

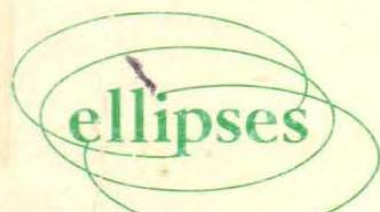
THERMODYNAMIQUE PHYSIQUE



Rappels de Cours
Exercices et Problèmes Corrigés



Classes Préparatoires
1ers Cycles Universitaires



Bernard GENDREAU

TABLE DES MATIERES

Liste des Ecoles d'Ingénieurs ou Universités citées dans cet ouvrage.....	12
Tableau des unités légales et symboles.....	12
Tableau des valeurs numériques de constantes.....	12

CHAPITRE I : GENERALITES.....13

1. SYSTEME THERMODYNAMIQUE.....	13
1.1 Système thermodynamique, 13	
1.1.1 Système, 13	
1.1.2 Système : ouvert, fermé, isolé, 13	
1.1.3 Phase d'un système, 13	
1.2 Système à l'équilibre, 13	
1.2.1 Equilibre thermodynamique d'un système, 13	
1.2.2 Variables d'état, ou paramètres d'état d'équilibre d'un système, 13	
1.2.3 Equation d'état, 14	
1.2.4 Dérivées partielles, 14	
1.3 Transformation d'un système, 14	
1.4 Fonction d'état, 14	
1.4.1 Définition, 14	
1.4.2 Propriétés, 14	
1.4.3 Différentielle d'une fonction d'état, 15	
2. TEMPERATURE D'UN SYSTEME	15
2.1 Température d'un corps, 15	
2.1.1 Notion commune, 15	
2.1.2 Equilibre thermique, 15	
2.1.3 Principe «zéro» de la thermodynamique, 15	
2.1.4 Thermomètre, température, 15	
2.1.5 Echelle empirique de température, 15	
2.2 Les températures légales, 15	
2.2.1 Température thermodynamique T, 15	
2.2.2 Température absolue T, 16	
2.2.3 Température Celsius t, 16	
2.3 Transformation isotherme, 16	
3. PRESSION DANS UN FLUIDE EN EQUILIBRE.....	16
3.1 Pression en un point d'un fluide en équilibre, 16	
3.2 Répartition de la pression au sein d'un fluide en équilibre dans le champ de pesanteur terrestre, 16	
3.3 Pression d'un gaz en équilibre, 17	
3.4 Transformation isobare, 17	

CHAPITRE II : FLUIDE REEL, GAZ PARFAIT.....19

1. ISOTHERMES D'UN FLUIDE REEL	19
1.1 Aux très basses pressions, 19	
1.2 Réseau d'isothermes d'un fluide dans le diagramme d'Amagat aux pressions élevées, 20	
1.3 Réseau d'isothermes d'un fluide dans le diagramme de Clapeyron, 20	

2. EQUATION D'ETAT D'UN FLUIDE.....	21
2.1 Gaz parfait, 21	
2.2 Fluide réel, 21	
2.3 Variables indépendantes, 21	
3. COEFFICIENTS THERMOELASTIQUES.....	21
EXERCICES SUR LE CHAPITRE II	22
II.1 Température de Mariotte d'un gaz de Van der Waals (E.N.S.T.I.M. 1986 *), 22	
II.2 Coefficients α et β , coefficients du viriel d'un gaz de Van der Waals (E.S.M. 1987 *), 23	
II.3 Détermination des constantes d'un gaz de Van der Waals (E.S.M. 1984 *), 24	
II.4 Isothermes d'un gaz réel aux faibles pressions (E.N.S.I. M 1982 *), 25	
II.5 Développement du viriel d'un gaz réel (E.S.T.P. 1981 *), 27	
II.6 Température critique, facteur de compressibilité, équation réduite d'un gaz réel (E.S.T.P. 1981 **), 28	
II.7 Répartition des températures dans la troposphère et dans la stratosphère (d'après E.N.M. 1987 *), 30	

CHAPITRE III : PREMIER PRINCIPE.....33

1. CHALEUR ET TRAVAIL REÇUS PAR UN SYSTEME	33
1.1 Energie thermique, ou chaleur, 33	
1.2 Travail, 33	
2. TRAVAIL DES FORCES DE PRESSION	33
2.1 Travail élémentaire, 33	
2.2 Travail élémentaire reçu par un fluide de pression P, 34	
2.3 Représentation du travail dans le diagramme de Clapeyron, 34	
3. PREMIER PRINCIPE	35
3.1 Enoncé, 35	
3.2 Propriétés de l'énergie interne, 35	
3.3 L'énergie interne au niveau microscopique, 35	
4. ENTHALPIE D'UN SYSTEME.....	35
5. APPLICATION DU PREMIER PRINCIPE A QUELQUES TRANSFORMATIONS PARTICULIERES	36
5.1 Transformation isoénergétique, 36	
5.2 Transformation isenthalpique, 36	
5.3 Transformation adiabatique, 36	
5.4 Transformation isochore, 36	
5.5 Transformation isobare, 36	
6. VARIATIONS D'ENERGIE INTERNE ET D'ENTHALPIE D'UN GAZ QUI SUIT LES LOIS DE JOULE	36
6.1 Gaz suivant la première loi de Joule, 36	
6.2 Gaz suivant la deuxième loi de Joule, 37	
7. APPLICATION DU PREMIER PRINCIPE AU GAZ PARFAIT	37
7.1 Nouvelle définition d'un gaz parfait, 37	
7.2 Relation de Mayer, 37	
7.3 Coefficient de Laplace, 37	
8. APPLICATION DU PREMIER PRINCIPE AU GAZ PARFAIT DE CAPACITE THERMIQUE CONSTANTE.....	37

EXERCICES SUR LE CHAPITRE III.....	39
III.1 Echauffement d'une balle de fusil (*), 39	
III.2 Compression ou détente d'un gaz parfait à pression et à température extérieure constantes (*), 39	
III.3 Apport d'énergie électrique I (*), 40	
III.4 Apport d'énergie électrique II (*), 41	
III.5 Apport d'énergie électrique III (*), 41	
III.6 Fonctionnement d'un vérin (E.N.S.I. Chimie Centre 1985 **), 42	
CHAPITRE IV : DEUXIEME PRINCIPE, ENTROPIE	45
1. REVERSIBILITE, IRREVERSIBILITE	45
1.1 Les facteurs d'irréversibilité d'une transformation, 45	
1.1.1. Les échanges thermiques, 45	
1.1.2. Les échanges de travail, 45	
1.2 Les conditions d'une transformation réversible d'un système, 45	
1.3 Evolution des transformations, 45	
1.4 Cas particulier du déplacement d'une paroi, 46	
2. DEUXIEME PRINCIPE, ENTROPIE	46
2.1 Enoncé du deuxième principe, 46	
2.2 Méthode générale de calcul de la variation d'entropie d'un système, 47	
2.3 Variation d'entropie d'un gaz parfait de capacité thermique constante ($\gamma = \text{constante}$), 47	
2.4 Troisième principe de la thermodynamique, 47	
EXERCICES SUR LE CHAPITRE IV	48
IV.1 Variation d'entropie d'un ensemble système-source thermiquement isolé (*), 48	
IV.2 Contact thermique d'un corps avec plusieurs sources (*), 49	
IV.3 Mise en contact de deux blocs de cuivre (E.N.S.I.M. 1977 *), 50	
IV.4 Variation d'entropie d'un gaz parfait de capacité thermique constante (*), 50	
IV.5 Variation d'entropie de la transformation étudiée dans l'exercice III.2 (*), 52	
IV.6 Variation d'entropie de la transformation étudiée dans l'exercice III.3 (*), 52	
IV.7 Transformation isochore irréversible d'un gaz parfait de capacité thermique constante (*), 53	
IV.8 Cycle réversible d'un gaz parfait de capacité calorifique constante (*), 54	
IV.9 Compression et détente rapide d'un gaz parfait de capacité thermique constante (**), 55	
IV.10 Cycle irréversible d'un gaz parfait de capacité thermique constante (**), 56	
IV.11 Détentes de Joule et de Joule-Thomson d'un gaz parfait de capacité thermique constante (*), 57	
IV.12 Transformation d'un gaz parfait de capacité thermique variable (E.N.S.T.I.M. Alès 1989 *), 59	
IV.13 Oscillations d'une paroi - Résonateur acoustique (d'après C.A.P.E.S. 1988**), 60	
IV.14 Propagation du son dans un gaz parfait de capacité thermique constante (I.N.C.I.R. 1984 **), 62	
IV.15 Résistor en régime permanent (*), 65	
IV.16 Entropie de mélange de deux gaz parfaits de capacités thermiques constantes (*), 65	
IV.17 Formule de Reech pour un gaz parfait (*), 66	
IV.18 Transformation polytropique d'un gaz parfait de capacité thermique constante (E.N.A.C. 1980 *), 66	
IV.19 Transformation particulière d'un gaz parfait de capacité thermique constante (I.N.T. 1980 **), 68	

- IV.20 Compression isentropique étagée d'un gaz parfait de capacité thermique constante (E.N.S.T.I.M. Alès 1988 **), 70
- IV.21 Transformation monotherme d'un gaz parfait de capacité thermique constante (*), 72
- IV.22 Détente d'un gaz parfait dans le vide (E.N.S.E.T. 1983 **), 73
- IV.23 Détente d'un gaz parfait à pression constante (E.S.M. Saint Cyr 1986 **), 75

CHAPITRE V : APPLICATION DES DEUX PRINCIPES AU FLUIDE HOMOGENE.....79

- 1. APPLICATION AU FLUIDE HOMOGENE.....79
 - 1.1 Chaleur reçue au cours d'une transformation élémentaire ; coefficients calorimétriques, 79
 - 1.1.1 Utilisation des variables T et V, 79
 - 1.1.2 Utilisation des variables T et P, 79
 - 1.1.3 Relations entre les coefficients, 80
 - 1.2 Les relations déduites des deux principes ; relations de Clapeyron, 80
 - 1.2.1 Utilisation des variables T et V, 80
 - 1.2.2 Utilisation des variables T et P, 80
 - 1.3 Relations de Maxwell, 80
 - 1.4 Cas particulier du gaz parfait, 81
- 2. APPLICATION DES DEUX PRINCIPES A D'AUTRES SYSTEMES THERMODYNAMIQUES.....81
- EXERCICES SUR LE CHAPITRE V82
 - V.1 Gaz suivant les deux lois de Joule (*), 82
 - V.2 Formule de Reech pour un fluide homogène (*), 82
 - V.3 Détente de Joule-Thomson d'un gaz de Van der Waals ; température d'inversion (E.S.M. Ecole de l'Air 1987 *), 83
 - V.4 Détente de Joule-Gay-Lussac d'un gaz de Clausius (E.N.S.I. TA 1981 **), 84
 - V.5 Détente de Joule-Thomson d'un gaz de Clausius (E.N.S.I. TA 1981 *), 85
 - V.6 Compression isentropique d'un gaz parfait de capacité thermique variable (E.N.S.T.I.M. Alès 1982 *), 87
 - V.7 Entropie d'un gaz parfait de capacité thermique variable (E.N.S.T.I.M. Alès 1982 *), 87
 - V.8 Détente de Joule-Gay-Lussac d'un gaz de Van der Waals (E.N.S.T.I.M. Douai 1986 *), 89
 - V.9 Diagramme d'Amagat d'une détente de Joule-Thomson (E.N.S.T.I.M. Douai 1986 *), 90
 - V.10 Etude thermodynamique simplifiée d'une feuille de caoutchouc (E.N.S.T.I.M. Douai 1987 *), 91
 - V.11 Etude thermodynamique d'une naine blanche (D'après E.S.E. 1981 **), 93
 - V.12 Désaimantation adiabatique d'une substance paramagnétique (E.N.S.I. Chimie Nord 1983 **), 94
 - V.13 Etude thermodynamique d'une lame de quartz piézo-électrique (I.N.C.I.R. 1983 **), 96
 - V.14 Etude thermodynamique d'un fil (E.I.T.P.E. 1986 **), 98
 - V.15 Torsion d'une tige d'acier (E.N.S.T.I.M. Alès 1986 *), 102
 - V.16 Energie interne d'un liquide (Ecole Nationale Vétérinaire *), 103

CHAPITRE VI : ENERGIE LIBRE, ENTHALPIE LIBRE.....105

- 1. ENERGIE LIBRE105
 - 1.1 Evolution isochore d'un système subissant une transformation monotherme, 105

1.2	Energie libre ; évolution isochore et isotherme d'un système,	105
1.3	Variation élémentaire d'énergie libre d'un fluide homogène,	105
1.4	Energie libre généralisée,	106
1.5	Relation de Helmholtz,	106
2.	ENTHALPIE LIBRE	106
2.1	Evolution d'un système subissant une transformation monotherme et monobare,	106
2.2	Enthalpie libre : évolution isobare et isotherme d'un système,	106
2.3	Variation élémentaire d'enthalpie libre d'un fluide homogène,	107
2.4	Enthalpie libre généralisée,	107
2.5	Relation de Helmholtz,	107
2.6	Potentiel chimique,	107
	EXERCICES SUR LE CHAPITRE VI	108
VI.1	Relations de Clapeyron (*),	108
VI.2	Transformations monothermes d'un gaz parfait : énergie utilisable (E.N.S.I. P 1977 *),	108
VI.3	Pile électrique réversible (*),	110
VI.4	Fugacité d'un gaz de Van der Waals (E.S.T.P. 1987 *),	111
VI.5	Etude thermodynamique d'un condensateur (E.N.S.E.T. B' 1982 ***),	113
VI.6	Electrolyse de l'eau (E.N.S.I. Chimie Centre 1987 ***),	116

CHAPITRE VII : CHANGEMENT D'ETAT D'UN CORPS PUR 123

1.	EQUILIBRES D'UN CORPS PUR	123
2.	RELATION DE CLAPEYRON.....	123
2.1	Relation générale,	123
2.2	Application aux trois changements d'état,	124
	fusion,	124
	vaporisation,	124
	sublimation,	124
3.	DIAGRAMME DE CLAPEYRON DE L'EQUILIBRE LIQUIDE-VAPEUR.....	124
4.	EQUILIBRE LIQUIDE-VAPEUR EN PRESENCE D'UN AUTRE GAZ	125
	EXERCICES SUR LE CHAPITRE VII.....	126

VII.1	Relation de Clapeyron déduite des deux principes (*),	126
VII.2	Vaporisation réversible, vaporisation irréversible de l'eau (E.S.I.M. 1977 *),	127
VII.3	Vaporisation irréversible de l'eau dans le vide (*),	128
VII.4	Vaporisation irréversible de l'eau dans l'azote (E.N.A.C. 1988 **),	130
VII.5	Variation de la pression de vapeur saturante avec la température (I.N.A. 1988 *),	131
VII.6	Equilibre liquide-vapeur dans une goutte (I.N.A. 1988 **),	132
VII.7	Atmosphère humide ; formation de nuages (I.N.A. et E.N.S.A. 1984 **),	134
VII.8	Transformation isotherme puis isochore d'un mélange gaz-eau (I.N.T. 1983 **),	136

CHAPITRE VIII : SYSTEMES OUVERTS..... 141

1.	LE PREMIER PRINCIPE APPLIQUE A UN SYSTEME OUVERT	141
2.	APPLICATIONS.....	142
2.1	Vitesses du fluide négligeables,	142
2.2	Régime permanent,	142

EXERCICES SUR LE CHAPITRE VIII	143
VIII.1 Entrée irréversible d'air dans une enceinte adiabatique (*), 143	
VIII.2 Turbine, turbine (I.N.T. 1983 *), 144	
VIII.3 Echangeur (E.N.S.I. Chimie Centre 1985 *), 145	
VIII.4 Compresseur (E.N.S.I. Chimie Centre 1985 **), 147	
VIII.5 Condenseur d'une machine thermique (*), 149	
VIII.6 Détendeur d'une machine thermique (*), 150	
VIII.7 Détente irréversible dans l'air (d'après I.S.E.P. 1988 **), 151	
VIII.8 Apport d'énergie électrique et écoulement gazeux (d'après I.S.E.P. 1988 **), 153	

CHAPITRE IX : MACHINES THERMIQUES..... 157

1. CYCLE MONOTHERME	157
2. CYCLE DITHERME ; MOTEUR THERMIQUE.....	157
3. CYCLE DITHERME : MACHINE FRIGORIFIQUE, POMPE A CHALEUR.....	158
3.1 Cycle réfrigérateur, 159	
3.2 Pompe à chaleur, 159	
4. INEGALITE DE CLAUSIUS	159
EXERCICES SUR LE CHAPITRE IX	160
IX.1 Cycle réversible et cycle irréversible (E.N.S.I. M 1987 *), 160	
IX.2 Rendement d'un cycle réversible (E.N.S.I. M 1987 *), 161	
IX.3 Machine frigorifique irréversible (E.N.S.T.I.M. 1988 *), 163	
IX.4 Débit d'une pompe à chaleur (U. Paris 6 1988 *), 165	
IX.5 Pompe à chaleur : maintien de la température d'un local (E.N.S.I. Chimie Sud 1985 *), 166	
IX.6 Rendement d'un moteur à explosion ; cycle de Beau de Rochas (d'après E.S.M. Ecole de l'Air 1986 *), 167	
IX.7 Moteur thermique ; sources de températures variables (E.N.A.C. 1986 *), 169	
IX.8 Pompe à chaleur : chauffage, régulation thermique d'une pièce (E.I.V.P. 1980 *), 170	
IX.9 Etude d'un turbo-propulseur (I.N.T. 1985 *), 172	
IX.10 Ensemble de trois systèmes (E.N.S.I. P 1980 **), 173	
IX.11 Compresseur à fluide non parfait (E.N.S.E.T. 1988 **), 175	
IX.12 Etude d'une pompe à chaleur (E.N.S.E.T. 1988 **), 178	

CHAPITRE X : PHENOMENES DE TRANSPORT..... 181

1. TRANSPORT (TRANSFERT) DE CHALEUR : CONDUCTION ET CONVECTION	181
1.1 Définitions, 181	
1.1.1 Conduction, 181	
1.1.2 Convection, 181	
1.1.3 Rayonnement, 181	
1.2 Loi de Fourier de la conduction, 181	
1.2.1 Conduction unidirectionnelle, 181	
1.2.2 Conduction dans l'espace, 181	
1.3 Equation différentielle de la conduction unidirectionnelle, 182	
1.4 Conduction en régime permanent, 182	
1.4.1 Régime permanent (ou stationnaire), 182	
1.4.2 Résistance, conductance thermique, 182	
1.5 Loi de Newton de la convection, 183	

2. TRANSPORT DE MATIERE : DIFFUSION.....	183
Loi de Fick de la diffusion, 183	
1. Diffusion unidirectionnelle, 183	
2. Diffusion dans l'espace, 184	
3. Equation de diffusion, 184	
EXERCICES SUR LE CHAPITRE X	185
X.1 Isolation thermique d'un mur (*), 185	
X.2 Vitrage, double vitrage. Conduction, convection. Régime permanent. Résistances thermiques en série (*), 185	
X.3 Chauffage thermostaté d'un local. Régime transitoire (E.N.S.T.I.M. 1985 *), 187	
X.4 Paroi d'une chaudière à vapeur (E.N.I.T.R.S. 1988 *), 188	
X.5 Calorifugeage des conduits de vapeur (E.S.I.M. P' 1987 **), 191	
X.6 Flux géothermique (d'après E.N.S.G.A. Nancy 1986 **), 193	
X.7 Etude d'un réfrigérateur thermoélectrique (E.N.S.I. Chimie Centre 1986 ***), 195	
X.8 Régime transitoire dans un milieu (I.N.T. 1988 **), 200	
X.9 Etude de l'évolution de la température du sol au cours d'une année (I.N.T. 1988 **), 202	
X.10 Propagation de la chaleur le long d'un fil en régime sinusoïdal ; propagation dans le sol (E.I.T.P.E. 1986 **), 204	
X.11 Purification d'un semi-conducteur (E.N.S.I. Chimie Centre 1988 **), 207	
X.12 Réalisation d'un monocristal par tirage (E.N.S.I. Chimie Centre 1988 **), 209	
X.13 Analogie conducteur électrique conducteur thermique (E.S.M. Brest 1987 ***), 213	
X.14 Diffusion du bore dans du silicium dopé (E.N.S.I. Chimie Nord 1989 **), 218	
X.15 Diffusion d'une espèce chimique en solution (E.N.S.G.A. Nancy 1986 *), 221	
X.16 Diffusion de l'iode de l'eau vers le benzène (E.N.S.G.A. Nancy 1986 **), 222	

CHAPITRE XI : THEORIE CINETIQUE DES GAZ227

1. MODELE D'UN GAZ PARFAIT	227
2. DISTRIBUTION DES VITESSES DANS UN GAZ PARFAIT MONOATOMIQUE (LOI DE BOLTZMANN)	227
3. PRESSION D'UN GAZ PARFAIT	227
4. ENERGIE INTERNE D'UN GAZ PARFAIT MONOATOMIQUE.....	228
4.1 Equipartition de l'énergie, 228	
4.2 Energie interne, 228	

EXERCICES SUR LE CHAPITRE XI.....	229
XI.1 Libre parcours moyen ; fréquence de collisions (*), 229	
XI.2 Pression partielle dans un gaz (U. Paris 6 1988 *), 230	
XI.3 Pression d'un gaz parfait (***), 231	
XI.4 Ecoulement d'un gaz à travers un orifice (E.S.M. Ecole Navale 1984 **), 233	
XI.5 Gaz de photons (**), 235	
XI.6 Vitesse la plus probable, énergie cinétique moyenne d'atomes d'hydrogène (I.S.E.P. P 1980 **), 236	
XI.7 Fonction de partition. Energie interne et énergie libre d'une distribution de Boltzmann (*), 238	