme irréversible.....	167
	1.1.3. Évolution sans échange de travail.....	167
	1.2. Énergie utilisable de Gouy.....	168
	1.2.1. Transformation réversible.....	168
	1.2.2. Transformation irréversible.....	168
	1.3. Énergie libre.....	168
2.	Enthalpie libre.....	169
	2.1. Cas des systèmes ouverts.....	169
	2.1.1. Bilan d'entropie.....	169
	2.1.2. Travail libérable dans une évolution monotherme.....	170
	2.1.2.a. Évolution monotherme : exergie.....	170
	2.1.2.b. Enthalpie libre, fonction de Gibbs.....	171
	2.2. Évolution monotherme et monobare d'un système fermé.....	171
3.	Transformation de Legendre.....	172
	3.1. Définition.....	172
	3.2. Interprétation de la transformation de Legendre.....	172
	3.3. Application à la thermodynamique.....	173
	3.2.1. Fonctions thermodynamiques.....	173
	3.2.2. Fonctions de Massieu.....	174
4.	Relations différentielles.....	174
	4.1. Coefficients.....	174
	4.2. Relations de Maxwell.....	175
	4.3. Transformations particulières.....	175

4.4.	Relations de Helmholtz.....	176
5.	Systèmes à composition variable.....	176
5.1.	Théorème d'Euler.....	176
5.2.	Relations de Gibbs, d'Euler et de Gibbs-Duhem.....	177
5.2.1.	Relation de Gibbs.....	177
5.2.2.	Relation d'Euler.....	178
5.2.3.	Relation de Gibbs-Duhem.....	178
5.2.4.	Différentielle massique.....	178
5.3.	Application à l'énergie interne d'un gaz.....	178
5.3.1.	Relation d'Euler.....	178
5.3.2.	Relation de Gibbs.....	179
5.3.3.	Relation de Gibbs-Duhem.....	179
5.3.4.	Relations massiques.....	179
5.4.	Retour sur la fonction de Gibbs.....	179
5.5.	Interprétation de la relation de Gibbs-Duhem.....	180
6.	Équilibre et stabilité.....	180
6.1.	Conditions d'équilibre.....	180
6.2.	Stabilité d'un équilibre.....	180
6.2.1.	Définition.....	180
6.2.2.	Cas de la mécanique (adiabatique).....	180
6.2.3.	Cas général.....	181
6.2.4.	Stabilité thermodynamique.....	181
7.	Potentiels thermodynamiques.....	182
7.1.	Évolutions adiabatiques.....	182
7.2.	Évolutions isothermes.....	182
7.2.1.	Évolutions isochores (et isothermes).....	183
7.2.2.	Évolutions isobares (et isothermes).....	183
7.3.	Énergie interne et enthalpie.....	183
7.3.1.	Différentielle seconde de l'énergie interne.....	183
7.3.2.	Différentielle seconde de l'enthalpie.....	184
7.4.	Sur les fonctions de Massieu.....	184
8.	Différentielles secondes : application aux gaz.....	184
8.1.	Différentielle seconde de l'énergie interne.....	184
8.2.	Conséquences : signe des chaleurs massiques.....	185
8.3.	Concavité des potentiels thermodynamiques.....	185
8.3.1.	Évolutions isochores.....	185
8.3.2.	Évolutions isobares.....	186
E 7.	Exercices sur le chapitre 7.....	186
	Énoncés.....	186
	Solutions.....	189

Chapitre 8	Bilan de principes	197
1.	Sur la construction du deuxième principe.....	198
1.1.	Les premiers énoncés	198
1.2.	L'entropie.....	199
2.	Les quatre principes fondamentaux.....	200
3.	Sur la résolution du problème.....	201
3.1.	Inventaire.....	201
3.1.1.	Équations fondamentales	201
3.1.2.	Inconnues.....	201
3.2.	Équations d'état.....	201
3.2.1.	Puissance des efforts intérieurs réversible.....	201
3.2.2.	Puissance des efforts intérieurs irréversible.....	202
3.3.	Lois phénoménologiques.....	202
3.4.	Variables internes	203
3.5.	Sur le choix des variables	203
4.	Thermostatique ou thermodynamique ? (II)	203
Chapitre 9	Gaz réels et mélanges.....	205
1.	Gaz réels.....	206
1.1.	Définition	206
1.2.	Modèles issus de la théorie cinétique des gaz.....	206
1.2.1.	Corrections.....	206
1.2.2.	Gaz de van der Waals.....	207
1.3.	Autres modèles.....	208
2.	Développement du viriel	208
2.1.	Définition	208
2.2.	Diagramme d'Amagat et température de Mariotte	209
2.3.	Applications.....	210
2.2.1.	Coefficients calorimétriques.....	210
2.2.2.	Énergie interne et enthalpie.....	210
3.	Mélanges.....	211
3.1.	Fractions.....	211
3.1.1.	Fraction massique.....	211
3.1.2.	Fraction molaire	211
3.1.3.	Fraction volumique.....	212
3.2.	Mélanges de gaz.....	212
3.2.1.	Pressions partielles	212
3.2.2.	Loi de Dalton.....	212
3.2.3.	Loi d'Amagat-Leduc.....	213
3.2.4.	Mélange de gaz idéaux	213
3.3.	Variables internes et lois complémentaires.....	213
3.4.	Potentiels pour un mélange.....	214

3.4.1.	Énergie interne.....	214
3.4.2.	Autres potentiels thermodynamiques.....	214
3.5.	Mélange idéal.....	215
3.5.1.	Mélange idéal de gaz idéaux.....	215
3.5.2.	Cas général.....	215
4.	Changements de phase d'un corps pur.....	216
4.1.	Transitions de phases.....	216
4.2.	Minimum de l'enthalpie libre.....	216
4.3.	Diagramme des phases.....	217
4.3.1.	Frontières entre deux phases.....	217
4.3.2.	Transition de phase du premier ordre.....	217
4.3.2.a.	Réversibilité.....	218
4.3.2.b.	Chaleur latente.....	218
4.3.2.c.	Courbes de transition.....	218
4.3.2.d.	Point triple.....	219
4.3.3.	Transition de phase du deuxième ordre.....	219
4.3.4.	Représentation dans le plan (T, p)	219
4.3.5.	Représentation dans l'espace (p, v, T)	219
4.4.	Représentation dans le plan (v, p)	220
4.4.1.	Diagramme d'Andrews.....	220
4.4.2.	Règle des moments.....	221
4.4.3.	Courbe de saturation.....	221
4.5.	Représentation dans le plan (s, T)	221
5.	Mélanges réactifs.....	222
5.1.	Description d'un mélange réactif.....	222
5.1.1.	Réaction chimique.....	222
5.1.2.	Avancement de réaction.....	222
5.2.	Grandeurs caractéristiques en thermochimie.....	223
5.2.1.	Affinité chimique.....	223
5.2.1.	Potentiels chimiques, activité.....	223
5.2.1.a.	Potentiel chimique d'un gaz idéal.....	223
5.2.1.b.	Mélange idéal de gaz idéaux.....	224
5.2.1.c.	Activité.....	224
5.2.1.d.	Mélange idéal.....	224
5.2.1.e.	Conditions standard.....	224
5.3.	Évolution (ou non).....	224
5.3.1.	Équilibre.....	225
5.3.2.	Condition d'évolution.....	225
5.3.3.	Enthalpie libre standard de réaction.....	225
5.3.4.	Loi d'action de masse.....	226
5.4.	Enthalpie et entropie standard de réaction.....	226
5.4.1.	Chaleur de réaction.....	227
5.4.2.	Chaleur de formation.....	227
5.4.3.	Loi de Hess.....	227
5.5.	Principe de modération de Le Chatelier.....	227
5.5.1.	Modification de la composition du mélange.....	228
5.5.1.a.	Ajout d'un constituant.....	228
5.5.1.b.	Ajout d'un gaz inerte.....	228

5.5.2.	Modification des conditions extérieures	228
5.5.2.a.	Variation de température.....	228
5.5.2.b.	Variation de pression	229
E 9.	Exercices sur le chapitre 9	229
	<i>Énoncés</i>	229
	<i>Solutions</i>	232
Chapitre 10 Introduction à la thermodynamique des milieux continus.....		237
1.	Transferts de chaleur	238
1.1.	Les modes de transfert de chaleur.....	238
1.1.1.	Conduction thermique.....	238
1.1.2.	Rayonnement thermique.....	238
1.1.3.	Convection thermique.....	238
1.1.4.	Enveloppe calorifugée.....	239
1.2.	Équation de la chaleur.....	239
1.2.1.	Loi de Fourier	239
1.2.2.	Équation de la température.....	240
1.3.	Modèles unidimensionnels en régime permanent	241
1.3.1.	Coefficients d'échange : lois de Newton.....	241
1.3.1.a.	Coefficient d'échange par conduction.....	241
1.3.1.b.	Coefficients d'échanges superficiels.....	241
1.3.2.	Résistance thermique.....	242
1.3.2.a.	Paroi composite série.....	242
1.3.2.b.	Paroi composite parallèle.....	243
2.	Dissipation dans un milieu continu	243
2.1.	Dissipation	244
2.1.1.	Milieu thermodynamiquement admissible	244
2.1.2.	Inégalité de Clausius–Duhem.....	244
2.1.3.	Dissipations intrinsèque et thermique.....	244
2.1.4.	Réversibilité et signe des dissipations.....	245
2.1.4.a.	Signe de la dissipation thermique.....	245
2.1.4.b.	Réversibilité.....	245
2.1.4.c.	Interprétation de la dissipation intrinsèque.....	245
2.1.4.d.	Signe de la dissipation intrinsèque.....	246
2.2.	Modèles rhéologiques	246
2.2.1.	Les assemblages de base.....	246
2.2.1.a.	Élément de Kelvin–Voigt	247
2.2.1.b.	Élément de Maxwell.....	247
2.2.1.b.	Élément de Prandtl–Reuss.....	248
2.2.2.	Exemple de loi de comportement	248
2.2.2.a.	Travail des efforts intérieurs.....	248
2.2.2.b.	Dissipation intrinsèque.....	250
2.3.	Matériaux standards	250
2.3.1.	Pseudo-potentiel de dissipation.....	250
2.3.2.	Matériau standard.....	251
2.3.3.	Relations de réciprocité d'Onsager	251
2.4.	Retour sur l'hypothèse de l'état d'accompagnement local	252

3.	Une formulation unifiée	252
3.1.	Équations d'état et lois complémentaires.....	252
3.2.	Développement de l'énergie libre.....	253
4.	Classification des comportements des milieux continus	254
4.1.	Liaisons internes parfaites.....	254
4.1.1.	Solide rigide.....	254
4.1.2.	Fluide parfait incompressible.....	255
4.2.	Dissipation intrinsèque nulle.....	255
4.2.1.	Hyperélasticité.....	255
4.2.2.	Fluide parfait.....	256
4.3.	Dissipation intrinsèque non nulle.....	256
5.	Application aux fluides visqueux	256
5.1.	Fluide stokésien.....	256
5.2.	Cas linéaire : fluide newtonien.....	257
5.3.	Équation de Navier–Stokes.....	258
6.	Application à l'élasticité en H.P.P.	258
6.1.	Cas isotherme.....	258
6.1.1.	Solide élastique.....	259
6.1.2.	Cas isotrope.....	259
6.1.2.a.	Énergie libre et coefficients de Lamé.....	259
6.1.2.b.	Relation de comportement.....	260
6.1.2.c.	Coefficient de Poisson et module d'Young.....	260
6.1.2.d.	Équation de Navier en élasticité linéaire isotrope.....	261
6.2.	Cas isotrope avec variation de température.....	261
6.3.	Équation de Beltrami–Michell.....	262
E 10.	Exercices sur le chapitre 10	263
	Énoncés.....	263
	Solutions.....	266
	Problèmes généraux	273
P.1.	Échangeurs thermiques	274
P.2.	Écoulements en conduites	282
P.3.	Machines et cycles	289
	Table des symboles.....	309
	Index.....	313

Alexandre Watzky

Thermodynamique macroscopique

«Une invitation à la réflexion et au raisonnement pour comprendre la thermodynamique»

La thermodynamique est la science des échanges d'énergie et de l'évolution des systèmes. La vocation de cet ouvrage est de présenter la thermodynamique dans une approche résolument macroscopique, avec notamment une ouverture marquée vers la mécanique.

Les principes fondamentaux sont construits en faisant fortement appel à la manière dont ils ont historiquement été introduits et où les points délicats sont discutés en détail.

Une progression rigoureuse assortie de nombreux exercices et problèmes corrigés guide le lecteur dans la compréhension des concepts généraux qui caractérisent cette discipline et leur application.

Si cet ouvrage se destine plus particulièrement à des étudiants en Sciences de l'Ingénieur (troisième année de licence, master, écoles d'ingénieurs), et notamment aux mécaniciens qui se doivent à l'heure actuelle d'appréhender globalement un problème, les enseignants et ingénieurs devraient aussi y trouver des ressources profitables.



Les «plus»

- ▶ Un point de vue délibérément macroscopique
- ▶ Une approche progressive et pédagogique
- ▶ Plus de 1000 exercices et problèmes corrigés avec leurs solutions détaillées
- ▶ Des illustrations et schémas explicatifs

Alexandre Watzky
de dix ans d'expérience
Il intervient à l'université

à l'Université Paris 12 – Val-de-Marne où il a été plus de dix ans professeur de la thermodynamique à un public de mécaniciens.

ISBN 978-2-8041-5238-3



THEMAC

Dans le cadre du nouveau Système Européen de Transfert de Crédits (E.C.T.S.), ce manuel couvre en **France** les niveaux : Licence 3 et Master 1.
En **Belgique** : Baccalauréat 3 et Master 1.
En **Suisse** : Bachelor 3 et Master 1.
Au **Canada** : Baccalauréat 3 et Master 1.

