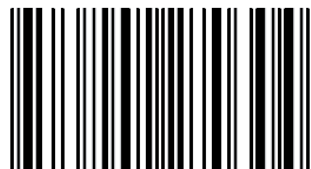


Cet ouvrage de thermodynamique appliquée, est destiné aux étudiants de la 3ème année licence énergétique spécialement ainsi qu'aux des étudiants des cycles courts et cycles longs du domaine sciences et techniques d'enseignement supérieur.

L'ouvrage est constitué de cours avec exercices corrigés, il est conforme aux programmes de thermodynamique appliquée agréée par le ministère de la recherche scientifique. Sa présentation didactique est le fruit de plusieurs années d'expérience pédagogique de l'auteur. Son contenu résulte de la lecture de nombreux ouvrages et documents dont la plupart sont cités dans les références bibliographiques.



Dr. OUDRANE Abdellatif est né à ADRAR en Algérie le 13 Mars 1980. Il travaille actuellement à la faculté des sciences et technologies de l'Université Ahmed Draia d'ADRAR. Il a mené des recherches dans les domaines de solaire thermique, l'environnement et les énergies renouvelables.



978-620-2-27030-4



Abdellatif Oudrane

# Cours et Exercice en Thermodynamique

Thermodynamique

**Abdellatif Oudrane**  
**Cours et Exercice en Thermodynamique**

FOR AUTHOR USE ONLY

**Abdellatif Oudrane**

**Cours et Exercice en  
Thermodynamique**

**Thermodynamique**

FOR AUTHOR USE ONLY

**Éditions universitaires européennes**

## **Imprint**

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: [www.ingimage.com](http://www.ingimage.com)

Publisher:

Éditions universitaires européennes

is a trademark of

International Book Market Service Ltd., member of OmniScriptum Publishing Group

17 Meldrum Street, Beau Bassin 71504, Mauritius

Printed at: see last page

**ISBN: 978-620-2-27030-4**

Copyright © Abdellatif Oudrane

Copyright © 2020 International Book Market Service Ltd., member of OmniScriptum Publishing Group

FOR AUTHOR USE ONLY

# Préface

Le renforcement des capacités dans le domaine de la recherche scientifique et technologique a toujours été une priorité pour l'université algérienne.

Dans le cadre de cet objectif, l'université algérienne a accordé une attention particulière à la promotion du savoir scientifique, et ce, afin d'asseoir les bases solides du développement scientifique et technologique. Ainsi, continue à encourager et à apporter son soutien pour la publication et la diffusion des ouvrages pédagogiques et scientifiques dans plusieurs disciplines afin d'aider la communauté scientifique au niveau des états membres à faire connaître les résultats des recherches et les informations les plus récentes menés dans ces dernières années.

La diffusion de cet ouvrage s'intitulant «*Cours et Exercice en thermodynamique*» vise à mettre à la disposition des étudiants de première année des facultés des sciences et technologie, un outil qui leur permettra d'acquérir une méthodologie rigoureuse de compréhension et de traitement des cours et problèmes relatifs à une discipline importante à savoir, la thermodynamique.

Ce polycopié de la thermodynamique est le fruit de plusieurs années de l'enseignement à la faculté des Sciences et Technologie dans l'Université. La précieuse contribution dans ce polycopié aux étudiants, aux chercheurs et aux professeurs, reflète la place et le rôle important de la thermodynamique pour les étudiants de L.M.D et de son apport dans le domaine des sciences et de la technologie.

*Dr. OUDARNE Abdellatif*  
*Maître conférence des universités*

# Avant-propos

Ce polycopié s'adresse aux étudiants de la première année des Sciences et Technologie (ST), des facultés des sciences.

Il comporte des résumés des cours, des exercices d'application concernant la loi du gaz parfait, le premier et le second principe de la thermodynamique, les équilibres chimiques et des séries des travaux dirigés non résolues.

Dans un premier chapitre, nous proposons un rappel mathématique sur les fonctions à plusieurs variables, les dérivées partielles, les fonctions d'états et de connaissances générales sur les gaz parfaits, afin de permettre aux étudiants d'acquérir les notions de base en thermodynamique et leur rôle dans les transformations.

Dans le deuxième chapitre, les théories des gaz parfaits, les transformations thermodynamique et le premier principe de la thermodynamique et ces applications.

Le troisième chapitre est consacré aux équilibres chimiques, méthodes directes et indirectes de détermination de l'enthalpie standard d'une réaction chimique. Il permettra aux étudiants d'approfondir leurs connaissances notamment sur la loi de Hess et l'équilibre homogène et hétérogène.

Le quatrième chapitre est dédié au deuxième principe de la thermodynamique, quant au cinquième chapitre, nous donnons un aperçu général sur les diagrammes de changements de phase, ses représentations graphiques et le calcul de l'enthalpie libre.

En effet, nous avons clôturé ce polycopié par des exercices avec solution dans le sixième chapitre et des séries des travaux dirigés dans le septième chapitre, afin d'évaluer la compétence des étudiants.

Nous espérons que ce polycopié, être le fruit de l'enseignement de ce module que nous avons mené depuis de nombreuses années à la Faculté des Sciences et Technologie, et sera d'une grande utilité pour les étudiants et leur permettra d'acquérir les bases solides en thermodynamique.

*L'auteur*

# Tableau des Matières

Préface.....	i
Avant-propos.....	ii
Tableau des Matières.....	iii-vi

## Chapitre 01 Rappel Mathématique

I.1.	Introduction.....	01
I.2.	Rappels et définitions mathématiques.....	01
I.2.1.	Définition d'une fonction à plusieurs variables.....	01
I.2.2.	Dérivées partielles.....	02
I.2.3.	Différentielle totale exacte.....	02
I.3.	Relation entre les dérivées partielles.....	03
I.4.	Intégration d'une forme différentielle.....	05

## Sous-Chapitre 01 La base en Thermodynamique

I.1.	Introduction.....	06
I.2.	Définitions d'un système thermodynamique.....	06
I.2.1.	Différents types de système.....	06
I.2.2.	Convention de signe.....	07
I.2.3.	Paramètre d'état d'un système thermodynamique.....	07
I.2.3.1.	Définition.....	07
I.3.	Types de paramètres d'état.....	07
I.3.1.	Variables extensives.....	07
I.3.2.	Variables intensives.....	07
I.4.	Equation d'état.....	07
I.5.	Fonction d'état.....	08
I.6.	Equilibre thermodynamique.....	08
I.6.1.	Équilibre mécanique.....	08
I.6.2.	Équilibre thermique.....	08
I.6.3.	Equilibre chimique.....	08
I.7.	Transformation d'un système thermodynamique.....	08
I.7.1.	Définition.....	08
I.7.2.	Transformation infiniment lente (quasi-statique).....	09
I.7.3.	Transformation réversible.....	09
I.7.4.	Transformation irréversible.....	09
I.7.5.	Transformation isotherme.....	10
I.7.6.	Transformation isobare.....	10
I.7.7.	Transformation isochore.....	10
I.7.8.	Transformation adiabatique.....	11
I.7.9.	Transformation cyclique.....	11
I.8.	Coefficients thermo élastiques.....	11
I.9.	Gaz parfaits.....	12
I.10.	Gaz réels.....	12
I.11.	Diagramme de Clapeyron.....	12
I.11.1.	Ecart entre un gaz parfait et gaz réel.....	12
I.11.2.	Diagramme d'Amagat ( $PV=F(P)$ ).....	12
I.12.	Loi de Boyle et Mariotte.....	13
I.12.1.	Définition.....	13

I.12.1.	Mise en évidence de la loi de Boyle et Mariotte.....	14
I.12.2.	Mise en évidence : Résultats.....	14
I.13.	Equation d'état des gaz parfaits.....	14
I.14.	Mélanges des gaz parfaits.....	15
I.14.1.	Fraction gravimétrique.....	15
I.14.2.	Fraction molaire $X_i$ .....	15
I.14.3.	Pression partielle.....	15
I.15.	Loi de Dalton.....	15
I.16.	Modèle de Van Der Waals.....	16
I.17.	Température.....	17
I.17.1.	Zéro absolu.....	18
I.17.2.	Thermométrie.....	18
I.17.3.	Principe de fonctionnement d'un thermomètre.....	18
I.17.4.	Efficacité d'un thermomètre.....	18
I.18.	Echelle de température.....	19
I.18.1.	Echelle centésimale.....	19
I.18.2.	Echelle absolue (à point fixe).....	19
I.18.3.	Echelle Celsius.....	20
I.18.4.	Echelle absolu Kelvin.....	20
I.18.5.	Echelle Fahrenheit.....	20
I.18.6.	Echelle de Rankine.....	20
I.19.	Notions de chaleur.....	20
I.19.1.	Chaleur massique ou molaire d'un corps pur.....	20
I.19.2.	Expression mathématique de la quantité de chaleur.....	20
I.19.3.	Capacité calorifique $C$ (J/K ou Cal/K).....	21
I.19.4.	Calcul de la quantité de chaleur pour différentes transformations.....	21
I.20.	Changement d'état d'un corps pur.....	21
I.20.1.	Chaleur latente.....	22
I.21.	Calorimètre.....	24
I.22.	Travail $W$ .....	24
I.22.1.	Travail réversible et irréversible.....	25
I.22.2.	Convention de signes.....	25

## Chapitre 02 Premier Principe de la Thermodynamique

II.1.	Introduction.....	26
II.2.	Energie total d'un système thermodynamique.....	26
II.2.1.	Propriétés de l'énergie interne d'un système.....	26
II.3.	Enoncé du premier principe.....	27
II.3.1.	Expression générale du premier principe de la thermodynamique.....	27
II.4.	Principe d'équivalence.....	28
II.5.	Expression différentielle du premier principe.....	28
II.6.	Première loi de joule.....	28
II.7.	Application de premier principe aux transformations thermodynamique.....	29
II.7.1.	Transformation isochore.....	29
II.7.2.	Transformation isotherme d'un gaz parfait.....	29
II.7.3.	Transformation isobare.....	30
II.7.4.	Enthalpie $H$ .....	30
II.7.5.	Transformation adiabatique.....	31
II.7.6.	Transformation adiabatique d'un gaz parfait.....	31
II.8.	Capacité thermique d'un système monophasé.....	32
II.9.	Deuxième loi de Joule.....	33
II.9.1.	Relation de Mayer du gaz parfait.....	33
II.9.2.	Cas d'un état condensé.....	33

## Chapitre 03 Application du Premier Principe de la Thermodynamique dans la Chimie



III.1.	Introduction.....	35
III.2.	Réaction Chimique.....	35
III.3.	Chaleur réaction.....	35
III.4.	Relation entre $Q_p$ et $Q_v$ .....	36
III.5.	Etat standard d'un corps pur.....	36
III.6.	Enthalpie standard d'une réaction chimique.....	36
III.7.	Détermination de l'enthalpie standard d'une réaction chimique.....	36
III.7.1.	Méthode indirecte.....	37
III.7.2.	Loi de Hess.....	37
III.7.3.	Méthode directe.....	38
III.7.3.1.	Corps simples et corps composés.....	38
III.7.3.2.	Enthalpie standard de formation.....	38
III.7.3.3.	$\Delta_f H^\circ T$ d'un élément corps simple.....	38
III.7.3.4.	Calcul des enthalpies standards de réaction $\Delta_r H^\circ T$ à partir des enthalpies standard de formation.....	39

## Chapitre 04 Deuxième Principe de la Thermodynamique

IV.1.	Introduction.....	41
IV.2.	Irréversibilité et évolution des phénomènes naturels.....	41
IV.3.	Second principe –Entropie.....	42
IV3.1.	Enoncé du second principe.....	42
IV.4.	Expression différentiel de l'entropie.....	43
IV.4.1.	Cas d'une transformation réversible.....	43
IV.4.2.	Cas d'une transformation irréversible.....	43
IV.4.2.	Mesure du désordre.....	43
IV.4.3.	Enoncé de Clausius.....	43
IV.4.4.	Enoncé de Kelvin.....	43
IV.4.5.	Variation de l'entropie avec la température $S=S(T)$ .....	43
IV.4.6.	Expressions différentielles de l'entropie.....	44
IV.4.7.	Une deuxième identité thermodynamique.....	44
IV.5.	Entropie du gaz parfait.....	45
IV.6.	Evolution isentropique du gaz parfait.....	46
IV.7.	Application du deuxième principe aux solides et aux liquides.....	47
IV.7.1.	Entropie d'une phase condensée.....	47
IV.7.2.	Contact thermique de deux solides.....	47

## Chapitre 05 Diagrammes de Phases Solide, Liquide et Vapeurs

V.1.	Introduction.....	49
V.2.	Définition qualitative.....	49
V.3.	Zone d'existence des différentes phases dans un diagramme (P,T).....	49
V.4.	Définition du changement d'état.....	50
V.5.	Equilibre d'un corps pur sous deux phases.....	52
V.6.	Etude de l'équilibre liquide-vapeur (gaz) d'un corps pur.....	53
V.7.	Titre de la vapeur humide.....	54
V.8.	Les coefficients calorimétriques le long de la courbe de saturation.....	56

## Chapitre 06 Exercices Avec Solution

VI.1.	Exercice 01.....	58
	Solution.....	58

VI.2.	Exercice 02 .....	58
	Solution.....	58
VI.3.	Exercice 03.....	58
	Solution.....	58
VI.4.	Exercice 04.....	59
	Solution.....	59
VI.5.	Exercice 05.....	60
	Solution.....	60

**Chapitre 07**  
**Série des Travaux Dirigés**

VII.1.	Série de TDN°01.....	61
VII.2.	Série de TDN°02.....	62
VII.3.	Série de TDN°03.....	63
VII.4.	Série de TDN°04.....	64
	Référence bibliographie.....	65

FOR AUTHOR USE ONLY

# Chapitre 01

**La thermodynamique est la science de la chaleur et des machines thermiques ou la science des grands systèmes en équilibre**

