



Notions de Base en
Thermodynamique


AlphaDoc
ألفا للوثائق للنشر والتوزيع

مكرر 36 نهج سايعي أحمد س م ك قسنطينة- الجزائر
الفاكس: +213 31 733 794 / الهاتف: +213 31 733 333
عمان-الأردن - البوابة الشمالية للجامعة الأردنية / الهاتف +962.797266248
البريد الإلكتروني: info@alphadoc.dz | edition@alphadoc.dz

ألفا للتصميم
ISBN:978-9931-08-241-5

9 789931 082415

Dr OUDRANE Abdellatif

Dr OUDRANE Abdellatif

Notions de Base en
Thermodynamique

cours destiné aux étudiants de licence L.M.D
(L1 et L2) de la spécialité Sciences et Technologie

Notions de Base en Thermodynamique




AlphaDoc
ألفا للوثائق للنشر والتوزيع



Notions de Base en Thermodynamique



TOUS DROITS RESERVES

L'AUTEUR : Dr OUDRANE Abdellatif.

LE TITRE: Notions de Base en Thermodynamique.

ALPHA DOCUMENTATION 2022
ISBN : 978-9931-08-241-5
DEPOT LEGAL : JANVIER 2022

1^{ère} EDITION

2022

L'auteur assume l'entière responsabilité juridique du contenu de son ouvrage et cet ouvrage n'exprime pas l'opinion du service de la bibliothèque nationale ou de toute autre entité gouvernementale.

ATTENTION :

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, du texte et/ ou de la nomenclature contenus dans le présent ouvrage, et qui sont la propriété de l'Editeur, est strictement interdite.

ALPHA DOCUMENTATION
Edition, importation et distribution de livres

36 BIS Rue Voltaire SMK Constantine ALGERIE

Tel : +21331 733 333

Fax : +21331 733 794

Tél portable : +213770906434

Notions de Base en Thermodynamique

Préparé par : **Dr OUDRANE Abdellatif**

Maître Conférence des Universités (MCB)
en Génie Mécanique Énergétique

cours destiné aux étudiants de licence L.M.D
(L1 et L2) de la spécialité Sciences et Technologie

Université Ahmed DRAIA Adrar-Algérie
Faculté des Sciences et de la Technologie

EDITION



2022

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 «*Notions de base 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 de conférences 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

Table des matières

Chapitre 01: Rappel Mathématique

I.1. Introduction.....	19
I.2. Rappels et définitions mathématiques	20
I.2.1. Définition d'une fonction à plusieurs variables.....	20
I.2.2. Dérivées partielles.....	20
I.2.3. Différentielle totale exacte	22
I.3. Relation entre les dérivées partielles.....	22
I.4. Intégration d'une forme différentielle	25

Sous-Chapitre 01 : La base en Thermodynamique

I.1. Introduction.....	29
I.2. Définitions d'un système thermodynamique.....	29
I.2.1. Différents types de système.....	29
I.2.2. Convention de signe.....	30
I.2.3. Paramètre d'état d'un système thermodynamique	30
I.3. Types de paramètres d'état	31
I.3.1. Variables extensives.....	31
I.4. Equation d'état.....	31
I.5. Fonction d'état	32
I.6. Equilibre thermodynamique	32
I.6.1. Équilibre mécanique.....	33
I.6.2. Équilibre thermique	33
I.6.3. Equilibre chimique.....	33

I.7. Transformation d'un système thermodynamique	33
I.7.1. Définition.....	33
I.7.2. Transformation infiniment lente (quasi-statique)	33
I.7.3. Transformation réversible.....	34
I.7.4. Transformation irréversible	34
I.7.5. Transformation isotherme	35
I.7.6. Transformation isobare	36
I.7.7. Transformation isochore	36
I.7.8. Transformation adiabatique	37
I.7.9. Transformation cyclique.....	37
I.8. Coefficients thermo élastiques	38
I.9. Gaz parfaits.....	38
I.10. Gaz réels	38
I.11. Diagramme de Clapeyron.....	39
I.11.1. Ecart entre un gaz parfait et gaz réel I.11.2. Diagramme d'Amagat ($PV=F(P)$).....	39
I.12. Loi de Boyle et Mariotte.....	41
I.12.1. Définition	41
I.12.1. Mise en évidence de la loi de Boyle et Mariotte.....	42
I.12.2. Mise en évidence Résultats.....	42
I.13. Equation d'état des gaz parfaits.....	43
I.14. Mélanges des gaz parfaits	43
I.14.1. Fraction gravimétrique.....	44
I.14.2. Fraction molaire X_i	44
I.14.3. Pression partielle.....	44
I.15. Loi de Dalton	44

I.16. Modèle de Van Der Waals.....	46
I.17. Température	47
I.17.1. Zéro absolu.....	48
I.17.2. Thermométrie	48
I.17.3. Principe de fonctionnement d'un thermomètre.....	48
I.17.4. Efficacité d'un thermomètre	49
I.18. Echelle de température.....	49
I.18.1. Echelle centésimale.....	50
I.18.2. Echelle absolue (à point fixe)	50
I.18.3. Echelle Celsius	51
I.18.4. Echelle absolu Kelvin	51
I.18.5. Echelle Farenheit.....	51
I.18.6. Echelle de Rankine	51
I.19. Notions de chaleur	51
I.19.1. Chaleur massique ou molaire d'un corps pur	52
I.19.2. Expression mathématique de la quantité de chaleur	52
I.19.3. Capacité calorifique C (J/K ou Cal/K).....	52
I.19.4. Calcul de la quantité de chaleur pour différentes transformations..	53
I.20. Changement d'état d'un corps pur	53
I.20.1. Chaleur latente.....	54
I.21. Calorimètre.....	57
I.22. Travail W.....	58
I.22.1. Travail réversible et irréversible.....	58
I.22.2. Convention de signes	59

Chapitre 02: Premier Principe de la Thermodynamique

II.1. Introduction.....	63
-------------------------	----

II.2. Energie total d'un système thermodynamique	63
II.2.1. Propriétés de l'énergie interne d'un système	64
II.3. Enoncé du premier principe	64
II.3.1. Expression générale du premier principe de la thermodynamique...	64
II.4. Principe d'équivalence	66
II.5. Expression différentielle du premier principe.....	66
II.6. Première loi de joule	66
II.7. Application de premier principe aux transformations thermodynamique	67
II.7.1. Transformation isochore	67
II.7.2. Transformation isotherme d'un gaz parfait.....	68
II.7.3. Transformation isobare.....	69
II.7.4. Enthalpie H	69
II.7.5. Transformation adiabatique	70
II.7.6. Transformation adiabatique d'un gaz parfait	70
II.8. Capacité thermique d'un système monophasé	72
II.9. Deuxième loi de Joule	73
II.9.1. Relation de Mayer du gaz parfait	73
II.9.2. Cas d'un état condensé	74

Chapitre 03

Application du Premier Principe de la Thermodynamique dans la Chimie

III.1. Introduction.....	77
III.2. Réaction Chimique	77
III.3. Chaleur réaction.....	78
III.4. Relation entre Q_p et Q_v	78

III.5. Etat standard d'un corps pur	79
III.6. Enthalpie standard d'une réaction chimique	79
III.7. Détermination de l'enthalpie standard d'une réaction chimique	79
III.7.1. Méthode indirecte	80
III.7.2. Loi de Hess.....	80
III.7.3. Méthode directe	81
III.7.3.1. Corps simples et corps composés	81
III.7.3.2. Enthalpie standard de formation $\Delta_f H^\circ_T$ (kJ.mol ⁻¹)	82
III.7.3.3. $\Delta_f H^\circ_T$ d'un élément corps simple	82
III.7.3.4. Calcul des enthalpies standards de réaction $\Delta_r H^\circ_T$ à partir des enthalpies standard de formation.....	83

Chapitre 04: Deuxième Principe de la Thermodynamique

IV.1. Introduction	89
IV.2. Irréversibilité et évolution des phénomènes naturels.....	89
IV.3. Second principe –Entropie	91
IV.3.1. Enoncé du second principe	91
IV.4. Expression différentiel de l'entropie.....	92
IV.4.1. Cas d'une transformation réversible	92
IV.4.2. Cas d'une transformation irréversible	92
IV.4.2.1. Mesure du désordre	92
IV.4.3. Enoncé de Clausius.....	92
IV.4.4. Enoncé de Kelvin	93
IV.4.5. Variation de l'entropie avec la température $S=S(T)$	93
IV.4.6. Expressions différentielles de l'entropie	93
IV.4.7. Une deuxième identité thermodynamique	95
IV.5. Entropie du gaz parfait.....	95

IV.6. Evolution isentropique du gaz parfait.....	97
IV.7. Application du deuxième principe aux solides et aux liquides	98
IV.7.1. Entropie d'une phase condensée	98
IV.7.2. Contact thermique de deux solides	98

Chapitre 05

Diagrammes de Phases Solide, Liquide et Vapeurs

V.1. Introduction	103
V.2. Définition qualitative	103
V.3. Zone d'existence des différentes phases dans un diagramme (P,T) ...	104
V.4. Définition du changement d'état.....	105
V.5. Equilibre d'un corps pur sous deux phases.....	107
V.6. Etude de l'équilibre liquide-vapeur (gaz) d'un corps pur	110
V.7. Titre de la vapeur humide.....	112
V.8. Les coefficients calorimétriques le long de la courbe de saturation ..	114

Chapitre 06: Exercices Avec Solution

VI.1. Exercice 01	119
Solution	119
VI.2. Exercice 02	119
Solution	120
VI.3. Exercice 03	120
Solution	120
VI.4. Exercice 04	121
Solution	121
VI.5. Exercice 05	122

Chapitre 07: Série des Travaux Dirigés

VII.1. Série de TDN°01	127
VII.2. Série de TDN°02	129
VII.3. Série de TDN°03	131
VII.4. Série de TDN°04	133
Référence bibliographie	135

Chapitre 01

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

I.1. Introduction

La thermodynamique est la science de la chaleur et des machines thermiques ou la science des grands systèmes en équilibre. D'une façon plus claire : la science qui étudie les phénomènes de transformations entre les deux formes d'énergies qui sont la chaleur et le travail à travers un système donné.

On distingue deux types de disciplines :

1. La thermodynamique macroscopique ou la thermodynamique classique.
Elle s'intéresse à l'aspect énergétique macroscopique indépendamment des modèles moléculaires ;
2. La thermodynamique microscopique ou la thermodynamique statistique.
Elle est définie comme étant la relation entre les propriétés moléculaires et les propriétés macroscopiques du système.

De façon analogue, la thermodynamique s'est dotée des lois ou principes, qui permettent le développement logique et mathématique de la théorie thermodynamique, parmi ces principes on distingue :

- a. Le principe zéro absolu qui est défini l'état du système à la température 0K.
- b. Le premier principe de la thermodynamique : Il définit la conversion entre les formes d'énergies sous forme de travail ou de chaleur ainsi que le principe de conservation d'énergie interne.
- c. Le deuxième principe de la thermodynamique qui évoque l'orientation de la transformation lié au passage des molécules vers un désordre entre deux ou plusieurs transformations qui suivent une augmentation de la valeur d'entropie S .
- d. Le troisième principe qui présente une référence pour l'ordre maximal des molécules dans le système avec une valeur d'entropie $S = 0$ pour les corps cristallisés.

- e. Lors d'une transformation, certaines grandeurs subissent des changements qui se traduisent par des notions mathématiques comme les différentielles.

Dans ce contexte, il serait utile de résoudre certaines équations en faisant appel à des outils de transformation mathématiques.

I.2. Rappels et définitions mathématiques

I.2.1. Définition d'une fonction à plusieurs variables

Une fonction à plusieurs variables est une application f dans l'espace vectoriel \mathbb{R}^n :

$$f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

$$(x_1, \dots, x_n) \mapsto f(x_1, \dots, x_n)$$

Si on considère trois variables réels x , y et z .

Les équations caractéristiques qui lient ces variables :

$$z = z(x, y); \quad y = y(x, z); \quad x = x(y, z)$$

Exemple :

Pour un gaz parfait :

$$P = P(V, T) = \frac{nRT}{V}$$

Pour un gaz de Van Der Waals :

$$P = P(V, T) = \frac{nRT}{V - nb} + \frac{n^2 a}{V^2}$$

I.2.2. Dérivées partielles :

La dérivée partielle de la fonction f par rapport à x : $\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right)_y$ est la fonction dérivée normale de f par rapport à x en supposant qu' y est constante.