



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<sup>ère</sup> 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 <sup>-1</sup> ) .....	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.