



**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ « Abbès Laghrou » KHENCHELA
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE**



Département de Génie Mécanique

Support de cours

Thermodynamique 2

2^{ème} Année Licence

Réalisé par :

Dr. MAACHE Mouna

Année universitaire 2022-2023

Introduction

Ce support de cours de thermodynamique est destiné particulièrement aux étudiants de deuxième année LMD licence génie mécanique. Il répond en grande partie au programme officiel du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Cet ouvrage couvre d'importants aspects fondamentaux de la thermodynamique comme l'étude de la vapeur d'eau tout en utilisant les notions pré-requises de la première année ainsi que l'introduction des cycles machines thermiques.

Le polycopié comporte cinq chapitres. Le premier est un rappel des principaux concepts de base de la thermodynamique. Le second chapitre présente les propriétés des substances pures, il met également l'accent sur les diagrammes de phase et quelques équations d'états des gaz parfaits. Le troisième chapitre traite les phénomènes de la compression et de la détente des gaz. Il permet à l'étudiant de maîtriser la notion de travail dans toutes les conditions possibles lors d'une transformation thermodynamique d'un gaz. Les notions d'énergie interne et enthalpie sont également introduites dans ce chapitre. Le quatrième chapitre introduit les cycles de puissance à gaz. Après un aperçu sur le moteur à combustion interne, trois cycles de puissance à gaz sont étudiés : le cycle Otto, le cycle Diesel et le cycle de Brayton. Le cinquième et dernière chapitre illustre la thermodynamique des vapeurs et de l'air humide où les notions d'humidité absolue et l'humidité relative de l'air ainsi que le point de Rosée sont bien expliquées.

Le cours s'appuie aussi sur des exercices et des exemples corrigés et bien choisis pour faciliter à l'étudiant la compréhension et la maîtrise de la matière.

Une liste des références est proposée à la fin de l'ouvrage pour les étudiants qui souhaitent approfondir davantage leurs connaissances en thermodynamique.

Sommaire

Introduction	1
Sommaire	2
Listes des figures	5
Listes des tableaux	8
Chapitre I : Rappels sur les concepts de base de la thermodynamique	9
1. Introduction.....	9
1. 1. Définition.....	9
1. 2. Système.....	9
1. 3. Description macroscopique et description microscopique des systèmes d'équilibre.....	9
1. 4. L'équilibre thermodynamique.....	10
1. 5. Variable d'état.....	10
1. 6. Fonction d'état	10
1. 7. Transformation	10
a. Transformation réversible	11
b. Transformation irréversible.....	11
2. Premier principe de la thermodynamique.....	11
2. 1. Expressions des travaux échangés.....	12
2. 2. Expressions des chaleurs échangées.....	12
2. 3. Expressions des variables d'énergie interne et d'enthalpie.....	13
2. 4. Cas des gaz parfaits.....	13
a. Définition.....	13
b. Transformations particulières.....	14
3. Deuxième principe de la thermodynamique : Fonction d'entropie.....	14
3. 1. Transformations cycliques monothermes.....	15
3. 2. Transformations cycliques dithermes.....	15
a. Cas du moteur thermique.....	15
b. Cas de la machine frigorifique.....	16
c. Cas de la pompe à chaleur.....	17

3. 3. Comparaison des cycles réversibles et irréversibles.....	17
a. Cycles réversibles.....	17
b. Cycles irréversibles	18
3. 4. Transformations ouvertes, entropie	19
a. Transformations réversibles	19
b. Transformations irréversibles	19
3. 5. Propriétés de la fonction entropie S	19
3. 6. Entropie d'une mole de gaz parfait	20
Chapitre II : Les propriétés des substances pures.....	21
1. Une substance pure.....	21
2. Les phases d'une substance pure.....	21
3. Les changements de phase d'une substance pure.....	22
3.1. Le liquide comprimé et le liquide saturé.....	22
3.2. La vapeur saturée et la vapeur surchauffée.....	22
3.3. La température et la pression de saturation.....	23
3.4. Les diagrammes de phase.....	24
a. Le diagramme température-volume (T-V).....	24
b. Le diagramme pression-volume (P-V).....	26
c. Le diagramme pression-volume (P-V) qui inclut la phase solide.....	26
3.5. Les tables des variables thermodynamiques.....	27
a. L'enthalpie : une combinaison de variables thermodynamiques.....	28
b. Les états de liquide saturé et de vapeur saturée.....	28
c. Un mélange liquide-vapeur à saturation.....	29
d. Une vapeur surchauffée.....	32
e. Un liquide comprimé.....	33
3.6. L'équation d'état d'un gaz parfait.....	33
3.7. Le facteur de compressibilité : l'écart du comportement des gaz parfaits.....	34
3.8. Les autres équations d'état.....	35
a. Equation d'état de Van des Waals.....	35
b. Equation d'état de Beattie-Bridgeman.....	35
c. Equation d'état de Benedict-Webb-Rubbin.....	35
d. Equation d'état du viriel.....	35

Chapitre III : Compression et détente des gaz	37
1. Le travail de frontière déformable.....	37
1.1. Travail fait durant une évolution à volume constant.....	39
1.2. Travail fait durant une détente à pression constante.....	39
1.3. Travail fait au cours d'une compression isotherme d'un gaz parfait.....	40
1.4. Transformation polytropique.....	41
2. Bilan d'énergie dans les systèmes fermés.....	42
3. Chaleurs massiques.....	43
4. L'énergie interne, l'enthalpie et les chaleurs massiques des gaz parfaits.....	44
5. Les relations entre les chaleurs massiques d'un gaz parfait.....	45
Chapitre IV : Les cycles de puissance à gaz	47
1. Des généralités à propos des cycles de puissance à gaz.....	47
2. A quoi sert le cycle de Carnot.....	48
3. Un aperçu du moteur à combustion interne.....	49
4. Le cycle Otto.....	50
5. Le cycle Diesel.....	52
6. Le cycle de Brayton.....	53
Chapitre V : Thermodynamique des vapeurs et de l'air humide	54
1. L'air sec et l'air humide.....	54
2. L'humidité absolue et l'humidité relative de l'air.....	54
3. Le point de Rosée.....	57
Annexes	59
Références	74

Listes des figures

Figure I. 1 : Schématisation de l'ensemble système et milieu extérieur.....	9
Figure I. 2 : Diagramme P-V avec deux chemins différents.....	11
Figure I. 3 : Machine thermique.....	16
Figure I. 4 : Diagramme P-V (Cycle de Carnot).....	17
Figure II. 1 : L'azote et l'air sont des substances pures.....	21
Figure II. 2 : Un mélange d'eau sous forme d'eau liquide et de vapeur d'eau est une substance pure. Un mélange d'air liquide et gazeux n'est pas une substance pure.....	21
Figure II. 3 : A 1 atm et 20°C, l'eau est un liquide comprimé ou liquide sous-refroidi.....	22
Figure II. 4 : A 1atm et 100°C l'eau est un liquide saturé c.-à-d. sur le point de s'évaporer.....	22
Figure II. 5 : A mesure que la chaleur est transmise à l'eau une partie du liquide saturé s'évapore. Dans ce cas l'eau est un mélange liquide-vapeur saturé.....	22
Figure II. 6 : A 1 atm, la température de l'eau reste constante à 100°C jusqu'à ce que la dernière goutte se soit évaporée. Il s'agit alors de vapeur saturée.....	23
Figure II. 7 : A mesure que la chaleur est transmise à la vapeur, sa température s'élève. Dans ce cas l'eau est une vapeur surchauffée.....	23
Figure II. 8 : Diagramme T-V de l'eau chauffée à pression constante.....	23
Figure II. 9 : Courbe de saturation d'une substance pure (l'eau).....	23
Figure II. 10 : Diagramme T- V pour les changements de phase d'une substance pure à diverses pressions constantes	25
Figure II. 11 : A des pressions surcritiques($P > P_{cr}$) il n'y a plus de changement de phase.....	25
Figure II. 12 : Diagramme T-V d'une substance pure.....	25
Figure II. 13 : Diagramme P-V d'une substance pure.....	26
Figure II. 14 : Diagramme P-V d'une substance pure qui se contracte durant la solidification.....	27

Figure II. 15 : Diagramme P-V d'une substance pure qui se dilate durant la solidification (eau).....	27
Figure II. 16 : Au point triple, les trois phases (solide, liquide et gazeuse) sont en équilibre.....	27
Figure II. 17 : Diagramme P-T d'une substance pure.....	27
Figure II. 18 : Pondération de liquide et de vapeur dans un mélange saturé.....	29
Figure II. 19 : Un système à 2 phases peut être analysé comme un mélange homogène.....	30
Figure II. 20 : Rapport des segments dans une courbe P-v ou T-v.....	30
Figure II. 21 : Exemple tiré de la table A.6.....	32
Figure II. 22 : Pourcentage d'écart entre les volumes massiques de la vapeur tirés de la table thermodynamique et calculés avec l'équation des gaz parfait.....	33
Figure II. 23 : Comparaison du facteur de compressibilité pour différentes substances.....	34
Figure III. 1 : Frontière déformable (état 1).....	37
Figure III. 2 : Le gaz fait un travail δW_b en soulevant le piston sur une distance ds (état 2).....	37
Figure III. 3 : L'air sous la courbe de l'évolution dans un diagramme P-V représente le travail de frontière.....	38
Figure III. 4 : Le travail de frontière dépend du parcours suivi, durant l'évolution.....	38
Figure III. 5 : Exemple 1.....	39
Figure III. 6 : Exemple 2.....	39
Figure III. 7 : Exemple 3.....	41
Figure III. 8 : Schéma et diagramme P-V d'une transformation polytropique.....	42
Figure III. 9 : Dans un cycle, $\Delta E = 0$ donc $Q = W$	43
Figure IV. 1 : Diagrammes P-v et T-s du cycle de Carnot.....	48
Figure IV. 2 : Diagramme T-s de l'exemple.....	48
Figure IV. 3 : Principaux éléments du moteur à combustion interne	49
Figure IV. 4 : Système piston-cylindre.....	50
Figure IV. 5 : Cylindrée et volume de compression.....	50
Figure IV. 6 : Cycle réel théorique (Otto) d'un moteur à combustion interne à quatre temps.....	51

Figure IV. 7 : Diagrammes T-s du cycle Otto théorique.....	51
Figure IV. 8 : Diagrammes P-v et T-s du cycle Diesel théorique.....	52
Figure IV. 9 : Diagrammes P-v et T-s du cycle Brayton idéal.....	53
Figure V. 1 : La pression de vapeur dans l'air est égale à la pression de saturation de l'eau à la même température.....	55
Figure V. 2 : L'humidité absolue et l'humidité relative.....	55

Listes des tableaux

Tableau 1 : Pression de saturation de l'eau pour différentes températures.....	24
Tableau 2 : Les constantes de l'équation de Beattie-Bridgeman.....	36
Tableau 3 : Les constantes de l'équation de Benedict-Webb-Rubin.....	36

Chapitre I

RAPPELS SUR LES CONCEPTS DE BASE DE LA THERMODYNAMIQUE

1. Introduction

1. 1. Définition

La thermodynamique est la science qui traite les rapports entre les phénomènes thermiques et les phénomènes mécaniques.

La thermodynamique classique : étudie les systèmes à l'échelle *macroscopique*.

La thermodynamique statistique : étudie le comportement des systèmes à l'échelle *microscopique*.

1. 2. Système

Un système est un ensemble de corps limités par une surface à travers laquelle s'effectuent les échanges d'énergie et/ou de matière avec le milieu extérieur. L'ensemble *système* et *milieu extérieur* constituent *l'univers*.

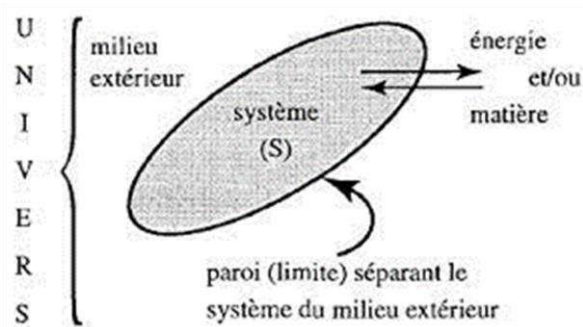


Figure I. 1 : Schématisation de l'ensemble système et milieu extérieur

En thermodynamique un système peut être ouvert, fermé ou isolé.

Système thermodynamique	Ouvert	Fermé	Isolé
<i>Echange d'énergie</i>	Oui	Oui	Non
<i>Echange de matière</i>	Oui	Non	Non

1. 3. Description macroscopique et description microscopique des systèmes d'équilibre

- Ce qui relève des atomes et des molécules et microscopique (Exemple : vitesse d'une particule ou force d'interaction entre deux molécules...)

- Ce qui est perçu à notre échelle et macroscopique. (Le système macroscopique peut-être décrit par un nombre de paramètres : pression, température, volume, etc.)

1. 4. L'équilibre thermodynamique :

En général le système échange de l'énergie et de la matière avec son environnement et ses propriétés dépendent du temps.

a- **Etat stationnaire** : les paramètres macroscopiques n'évoluent pas au cours du temps.

b- **Etat d'équilibre thermodynamique** : un système est en équilibre thermodynamique si son état est stationnaire en l'absence des échanges de matière et d'énergie avec le milieu extérieur.

1. 5. Variable d'état

L'état d'un système est défini par des grandeurs physiques « mesurables » telles que : la température (T), la pression (P), le volume (V)... Ces variables sont *des variables d'état*.

a- **Variables extensives** : proportionnelles à la quantité de matière exemple volume (V), énergie interne (U), nombre de moles (n), entropie (S)...

b- **Variables intensives** : indépendantes de la quantité de matière exemple pression (P) température (T) masse volumique (ρ) concentration (c)

1. 6. Fonction d'état

- La fonction d'état est une grandeur extensive.
- La variable dZ de la fonction d'état Z est une différentielle totale exacte. Z ne dépend pas du chemin suivi. Elle ne dépend que de l'état initial et de l'état final. $\Delta Z = Z_F - Z_I$.
- H et U sont des fonctions d'État. W et Q ne sont pas des fonctions d'état.

1. 7. Transformation

On appelle transformation le passage d'un état *initial 1* à un état *final 2*. On identifie souvent les transformations par une variable d'état qui reste constante. (Isotherme : T constante, isobare : P cste, isochore : V cst, isenthalpique : H cste, adiabatique : $Q = 0$)

Il existe deux grandes classes de transformations :

- a- Transformation réversible :** Une fois la transformation effectuée l'état initial peut-être rejoint depuis l'état final en appliquant une action mineure sur le système. On peut dire d'une telle transformation qu'elle est lente, constituée d'une suite continue d'états d'équilibre : elle est quasi statique.

Exemple : Une bouteille d'eau fermée à température et pression ambiante (20°C et 1 bar) est laissée sous un soleil. La température monte alors à 30°C et la pression à 2 bars. Si le soleil disparaît la bouteille retrouve son état initial au bout d'un certain temps.

- b- Transformation irréversible :** Une fois la transformation réalisée, il est impossible de revenir à l'état initial.

Exemple : Une bouteille est remplie de deux liquides de même densité et de couleurs différentes (un bleu et un jaune) séparés par une paroi étanche. On retire la paroi et les deux liquides se mélangent. Il est alors impossible de retrouver l'état initial.

2. Premier principe de la thermodynamique

- Au cours d'une transformation élémentaire un système échange avec le milieu extérieur un travail δW et une quantité de chaleur δQ . L'énergie interne de ce système subit alors une variation :

$$dU = \delta W + \delta Q \quad (\text{I. 1})$$

- Le premier principe postule que la somme $\delta W + \delta Q = dU$ est une différentielle totale exacte, alors que δW et δQ ne le sont pas.

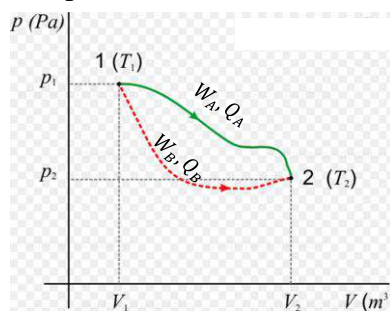


Figure I. 2 : Diagramme P-V avec deux chemins différents

$$U_2 - U_1 = W_A + Q_A = W_B + Q_B \quad (\text{I. 2})$$

$$U_2 - U_1 = W_{1,2} + Q_{1,2} \quad (\text{I. 3})$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Indépendants des états intermédiaires}} \quad \swarrow \quad \searrow \quad \searrow$
 Indépendants des états intermédiaires Indépendants des états intermédiaires

- **Cas particuliers**

- a- Dans le cas d'une transformation cyclique l'état (1) coïncide avec l'état (2) ($U_1 = U_2$) \Rightarrow $(W + Q)_{cycle} = 0$.
- b- Dans un système isolé (le système n'échange rien avec le milieu extérieur), $W = 0$ et $Q = 0$, on a donc $U_1 = U_2$.
- c- Pour un système qui fournit du travail sans recevoir de la chaleur, c-à-d $W < 0$ et $Q < 0 \Rightarrow U_2 - U_1 < 0$, il y'a donc diminution de l'énergie du système, jusqu'au moment où ses réserves d'énergie s'épuisent : le système ne pourra donc pas fournir indéfiniment du travail.

2. 1. Expressions des travaux échangés

$$\delta W = -P_{ext} dV$$

- Si la transformation est irréversible :

$$\delta W_{irrev} = -P_{ext} dV \Rightarrow W_{irrev} = - \int_i^f P_{ext} dV =$$

$$= P_{ext}(V_f - V_i)$$

$$W_{irrev} = -P_{ext} \Delta V$$



- Si la transformation est réversible :

$$\delta W_{rev} = -P dV \quad (\text{car } P_{ext} = P_{sys} = P)$$

- Transformation isochore $W = 0$
- Transformation isobare ($W = -P(V_2 - V_1)$)

2. 2. Expressions des chaleurs échangées

- Dans le cas général $\delta Q = dU - \delta W$.
- Pour une transformation réversible :

$$\delta Q = c_v dT + l dV = c_p dT + h dP = \lambda dV + \mu dP$$

Cas particuliers

- a- Dans une transformation isochore ($dV = 0$) $\delta Q = c_v dT \Rightarrow c_v = \left(\frac{\delta Q}{dT}\right)_V$

c_v : capacité calorifique à volume constant.

b- Dans une transformation isobare ($dP = 0$) $\delta Q = c_p dT \Rightarrow c_p = \left(\frac{\delta Q}{dT}\right)_P$

c_p : capacité calorifique à pression constante.

c- Dans une transformation adiabatique $\delta Q = 0$

2. 3. Expressions des variables d'énergie interne et d'enthalpie

Si le système ne reçoit que des forces de pression $\delta W = -P dV$.

$$dU = \delta W + \delta Q = c_v dT + l dV - P dV = c_v dT + (l - P) dV$$

$$dU = c_v dT + (l - P) dV$$

$$dH = d(U + PV) = dU + PdV + VdP = \delta Q + \delta W + PdV + VdP = \delta Q - PdV + PdV + VdP$$

$$= c_p dT + h dP + VdP = c_p dT + (h + V) dP$$

$$dH = c_p dT + (h + V) dP$$

dU et dH sont des différentielles totales exactes $\Leftrightarrow \frac{\partial U}{\partial V} = l - P$ et $\frac{\partial U}{\partial T} = c_v$ et $\frac{\partial H}{\partial P} = h + V$ et

$$\frac{\partial H}{\partial T} = c_p$$

2. 4. Cas des gaz parfaits

a. Définition

Un gaz parfait et un gaz qui obéit à :

- La première loi de Joule : l'énergie interne n'est fonction que de la température. $U = U(T)$

$$\frac{\partial U}{\partial P} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial U}{\partial V} = l - P = 0 \quad \Rightarrow l = P \quad \Rightarrow dU = c_v dT$$

- La deuxième loi de Joule l'enthalpie ne fonction que de la température. $H = H(T)$

$$\frac{\partial H}{\partial V} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial H}{\partial P} = h + V = 0 \quad \Rightarrow h = -V \quad \Rightarrow dH = c_p dT$$

$$dH = d(U + PV) = dU + d(PV) \text{ or pour un gaz parfait } PV = nRT$$

$$dH = dU + d(nRT) \Rightarrow c_p dT = c_v dT + nRdT \Rightarrow c_p - c_v = nR : \text{Relation de Mayer}$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \Rightarrow c_v(\gamma - 1) = nR \Rightarrow c_v = \frac{nR}{\gamma - 1} \quad \text{et} \quad c_p = \frac{nR\gamma}{\gamma - 1}$$

b. Transformations particulières

- Transformation isotherme ($T = C^{ste}$) :

$$PV = C^{ste} ; dU = 0 \Rightarrow U_2 - U_1 = 0 \text{ et}$$

$$W = -Q = n R T \ln \frac{P_2}{P_1} = P_1 V_1 \ln \frac{V_1}{V_2}$$

- Transformation isochore ($V = C^{ste}$) :

$$W = 0 \text{ et } U_2 - U_1 = Q_v = \int_1^2 c_v dT$$

- Transformation adiabatique réversible ($Q = 0$) :

$$P V^\gamma = C^{ste} \text{ ou } T V^{\gamma-1} = C^{ste} \text{ ou } T^\gamma P^{1-\gamma} = C^{ste} ;$$

$$U_2 - U_1 = W_d = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{\gamma - 1} = c_v (T_2 - T_1)$$

- Transformation isobare ($P = C^{ste}$) :

$$W = - \int_1^2 P_{ext} dV = -P(V_2 - V_1)$$

$$\delta Q = c_p dT + h dP = c_p dT = dH \quad H_2 - H_1 = Q_p = \int_1^2 c_p dT$$

Remarques :

- Transformation adiabatique $\Delta U = W$
- Transformation isochore $\Delta U = Q_v$
- Transformation isobare $\Delta H = Q_p$

3. Deuxième principe de la thermodynamique : Fonction d'entropie

Le deuxième principe (ou principe d'évolution) impose des conditions restrictives au cours des transformations d'un système et permet, contrairement au premier principe, de prévoir le sens de l'évolution d'un système.

3. 1. Transformations cycliques monothermes

Le système n'échange de la chaleur qu'avec une seule source.

- D'après le deuxième principe, il est impossible qu'un système puisse fournir du travail au milieu extérieur, au cours d'un cycle monotherme. On a donc nécessairement

$$W_{cycle} \geq 0$$

et comme $(W + Q)_{cycle} = 0$ on a aussi

$$Q_{cycle} \leq 0$$

- Si la transformation monotherme est *réversible*, dans un sens, on a $W \geq 0$ et, en sens inverse $-W \leq 0$; ces deux conditions entraînent $W_{cycle} = Q_{cycle} = 0$.

3. 2. Transformations cycliques dithermes

Le système échange de la chaleur avec deux sources.

- D'après ce qui précède, il est impossible de réaliser une machine thermique motrice, en empruntant de la chaleur à une seule source. Pour fonctionner une machine thermique doit donc être en contact avec au moins deux sources.
- Une machine thermique ditherme échange une quantité de chaleur Q_1 avec la source chaude, une quantité de chaleur Q_2 avec la source froide et un travail W avec le milieu extérieur (figure I. 3).

Au cours d'un cycle, d'après le premier principe, on aura toujours, en valeur algébrique,

$$W + Q_1 + Q_2 = 0 \quad (\text{I. 4})$$

a. Cas du moteur thermique

Son rôle est de fournir un travail au milieu extérieur ($W < 0$), en empruntant une quantité de chaleur Q_1 à la source chaude ($Q_1 > 0$) et en restituant obligatoirement une quantité de chaleur Q_2 à la source froide ($Q_2 < 0$). Il est donc impossible d'avoir $Q_2 = 0$, sinon on reviendrait à la machine thermique monotherme qui ne peut pas fonctionner.

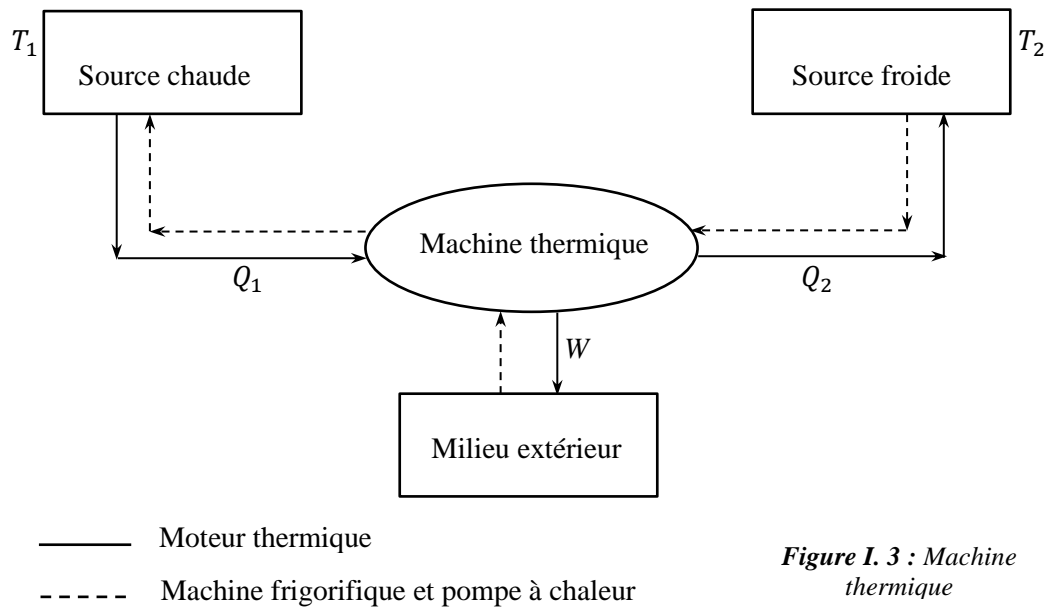


Figure I. 3 : Machine thermique

Le rendement du moteur, défini comme le rapport positif recette-dépense, est

$$\eta = -\frac{W}{Q_1} \quad (\eta < 1)$$

Ou, d'après la relation (I. 4),

$$\eta = -\frac{Q_1+Q_2}{Q_1} \quad (\text{I. 5})$$

b. Cas de la machine frigorifique

Son rôle est d'extraire une quantité de chaleur Q_2 à la source froide ($Q_2 > 0$), en recevant un travail W du milieu extérieur ($W > 0$), et en fournissant une quantité de chaleur Q_1 ($Q_1 < 0$), à la source chaude.

Le coefficient d'efficacité est encore le rapport positif recette-dépense, soit

$$e = \frac{Q_2}{W}$$

($e > 1$), ou, d'après la relation (I. 4),

$$e = \frac{Q_2}{-(Q_1+Q_2)} \quad (\text{I. 6})$$

c. Cas de la pompe à chaleur

Son rôle est de fournir une quantité de chaleur Q_1 ($Q_1 < 0$) à la source chaude (air de la salle à chauffer), en recevant un travail W du milieu extérieur ($W > 0$) et une quantité de chaleur Q_2 ($Q_2 > 0$) de la source froide (atmosphère).

Le coefficient d'efficacité est le rapport positif recette-dépense, soit :

$$e' = -\frac{Q_1}{W}$$

($e > 1$), ou, d'après la relation (I. 4),

$$e' = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} \quad (\text{I. 7})$$

3. 3. Comparaison des cycles réversibles et irréversibles

a. Cycles réversibles

D'après le théorème de Carnot, tous les cycles réversibles, fonctionnant entre les mêmes sources, ont même rendement (ou même coefficient d'efficacité), indépendamment de la nature du fluide.

Exemple : le cycle de Carnot (cycle réversible ditherme) comprend deux isotherme (T_1) et (T_2) reliées par deux adiabatiques réversibles.

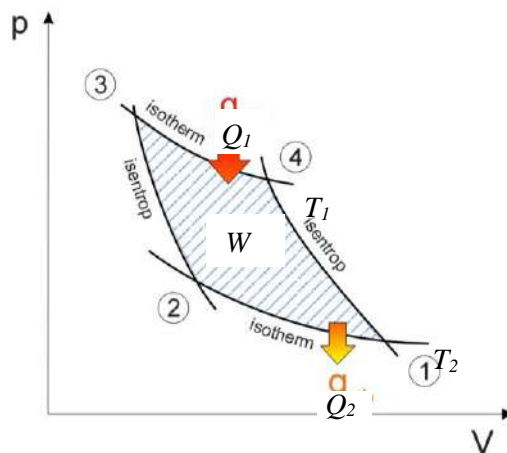


Figure I. 4 : Diagramme P-V
(Cycle de Carnot)

Le rapport d'échange des chaleurs échangées (au cours des transformations isothermes) avec les sources de température T_1 et T_2 est :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = -\frac{T_1}{T_2} \quad (\text{I. 8})$$

On en déduit, d'après les relations (I. 5), (I. 6) et (I. 7),

1- Le rendement du moteur thermique ditherme réversible :

$$\eta_r = \frac{T_1 - T_2}{T_1} ;$$

2- Le coefficient d'efficacité de la machine frigorifique réversible :

$$e_r = \frac{T_2}{T_1 - T_2} ;$$

3- Le coefficient d'efficacité de la pompe à chaleur réversible :

$$e'_r = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

D'autre part, pour les cycles réversibles dithermes, la relation (5) s'écrit :

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

On peut généraliser cette relation à ainsi que réversible fonctionnant avec un grand nombre de sources :

$$\sum \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

et pour une infinité de sources, On aura :

$$\oint_{\substack{\text{cycle} \\ \text{réversible}}} \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad (\text{I. 9})$$

Où δQ est la chaleur échangée par le système avec la source de température T (égale à celle du système, car il y a réversibilité).

b. Cycles irréversibles :

D'après le théorème de Carnot, le rendement (le coefficient d'efficacité) d'un cycle fonctionnant entre deux sources et maximal lorsque le système fonctionne de façon réversible ; donc : $\eta_{\text{irr}} < \eta_{\text{rév}}$; on en déduit :

$$\frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad \text{soit} \quad \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} < 0$$

On peut généraliser ce résultat à un cycle irréversible fonctionnant avec un grand nombre de sources :

$$\sum \frac{Q_i}{T_i} < 0$$

et pour une infinité de sources, on aura :

$$\oint_{\text{cycle irr\u00e9versible}} \frac{\delta Q}{T} < 0 \quad (\text{I. 10})$$

Ici, T d\u00e9signe toujours la temp\u00e9rature d'une source, mais en aucun cas celle du syst\u00e8me (car la transformation est irr\u00e9versible).

3. 4. Transformations ouvertes, entropie

a. Transformations r\u00e9versibles

La quantit\u00e9 $\int_I^F \frac{\delta Q}{T}$, ind\u00e9pendante du chemin suivi pour passer de l'\u00e9tat initial I \u00e0 l'\u00e9tat final F , est mesur\u00e9e par la variation de la fonction d'\u00e9tat S (entropie) :

$$(\text{Transformation r\u00e9versible}) \quad \int_I^F \frac{\delta Q}{T} = S_F - S_I \quad (\text{I. 11})$$

Pour un cycle, $S_I = S_F$ et on retrouve la relation (I. 9).

La diff\u00e9rentielle de la fonction entropie est donc, pour une transformation r\u00e9versible,

$$dS = \frac{\delta Q}{T},$$

T \u00e9tant la temp\u00e9rature de la source et non celle du syst\u00e8me.

b. Transformations irr\u00e9versibles

D'apr\u00e8s les relations (I. 9) et (I. 10), on a :

$$(\text{Transformation irr\u00e9versible}) \quad \int_I^F \frac{\delta Q}{T} < S_F - S_I \quad (\text{I. 12})$$

T \u00e9tant la temp\u00e9rature de la source et non celle du syst\u00e8me.

3. 5. Propri\u00e9t\u00e9s de la fonction entropie S

S est une fonction d'\u00e9tat li\u00e9e au d\u00e9sordre mol\u00e9culaire ; elle est d\u00e9finie dans un \u00e9tat d'\u00e9quilibre du syst\u00e8me ; ses variations ne d\u00e9pendent pas du chemin suivi, ce qui simplifier le calcul de ΔS .

$dS = \frac{\delta Q}{T}$ est donc une diff\u00e9rentielle totale exacte (alors que δQ n'est pas une diff\u00e9rentielle totale).

S est une quantit\u00e9 extensive (donc additive) : on peut calculer la variation d'entropie de l'univers en faisant la somme des entropies de chaque partie du syst\u00e8me, des sources et du milieu ext\u00e9rieur :

$$(\Delta S)_{univers} = (\Delta S)_{système} + (\Delta S)_{source} + (\Delta S)_{extérieur}$$

L'irréversibilité est liée à l'augmentation de l'entropie de l'univers.

- Pour un système isolé, alors que son énergie interne U est constante, son entropie ne peut que croître : $\Delta S \geq 0$. C'est la raison pour laquelle un système isolé qui a subi une évolution ne peut plus revenir à son état initial.
- Il existe une relation générale entre la variation d'entropie de l'univers et le travail $W_{irr} - W_{rév} = T_0 \Delta S$.

3. 6. Entropie d'une mole de gaz parfait

- En fonction des variables T et P, on a $dS = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dP}{P}$
- En fonction des variables T et V, on a $dS = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V}$
- En fonction des variables V et P, on a $dS = c_v \frac{dP}{P} + c_p \frac{dV}{V}$

Ainsi la variation d'entropie d'une mole de gaz parfait, de capacité calorifique molaire

$$c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \text{ et } c_v = \frac{R}{\gamma - 1}, \text{ sera}$$

- Si la transformation est isobare : $\Delta S = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$
- Si la transformation est isochore : $\Delta S = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$
- Si la transformation est isotherme : $\Delta S = R \ln \frac{V_2}{V_1} = R \ln \frac{P_1}{P_2}$
- Si la transformation est adiabatique réversible : $\Delta S = 0$

Chapitre II

LES PROPRIETES DES SUBSTANCES PURES

1. Une substance pure

- Une substance pure est une substance dont la composition chimique est homogène et stable.
- L'eau, l'azote et le gaz carbonique sont des substances pures.
- Une substance pure peut être constituée de différentes espèces chimiques pourvu que leur mélange demeure homogène et stable. Exemple l'air constitué d'azote (N_2) et d'oxygène (O_2) et d'autres gaz est une substance pure. Le mélange de l'huile et de l'eau n'est pas une substance pure. Leur composition chimique n'est pas homogène.
- Une substance pure peut avoir des phases distinctes. Toutefois, dans chacune de ces phases elle conserve toujours la même composition chimique.
- Un mélange d'eau liquide et de glace ou d'eau liquide et de vapeur est une substance pure, car les phases solide et liquide ont la même composition chimique.
- Un mélange d'air liquide et d'air gazeux n'est pas une substance pure. La composition chimique de la phase gazeuse est différente de la phase liquide. Les gaz qui constituent l'air ne se condensent pas tous à la même température.

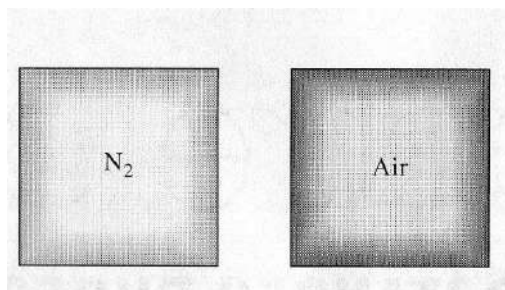


Figure II. 1. L'azote et l'air sont des substances pures

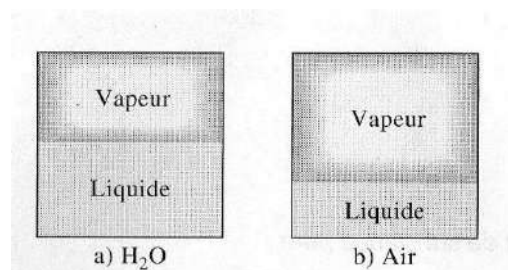


Figure II. 2. Un mélange d'eau sous forme d'eau liquide et de vapeur d'eau est une substance pure. Un mélange d'air liquide et gazeux n'est pas une substance pure

2. Les phases d'une substance pure

Les substances peuvent se présenter dans différentes phases. A la température ambiante le cuivre est solide, le mercure est liquide et l'azote est gazeux. L'énergie des molécules dans un gaz est plus élevée que celles des molécules dans un liquide ou encore des molécules dans un solide. Un gaz doit céder une grande quantité d'énergie avant de se condenser ou de se solidifier.

3. Les changements de phase d'une substance pure

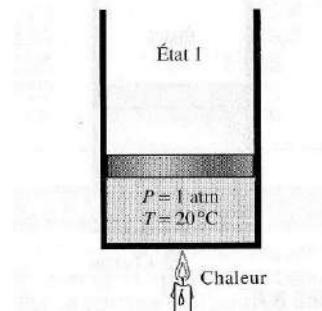
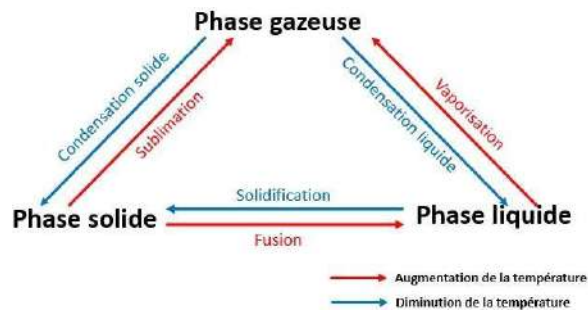


Figure II. 3. A 1 atm et 20°C, l'eau est un **liquide comprimé** ou **liquide sous-refroidi**.

Une substance pure peut se présenter dans des phases différentes. A l'intérieur d'une bouilloire ou d'une chaudière, l'eau se trouve sous forme liquide-vapeur. L'eau dans un tuyau mal isolé risque de passer de l'état liquide à l'état solide pendant l'hiver. Ce cours porte sur les évolutions liquide-vapeur de l'eau. Ces évolutions sont fondamentales dans le fonctionnement de la plupart des machines thermiques.

3.1. Le liquide comprimé et le liquide saturé

Une substance liquide qui n'est pas sur le point de s'évaporer et un liquide comprimé ou sous-refroidi.

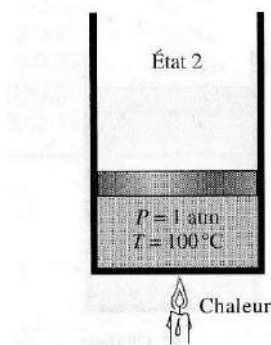


Figure II. 4. A 1 atm et 100°C l'eau est un **liquide saturé** c.-à-d. sur le point de s'évaporer.

3.2. La vapeur saturée et la vapeur surchauffée

Une substance gazeuse qui n'est pas sur le point de se condenser est une **vapeur surchauffée**.

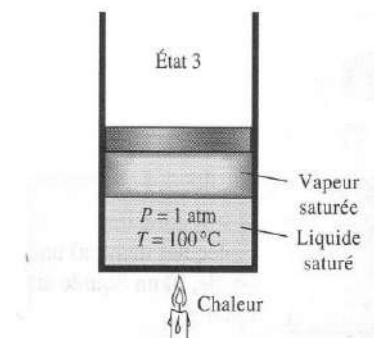


Figure II. 5. A mesure que la chaleur est transmise à l'eau une partie du liquide saturé s'évapore. Dans ce cas l'eau est un mélange **liquide-vapeur saturé**.

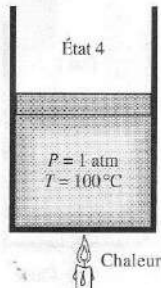


Figure II. 6. A 1 atm, la température de l'eau reste constante à 100°C jusqu'à ce que la dernière goutte se soit évaporée. Il s'agit alors de **vapeur saturée**.

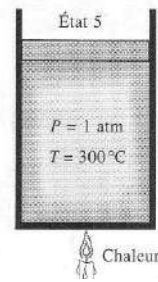


Figure II. 7. A mesure que la chaleur est transmise à la vapeur, sa température s'élève. Dans ce cas l'eau est une **vapeur surchauffée**.

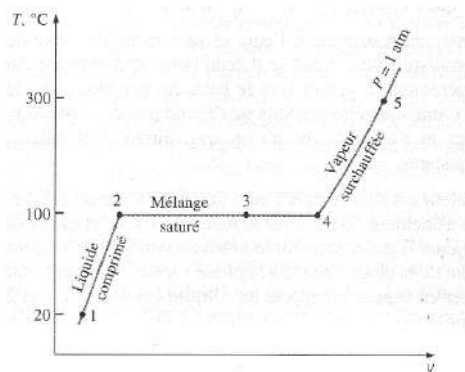


Figure II. 8. Diagramme T-V de l'eau chauffée à pression constante

3.3. La température et la pression de saturation

- La température de saturation est la température à laquelle une substance change de phase sous une pression donnée.
- La pression de saturation est la pression à laquelle une substance change de phase à une température donnée.

Il existe des tables de saturation de la pression en fonction de la température (ou de la température en fonction de la pression) pour presque toutes les substances. Le tableau suivant est un exemple qui se rapporte à l'eau.

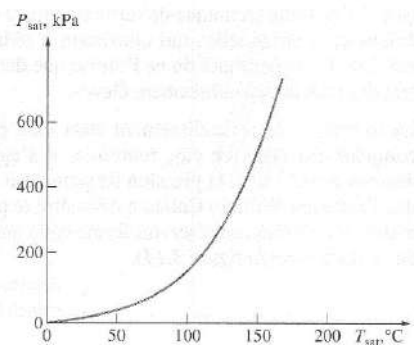


Figure II. 9. Courbe de saturation d'une substance pure (l'eau)

Température (°C)	Pression de saturation (kPa)	Température (°C)	Pression de saturation (kPa)
-10	0,26	30	4,25
-5	0,40	40	7,39
0	0,61	50	12,35
5	0,87	100	101,4
10	1,23	150	476,2
15	1,71	200	1555
20	2,34	250	3976
25	3,17	300	8588

Tableau 1. Pression de saturation de l'eau pour différentes températures.

La figure II.9 illustre la relation $P_{sat} = f(T_{sat})$. Cette courbe est la courbe de saturation. On observe que l'eau bout à plus haute température sous une pression plus élevée.

La quantité de chaleur absorbée par une substance pendant sa fusion est la **chaleur latente de fusion**. Cette même quantité de chaleur est dégagée durant sa solidification. De même la quantité de chaleur absorbée par une substance au cours de son évaporation est la chaleur latente d'évaporation. Cette même quantité de chaleur est dégagée durant sa condensation. La grandeur des chaleurs latentes dépend de la pression et de la température à laquelle le changement de phase se produit.

3.4. Les diagrammes de phase

a. Le diagramme température-volume (T-V)

Répetons les évolutions des figures II. 1 à II. 9 pour différentes pressions au sein du système piston-cylindre. Les résultats sont rapportés dans le diagramme température-volume de la figure II. 10. On note que la forme de toutes les courbes est semblable. L'eau s'évapore à plus haute température lorsqu'elle est soumise à une pression plus élevée. Par exemple à 100 kPa, elle s'évapore à 99,6°C alors qu'à 1MPa elle s'évapore à 179,9°C. Le volume massique de la vapeur saturé diminue à mesure que la pression augmente. Par exemple à 100 kPa, $V_g = 1,6941 \text{ m}^3/\text{kg}$, alors qu'à 1 MPa, $V_f = 0,19436 \text{ m}^3/\text{kg}$. Autrement dit, le parcours horizontal entre l'état du liquide saturé et l'état de la vapeur saturée rétrécit à mesure que la pression croît pour devenir, à la pression de 22,06 MPa, un point. Ce point est appelé le « **point critique** ». C'est le point où les états du liquide saturé et de la vapeur saturée sont identiques.

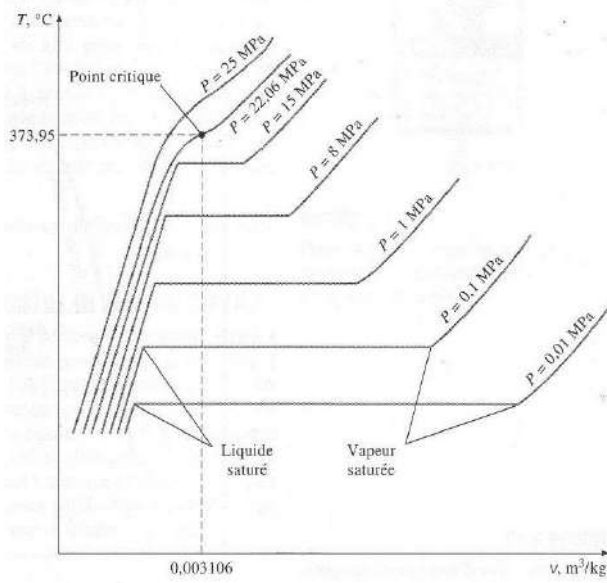


Figure II. 10. Diagramme T-V pour les changements de phase d'une substance pure à diverses pressions constantes.

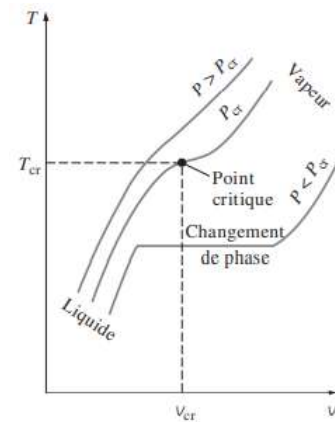


Figure II. 11. A des pressions surcritiques ($P > P_{cr}$) il n'y a plus de changement de phase.

Si on relie entre les points représentant les états du liquide saturé de la figure on obtient la **courbe du liquide saturé**. Si on relie entre les points des états de la vapeur saturée on obtient la **courbe de la vapeur saturée**. En se rejoignant au point critique ces deux courbes forment la courbe de saturation dont la forme ressemblant à celle d'une cloche et illustré sur la figure II. 12.

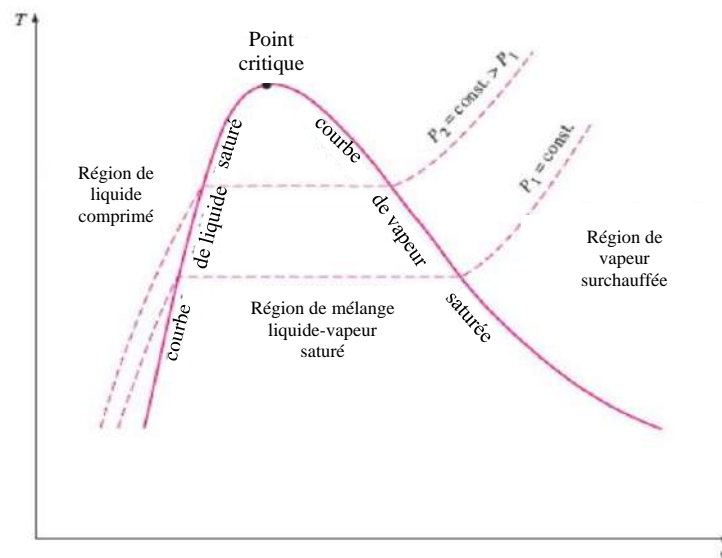


Figure II. 12. Diagramme T-V d'une substance pure

b. Le diagramme pression-volume (P-V)

La forme de la courbe de saturation d'une substance pure dans un diagramme pression-volume est semblable à celle dans un diagramme température-volume excepté pour les lignes en pointillé qui représentent les lignes à températures constantes.

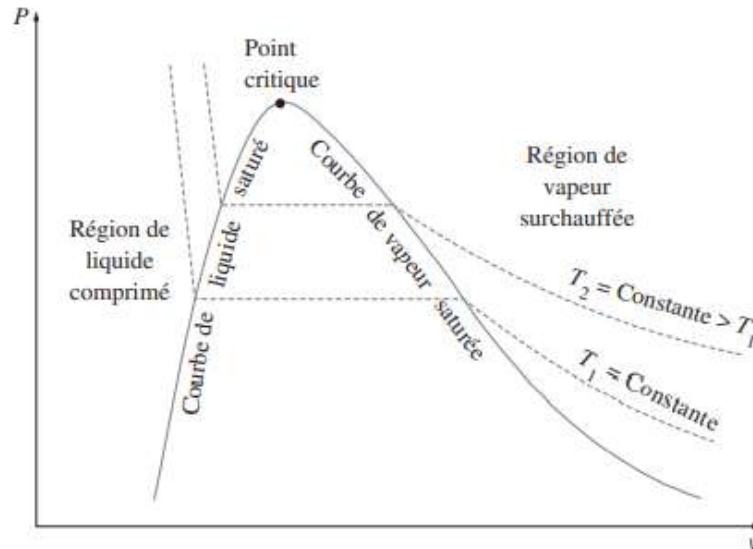


Figure II. 13. Diagramme P-V d'une substance pure

c. Le diagramme pression-volume (P-V) qui inclut la phase solide

Les diagrammes T-V et P-V présentés jusqu'à présent ne montrent que les phases liquide et vapeur. Toutefois ils peuvent aussi montrer les phases solide-liquide et solide-vapeur. La figure II. 14 montre le diagramme P-V d'une substance qui se contracte durant la solidification. C'est le cas de la presque totalité des substances. La figure II. 15 illustre le diagramme T-V d'une substance qui se dilate durant la solidification. C'est le cas de quelques substances dont l'eau. La différence entre les deux figures apparaît dans la courbe de saturation solide-liquide. Dans le cas de l'eau, la pente de la courbe est négative. L'eau se dilate en gelant.

Le point où les phases solide, liquide et vapeur d'une substance pure sont en équilibre est appelé le « **point triple** » (voir la figure II. 16). Dans un diagramme P-V ou T-V, l'état d'équilibre des trois phases forme la **courbe triple**. Dans un diagramme P-T, cette courbe apparaît comme un point (figure II. 17).

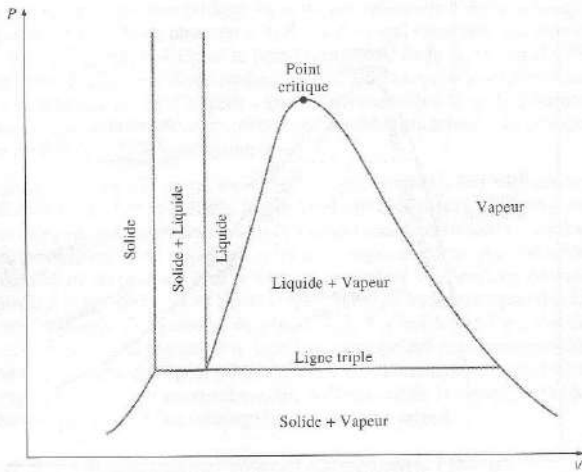


Figure II. 14. Diagramme P-V d'une substance pure qui se contracte durant la solidification.

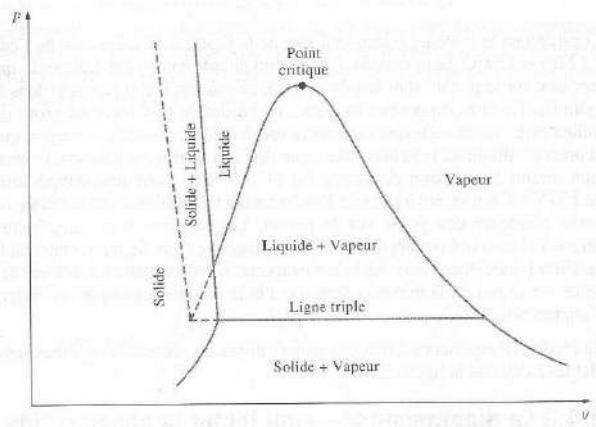


Figure II. 15. Diagramme P-V d'une substance pure qui se dilate durant la solidification (eau).

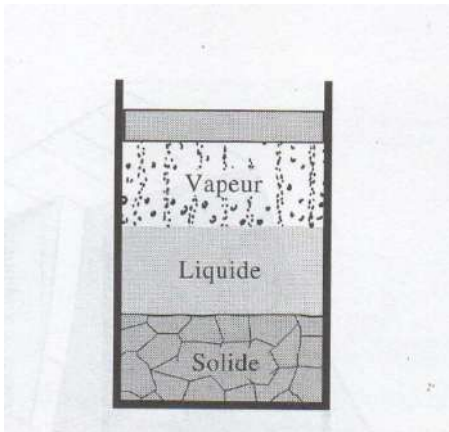


Figure II. 16. Au point triple, les trois phases (solide, liquide et gazeuse) sont en équilibre

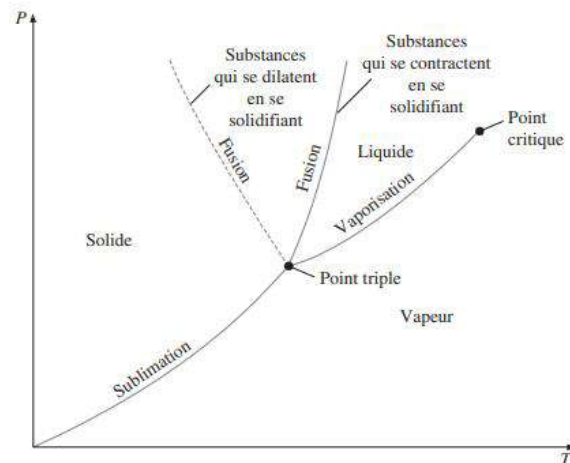


Figure II. 17. Diagramme P-T d'une substance pure

3.5. Les tables des variables thermodynamiques

Les tables des variables thermodynamiques présentent la température, la pression, les volumes massiques les énergies internes, les enthalpies ainsi que les entropies de la phase liquide et de la phase gazeuse. Les variables ont été mesurées expérimentalement où elles ont été déterminées à l'aide de relations thermodynamiques.

a. L'enthalpie : une combinaison de variables thermodynamiques

L'enthalpie totale H :

$$H = U + PV \quad (\text{kJ}) \quad (\text{II. 1})$$

L'enthalpie massique h :

$$h = u + Pv \quad (\text{kJ/kg}) \quad (\text{II. 2})$$

b. Les états de liquide saturé et de vapeur saturée

Les variables thermodynamiques du liquide saturé et de la vapeur saturée sont rapportées dans les tables A.4 et A.5 (voir annexe). Voici comment on utilise les tables pour trouver les propriétés associées à un état particulier. Pour une valeur de T donnée, les tables donnent P_{sat} et les autres propriétés. Pour une valeur de P donnée, les tables donnent T_{sat} et les autres propriétés.

V_f : volume massique du liquide saturé.

V_g : volume massique de la vapeur saturée.

$$V_{fg} = V_g - V_f$$

L'enthalpie h_{fg} est appelée l' « *enthalpie de vaporisation* » ou « *chaleur latente de vaporisation* ». Elle représente la quantité d'énergie requise par unité de masse pour vaporiser un liquide saturé à une pression et à une température donnée. L'enthalpie de vaporisation décroît avec la température et la pression et elle devient nulle au point critique.

Exemple 1 :

Un réservoir rigide renferme 50 kg d'eau liquide saturée à 90°C. Déterminer la pression dans le réservoir ainsi que son volume.

Solution :

L'état de l'eau liquide saturée est illustré dans le diagramme T-V de la figure ci-dessus. Puisque les conditions de saturation prévalent dans le réservoir, la pression qui y règne est la pression de saturation à 90°C, soit :

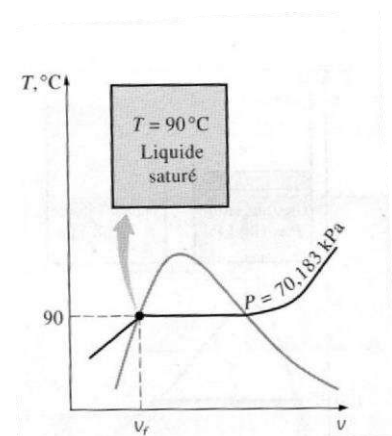
$$P = P_{\text{sat},90^\circ\text{C}} = \mathbf{70,183\text{kPa}} \quad (\text{voir la table A.4})$$

Le volume massique du liquide saturé est à 90°C est :

$$v = v_{f,90^\circ\text{C}} = 0,001036 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{voir la table A.4})$$

Alors, le volume du réservoir est :

$$V = m v = (50 \text{ kg}) (0,001036 \text{ m}^3/\text{kg}) = \mathbf{0,0518 \text{ m}^3}.$$



Exemple 2 :

Un système piston-cylindre contient 1 m^3 de vapeur saturée à 400 kPa . Déterminer la température et la masse de vapeur dans le système.

Solution :

L'état de la vapeur saturée est montré dans le diagramme P - V de la figure ci-dessus. Puisque le cylindre contient de la vapeur saturée à 400 kPa , la température qui règne dans le cylindre est la température de saturation à 400 kPa , soit :

$$T = T_{sat,400 \text{ kPa}} = \mathbf{143,61 \text{ }^\circ\text{C}} \quad (\text{voir la table A.5})$$

Le volume massique du liquide saturé est à 400 kPa est :

$$v = v_{f,400 \text{ kPa}} = \mathbf{0.46242 \text{ m}^3/\text{kg}} \quad (\text{voir la table A.5})$$

Alors, la masse de vapeur dans le cylindre est :

$$m = \frac{V}{v} = \frac{1 \text{ m}^3}{0.46242 \text{ m}^3/\text{kg}} = \mathbf{2,16 \text{ kg}}$$

c. Un mélange liquide-vapeur à saturation

Au cours d'une transformation d'évaporation, la substance se présente comme un mélange de liquide saturé et de vapeur saturée. Les variables thermodynamiques qui déterminent l'état du mélange (le volume massique, l'énergie interne, l'enthalpie et l'entropie) sont alors pondérées entre l'état de liquide saturé et l'état de vapeur saturée à l'aide du **titre x** , défini comme le rapport de la masse de vapeur dans le mélange à la masse totale du mélange, soit :

$$x = \frac{m_{\text{vapeur}}}{m_{\text{totale}}} \quad (\text{II. 3})$$

Où $m_{\text{totale}} = m_{\text{liquide}} + m_{\text{vapeur}} = m_f + m_g$

Afin d'établir la relation de pondération des propriétés thermodynamiques à l'aide du titre x , on considère un réservoir dans lequel se trouve un mélange liquide-vapeur saturé (figure II. 19).

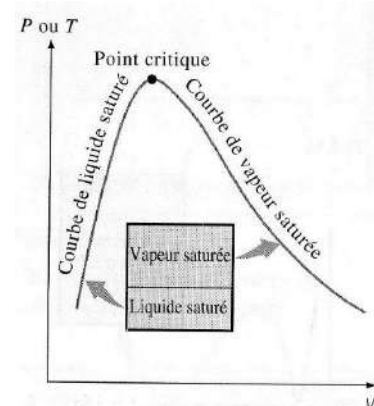
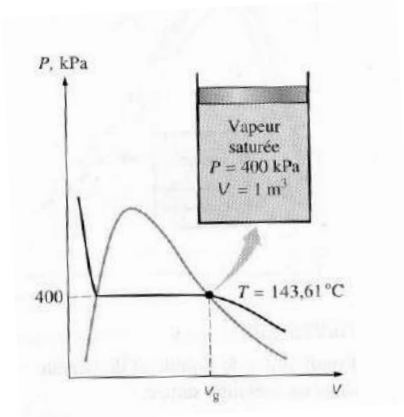


Figure II. 18. Pondération de liquide et de vapeur dans un mélange saturé

Le volume occupé par le liquide saturé et de V_f et celui qui est occupé par la vapeur saturée est de V_g . Le volume total et alors :

$$V = V_f + V_g$$

$$V = mv \rightarrow m_{totale} \cdot V_{moy} = m_f V_f + m_g V_g$$

$$m_f = m_{totale} - m_g \rightarrow m_{totale} \cdot V_{moy} = (m_{totale} - m_g) V_f + m_g V_g$$

En divisant cette dernière expression par la masse totale

m_{totale} , on obtient :

$$V_{moy} = (1 - x) V_f + x V_g$$

Ou encore

Où $V_{fg} = V_g - V_f$

De l'équation (4) on a :

$$x = \frac{V_{moy} - V_f}{V_{fg}} \tag{II.5}$$

$$V_{moy} = V_f + x V_{fg} \tag{II. 4}$$

Sous la forme d'un diagramme $P-V$ ou $T-V$ (voir figure II. 20), cette dernière expression est le rapport entre, d'une part, la distance séparant l'état du mélange à l'état du liquide saturé

(le segment \overline{AB}) et, d'autre part, la distance séparant l'état de la vapeur saturée à l'état du liquide saturé (le segment \overline{AC}).

Par analogie avec l'équation (II. 4), l'énergie interne et l'enthalpie d'un mélange liquide-vapeur saturé sont déterminées par :

$$u_{moy} = u_f + x u_{fg} \tag{II. 6}$$

$$h_{moy} = h_f + x h_{fg} \tag{II. 7}$$

Pour alléger l'écriture dans ce qui suit, on omettra l'indice « moy » dans les équations (II. 4), (II. 6) et (II. 7).

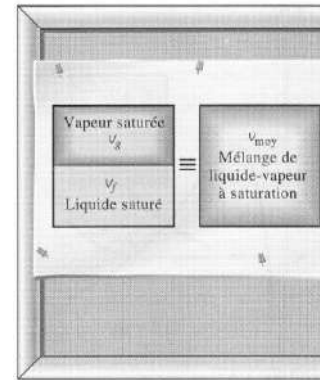


Figure II. 19. Un système à 2 phases peut être analysé comme un mélange homogène

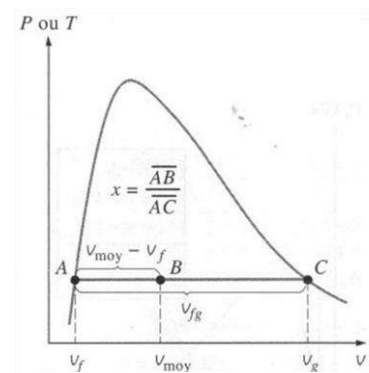


Figure II. 20. Rapport des segments dans une courbe $P-v$ ou $T-v$

Exemple 3 :

Un réservoir indéformable contient 10 kg d'eau dont la température est de 90°C . Si 8 kg d'eau se trouvent sous forme liquide et le reste de la masse sous forme de vapeur, déterminez :

- La pression dans le réservoir
- Le volume du réservoir.

Solution :

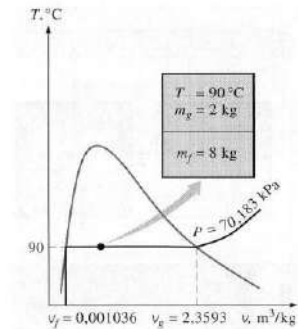
a) L'état du mélange à saturation est illustré sur la figure.

Parce que les phases liquide et vapeur sont en équilibre, le mélange est saturé et la pression est la pression de saturation, soit :

$$P = P_{sat,90^\circ\text{C}} = \mathbf{70,183\text{ kPa}} \quad (\text{voir la table A.4})$$

- b) A 90°C , $v_f = 0,001036\text{ m}^3/\text{kg}$ et $v_g = 2,3593\text{ m}^3/\text{kg}$ (voir la table A.4). On peut déterminer le volume du réservoir en additionnant le volume occupé par chacune des phases selon l'équation :

$$\begin{aligned} V &= V_f + V_g = m_f v_f + m_g v_g \\ &= (8\text{ kg})(0,001036\text{ m}^3/\text{kg}) + (2\text{ kg})(2,3593\text{ m}^3/\text{kg}) \\ &= \mathbf{4,73\text{ m}^3} \end{aligned}$$

**Exemple 4 :**

Un réservoir de 80 l contient 4 kg de réfrigérant R-134a à la pression de 160 kPa .

Déterminer

- La température dans le réservoir,
- Le titre,
- L'enthalpie du réfrigérant,
- Le volume occupé par la phase vapeur.

Solution :

- a) L'état du mélange à saturation est illustré à la figure. D'après les conditions qui règnent au sein du réservoir, on ignore toutefois si le réfrigérant se présente sous la forme d'un liquide comprimé, d'un mélange liquide-vapeur saturé ou d'une vapeur surchauffée. Pour le déterminer, il faut comparer une des variables provenant de l'énoncé du problème aux variables relevées de la table de vapeur. Par exemple, selon l'énoncé, on peut calculer le

$$\text{volume massique du réfrigérant par : } v = \frac{V}{m} = \frac{0,080\text{ m}^3}{4\text{ kg}} = 0,02\text{ m}^3/\text{kg}$$

Or, à la pression de 160 kPa,

$$v_f = 0,0007437 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g = 0,12348 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{voir la table A.12}).$$

On constate alors que $v_f < v < v_g$. Le réfrigérant se trouve sous la forme de liquide-vapeur saturée. La température de saturation correspondant à la pression de 160 kPa est

$$T = T_{\text{sat},160 \text{ kPa}} = -15,60^\circ\text{C}$$

b) Le titre est

$$x = \frac{v - v_f}{v_{fg}} = \frac{0,02 - 0,0007437}{0,12348 - 0,0007437} = 0,157$$

c) A 160 kPa, on tire de la table A.12, $h_f = 31,21 \text{ kJ/kg}$ et $h_{fg} = 209,90 \text{ kJ/kg}$

Alors :

$$\begin{aligned} h &= h_f + x h_{fg} \\ &= 31,21 \text{ kJ/kg} + (0,157)(209,90 \text{ kJ/kg}) \\ &= 64,2 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

d) La masse de vapeur est

$$m_g = x m_t = (0,157)(4 \text{ kg}) = 0,628 \text{ kg}$$

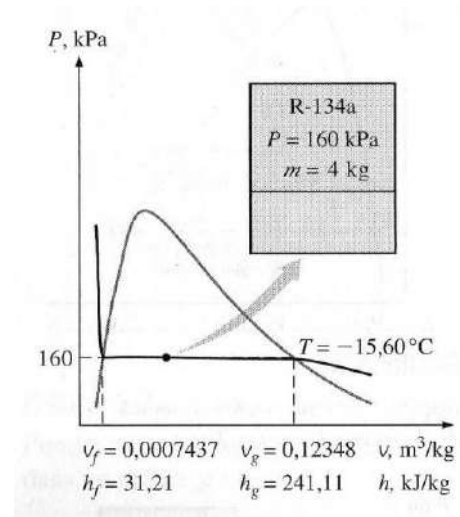
Et le volume occupé par la phase vapeur est

$$V_g = m_g v_g = (0,628 \text{ kg})(0,12348 \text{ m}^3/\text{kg}) = 0,0775 \text{ m}^3 \text{ (ou } 77,5 \text{ l)}$$

Le reste du volume (2,5 l) est occupé par la phase liquide.

d. Une vapeur surchauffée

Il existe des tables de vapeur surchauffée. Pour une pression donnée, les variables thermodynamiques sont déclinées en fonction de la température à partir de la température de saturation. La température de saturation et d'ailleurs indiquée entre parenthèses à côté de la pression. (Voir figure II. 21)



T, °C	v, u, h		
	m³/kg	kJ/kg	kJ/kg
P = 0.1 MPa (99.61°C)			
Sat.	1.6941	2505.6	2675.0
100	1.6959	2506.2	2675.8
150	1.9367	2582.9	2776.6
⋮	⋮	⋮	⋮
1300	7.2605	4687.2	5413.3
P = 0.5 MPa (151.83°C)			
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1
200	0.42503	2643.3	2855.8
250	0.47443	2723.8	2961.0

Figure II. 21. Exemple tiré de la table A.6

3.7. Le facteur de compressibilité : l'écart du comportement des gaz parfaits

La figure II. 23 montre clairement que le comportement des gaz réels s'écarte du comportement d'un gaz parfait dans les régions de saturation et du point critique. Cet écart peut être réduit si on utilise le facteur de compressibilité défini comme :

$$Z = \frac{P v}{R T} \quad \text{où} \quad Z = \frac{v_{\text{réel}}}{v_{\text{parfait}}} \quad (\text{II. 9})$$

Le facteur Z est à peu près le même pour tous les gaz à la même pression réduite et à la même température réduite définies comme :

$$T_R = \frac{T}{T_{cr}} \quad \text{et} \quad P_R = \frac{P}{P_{cr}} \quad (\text{II. 10})$$

Lorsque P ou T sont inconnus, on utilise le diagramme généralisé de compressibilité et l'équation du volume massique réduit pour déterminer la variable thermodynamique inconnue :

$$V_R = \frac{V_{\text{réel}}}{R T_{cr}/P_{cr}} \quad (\text{II. 11})$$

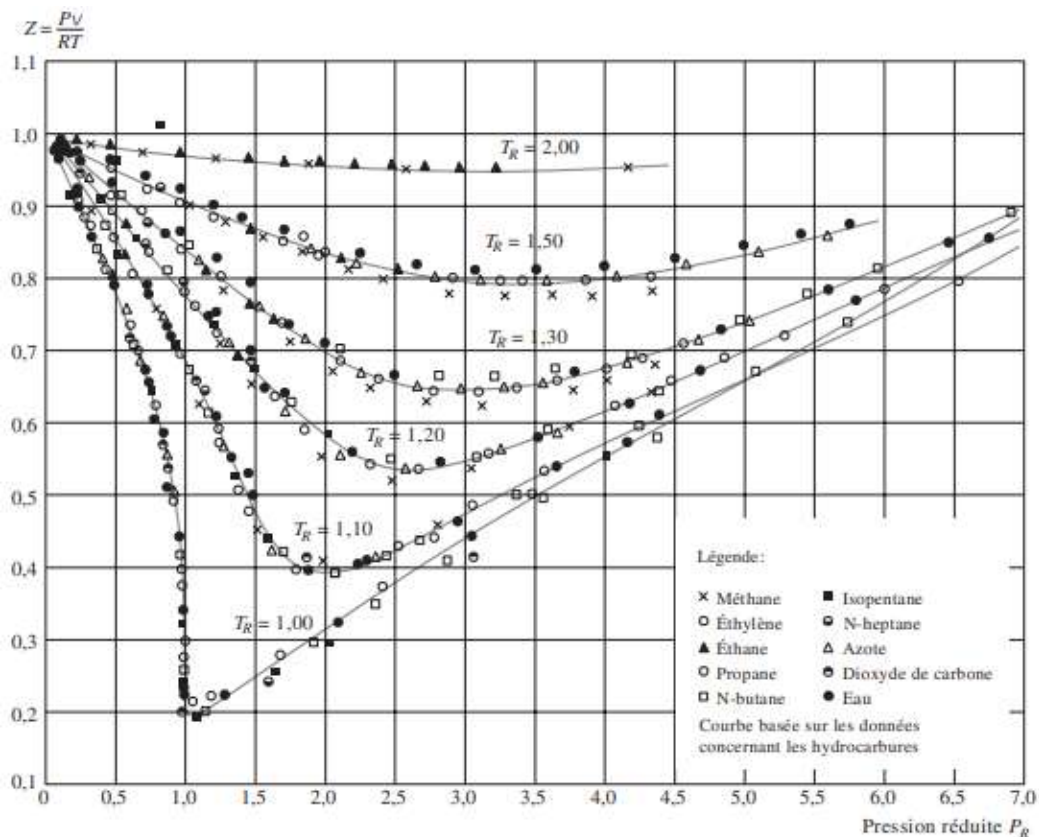


Figure II. 23. Comparaison du facteur de compressibilité pour différentes substances

3.8. Les autres équations d'état

Il existe des relations d'état dont la plage d'application est plus étendue. Il s'agit de :

a. Equation d'état de Van des Waals

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \quad (\text{II. 12})$$

Où :

$$a = \frac{27 R^2 T_{cr}^2}{64 P_{cr}} \quad \text{et} \quad b = \frac{R T_{cr}}{8 P_{cr}}$$

b. Equation d'état de Beattie-Bridgeman

$$P = \frac{R_u T}{\bar{V}^2} \left(1 - \frac{c}{\bar{V} T^3}\right) (\bar{V} + B) - \frac{A}{\bar{V}^2} \quad (\text{II. 13})$$

Où :

$$A = A_0 \left(1 - \frac{a}{\bar{V}}\right) \quad \text{et} \quad B = B_0 \left(1 - \frac{b}{\bar{V}}\right)$$

et R_u est la constante des gaz parfaits et \bar{V} est le volume molaire 5 constantes données dans un tableau.

Cette équation est précise pour $\rho \leq 0,8\rho_{cr}$

c. Equation d'état de Benedict-Webb-Rubin

$$P = \frac{R_u T}{\bar{V}^2} + \left(B_0 R_u T - A_0 - \frac{C_0}{T^2}\right) \frac{1}{\bar{V}^2} + \frac{b R_u T - a}{\bar{V}^3} + \frac{a\alpha}{\bar{V}^6} + \frac{c}{\bar{V}^3 T^2} \left(1 + \frac{\gamma}{\bar{V}^2}\right) e^{-\gamma/\bar{V}^2} \quad (\text{II. 14})$$

8 constantes données dans un tableau. Cette équation est précise pour $\rho \leq 2,5\rho_{cr}$

d. Equation d'état du viriel

Cette équation d'état emprunte une approche théorique. Elle est établie à partir de la thermodynamique statistique et est présentée sous la forme d'une série entière de l'inverse du volume, soit :

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{a(T)}{V^2} + \frac{b(T)}{V^3} + \frac{c(T)}{V^4} + \frac{d(T)}{V^5} + \dots \quad (\text{II. 15})$$

Où $a(T)$, $b(T)$, $c(T)$, etc., sont appelés des « coefficients du viriel ». Lorsque la pression tend vers zéro, les coefficients du viriel disparaissent, et l'équation (II. 15) devient l'équation des gaz parfaits

a) Lorsque P est en kilopascals, \bar{V} est en mètres cube par kilomole, T est en kelvins et $R_0 = 8.314 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kmol} \cdot \text{K}$, les 5 constantes de l'équation de Beattie-Bridgeman sont les suivantes :

Gas	A_0	a	B_0	b	c
Air	131.8441	0.01931	0.04611	-0.001101	4.34×10^4
Argon, Ar	130.7802	0.02328	0.03931	0.0	5.99×10^4
Carbon dioxide, CO ₂	507.2836	0.07132	0.10476	0.07235	6.60×10^5
Helium, He	2.1886	0.05984	0.01400	0.0	40
Hydrogen, H ₂	20.0117	-0.00506	0.02096	-0.04359	504
Nitrogen, N ₂	136.2315	0.02617	0.05046	-0.00691	4.20×10^4
Oxygen, O ₂	151.0857	0.02562	0.04624	0.004208	4.80×10^4

Tableau 2 : Les constantes de l'équation de Beattie-Bridgeman

b) Lorsque P est en kilopascals, \bar{V} est en mètres cube par kilomole, T est en kelvins et $R_0 = 8.314 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kmol} \cdot \text{K}$, les 8 constantes de l'équation de Benedict-Webb-Rubin sont les suivantes :

Gas	a	A_0	b	B_0	c	C_0	α	γ
n-Butane, C ₄ H ₁₀	190.68	1021.6	0.039998	0.12436	3.205×10^7	1.006×10^8	1.101×10^{-3}	0.0340
Carbon dioxide, CO ₂	13.86	277.30	0.007210	0.04991	1.511×10^6	1.404×10^7	8.470×10^{-5}	0.00539
Carbon monoxide, CO	3.71	135.87	0.002632	0.05454	1.054×10^5	8.673×10^5	1.350×10^{-4}	0.0060
Methane, CH ₄	5.00	187.91	0.003380	0.04260	2.578×10^5	2.286×10^6	1.244×10^{-4}	0.0060
Nitrogen, N ₂	2.54	106.73	0.002328	0.04074	7.379×10^4	8.164×10^5	1.272×10^{-4}	0.0053

Tableau 3 : Les constantes de l'équation de Benedict-Webb-Rubin

Chapitre III

COMPRESSION ET DETENTE DES GAZ

1. Le travail de frontière déformable

Le travail est connu comme le produit d'une force agissant sur un corps par le déplacement de ce corps. Le travail peut également résulter du déplacement de la frontière du système, par exemple celui qu'accomplit un piston lorsqu'il se déplace dans un cylindre.

Le travail de **frontière** est le travail accompli par une de **frontière déformable**. Ce travail se manifeste durant des évolutions de **compression** et de **détente** dans les systèmes à piston.

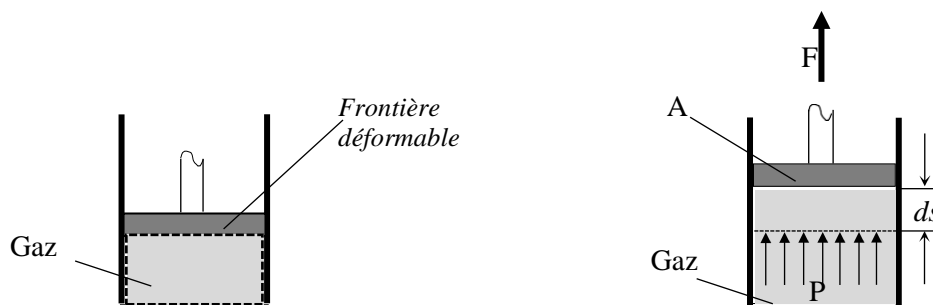


Figure III. 1. Frontière déformable. (état1)

Figure III. 2. Le gaz fait un travail δW_b en soulevant le piston sur une distance ds . (état 2)

On choisit comme système le gaz contenu dans le dispositif piston-cylindre de la figure III. 2. La pression initiale dans le gaz est de P , le volume total du gaz est V et la section du piston est A . Le travail accompli durant le déplacement quasi statique du piston sur une distance infinitésimale ds est:

$$\delta W_b = F ds = P A ds = P dV \quad (\text{III. 1})$$

L'indice b souligne le fait que le travail implique une frontière déformable.

La pression absolue P dans l'équation (III. 1) est toujours positive ou égal à zéro. Tandis que la variation du volume V peut être positive, négative ou nulle. Au cours d'une détente, le volume croît et le travail de frontière est alors positif. Au cours d'une compression, le volume décroît et le travail de frontière est alors négatif. Si le volume reste inchangé le travail est alors nul.

Le travail total effectué par le déplacement du piston de l'état 1 à l'état 2 est obtenu en intégrant l'équation (III. 1), soit :

$$W_b = \int_1^2 P dV \quad [\text{kJ}] \quad (\text{III. 2})$$

Le travail de frontière est égal à l'aire sous la courbe de l'évolution quasi statique dans un diagramme P-V.

Dans la figure III. 3, le travail fait durant la détente du piston de l'état 1 à l'état 2 est représenté avec l'aire sous la courbe dans le diagramme P-V sous la forme :

$$\text{Aire} = A = \int_1^2 dA = \int_1^2 P dV \quad (\text{III.3})$$

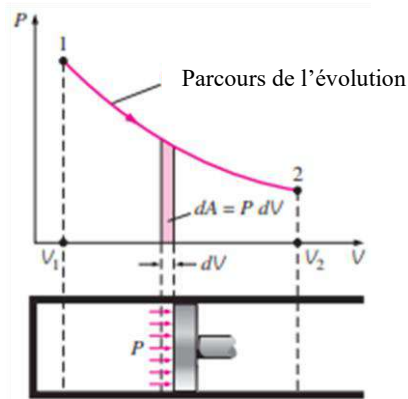


Figure III. 3. L'air sous la courbe de l'évolution dans un diagramme P-V représente le travail de frontière.

Selon l'évolution, un gaz peut passer de l'état 1 à l'état 2 en empruntant différents parcours (figure III. 4). Puisque le travail accompli correspond à l'aire sous la courbe dans le diagramme P-V, il est clair qu'il dépend non seulement des états initial et final mais aussi du parcours suivi le travail est une fonction de parcours.

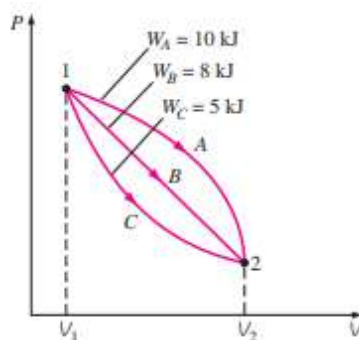


Figure III. 4. Le travail de frontière dépend du parcours suivi, durant l'évolution.

Il faut noter que la pression P est la pression qui règne sur la surface interne du piston P_1 . Dans ce cas l'équation devrait être réécrite selon l'équation :

$$W_b = \int_1^2 P_i dV = 0 \quad (\text{III. 4})$$

Il faut souligner que, dans les moteurs, le travail fait par le piston durant la détente du gaz W_b est utilisé pour :

- Vaincre le frottement entre le piston et le cylindre $W_{friction}$;
- S'opposer à la pression atmosphérique extérieure W_{atm} ;
- Entraîner l'arbre de transmission W_{arbre} , soit :

$$W_b = W_{friction} + W_{atm} + W_{arbre} = \int_1^2 (F_{friction} + P_{atm}A + F_{arbre}) dx \quad (\text{III. 5})$$

1.1. Travail fait durant une évolution à volume constant

Exemple 1 :

Un réservoir indéformable contient de l'air à 500 kPa et à 150°C. Le réservoir perd de la chaleur au profit du milieu extérieur. La pression de l'air chute alors à 400 kPa et la température descend à 65°C. Déterminez le travail durant cette évolution.

Solution :

Le réservoir est rigide. Sa frontière est indéformable. Par conséquent, $dV = 0$. Dans un diagramme P-V, l'aire sous la courbe est nulle.

$$W_b = \int_1^2 P dV = 0$$

1.2. Travail fait durant une détente à pression constante

Exemple 2 :

Soit un système piston-cylindre renfermant 10 kg de vapeur d'eau surchauffée à 200°C et à 200kPa. De la chaleur est ajoutée au cylindre jusqu'à ce que la température de la vapeur d'eau atteigne 400°C. Déterminez le travail fait pendant l'évolution. Supposez que le piston est libre de se déplacer sans frottement. De plus, la masse du piston et la pression atmosphérique extérieure demeurent inchangées pendant l'évolution.

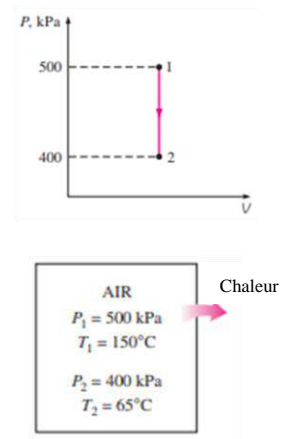


Figure III. 5. Exemple 1

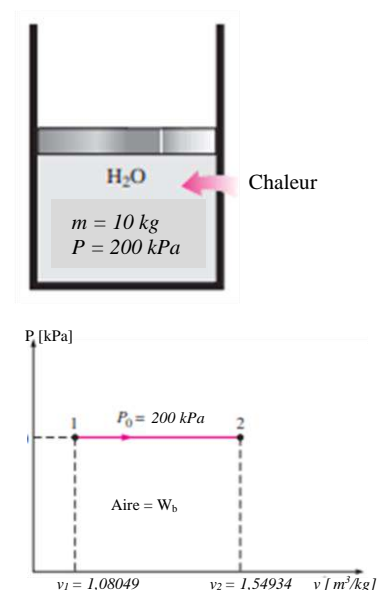


Figure III. 6. Exemple 2

Solution :

L'évolution est quasi statique.

La pression dans le cylindre demeure constante pendant l'évolution, car la masse du cylindre ainsi que la pression atmosphérique extérieure demeurent inchangées.

Le travail fait par la frontière déformable est :

$$W_b = \int_1^2 P dV = P_0(V_2 - V_1) \quad (\text{III. 6})$$

Soit :

$$W_b = m P_0 (V_2 - V_1)$$

Car $V = m \cdot v$. De la table A.6 (la vapeur d'eau surchauffée), à 200°C et à 200 kPa, on a $v_1 = 1,08049 \text{ m}^3/\text{kg}$, et à 400°C et à 200 kPa, on a $v_2 = 1,54914 \text{ m}^3/\text{kg}$. En substituant ces valeurs dans l'expression du travail on obtient :

$$\begin{aligned} W_b &= (10 \text{ kg})(200 \text{ kPa})(1,54914 - 1,08049) \text{ m}^3/\text{kg} \\ &= 937,7 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 = 937,7 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Remarque : Le signe positif signifie que le travail est fait par le système. La vapeur a utilisé 937,7 kJ de son énergie pour déplacer le piston. Ce travail aurait également pu être déterminé grâce au calcul de l'aire sous la courbe de l'évolution dans le diagramme P-V.

1.3. Travail fait au cours d'une compression isotherme d'un gaz parfait

Exemple 3 :

Soit un système piston cylindre 0,4 m³ d'air à 80°C et à 100 kPa. L'air est comprimé à 0,1 m³, de telle sorte que la température à l'intérieur du cylindre demeure constante. Déterminez le travail fait pendant l'évolution.

Solution :

- L'évolution de compression est quasi statique.
- L'air se comporte comme un gaz parfait car il se trouve à haute température et à basse pression par rapport à son point critique ($T_{cr} = 132,5 \text{ K}$; $P_{cr} = 3,77 \text{ MPa}$)

Pour un gaz parfait dont la température demeure constante et égale à T_0 , on a :

$$PV = nRT_0 = C \quad \text{ou encore} \quad P = \frac{C}{V} \quad \text{où } C \text{ est une constante.}$$

En substituant cette expression dans l'équation (III. 2), on obtient :

$$W_b = \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{C}{V} dV = C \int_1^2 \frac{dV}{V} = C \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{III. 7})$$

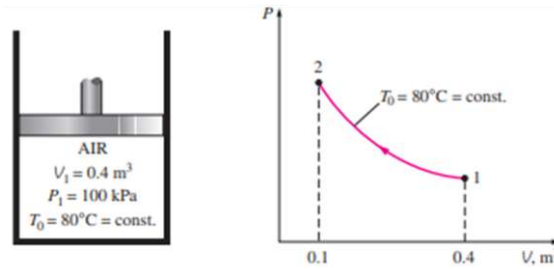


Figure III. 7. Exemple 3

On a aussi $P_1V_1 = P_2V_2 = nRT$ ou encore $V_2/V_1 = P_1/P_2$ d'où : $W_b = -55,5 \text{ kJ}$

1.4. Transformation polytropique

Une transformation polytropique est une évolution où la relation entre la pression et la température dans un gaz est $P V^\gamma = C$, dans laquelle γ et C sont des constantes. Cette expression est souvent employée pour modéliser des évolutions de compression ou de détente réelles. La pression dans une évolution polytropique est donc :

$$P = C V^{-\gamma} \quad (\text{III. 8})$$

En remplaçant la pression dans l'équation (III.2) par l'expression (III. 8) puis en effectuant l'intégrale on obtient :

$$W_b = \int_1^2 P dV = \int_1^2 C V^{-\gamma} dV = C \frac{V_2^{-\gamma+1} - V_1^{-\gamma+1}}{-\gamma+1} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-\gamma} \quad (\text{III. 9})$$

$$\text{Où } P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma = C$$

Pour un gaz parfait, $PV = nRT$, et l'équation (III. 9) devient :

$$W_b = \frac{n R (T_2 - T_1)}{1-\gamma} \quad \gamma \neq 1 \quad [\text{kJ}] \quad (\text{III. 10})$$

Dans le cas où $\gamma = 1$, le travail de la frontière déformable devient :

$$W_b = \int_1^2 P dV = \int_1^2 C V^{-1} dV = C \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Cette dernière équation correspond à une évolution isotherme au sein d'un gaz parfait.

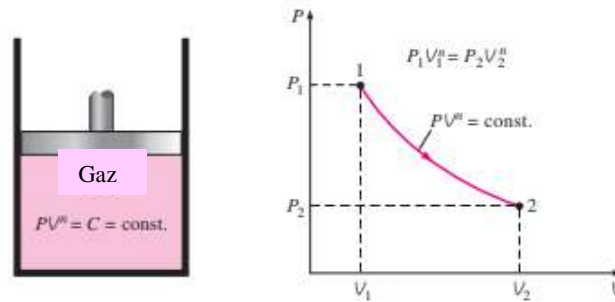


Figure III. 8. Schéma et diagramme P-V d'une transformation polytropique.

2. Bilan d'énergie dans les systèmes fermés

On sait que le bilan d'énergie pour tout système subissant une transformation est :

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{système} \quad [\text{kJ}] \quad (\text{III. 11})$$

$E_{in} - E_{out}$: Energie transférée par la chaleur, le travail et l'écoulement.

$\Delta E_{système}$: Variation des énergies interne, cinétique et potentielle.

En termes de taux (énergie par unité de temps) l'équation (III. 11) devient :

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{système}/dt \quad [\text{kW}] \quad (\text{III. 12})$$

$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}$: Puissance transférée par la chaleur, le travail et l'écoulement.

$dE_{système}/dt$: Accumulation des énergies interne, cinétique et potentielle.

Si les taux Demeurent constants pendant un intervalle de temps Δt alors :

$$Q = \dot{Q} \Delta t, \quad W = \dot{W} \Delta t \quad \text{et} \quad \Delta E = (dE/dt)\Delta t \quad [\text{kJ}] \quad (\text{III. 13})$$

Le bilan d'énergie et souvent exprimé par unité de masse il s'agit simplement de diviser tous les termes de l'équation (III. 11) par la masse m du système, soit :

$$e_{in} - e_{out} = \Delta e_{système} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (\text{III. 14})$$

Le bilan d'énergie peut aussi être écrit sous forme différentielle selon :

$$\delta E_{in} - \delta E_{out} = dE_{système} \quad \text{ou} \quad \delta e_{in} - \delta e_{out} = de_{système} \quad (\text{III. 15})$$

Lorsqu'un système fermé subit un cycle, les états initial et final sont identiques, soit

$$\Delta E_{système} = E_2 - E_1 = 0.$$

Le bilan d'énergie pour un cycle se résume alors à $E_{in} - E_{out} = 0$ ou encore $E_{in} = E_{out}$.

Si de plus, le système est fermé (aucun écoulement ne traverse ses frontières), le bilan d'énergie devient :

$$W_{net,out} = Q_{net,in} \quad \text{ou} \quad W_{net,out} = Q_{net,in} \quad (\text{pour un cycle}) \quad (\text{III. 16})$$

Cela signifie que le travail net produit par le système est égal à la chaleur nette qui lui est transmise (Figure III. 9).

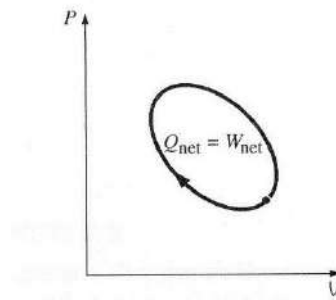


Figure III. 9. Dans un cycle, $\Delta E = 0$ donc $Q = W$.

Rappelons la convention adoptée en thermodynamique : la chaleur fournie à un système et le travail fait par un système sont positifs, alors que la chaleur cédée par un système et le travail fait par un système sont négatifs. C'est ainsi que, dans les systèmes fermés, on peut réécrire le bilan d'énergie (III. 11) comme :

$$Q_{net,n} - W_{net,out} = \Delta E_{système} \quad \text{ou} \quad Q - W = \Delta E \quad (\text{III. 17})$$

3. Chaleurs massiques

On distingue d'une part **la chaleur massique à volume constant** c_v , c'est-à-dire la chaleur requise pour élever de 1°C la température de 1 kg d'une substance maintenue à volume constant et, d'autre part, **la chaleur massique à pression constante** c_p , c'est-à-dire la chaleur requise pour élever de 1°C la température de 1 kg d'une substance maintenue à pression constante.

La chaleur massique à volume constant est défini par :

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (\text{III. 19. a})$$

Où c_v est la variation de l'énergie interne d'une substance par unité de température à volume constant.

La chaleur massique à pression constante est défini par :

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (\text{III. 19. b})$$

Où c_p est la variation de l'enthalpie d'une substance par unité de température à pression constante. Les chaleurs massiques sont habituellement exprimées en termes de $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{C})$ ou de $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$.

Ces unités sont les mêmes, car $\Delta(^{\circ}\text{C}) = \Delta \text{K}$.

On exprime aussi c_v et c_p en termes de $[\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{C})]$ ou de $[\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})]$

4. L'énergie interne, l'enthalpie et les chaleurs massiques des gaz parfaits

Il a été démontré mathématiquement et expérimentalement (Joule, 1843) que l'énergie interne d'un gaz parfait n'est fonction que de la température.

$$u = u(T) \quad (\text{III. 20})$$

A l'aide de la définition de l'enthalpie : $h = u + PV$, et de l'équation des gaz parfaits, $PV = RT$, l'enthalpie devient donc $h = u + R \cdot T$. Puisque R est une constante et que $u = u(T)$, l'enthalpie d'un gaz parfait n'est aussi qu'une fonction de la température seulement, soit :

$$h = h(T) \quad (\text{III. 21})$$

Par conséquent les chaleurs massiques des gaz parfaits c_v et c_p dépendent uniquement de la température. La variation différentielle de l'énergie interne d'un gaz parfait est :

$$du = c_v(T) dT \quad (\text{III. 22})$$

Et la variation différentielle de l'enthalpie d'un gaz parfait est :

$$dh = c_p(T) dT \quad (\text{III. 23})$$

L'équation (III. 22) permet de calculer la variation de l'énergie interne d'un gaz parfait durant une évolution de l'état 1 à l'état 2 selon :

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c_v(T) dT \quad [\text{kJ/kg}] \quad (\text{III. 24})$$

De même, l'équation (III. 23) permet de calculer la variation de l'enthalpie d'un gaz parfait durant une évolution de l'état 1 à l'état 2 selon :

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 c_p(T) dT \quad [\text{kJ/kg}] \quad (\text{III. 25})$$

On estime les chaleurs massiques $c(T)$ et $c_p(T)$ avec une valeur moyenne $c_{v,moy}$ et $c_{p,moy}$ dans la plage de températures de l'évolution. D'où :

$$u_2 - u_1 = c_{v,moy} (T_2 - T_1) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (\text{III. 26})$$

et
$$h_2 - h_1 = c_{p,moy} (T_2 - T_1) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (\text{III. 27})$$

En résumé, le changement d'énergie interne et d'enthalpie d'un gaz parfait durant une évolution peut-être estimé de trois façons différentes :

- 1- On utilise les valeurs des valeurs de l'énergie interne u et de l'enthalpie h disponibles dans les tables thermodynamiques. C'est le moyen le plus rapide et le plus précis.
- 2- On se sert des relations $c(T)$ et $c_p(T)$ qui sont disponibles sous forme de graphiques, de tableaux ou de Polynômes pour intégrer les équations (III. 24) et (III. 25). Cette façon de procéder se prête bien au calcul informatique
- 3- On emploie une valeur moyenne de la chaleur massique (voir les équations (III. 26) et (III. 27)). Ce calcul est simple et pratique, surtout si les tables thermodynamiques ne sont pas disponibles pour le gaz. Les résultats sont plus précis si l'intervalle de température, dans lequel la chaleur massique est considérée constante, demeure petit.

5. Les relations entre les chaleurs massiques d'un gaz parfait

Pour un gaz parfait : $h = u + RT$, en différenciant on trouve $dh = du + RdT$. Or $dh = c_p dT$ et $du = c_v dT$ d'où la relation :

$$c_p = c_v + R \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (\text{III. 28})$$

Si les chaleurs massiques sont exprimées sur une base molaire, alors :

$$\bar{c}_p = \bar{c}_v + R_u \quad [\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})] \quad (\text{III. 29})$$

Enfin le rapport des chaleurs massique est défini par :

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (\text{III. 30})$$

Tout comme les chaleurs massiques, le rapport k varie en fonction de la température. Toutefois dans les gaz monoatomiques, il demeure constant est égal à 1,667. Pour les gaz diatomiques, comme l'air, il est à peu près égal à 1,4 à la température de la pièce.

Chapitre IV

LES CYCLES DE PUISSANCE À GAZ

Les cycles de puissance et les cycles de réfrigération sont des applications importantes de la thermodynamique.

Dans les cycles de puissance à gaz, le fluide moteur reste toujours, en phase gazeuse. Le cycle peut être fermé ou ouvert. Dans un cycle fermé, le fluide moteur parcourt de façon cyclique, les mêmes évolutions. À la fin de chaque cycle, le fluide moteur revient à son état initial. Dans un cycle ouvert, le fluide moteur est renouvelé à la fin de chaque cycle. Par exemple, à la fin du cycle ouvert d'un moteur à combustion, les gaz d'échappement sont expulsés dans le milieu extérieur et remplacés par un nouveau mélange d'air-carburant.

Dans les moteurs à combustion externe, la chaleur est transmise au fluide moteur à l'aide d'une source externe comme un capteur solaire ou une chaudière. Dans les moteurs à combustion interne, par exemple les moteurs de voiture, le fluide moteur est chauffé en participant à la combustion du carburant à l'intérieur des frontières du système.

1. Des généralités à propos des cycles de puissance à gaz

Le rendement thermique de ces machines est le rapport du travail qu'elles produisent à la chaleur qui les alimente, soit :

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad \text{ou encore} \quad \eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} \quad (\text{IV. 1})$$

$$(W_{net} \text{ et } Q_{in} \text{ en } J \text{ et } w_{net} \text{ et } q_{in} \text{ en } J/kg)$$

Les machines à combustion interne et les turbine à gaz fonctionnent suivant un cycle ouvert (Les gaz d'échappement sont expulsés de la machine). Mais, pour analyser leur comportement thermodynamique, il faut modéliser le cycle ouvert avec des cycles fermés appelés des « **cycles théoriques** » ou des « **cycles idéaux** », qui admettent des hypothèses simplificatrices. Ces hypothèses appelées « **hypothèses d'air standard** » sont les suivantes :

- 1- Le fluide moteur est l'air, il se comporte comme un gaz parfait.
- 2- Toutes les évolutions du cycle sont réversibles intérieurement.
- 3- La combustion est représentée par un apport de chaleur provenant d'une source externe.
- 4- Le cycle se termine par l'évacuation de la chaleur dans le milieu extérieur.

De plus si on suppose que les chaleurs massiques de l'air, estimées à 25°C demeurent constantes, on parle alors des « **hypothèses d'air standard simplifiées** »

2. À quoi sert le cycle de Carnot

La figure 2 représente le cycle de Carnot. C'est le cycle le plus efficace que peut exécuter une machine fonctionnant entre une source de chaleur à la température T_H et un puits de chaleur à T_L . Son rendement est :

$$\eta_{th,Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (IV.2)$$

Une machine qui fonctionne selon le cycle de Carnot est difficile à réaliser.

L'intérêt du cycle de Carnot est de servir d'étalon auquel les cycles réels et les cycles théoriques peuvent être comparés.

Exemple :

Démontrez que le rendement du cycle de Carnot parcouru entre des réservoirs dont les températures sont de T_H et de T_L ne dépend que de ces températures et est donné par l'expression (2).

Solution :

Les 4 évolutions du cycle sont réversibles. La chaleur admise dans le système q_{in} et l'aire sous la courbe de l'évolution 1-2, et la chaleur évacuée par le système q_{out} est l'aire sous la courbe de l'évolution 3-4. Ces quantités de chaleur sont :

$$q_{in} = T(s_2 - s_1) \quad \text{et}$$

$$q_{out} = T_L(s_3 - s_4) = T_L(s_2 - s_1)$$

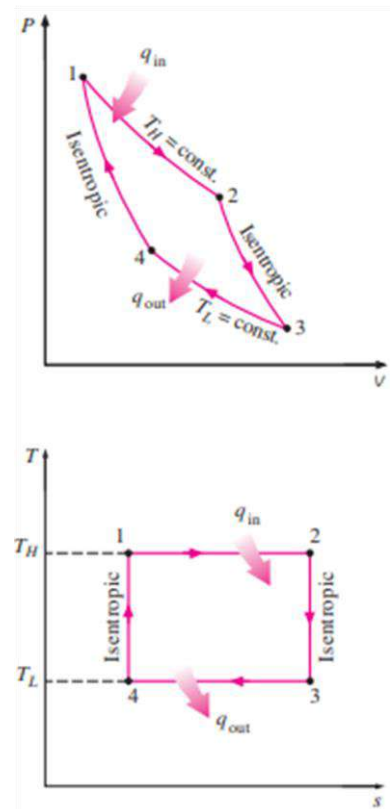


Figure IV. 1. Diagrammes P-v et T-s du cycle de Carnot.

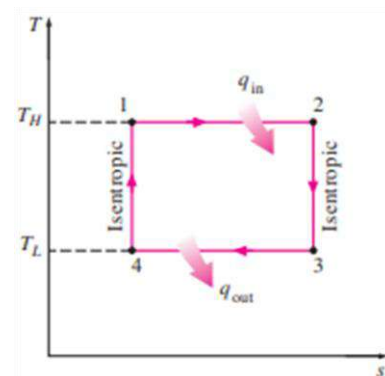


Figure IV. 2. Diagramme T-s de l'exemple

$s_3 = s_2$ et $s_1 = s_4$, car les évolutions 2-3 et 4-1 sont isentropiques. Si on substitue ces expressions dans la définition du rendement (1), le rendement du cycle de Carnot devient :

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_L(s_2 - s_1)}{T_H(s_2 - s_1)} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (\text{IV. 3})$$

3. Un aperçu du moteur à combustion interne

Le moteur à combustion interne est une machine qui convertit, à l'intérieur de la chambre de combustion, l'énergie chimique recélée dans un carburant en chaleur et en énergie mécanique.

Les principaux éléments du moteur à combustion interne sont :

- La chambre de combustion.
- Le cylindre.
- Le système bielle-manivelle.
- Le bloc moteur.

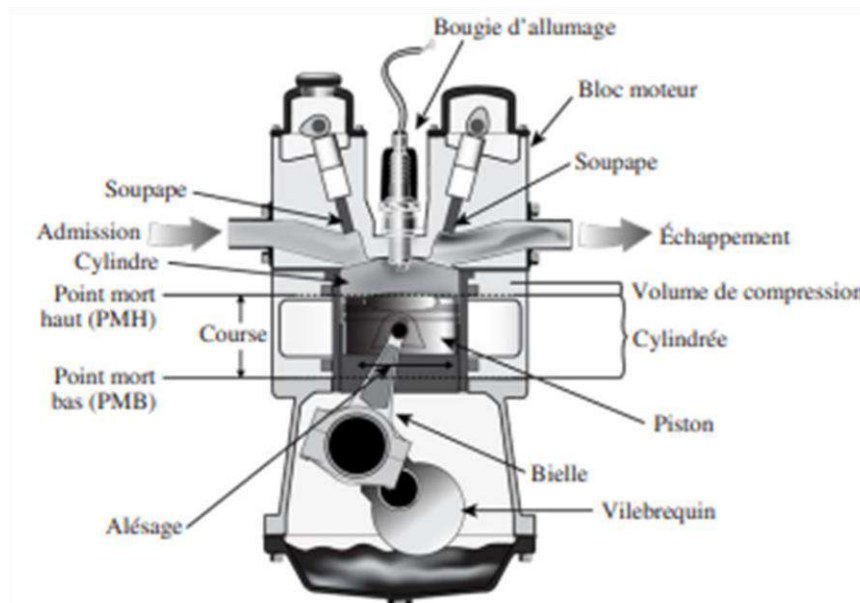


Figure IV. 3 : Principaux éléments du moteur à combustion interne.

À l'intérieur de la chambre de combustion se déroule le cycle thermodynamique qui peut être un cycle à 4 temps ou à deux temps. Durant le cycle l'échange des gaz avec l'extérieur se fait par les soupapes d'admission et les soupapes d'échappement (voir figure IV.3). Le piston se déplace dans le cylindre entre deux positions extrêmes **le point mort bas** (PMB) (volume du cylindre est maximal, V_{max}) et **le point mort haut** (PMH) (volume du cylindre est minimal, V_{mi}). Ce volume minimal est

appelé le « **volume de compression** » la distance séparant le point mort bas (PMB) du point mort haut (PMH) est « **la course du piston** » et le diamètre du cylindre est appelé l' « **alésage** ». La différence entre le volume maximal et le volume minimal est « **la cylindrée** ».

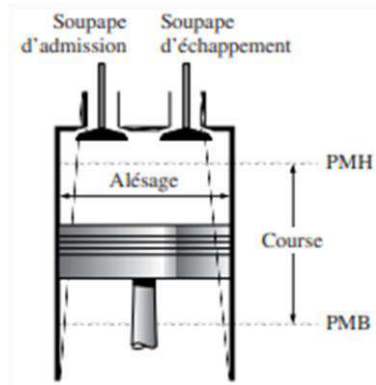
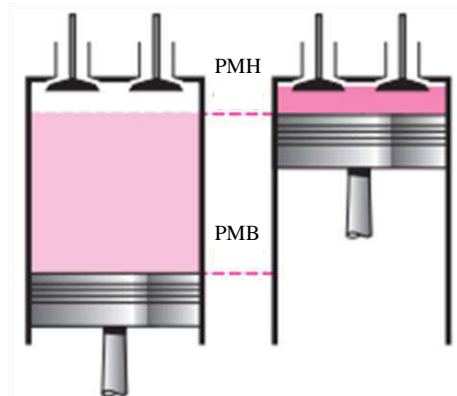


Figure IV. 4 : Système piston-cylindre



a) Cylindrée b) Volume de compression

Figure IV. 5 : Cylindrée et volume de compression

Le rapport du volume maximal du cylindre au volume minimal, appelé le « **taux de compression** » est :

$$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{PMB}}{V_{PMH}} \quad (\text{IV. 4})$$

La pression moyenne effective (PME)

$$PME = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}} = \frac{w_{net}}{v_{max} - v_{min}} \quad (\text{IV. 5})$$

4. Le cycle Otto

Le cycle Otto théorique est le cycle du moteur à allumage commandé (le moteur à essence). Ce cycle compte quatre évolutions réversibles intérieurement : une compression isentropique, un apport de chaleur à volume constant, une détente isentropique et une évacuation de chaleur à volume.

Le cycle est illustré sur la figure IV. 6.

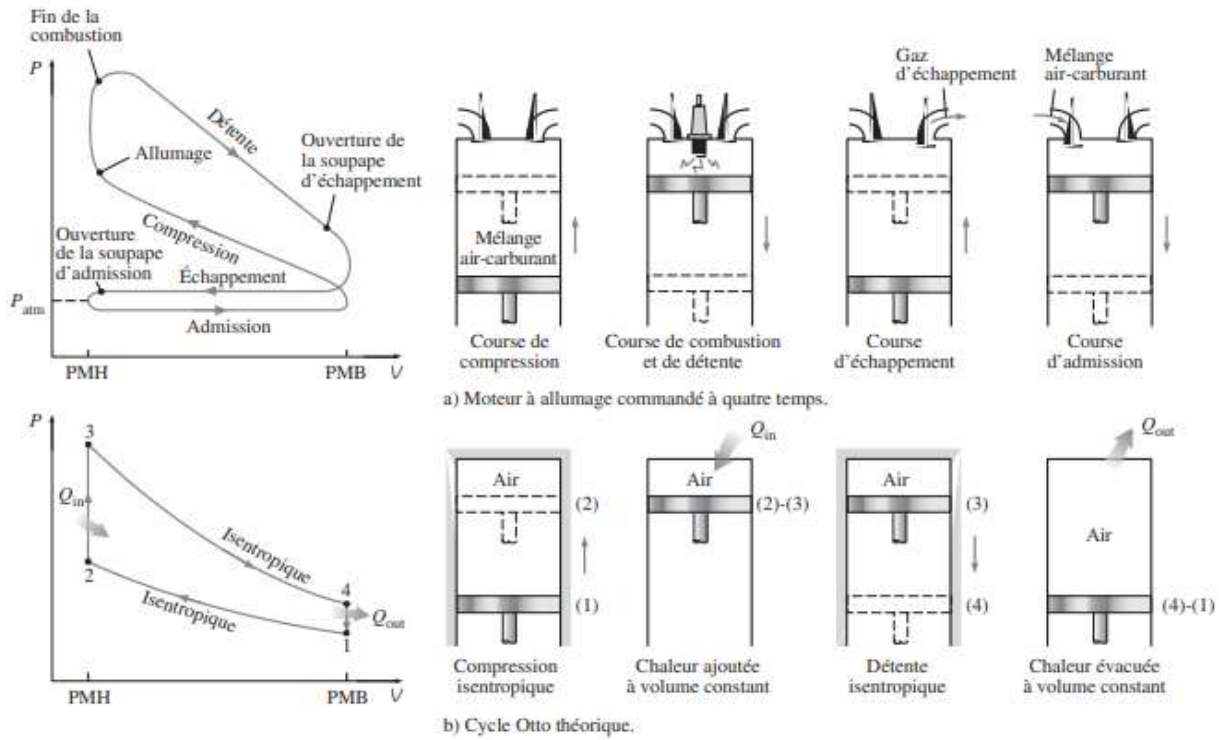


Figure IV. 6 : Cycle réel théorique (Otto) d'un moteur à combustion interne à quatre temps.

Le cycle est aussi illustré dans le diagramme T-s de la figure IV. 7. Le bilan d'énergie pour l'ensemble du cycle est :

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = \Delta u \quad (kJ/kg) \quad (IV. 6)$$

Or, la chaleur ajoutée au système est :

$$q_{in} = u_3 - u_2 = c_v (T_3 - T_2) \quad (IV. 7.a)$$

Et la chaleur évacuée est:

$$q_{out} = u_4 - u_1 = c_v (T_4 - T_1) \quad (IV. 7.b)$$

Le rendement thermique du cycle est donc :

$$\eta_{th,Otto} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (IV. 8)$$

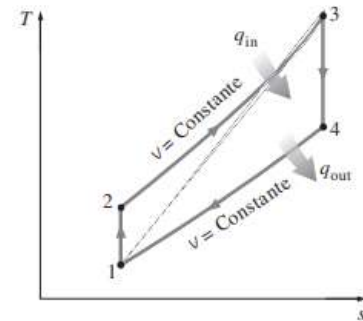


Figure IV. 7 : Diagramme T-s du cycle Otto théorique

Les évolutions 1-2 et 3-4 sont isentropiques, et $V_2 = V_3$ et $V_4 = V_1$. Alors :

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3} \quad (\text{IV. 9})$$

On substitue (IV. 9) dans le rendement, on trouve :

$$\eta_{th,Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad (\text{IV. 10})$$

Où $k = c_p/c_v$, r est le taux de compression :

$$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (\text{IV. 11})$$

5. Le cycle Diesel

Le cycle théorique Diesel est le cycle du moteur à allumage par compression (le moteur Diesel). Ce cycle est semblable au cycle Otto, excepté que l'apport de chaleur se fait à pression constante (Figure IV. 7).

La chaleur transmise au fluide moteur à pression constante est :

$$\begin{aligned} q_{in} - w_{b,ut} &= u_3 - u_2 \rightarrow \\ q_{in} &= P_2(v_3 - v_2) + (u_3 - u_2) \\ &= h_3 - h_2 = c_v(T_3 - T_2) \end{aligned} \quad (\text{IV. 12.a})$$

Et la chaleur évacuée à volume constant est :

$$\begin{aligned} -q_{out} &= u_1 - u_4 \rightarrow \\ q_{out} &= u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1) \end{aligned} \quad (\text{IV. 12.b})$$

Le rendement du cycle diesel dans le cas où les hypothèses d'air standard simplifiées sont retenues, est alors :

$$\eta_{th,Diesel} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{kT_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (\text{IV.13})$$

Soit r_c le rapport du volume du cylindre après la combustion à celui avant la combustion :

$$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2} \quad (\text{IV. 14})$$

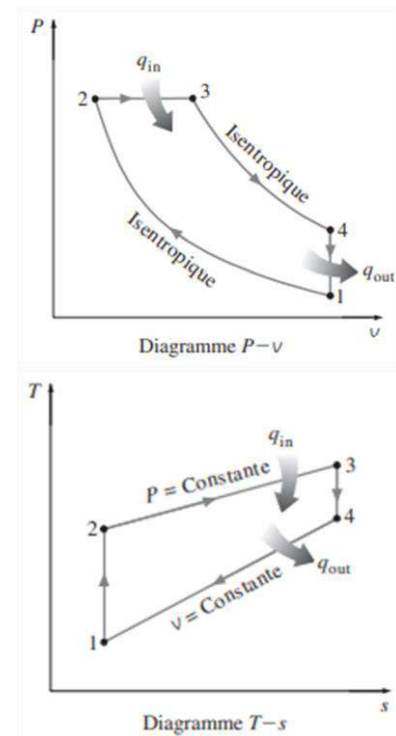


Figure IV. 8 : Diagrammes P-v et T-s du cycle Diesel théorique

En substituant cette relation dans l'expression du rendement, on trouve :

$$\eta_{th,Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right] \quad (IV.15)$$

6. Le cycle de Brayton

Le cycle théorique de la turbine à gaz est le cycle de Brayton. Ce cycle comprend quatre évolutions réversibles intérieurement : une compression isentropique, un apport de chaleur à pression constante, une détente isentropique et une évacuation de chaleur à pression constante. Ces évolutions sont illustrées dans les diagrammes T-s et P-V de la figure IV.9.

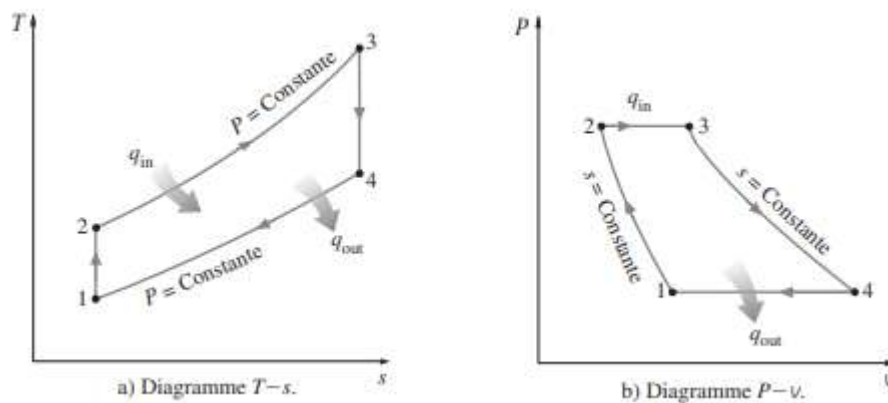


Figure IV. 9. Diagramme T-s et P-v du cycle de Brayton idéal.

Le bilan d'énergie pour l'ensemble du cycle est :

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_{sortie} - h_{entrée} \quad (IV.16)$$

Or, la chaleur transmise au fluide moteur à pression constante est :

$$q_{in} = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2) \quad (IV.17.a)$$

Et la chaleur évacuée à volume constant est :

$$q_{out} = h_4 - h_1 = c_p (T_4 - T_1) \quad (IV.17.b)$$

Le rendement du cycle de Brayton dans le cas où les hypothèses d'air standard simplifiées sont admises est :

$$\eta_{th,Brayton} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (IV.18)$$

Chapitre V

THERMODYNAMIQUE DES VAPEURS ET DE L'AIR HUMIDE

1. L'air sec et l'air humide

- L'air est un mélange composé d'azote, d'oxygène et de traces d'autres gaz. L'air dans l'atmosphère contient de la vapeur d'eau (humidité). Il est appelé **air humide** ou **air atmosphérique**. L'air qui ne contient aucune trace d'humidité et appelé **air sec**.
- Dans les systèmes de conditionnement d'air l'air sec et la vapeur d'eau se comportent comme un gaz parfait et sa chaleur massique demeure à peu près constante est égal à **1.005 kJ/kg.K**.
- L'enthalpie de l'air sec est alors estimée avec l'expression :

$$h_{air\ sec} = c_p T = (1.005\ kJ/kg.\ ^\circ C) T \quad [kJ/kg] \quad (V.1.a)$$

et sa variation est :

$$\Delta h_{air\ sec} = c_p \Delta T = (1.005\ kJ/kg.\ ^\circ C) \Delta T \quad [kJ/kg] \quad (V.1.b)$$

où T est la température en °C, et ΔT est la variation de température.

- L'air atmosphérique peut être modélisé comme un mélange de gaz parfaits dont la pression est égale à la somme des pressions partielle de l'air sec et de la vapeur d'eau.

$$P = P_a + P_v \quad [kPa] \quad (V.2)$$

- L'enthalpie de la vapeur d'eau dans l'air est égale à l'enthalpie de la vapeur d'eau saturée à la même température, soit :

$$h_v(T, P_{basse}) \cong h_g(T) \quad (V.3)$$

$$h_g(T) \cong 2500.9 + 1.82 T \quad [kJ/kg] \quad (T\ en\ ^\circ C) \quad (V.4)$$

Où $-10^\circ C \leq T \leq 50^\circ C$

2. L'humidité absolue et l'humidité relative de l'air

La quantité de vapeur d'eau dans l'air peut être exprimée en termes d'humidité absolue ou d'humidité relative. **L'humidité absolue** est définie comme le rapport de la masse de vapeur à la masse d'air sec, soit :

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{kg de vapeur d'eau / kg d'air sec}) \quad (V.5)$$

La vapeur d'eau et l'air sec se comportent comme un gaz parfait alors l'humidité absolue peut être exprimée en termes de pression par :

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{P_v / R_v}{P_a / R_a} = 0.622 \frac{P_v}{P_a} \quad (V.6)$$

Ou encore

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (\text{kg de vapeur d'eau / kg d'air sec}) \quad (V.7)$$

Où $P = P_a + P_v$ est la pression totale.

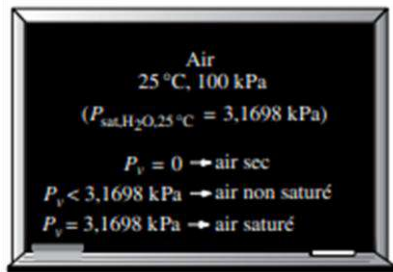


Figure V. 1 : La pression de vapeur dans l'air est égale à la pression de sat de l'eau à la même température

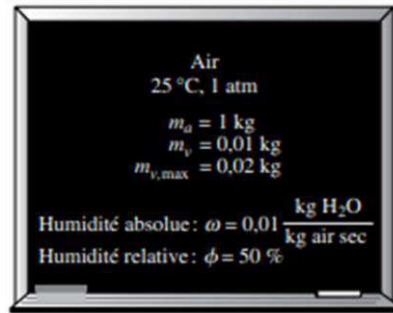


Figure V. 2 : L'humidité absolue et l'humidité relative

Soit 1 kg d'air sec dont l'humidité absolue est nulle. On se met à y ajouter de la vapeur d'eau, son humidité absolue augmente et à un certain point l'air ne peut plus absorber l'humidité sans qu'il y ait condensation. L'air est donc saturé de vapeur. On appelle cet air « **air saturé** » On peut estimer la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air saturé se trouvant à une température et à une pression données, en remplaçant la pression de la vapeur P_v dans l'équation (V. 7) par la pression de saturation P_g déterminée pour cette même température. (la pression de vapeur dans l'air saturé est égale à la pression de saturation de l'eau à la même température).

Le rapport de ces deux quantités est défini comme **l'humidité relative** :

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / R_v T}{P_g V / R_v T} = \frac{P_v}{P_g} \quad (V.8)$$

Où

$$P_g = P_{sat,T} \quad (V.9)$$

En regroupant les équations (V.7) et (V. 8) on établit les relations entre l'humidité absolue

et l'humidité relative, soit :

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega) P_g} \quad (\text{V. 10.a})$$

et

$$\omega = \frac{0.622 \phi P_g}{P - \phi P_g} \quad (\text{V. 10.b})$$

L'enthalpie totale de l'air atmosphérique est la somme des enthalpies de l'air sec et de la vapeur d'eau, soit :

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v$$

en divisant le tout par la masse d'air sec m_a , on obtient :

$$h = \frac{H}{m_a} = h_a + \omega h_v$$

$$h = h_a + \omega h_g \quad (\text{kJ/kg d'air sec}) \quad (\text{V. 11})$$

car $h_v \cong h_g$

Exemple :

Soit une pièce dont les dimensions sont 5 m sur 5 m sur 3 m. La pièce est remplie d'air à 100 kPa et à 25°C et son humidité relative est de 75 %. Déterminer :

- La pression partielle de l'air sec.
- L'humidité absolue.
- L'enthalpie de l'air atmosphérique par unité de masse d'air sec.
- La masse d'air sec et la masse de vapeur dans la pièce.

Solution

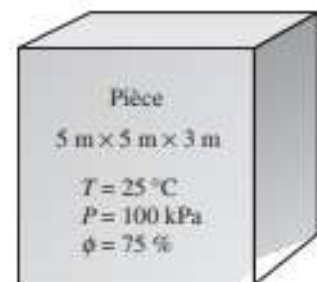
Variables thermodynamiques :

- La chaleur massique de l'air à pression constante et à 25°C est $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg.K}$ (voir table A.2a)
- La pression de saturation de l'eau à 25°C est $P_{sat} = 3.1698 \text{ kPa}$.
- L'enthalpie de la vapeur d'eau est $h_g = 2546.5 \text{ kJ/kg}$.

a- La pression partielle de l'air sec déterminée à l'aide de l'équation V.2 est :

$$P_a = P - P_v$$

$$\text{Où } P_v = \phi P_g = \phi P_{sat,25^\circ\text{C}} = 0.75 \times 3.1698 = 2.38 \text{ kPa}$$



Alors : $P_a = 100 - 2.38 = 97.62 \text{ kPa}$

b- D'après l'équation V.7 :

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} = \frac{0.622 \times 2.38}{100 - 2.38} = 0.0152 \text{ kg H}_2\text{O/kg d'air sec}$$

c- D'après l'équation V.11 :

$$\begin{aligned} h &= h_a + \omega h_v \cong c_p T + \omega h_g \\ &= 1.005 \times 25 + 0.0152 \times 2546.5 = 63.8 \text{ kJ/kg d'air sec} \end{aligned}$$

L'enthalpie de la vapeur d'eau (2546.5 kJ/kg) peut aussi être estimée à l'aide de l'expression V.4 :

$$h_{g,25^\circ\text{C}} \cong 2500.9 + 1.82 (25) = 2546.6 \text{ kJ/kg}$$

Cette valeur est presque identique à celle qui a été tirée de la table A.4.

d- L'air sec et la vapeur d'eau occupent toute la pièce. Donc le volume de chaque constituant est égal au volume de la pièce, soit :

$$V_a = V_v = V_{\text{pièce}} = 5 \times 5 \times 3 = 75 \text{ m}^3$$

La masse d'air sec et la masse de vapeur estimées à l'aide de l'équation d'état d'un gaz parfait sont :

$$m_a = \frac{P_a V_a}{R_a T} = \frac{97.62 \times 75}{0.287 \times 298} = 85.61 \text{ kg}$$

$$m_v = \frac{P_v V_v}{R_v T} = \frac{2.38 \times 75}{0.4615 \times 298} = 1.3 \text{ kg}$$

La masse de la vapeur d'eau peut aussi être estimée à l'aide de l'équation V.5 selon

$$m_v = \omega m_a = 0.0152 \times 85.61 = 1.3 \text{ kg}$$

3. Le point de Rosée

L'été, durant le jour, le soleil évapore l'eau, l'air atmosphérique est chauffé et se charge d'humidité. La nuit, la température de l'air atmosphérique baisse et son humidité relative augmente. Quand elle atteint 100 %, l'air atmosphérique ne peut plus retenir l'humidité. Toute baisse additionnelle de température entraîne de la condensation.

La rosée du matin provient de l'humidité dans l'air qui, durant la nuit, s'est condensée sur les surfaces froides comme le sol. A plus basse température, l'humidité dans l'air peut même se sublimer et former du givre.

Le point de rosée $T_{\text{rosée}}$ est défini comme la température à laquelle la condensation commence à

se manifester lorsque l'air est refroidi à pression constante.

$$T_{rosée} = T_{sat,P_v} \quad (V. 12)$$

Exemple

Lorsqu'il fait frais à l'extérieur, la condensation peut se produire sur la surface intérieure des vitres dans la maison. Supposant que la température de l'air dans la maison est de 20°C et que l'humidité relative est de 75 % (voir figure). A quelle température de la surface intérieure de la vitre la condensation commence-t-elle à se manifester ?

La température n'est pas uniforme dans l'air de la maison. Près des murs et des fenêtres la température est plus basse, car le milieu intérieur perd de la chaleur au profit du milieu extérieur. Par conséquent, dans cette région l'air est refroidi à pression P_v constante jusqu'à ce que la condensation commence à se manifester cela se produit au point de rosée $T_{rosée}$ qui est estimé à l'aide de l'expression :

$$T_{rosée} = T_{sat,P_v}$$

$$\text{Où } P_v = \phi P_{g,20^\circ C} = 0.75 \times 2.3392 = 1.754 \text{ kPa}$$

Par conséquent :

$$T_{rosée} = T_{sat,1.754 \text{ kPa}} = 15.4^\circ C$$

Remarque :

Si la température et l'humidité de l'air intérieur demeurent inchangées, pour éviter la condensation, il faut maintenir la température sur la surface intérieure de la vitre au-dessus de 15,4°C.

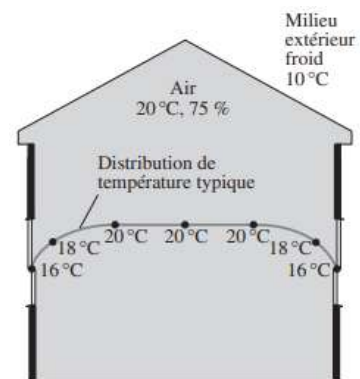


TABLE A.1

Masse molaire, constante des gaz et point critique

Substance	Formule	Masse molaire M (kg/kmol)	Constante du gaz R (kJ/(kg · K))*	Point critique		
				Température (K)	Pression (MPa)	Volume (m ³ /kmol)
Air	—	28,970	0,28700	132,5	3,770	0,0883
Ammoniac	NH ₃	17,030	0,48820	405,5	11,280	0,0724
Argon	Ar	39,948	0,20810	151,0	4,860	0,0749
Azote	N ₂	28,013	0,29680	126,2	3,390	0,0899
Benzène	C ₆ H ₆	78,115	0,10640	562,0	4,920	0,2603
Bromine	Br ₂	159,808	0,05200	584,0	10,340	0,1355
Chlore	Cl ₂	70,906	0,11730	417,0	7,710	0,1242
Chloroforme	CHCl ₃	119,380	0,06964	536,6	5,470	0,2403
Chlorure de méthyl	CH ₃ Cl	50,488	0,16470	416,3	6,680	0,1430
Dichlorodifluorométhane (R-12)	CCl ₂ F ₂	120,910	0,06876	384,7	4,010	0,2179
Dichlorofluorométhane (R-21)	CHCl ₂ F	102,920	0,08078	451,7	5,170	0,1973
Dioxyde de carbone	CO ₂	44,010	0,18890	304,2	7,390	0,0943
Dioxyde de soufre	SO ₂	64,063	0,12980	430,7	7,880	0,1217
Eau	H ₂ O	18,015	0,46150	647,1	22,060	0,0560
Éthane	C ₂ H ₆	30,070	0,27650	305,5	4,480	0,1480
Éthanol	C ₂ H ₅ OH	46,070	0,18050	516,0	6,380	0,1673
Éthylène	C ₂ H ₄	28,054	0,29640	282,4	5,120	0,1242
Hélium	He	4,003	2,07690	5,3	0,230	0,0578
Hydrogène (normal)	H ₂	2,016	4,12400	33,3	1,300	0,0649
Krypton	Kr	83,800	0,09921	209,4	5,500	0,0924
Méthane	CH ₄	16,043	0,51820	191,1	4,640	0,0993
Méthanol	CH ₃ OH	32,042	0,25950	513,2	7,950	0,1180
Monoxyde de carbone	CO	28,011	0,29680	133,0	3,500	0,0930
N-butane	C ₄ H ₁₀	58,124	0,14300	425,2	3,800	0,2547
N-hexane	C ₆ H ₁₄	86,179	0,09647	507,9	3,030	0,3677
Néon	Ne	20,183	0,41190	44,5	2,730	0,0417
Oxyde nitreux	N ₂ O	44,013	0,18890	309,7	7,270	0,0961
Oxygène	O ₂	31,999	0,25980	154,8	5,080	0,0780
Propane	C ₃ H ₈	44,097	0,18850	370,0	4,260	0,1998
Propylène	C ₃ H ₆	42,081	0,19760	365,0	4,620	0,1810
Tétrachlorure de carbone	CCl ₄	153,820	0,05405	556,4	4,560	0,2759
Tétrafluoroéthane (R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102,030	0,08149	374,2	4,059	0,1993
Trichlorofluorométhane (R-11)	CCl ₃ F	137,370	0,06052	471,2	4,380	0,2478
Xénon	Xe	131,300	0,06332	289,8	5,880	0,1186

* L'unité kJ/(kg · K) est équivalente à l'unité (kPa · m³)/(kg · K). La constante du gaz est calculée avec l'expression $R = R_u/M$ où $R_u = 8,31447$ ((kJ/kmol · K)), et M est la masse molaire.

TABLE A.2

Chaleurs massiques de gaz parfaits

a) À 300 K

Gaz	Formule	Constante du gaz R (kJ/(kg · K))	c_p (kJ/(kg · K))	c_v (kJ/(kg · K))	k
Air	—	0,2870	1,0050	0,7180	1,400
Argon	Ar	0,2081	0,5203	0,3122	1,667
Azote	N ₂	0,2968	1,0390	0,7430	1,400
Butane	C ₄ H ₁₀	0,1433	1,7164	1,5734	1,091
Dioxyde de carbone	CO ₂	0,1889	0,8460	0,6570	1,289
Éthane	C ₂ H ₆	0,2765	1,7662	1,4897	1,186
Éthylène	C ₂ H ₄	0,2964	1,5482	1,2518	1,237
Hélium	He	2,0769	5,1926	3,1156	1,667
Hydrogène	H ₂	4,1240	14,3070	10,1830	1,405
Méthane	CH ₄	0,5182	2,2537	1,7354	1,299
Monoxyde de carbone	CO	0,2968	1,0400	0,7440	1,400
Néon	Ne	0,4119	1,0299	0,6179	1,667
Octane	C ₈ H ₁₈	0,0729	1,7113	1,6385	1,044
Oxygène	O ₂	0,2598	0,9180	0,6580	1,395
Propane	C ₃ H ₈	0,1885	1,6794	1,4909	1,126
Vapeur d'eau	H ₂ O	0,4615	1,8723	1,4108	1,327

Note: L'unité kJ/(kg · K) est équivalente à l'unité kJ/(kg · °C).

TABLE A.2

Chaleurs massiques de gaz parfaits (suite)

b) À différentes températures

Température (K)	c_p (kJ/(kg · K))	c_v (kJ/(kg · K))	k	c_p (kJ/(kg · K))	c_v (kJ/(kg · K))	k	c_p (kJ/(kg · K))	c_v (kJ/(kg · K))	k
	Air			Dioxyde de carbone, CO ₂			Monoxyde de carbone, CO		
250	1,003	0,716	1,401	0,791	0,602	1,314	1,039	0,743	1,400
300	1,005	0,718	1,400	0,846	0,657	1,288	1,040	0,744	1,399
350	1,008	0,721	1,398	0,895	0,706	1,268	1,043	0,746	1,398
400	1,013	0,726	1,395	0,939	0,750	1,252	1,047	0,751	1,395
450	1,020	0,733	1,391	0,978	0,790	1,239	1,054	0,757	1,392
500	1,029	0,742	1,387	1,014	0,825	1,229	1,063	0,767	1,387
550	1,040	0,753	1,381	1,046	0,857	1,220	1,075	0,778	1,382
600	1,051	0,764	1,376	1,075	0,886	1,213	1,087	0,790	1,376
650	1,063	0,776	1,370	1,102	0,913	1,207	1,100	0,803	1,370
700	1,075	0,788	1,364	1,126	0,937	1,202	1,113	0,816	1,364
750	1,087	0,800	1,359	1,148	0,959	1,197	1,126	0,829	1,358
800	1,099	0,812	1,354	1,169	0,980	1,193	1,139	0,842	1,353
900	1,121	0,834	1,344	1,204	1,015	1,186	1,163	0,866	1,343
1 000	1,142	0,855	1,336	1,234	1,045	1,181	1,185	0,888	1,335
	Hydrogène, H ₂			Azote, N ₂			Oxygène, O ₂		
250	14,051	9,927	1,416	1,039	0,742	1,400	0,913	0,653	1,398
300	14,307	10,183	1,405	1,039	0,743	1,400	0,918	0,658	1,395
350	14,427	10,302	1,400	1,041	0,744	1,399	0,928	0,668	1,389
400	14,476	10,352	1,398	1,044	0,747	1,397	0,941	0,681	1,382
450	14,501	10,377	1,398	1,049	0,752	1,395	0,956	0,696	1,373
500	14,513	10,389	1,397	1,056	0,759	1,391	0,972	0,712	1,365
550	14,530	10,405	1,396	1,065	0,768	1,387	0,988	0,728	1,358
600	14,546	10,422	1,396	1,075	0,778	1,382	1,003	0,743	1,350
650	14,571	10,447	1,395	1,086	0,789	1,376	1,017	0,758	1,343
700	14,604	10,480	1,394	1,098	0,801	1,371	1,031	0,771	1,337
750	14,645	10,521	1,392	1,110	0,813	1,365	1,043	0,783	1,332
800	14,695	10,570	1,390	1,121	0,825	1,360	1,054	0,794	1,327
900	14,822	10,698	1,385	1,145	0,849	1,349	1,074	0,814	1,319
1 000	14,983	10,859	1,380	1,167	0,870	1,341	1,090	0,830	1,313

TABLE A.2
Chaleurs massiques de gaz parfaits (suite)

c) En fonction de la température

$$\bar{c}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

(T en K, c_p en kJ/(kmol · K))

Substance	Formule	a	b	c	d	Plage de température (K)	% erreur	
							Max	Moy
Azote	N ₂	28,900	-0,15710 × 10 ⁻²	0,80810 × 10 ⁻⁵	-2,8730 × 10 ⁻⁹	273-1 800	0,59	0,34
Oxygène	O ₂	25,480	1,52000 × 10 ⁻²	-0,71550 × 10 ⁻⁵	1,3120 × 10 ⁻⁹	273-1 800	1,19	0,28
Air	—	28,110	0,19670 × 10 ⁻²	0,48020 × 10 ⁻⁵	-1,9660 × 10 ⁻⁹	273-1 800	0,72	0,33
Hydrogène	H ₂	29,110	-0,19160 × 10 ⁻²	0,40030 × 10 ⁻⁵	-0,8704 × 10 ⁻⁹	273-1 800	1,01	0,26
Monoxyde de carbone	CO	28,160	0,16750 × 10 ⁻²	0,53720 × 10 ⁻⁵	-2,2220 × 10 ⁻⁹	273-1 800	0,89	0,37
Dioxyde de carbone	CO ₂	22,260	5,98100 × 10 ⁻²	-3,50100 × 10 ⁻⁵	7,4690 × 10 ⁻⁹	273-1 800	0,67	0,22
Vapeur d'eau	H ₂ O	32,240	0,19230 × 10 ⁻²	1,05500 × 10 ⁻⁵	-3,5950 × 10 ⁻⁹	273-1 800	0,53	0,24
Oxyde nitrique	NO	29,340	-0,09395 × 10 ⁻²	0,97470 × 10 ⁻⁵	-4,1870 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,97	0,36
Oxyde nitreux	N ₂ O	24,110	5,86320 × 10 ⁻²	-3,56200 × 10 ⁻⁵	10,5800 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,59	0,26
Dioxyde d'azote	NO ₂	22,900	5,71500 × 10 ⁻²	-3,52000 × 10 ⁻⁵	7,8700 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,46	0,18
Ammoniac	NH ₃	27,568	2,56300 × 10 ⁻²	0,99072 × 10 ⁻⁵	-6,6909 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,91	0,36
Soufre	S ₂	27,210	2,21800 × 10 ⁻²	-1,62800 × 10 ⁻⁵	3,9860 × 10 ⁻⁹	273-1 800	0,99	0,38
Dioxyde de soufre	SO ₂	25,780	5,79500 × 10 ⁻²	-3,81200 × 10 ⁻⁵	8,6120 × 10 ⁻⁹	273-1 800	0,45	0,24
Trioxyde de soufre	SO ₃	16,400	14,58000 × 10 ⁻²	-11,20000 × 10 ⁻⁵	32,4200 × 10 ⁻⁹	273-1 300	0,29	0,13
Acétylène	C ₂ H ₂	21,800	9,21430 × 10 ⁻²	-6,52700 × 10 ⁻⁵	18,2100 × 10 ⁻⁹	273-1 500	1,46	0,59
Benzène	C ₆ H ₆	-36,220	48,47500 × 10 ⁻²	-31,57000 × 10 ⁻⁵	77,6200 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,34	0,20
Méthanol	CH ₄ O	19,000	9,15200 × 10 ⁻²	-1,22000 × 10 ⁻⁵	-8,0390 × 10 ⁻⁹	273-1 000	0,18	0,08
Éthanol	C ₂ H ₆ O	19,900	20,96000 × 10 ⁻²	-10,38000 × 10 ⁻⁵	20,0500 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,40	0,22
Acide chlorhydrique	HCl	30,330	-0,76200 × 10 ⁻²	1,32700 × 10 ⁻⁵	-4,3380 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,22	0,08
Méthane	CH ₄	19,890	5,02400 × 10 ⁻²	1,26900 × 10 ⁻⁵	-11,0100 × 10 ⁻⁹	273-1 500	1,33	0,57
Éthane	C ₂ H ₆	6,900	17,27000 × 10 ⁻²	-6,40600 × 10 ⁻⁵	7,2850 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,83	0,28
Propane	C ₃ H ₈	-4,040	30,48000 × 10 ⁻²	-15,72000 × 10 ⁻⁵	31,7400 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,40	0,12
N-butane	C ₄ H ₁₀	3,960	37,15000 × 10 ⁻²	-18,34000 × 10 ⁻⁵	35,0000 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,54	0,24
I-butane	C ₄ H ₁₀	-7,913	41,60000 × 10 ⁻²	-23,01000 × 10 ⁻⁵	49,9100 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,25	0,13
N-pentane	C ₅ H ₁₂	6,774	45,43000 × 10 ⁻²	-22,46000 × 10 ⁻⁵	42,2900 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,56	0,21
N-hexane	C ₆ H ₁₄	6,938	55,22000 × 10 ⁻²	-28,65000 × 10 ⁻⁵	57,6900 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,72	0,20
Éthylène	C ₂ H ₄	3,950	15,64000 × 10 ⁻²	-8,34400 × 10 ⁻⁵	17,6700 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,54	0,13
Propylène	C ₃ H ₆	3,150	23,83000 × 10 ⁻²	-12,18000 × 10 ⁻⁵	24,6200 × 10 ⁻⁹	273-1 500	0,73	0,17

TABLE A.3

Propriétés de substances liquides et solides et d'aliments

a) Liquides							
Substance	Ébullition à 1 atm		Solidification		Propriétés des liquides		
	Point d'ébullition (°C)	Chaleur latente d'évaporation h_{lg} (kJ/kg)	Point de solidification (°C)	Chaleur latente de fusion h_{fs} (kJ/kg)	Température (°C)	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Chaleur massique c_p (kJ/(kg · K))
Alcool éthylique	78,6	855,0	-156,0	108,0	20,0	789,0	2,840
Ammoniac	-33,3	1 357,0	-77,7	322,4	-33,3	682,0	4,430
					-20,0	665,0	4,520
					0,0	639,0	4,600
					25,0	602,0	4,800
Argon	-185,9	161,6	-189,3	28,0	-185,6	1 394,0	1,140
Azote	-195,8	198,6	-210,0	25,3	-195,8	809,0	2,060
					-160,0	596,0	2,970
Benzène	80,2	394,0	-138,5	126,0	20,0	879,0	1,720
Dioxyde de carbone	-78,4*	230,5 (à 0 °C)	0,0		0,0	298,0	0,590
Eau	100,0	2 257,0		333,7	0,0	1 000,0	4,220
					25,0	997,0	4,180
					50,0	988,0	4,180
					75,0	975,0	4,190
					100,0	958,0	4,220
Éthanol	78,2	838,3	-114,2	109,0	25,0	783,0	2,460
Éthylène glycol	198,1	800,1	-10,8	181,1	20,0	1 109,0	2,840
Glycérine	179,9	974,0	18,9	200,6	20,0	1 261,0	2,320
Hélium	-268,9	22,8	—	—	-268,9	146,2	22,800
Huile					25,0	910,0	1,800
Hydrogène	-252,8	445,7	-259,2	59,5	-252,8	70,7	10,000
Isobutane	-11,7	367,1	-160,0	105,7	-11,7	593,8	2,280
Kérosène	204-293	251,0	-24,9	—	20,0	820,0	2,000
Mercure	356,7	294,7	-38,9	11,4	25,0	13 560,0	0,139
Méthane	-161,5	510,4	-182,2	58,4	-161,5	423,0	3,490
					-100,0	301,0	5,790
Méthanol	64,5	1 100,0	-97,7	99,2	25,0	787,0	2,550
N-butane	-0,5	385,2	-56,6	80,3	-0,5	601,0	2,310
Octane	124,8	306,3	-57,5	180,7	20,0	703,0	2,100
Oxygène	-183,0	212,7	-218,8	13,7	-183,0	1 141,0	1,710
Pétrole	—	230-384			20,0	640,0	2,000
Propane	-42,1	427,8	-187,7	80,0	-42,1	581,0	2,250
					0,0	529,0	2,530
Réfrigérant R-134a	-26,1	217,0	-96,6	—	50,0	449,0	3,130
					-50,0	1 443,0	1,230
					-26,1	1 374,0	1,270
					0,0	1 295,0	1,340
Saumure (20 % de chlorure de sodium)	103,9	—	-17,4	—	25,0	1 207,0	1,430
					20,0	1 150,0	3,110

* Température de sublimation. En dessous de la pression de son point triple (518 kPa), le dioxyde de carbone se présente sous forme solide ou gazeuse. Le point de solidification du dioxyde de carbone est égal à la température de son point triple, soit -56,5 °C.

TABLE A.3

Propriétés de substances liquides et solides et d'aliments (suite)

b) Solides (à 298 K, à moins d'indication contraire)					
Substance	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Chaleur massique c_p (kJ/(kg · K))	Substance	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Chaleur massique c_p (kJ/(kg · K))
<i>Métal</i>			<i>Substance non métallique</i>		
Acier doux	7 830	0,500	Argile	1 000	0,920
Aluminium			Asphalte	2 110	0,920
200 K		0,797	Béton	2 300	0,653
250 K		0,859	Bois dur (érable, chêne, etc.)	721	1,260
300 K	2 700	0,902	Bois tendre (pin, sapin, etc.)	513	1,380
350 K		0,929	Brique de construction	1 922	0,790
400 K		0,949	Brique réfractaire (500 °C)	2 300	0,960
450 K		0,973	Calcaire	1 650	0,909
500 K		0,997	Caoutchouc dur	1 150	2,009
Argent	10 470	0,235	Caoutchouc tendre	1 100	1,840
Bronze (76 % Cu, 2 % Zn, 2 % Al)	8 280	0,400	Contreplaqué	545	1,210
Cuivre			Diamant	2 420	0,616
-173 °C		0,254	Glace		
-100 °C		0,342	200 K		1,560
-50 °C		0,367	220 K		1,710
0 °C		0,381	240 K		1,860
27 °C	8 900	0,386	260 K		2,010
100 °C		0,393	273 K	921	2,110
200 °C		0,403	Granit	2 700	1,017
Fer	7 840	0,450	Graphite	2 500	0,711
Laiton, jaune (65 % Cu, 35 % Zn)	8 310	0,400	Gypse	800	1,090
Magnésium	1 730	1,000	Marbre	2 600	0,880
Nickel	8 890	0,440	Pierre	1 500	0,800
Plomb	11 310	0,128	Sable	1 520	0,800
Tungstène	19 400	0,130	Verre de fenêtre	2 700	0,800
			Verre, pyrex	2 230	0,840

c) Aliments											
Aliment	Teneur en eau (%) (massique)	Point de congélation (°C)	Chaleur massique (kJ/(kg · K))		Chaleur latente de fusion (kJ/kg)	Aliment	Teneur en eau (%) (massique)	Point de congélation (°C)	Chaleur massique (kJ/(kg · K))		Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
			Au-dessus du point de congélation	Au-dessous du point de congélation					Au-dessus du point de congélation	Au-dessous du point de congélation	
Bananes	75	-0,8	3,35	1,78	251	Lait	88	-0,6	3,79	1,95	294
Beurre	16	—	—	1,04	53	Laitue	95	-0,2	4,02	2,04	317
Bœuf	67	—	3,08	1,68	224	Maïs	74	-0,6	3,32	1,77	247
Brocoli	90	-0,6	3,86	1,97	301	Melon	93	-0,4	3,96	2,01	311
Œuf	80	-1,8	3,52	1,85	267	Œufs	74	-0,6	3,32	1,77	247
Crème glacée	63	-5,6	2,95	1,63	210	Oranges	87	-0,8	3,75	1,94	291
Crevettes	83	-2,2	3,62	1,89	277	Patates	78	-0,6	3,45	1,82	261
Dinde	64	—	2,98	1,65	214	Pommes	84	-1,1	3,65	1,90	281
Épinards	93	-0,3	3,96	2,01	311	Poulet	74	-2,8	3,32	1,77	247
Fraises	90	-0,8	3,86	1,97	301	Saumon	64	-2,2	2,98	1,65	214
Fromage	39	-10,0	2,15	1,33	130	Tomates	94	-0,5	3,99	2,02	314

Source : Les valeurs sont tirées de différentes sources.

TABLE A.4

Variables de la vapeur d'eau saturée : table de la température

Température T (°C)	Pression de saturation P_{sat} (kPa)	Volume massique (m ³ /kg)		Énergie interne (kJ/kg)			Enthalpie (kJ/kg)			Entropie (kJ/(kg · K))		
		Liquide saturé v_f	Vapeur saturée v_g	Liquide saturé u_f	Évapo- ration u_{fg}	Vapeur saturée u_g	Liquide saturé h_f	Évapo- ration h_{fg}	Vapeur saturée h_g	Liquide saturé s_f	Évapo- ration s_{fg}	Vapeur saturée s_g
0,01	0,6117	0,001000	206,00000	0,000	2 374,9	2 374,9	0,001	2 500,9	2 500,9	0,0000	9,1556	9,1556
5,00	0,8725	0,001000	147,03000	21,019	2 360,8	2 381,8	21,020	2 489,1	2 510,1	0,0763	8,9487	9,0249
10,00	1,2281	0,001000	106,32000	42,020	2 346,6	2 388,7	42,022	2 477,2	2 519,2	0,1511	8,7488	8,8999
15,00	1,7057	0,001001	77,88500	62,980	2 332,5	2 395,5	62,982	2 465,4	2 528,3	0,2245	8,5559	8,7803
20,00	2,3392	0,001002	57,76200	83,913	2 318,4	2 402,3	83,915	2 453,5	2 537,4	0,2965	8,3696	8,6661
25,00	3,1698	0,001003	43,34000	104,830	2 304,3	2 409,1	104,830	2 441,7	2 546,5	0,3672	8,1895	8,5567
30,00	4,2469	0,001004	32,87900	125,730	2 290,2	2 415,9	125,740	2 429,8	2 555,6	0,4368	8,0152	8,4520
35,00	5,6291	0,001006	25,20500	146,630	2 276,0	2 422,7	146,640	2 417,9	2 564,6	0,5051	7,8466	8,3517
40,00	7,3851	0,001008	19,51500	167,530	2 261,9	2 429,4	167,530	2 406,0	2 573,5	0,5724	7,6832	8,2556
45,00	9,5953	0,001010	15,25100	188,430	2 247,7	2 436,1	188,440	2 394,0	2 582,4	0,6386	7,5247	8,1633
50,00	12,3520	0,001012	12,02600	209,330	2 233,4	2 442,7	209,340	2 382,0	2 591,3	0,7038	7,3710	8,0748
55,00	15,7630	0,001015	9,56390	230,240	2 219,1	2 449,3	230,260	2 369,8	2 600,1	0,7680	7,2218	7,9898
60,00	19,9470	0,001017	7,66700	251,160	2 204,7	2 455,9	251,180	2 357,7	2 608,8	0,8313	7,0769	7,9082
65,00	25,0430	0,001020	6,19350	272,090	2 190,3	2 462,4	272,120	2 345,4	2 617,5	0,8937	6,9360	7,8296
70,00	31,2020	0,001023	5,03960	293,040	2 175,8	2 468,9	293,070	2 333,0	2 626,1	0,9551	6,7989	7,7540
75,00	38,5970	0,001026	4,12910	313,990	2 161,3	2 475,3	314,030	2 320,6	2 634,6	1,0158	6,6655	7,6812
80,00	47,4160	0,001029	3,40530	334,970	2 146,6	2 481,6	335,020	2 308,0	2 643,0	1,0756	6,5355	7,6111
85,00	57,8680	0,001032	2,82610	355,960	2 131,9	2 487,8	356,020	2 295,3	2 651,4	1,1346	6,4089	7,5435
90,00	70,1830	0,001036	2,35930	376,970	2 117,0	2 494,0	377,040	2 282,5	2 659,6	1,1929	6,2853	7,4782
95,00	84,6090	0,001040	1,98080	398,000	2 102,0	2 500,1	398,090	2 269,6	2 667,6	1,2504	6,1647	7,4151
100,00	101,4200	0,001043	1,67200	419,060	2 087,0	2 506,0	419,170	2 256,4	2 675,6	1,3072	6,0470	7,3542
105,00	120,9000	0,001047	1,41860	440,150	2 071,8	2 511,9	440,280	2 243,1	2 683,4	1,3634	5,9319	7,2952
110,00	143,3800	0,001052	1,20940	461,270	2 056,4	2 517,7	461,420	2 229,7	2 691,1	1,4188	5,8193	7,2382
115,00	169,1800	0,001056	1,03600	482,420	2 040,9	2 523,3	482,590	2 216,0	2 698,6	1,4737	5,7092	7,1829
120,00	198,6700	0,001060	0,89133	503,600	2 025,3	2 528,9	503,810	2 202,1	2 706,0	1,5279	5,6013	7,1292
125,00	232,2300	0,001065	0,77012	524,830	2 009,5	2 534,3	525,070	2 188,1	2 713,1	1,5816	5,4956	7,0771
130,00	270,2800	0,001070	0,66808	546,100	1 993,4	2 539,5	546,380	2 173,7	2 720,1	1,6346	5,3919	7,0265
135,00	313,2200	0,001075	0,58179	567,410	1 977,3	2 544,7	567,750	2 159,1	2 726,9	1,6872	5,2901	6,9773
140,00	361,5300	0,001080	0,50850	588,770	1 960,9	2 549,6	589,160	2 144,3	2 733,5	1,7392	5,1901	6,9294
145,00	415,6800	0,001085	0,44600	610,190	1 944,2	2 554,4	610,640	2 129,2	2 739,8	1,7908	5,0919	6,8827
150,00	476,1600	0,001091	0,39248	631,660	1 927,4	2 559,1	632,180	2 113,8	2 745,9	1,8418	4,9953	6,8371
155,00	543,4900	0,001096	0,34648	653,190	1 910,3	2 563,5	653,790	2 098,0	2 751,8	1,8924	4,9002	6,7927
160,00	618,2300	0,001102	0,30680	674,790	1 893,0	2 567,8	675,470	2 082,0	2 757,5	1,9426	4,8066	6,7492
165,00	700,9300	0,001108	0,27244	696,460	1 875,4	2 571,9	697,240	2 065,6	2 762,8	1,9923	4,7143	6,7067
170,00	792,1800	0,001114	0,24260	718,200	1 857,5	2 575,7	719,080	2 048,8	2 767,9	2,0417	4,6233	6,6650
175,00	892,6000	0,001121	0,21659	740,020	1 839,4	2 579,4	741,020	2 031,7	2 772,7	2,0906	4,5335	6,6242
180,00	1 002,8000	0,001127	0,19384	761,920	1 820,9	2 582,8	763,050	2 014,2	2 777,2	2,1392	4,4448	6,5841
185,00	1 123,5000	0,001134	0,17390	783,910	1 802,1	2 586,0	785,190	1 996,2	2 781,4	2,1875	4,3572	6,5447
190,00	1 255,2000	0,001141	0,15636	806,000	1 783,0	2 589,0	807,430	1 977,9	2 785,3	2,2355	4,2705	6,5059
195,00	1 398,8000	0,001149	0,14089	828,180	1 763,6	2 591,7	829,780	1 959,0	2 788,8	2,2831	4,1847	6,4678
200,00	1 554,9000	0,001157	0,12721	850,460	1 743,7	2 594,2	852,260	1 939,8	2 792,0	2,3305	4,0997	6,4302

TABLE A.4

Variables de la vapeur d'eau saturée: table de la température (suite)

Température T (°C)	Pression de saturation P_{sat} (kPa)	Volume massique (m ³ /kg)		Énergie interne (kJ/kg)			Enthalpie (kJ/kg)			Entropie (kJ/(kg · K))		
		Liquide saturé v_f	Vapeur saturée v_g	Liquide saturé u_f	Évapo- ration u_{fg}	Vapeur saturée u_g	Liquide saturé h_f	Évapo- ration h_{fg}	Vapeur saturée h_g	Liquide saturé s_f	Évapo- ration s_{fg}	Vapeur saturée s_g
205,00	1 724,3	0,001164	0,115080	872,86	1 723,5	2 596,4	874,87	1 920,0	2 794,8	2,3776	4,0154	6,3930
210,00	1 907,7	0,001173	0,104290	895,38	1 702,9	2 598,3	897,61	1 899,7	2 797,3	2,4245	3,9318	6,3563
215,00	2 105,9	0,001181	0,094680	918,02	1 681,9	2 599,9	920,50	1 878,8	2 799,3	2,4712	3,8489	6,3200
220,00	2 319,6	0,001190	0,086094	940,79	1 660,5	2 601,3	943,55	1 857,4	2 801,0	2,5176	3,7664	6,2840
225,00	2 549,7	0,001199	0,078405	963,70	1 638,6	2 602,3	966,76	1 835,4	2 802,2	2,5639	3,6844	6,2483
230,00	2 797,1	0,001209	0,071505	986,76	1 616,1	2 602,9	990,14	1 812,8	2 802,9	2,6100	3,6028	6,2128
235,00	3 062,6	0,001219	0,065300	1 010,00	1 593,2	2 603,2	1 013,70	1 789,5	2 803,2	2,6560	3,5216	6,1775
240,00	3 347,0	0,001229	0,059707	1 033,40	1 569,8	2 603,1	1 037,50	1 765,5	2 803,0	2,7018	3,4405	6,1424
245,00	3 651,2	0,001240	0,054656	1 056,90	1 545,7	2 602,7	1 061,50	1 740,8	2 802,2	2,7476	3,3596	6,1072
250,00	3 976,2	0,001252	0,050085	1 080,70	1 521,1	2 601,8	1 085,70	1 715,3	2 801,0	2,7933	3,2788	6,0721
255,00	4 322,9	0,001263	0,045941	1 104,70	1 495,8	2 600,5	1 110,10	1 689,0	2 799,1	2,8390	3,1979	6,0369
260,00	4 692,3	0,001276	0,042175	1 128,80	1 469,9	2 598,7	1 134,80	1 661,8	2 796,6	2,8847	3,1169	6,0017
265,00	5 085,3	0,001289	0,038748	1 153,30	1 443,2	2 596,5	1 159,80	1 633,7	2 793,5	2,9304	3,0358	5,9662
270,00	5 503,0	0,001303	0,035622	1 177,90	1 415,7	2 593,7	1 185,10	1 604,6	2 789,7	2,9762	2,9542	5,9305
275,00	5 946,4	0,001317	0,032767	1 202,90	1 387,4	2 590,3	1 210,70	1 574,5	2 785,2	3,0221	2,8723	5,8944
280,00	6 416,6	0,001333	0,030153	1 228,20	1 358,2	2 586,4	1 236,70	1 543,2	2 779,9	3,0681	2,7898	5,8579
285,00	6 914,6	0,001349	0,027756	1 253,70	1 328,1	2 581,8	1 263,10	1 510,7	2 773,7	3,1144	2,7066	5,8210
290,00	7 441,8	0,001366	0,025554	1 279,70	1 296,9	2 576,5	1 289,80	1 476,9	2 766,7	3,1608	2,6225	5,7834
295,00	7 999,0	0,001384	0,023528	1 306,00	1 264,5	2 570,5	1 317,10	1 441,6	2 758,7	3,2076	2,5374	5,7450
300,00	8 587,9	0,001404	0,021659	1 332,70	1 230,9	2 563,6	1 344,80	1 404,8	2 749,6	3,2548	2,4511	5,7059
305,00	9 209,4	0,001425	0,019932	1 360,00	1 195,9	2 555,8	1 373,10	1 366,3	2 739,4	3,3024	2,3633	5,6657
310,00	9 865,0	0,001447	0,018333	1 387,70	1 159,3	2 547,1	1 402,00	1 325,9	2 727,9	3,3506	2,2737	5,6243
315,00	10 556,0	0,001472	0,016849	1 416,10	1 121,1	2 537,2	1 431,60	1 283,4	2 715,0	3,3994	2,1821	5,5816
320,00	11 284,0	0,001499	0,015470	1 445,10	1 080,9	2 526,0	1 462,00	1 238,5	2 700,6	3,4491	2,0881	5,5372
325,00	12 051,0	0,001528	0,014183	1 475,00	1 038,5	2 513,4	1 493,40	1 191,0	2 684,3	3,4998	1,9911	5,4908
330,00	12 858,0	0,001560	0,012979	1 505,70	993,5	2 499,2	1 525,80	1 140,3	2 666,0	3,5516	1,8906	5,4422
335,00	13 707,0	0,001597	0,011848	1 537,50	945,5	2 483,0	1 559,40	1 086,0	2 645,4	3,6050	1,7857	5,3907
340,00	14 601,0	0,001638	0,010783	1 570,70	893,8	2 464,5	1 594,60	1 027,4	2 622,0	3,6602	1,6756	5,3358
345,00	15 541,0	0,001685	0,009772	1 605,50	837,7	2 443,2	1 631,70	963,4	2 595,1	3,7179	1,5585	5,2765
350,00	16 529,0	0,001741	0,008806	1 642,40	775,9	2 418,3	1 671,20	892,7	2 563,9	3,7788	1,4326	5,2114
355,00	17 570,0	0,001808	0,007872	1 682,20	706,4	2 388,6	1 714,00	812,9	2 526,9	3,8442	1,2942	5,1384
360,00	18 666,0	0,001895	0,006950	1 726,20	625,7	2 351,9	1 761,50	720,1	2 481,6	3,9165	1,1373	5,0537
365,00	19 822,0	0,002015	0,006009	1 777,20	526,4	2 303,6	1 817,20	605,5	2 422,7	4,0004	0,9489	4,9493
370,00	21 044,0	0,002217	0,004953	1 844,50	385,6	2 230,1	1 891,20	443,1	2 334,3	4,1119	0,6890	4,8009
373,95	22 064,0	0,003106	0,003106	2 015,70	0,0	2 015,7	2 084,30	0,0	2 084,3	4,4070	0,0000	4,4070

TABLE A.5

Variables de la vapeur d'eau saturée : table de la pression

Pression P (kPa)	Température de saturation T_{sat} (°C)	Volume massique (m ³ /kg)		Énergie interne (kJ/kg)			Enthalpie (kJ/kg)			Entropie (kJ/(kg · K))		
		Liquide saturé v_f	Vapeur saturée v_g	Liquide saturé u_f	Évaporation u_{fg}	Vapeur saturée u_g	Liquide saturé h_f	Évaporation h_{fg}	Vapeur saturée h_g	Liquide saturé s_f	Évaporation s_{fg}	Vapeur saturée s_g
1,000	6,97	0,001000	129,19000	29,302	2 355,2	2 384,5	29,303	2 484,4	2 513,7	0,1059	8,8690	8,9749
1,500	13,02	0,001001	87,96400	54,686	2 338,1	2 392,8	54,688	2 470,1	2 524,7	0,1956	8,6314	8,8270
2,000	17,50	0,001001	66,99000	73,431	2 325,5	2 398,9	73,433	2 459,5	2 532,9	0,2606	8,4621	8,7227
2,500	21,08	0,001002	54,24200	88,422	2 315,4	2 403,8	88,424	2 451,0	2 539,4	0,3118	8,3302	8,6421
3,000	24,08	0,001003	45,65400	100,980	2 306,9	2 407,9	100,980	2 443,9	2 544,8	0,3543	8,2222	8,5765
4,000	28,96	0,001004	34,79100	121,390	2 293,1	2 414,5	121,390	2 432,3	2 553,7	0,4224	8,0510	8,4734
5,000	32,87	0,001005	28,18500	137,750	2 282,1	2 419,8	137,750	2 423,0	2 560,7	0,4762	7,9176	8,3938
7,500	40,29	0,001008	19,23300	168,740	2 261,1	2 429,8	168,750	2 405,3	2 574,0	0,5763	7,6738	8,2501
10,000	45,81	0,001010	14,67000	191,790	2 245,4	2 437,2	191,810	2 392,1	2 583,9	0,6492	7,4996	8,1488
15,000	53,97	0,001014	10,02000	225,930	2 222,1	2 448,0	225,940	2 372,3	2 598,3	0,7549	7,2522	8,0071
20,000	60,06	0,001017	7,64810	251,400	2 204,6	2 456,0	251,420	2 357,5	2 608,9	0,8320	7,0752	7,9073
25,000	64,96	0,001020	6,20340	271,930	2 190,4	2 462,4	271,960	2 345,5	2 617,5	0,8932	6,9370	7,8302
30,000	69,09	0,001022	5,22870	289,240	2 178,5	2 467,7	289,270	2 335,3	2 624,6	0,9441	6,8234	7,7675
40,000	75,86	0,001026	3,99330	317,580	2 158,8	2 476,3	317,620	2 318,4	2 636,1	1,0261	6,6430	7,6691
50,000	81,32	0,001030	3,24030	340,490	2 142,7	2 483,2	340,540	2 304,7	2 645,2	1,0912	6,5019	7,5931
75,000	91,76	0,001037	2,21720	384,360	2 111,8	2 496,1	384,440	2 278,0	2 662,4	1,2132	6,2426	7,4558
100,000	99,61	0,001043	1,69410	417,400	2 088,2	2 505,6	417,510	2 257,5	2 675,0	1,3028	6,0562	7,3589
101,325	99,97	0,001043	1,67340	418,950	2 087,0	2 506,0	419,060	2 256,5	2 675,6	1,3069	6,0476	7,3545
125,000	105,97	0,001048	1,37500	444,230	2 068,8	2 513,0	444,360	2 240,6	2 684,9	1,3741	5,9100	7,2841
150,000	111,35	0,001053	1,15940	466,970	2 052,3	2 519,2	467,130	2 226,0	2 693,1	1,4337	5,7894	7,2231
175,000	116,04	0,001057	1,00370	486,820	2 037,7	2 524,5	487,010	2 213,1	2 700,2	1,4850	5,6865	7,1716
200,000	120,21	0,001061	0,88578	504,500	2 024,6	2 529,1	504,710	2 201,6	2 706,3	1,5302	5,5968	7,1270
225,000	123,97	0,001064	0,79329	520,470	2 012,7	2 533,2	520,710	2 191,0	2 711,7	1,5706	5,5171	7,0877
250,000	127,41	0,001067	0,71873	535,080	2 001,8	2 536,8	535,350	2 181,2	2 716,5	1,6072	5,4453	7,0525
275,000	130,58	0,001070	0,65732	548,570	1 991,6	2 540,1	548,860	2 172,0	2 720,9	1,6408	5,3800	7,0207
300,000	133,52	0,001073	0,60582	561,110	1 982,1	2 543,2	561,430	2 163,5	2 724,9	1,6717	5,3200	6,9917
325,000	136,27	0,001076	0,56199	572,840	1 973,1	2 545,9	573,190	2 155,4	2 728,6	1,7005	5,2645	6,9650
350,000	138,86	0,001079	0,52422	583,890	1 964,6	2 548,5	584,260	2 147,7	2 732,0	1,7274	5,2128	6,9402
375,000	141,30	0,001081	0,49133	594,320	1 956,6	2 550,9	594,730	2 140,4	2 735,1	1,7526	5,1645	6,9171
400,000	143,61	0,001084	0,46242	604,220	1 948,9	2 553,1	604,660	2 133,4	2 738,1	1,7765	5,1191	6,8955
450,000	147,90	0,001088	0,41392	622,650	1 934,5	2 557,1	623,140	2 120,3	2 743,4	1,8205	5,0356	6,8561
500,000	151,83	0,001093	0,37483	639,540	1 921,2	2 560,7	640,090	2 108,0	2 748,1	1,8604	4,9603	6,8207
550,000	155,46	0,001097	0,34261	655,160	1 908,8	2 563,9	655,770	2 096,6	2 752,4	1,8970	4,8916	6,7886
600,000	158,83	0,001101	0,31560	669,720	1 897,1	2 566,8	670,380	2 085,8	2 756,2	1,9308	4,8285	6,7593
650,000	161,98	0,001104	0,29260	683,370	1 886,1	2 569,4	684,080	2 075,5	2 759,6	1,9623	4,7699	6,7322
700,000	164,95	0,001108	0,27278	696,230	1 875,6	2 571,8	697,000	2 065,8	2 762,8	1,9918	4,7153	6,7071
750,000	167,75	0,001111	0,25552	708,400	1 865,6	2 574,0	709,240	2 056,4	2 765,7	2,0195	4,6642	6,6837

TABLE A.5

Variables de la vapeur d'eau saturée : table de la pression (suite)

Pression P (kPa)	Température de saturation T_{sat} (°C)	Volume massique (m ³ /kg)		Énergie interne (kJ/kg)			Enthalpie (kJ/kg)			Entropie (kJ/(kg · K))		
		Liquide saturé v_f	Vapeur saturée v_g	Liquide saturé u_f	Évaporation u_{fg}	Vapeur saturée u_g	Liquide saturé h_f	Évaporation h_{fg}	Vapeur saturée h_g	Liquide saturé s_f	Évaporation s_{fg}	Vapeur saturée s_g
800	170,41	0,001115	0,240350	719,97	1 856,1	2 576,0	720,87	2 047,5	2 768,3	2,0457	4,6160	6,6616
850	172,94	0,001118	0,226900	731,00	1 846,9	2 577,9	731,95	2 038,8	2 770,8	2,0705	4,5705	6,6409
900	175,35	0,001121	0,214890	741,55	1 838,1	2 579,6	742,56	2 030,5	2 773,0	2,0941	4,5273	6,6213
950	177,66	0,001124	0,204110	751,67	1 829,6	2 581,3	752,74	2 022,4	2 775,2	2,1166	4,4862	6,6027
1 000	179,88	0,001127	0,194360	761,39	1 821,4	2 582,8	762,51	2 014,6	2 777,1	2,1381	4,4470	6,5850
1 100	184,06	0,001133	0,177450	779,78	1 805,7	2 585,5	781,03	1 999,6	2 780,7	2,1785	4,3735	6,5520
1 200	187,96	0,001138	0,163260	796,96	1 790,9	2 587,8	798,33	1 985,4	2 783,8	2,2159	4,3058	6,5217
1 300	191,60	0,001144	0,151190	813,10	1 776,8	2 589,9	814,59	1 971,9	2 786,5	2,2508	4,2428	6,4936
1 400	195,04	0,001149	0,140780	828,35	1 763,4	2 591,8	829,96	1 958,9	2 788,9	2,2835	4,1840	6,4675
1 500	198,29	0,001154	0,131710	842,82	1 750,6	2 593,4	844,55	1 946,4	2 791,0	2,3143	4,1287	6,4430
1 750	205,72	0,001166	0,113440	876,12	1 720,6	2 596,7	878,16	1 917,1	2 795,2	2,3844	4,0033	6,3877
2 000	212,38	0,001177	0,099587	906,12	1 693,0	2 599,1	908,47	1 889,8	2 798,3	2,4467	3,8923	6,3390
2 250	218,41	0,001187	0,088717	933,54	1 667,3	2 600,9	936,21	1 864,3	2 800,5	2,5029	3,7926	6,2954
2 500	223,95	0,001197	0,079952	958,87	1 643,2	2 602,1	961,87	1 840,1	2 801,9	2,5542	3,7016	6,2558
3 000	233,85	0,001217	0,066667	1 004,60	1 598,5	2 603,2	1 008,30	1 794,9	2 803,2	2,6454	3,5402	6,1856
3 500	242,56	0,001235	0,057061	1 045,40	1 557,6	2 603,0	1 049,70	1 753,0	2 802,7	2,7253	3,3991	6,1244
4 000	250,35	0,001252	0,049779	1 082,40	1 519,3	2 601,7	1 087,40	1 713,5	2 800,8	2,7966	3,2731	6,0696
5 000	263,94	0,001286	0,039448	1 148,10	1 448,9	2 597,0	1 154,50	1 639,7	2 794,2	2,9207	3,0530	5,9737
6 000	275,59	0,001319	0,032449	1 205,80	1 384,1	2 589,9	1 213,80	1 570,9	2 784,6	3,0275	2,8627	5,8902
7 000	285,83	0,001352	0,027378	1 258,00	1 323,0	2 581,0	1 267,50	1 505,2	2 772,6	3,1220	2,6927	5,8148
8 000	295,01	0,001384	0,023525	1 306,00	1 264,5	2 570,5	1 317,10	1 441,6	2 758,7	3,2077	2,5373	5,7450
9 000	303,35	0,001418	0,020489	1 350,90	1 207,6	2 558,5	1 363,70	1 379,3	2 742,9	3,2866	2,3925	5,6791
10 000	311,00	0,001452	0,018028	1 393,30	1 151,8	2 545,2	1 407,80	1 317,6	2 725,5	3,3603	2,2556	5,6159
11 000	318,08	0,001488	0,015988	1 433,90	1 096,6	2 530,4	1 450,20	1 256,1	2 706,3	3,4299	2,1245	5,5544
12 000	324,68	0,001526	0,014264	1 473,00	1 041,3	2 514,3	1 491,30	1 194,1	2 685,4	3,4964	1,9975	5,4939
13 000	330,85	0,001566	0,012781	1 511,00	985,5	2 496,6	1 531,40	1 131,3	2 662,7	3,5606	1,8730	5,4336
14 000	336,67	0,001610	0,011487	1 548,40	928,7	2 477,1	1 571,00	1 067,0	2 637,9	3,6232	1,7497	5,3728
15 000	342,16	0,001657	0,010341	1 585,50	870,3	2 455,7	1 610,30	1 000,5	2 610,8	3,6848	1,6261	5,3108
16 000	347,36	0,001710	0,009312	1 622,60	809,4	2 432,0	1 649,90	931,1	2 581,0	3,7461	1,5005	5,2466
17 000	352,29	0,001770	0,008374	1 660,20	745,1	2 405,4	1 690,30	857,4	2 547,7	3,8082	1,3709	5,1791
18 000	356,99	0,001840	0,007504	1 699,10	675,9	2 375,0	1 732,20	777,8	2 510,0	3,8720	1,2343	5,1064
19 000	361,47	0,001926	0,006677	1 740,30	598,9	2 339,2	1 776,80	689,2	2 466,0	3,9396	1,0860	5,0256
20 000	365,75	0,002038	0,005862	1 785,80	509,0	2 294,8	1 826,60	585,5	2 412,1	4,0146	0,9164	4,9310
21 000	369,83	0,002207	0,004994	1 841,60	391,9	2 233,5	1 888,00	450,4	2 338,4	4,1071	0,7005	4,8076
22 000	373,71	0,002703	0,003644	1 951,70	140,8	2 092,4	2 011,10	161,5	2 172,6	4,2942	0,2496	4,5439
22 064	373,95	0,003106	0,003106	2 015,70	0,0	2 015,7	2 084,30	0,0	2 084,3	4,4070	0,0000	4,4070

TABLE A.6

Variables de la vapeur d'eau surchauffée

T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg·K))	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg·K))	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg·K))
	$P = 0,01 \text{ MPa (45,81 °C)}^*$				$P = 0,05 \text{ MPa (81,32 °C)}$				$P = 0,10 \text{ MPa (99,61 °C)}$			
Sat. [†]	14,670	2 437,2	2 583,9	8,1488	3,2403	2 483,2	2 645,2	7,5931	1,6941	2 505,6	2 675,0	7,3589
50	14,867	2 443,3	2 592,0	8,1741								
100	17,196	2 515,5	2 687,5	8,4489	3,4187	2 511,5	2 682,4	7,6953	1,6959	2 506,2	2 675,8	7,3611
150	19,513	2 587,9	2 783,0	8,6893	3,8897	2 585,7	2 780,2	7,9413	1,9367	2 582,9	2 776,6	7,6148
200	21,826	2 661,4	2 879,6	8,9049	4,3562	2 660,0	2 877,8	8,1592	2,1724	2 658,2	2 875,5	7,8356
250	24,136	2 736,1	2 977,5	9,1015	4,8206	2 735,1	2 976,2	8,3568	2,4062	2 733,9	2 974,5	8,0346
300	26,446	2 812,3	3 076,7	9,2827	5,2841	2 811,6	3 075,8	8,5387	2,6389	2 810,7	3 074,5	8,2172
400	31,063	2 969,3	3 280,0	9,6094	6,2094	2 968,9	3 279,3	8,8659	3,1027	2 968,3	3 278,6	8,5452
500	35,680	3 132,9	3 489,7	9,8998	7,1338	3 132,6	3 489,3	9,1566	3,5655	3 132,2	3 488,7	8,8362
600	40,296	3 303,3	3 706,3	10,1631	8,0577	3 303,1	3 706,0	9,4201	4,0279	3 302,8	3 705,6	9,0999
700	44,911	3 480,8	3 929,9	10,4056	8,9813	3 480,6	3 929,7	9,6626	4,4900	3 480,4	3 929,4	9,3424
800	49,527	3 665,4	4 160,6	10,6312	9,9047	3 665,2	4 160,4	9,8883	4,9519	3 665,0	4 160,2	9,5682
900	54,143	3 856,9	4 398,3	10,8429	10,8280	3 856,8	4 398,2	10,1000	5,4137	3 856,7	4 398,0	9,7800
1 000	58,758	4 055,3	4 642,8	11,0429	11,7513	4 055,2	4 642,7	10,3000	5,8755	4 055,0	4 642,6	9,9800
1 100	63,373	4 260,0	4 893,8	11,2326	12,6745	4 259,9	4 893,7	10,4897	6,3372	4 259,8	4 893,6	10,1698
1 200	67,989	4 470,9	5 150,8	11,4132	13,5977	4 470,8	5 150,7	10,6704	6,7988	4 470,7	5 150,6	10,3504
1 300	72,604	4 687,4	5 413,4	11,5857	14,5209	4 687,3	5 413,3	10,8429	7,2605	4 687,2	5 413,3	10,5229
	$P = 0,20 \text{ MPa (120,21 °C)}$				$P = 0,30 \text{ MPa (133,52 °C)}$				$P = 0,40 \text{ MPa (143,61 °C)}$			
Sat.	0,88578	2 529,1	2 706,3	7,1270	0,60582	2 543,2	2 724,9	6,9917	0,46242	2 553,1	2 738,1	6,8955
150	0,95986	2 577,1	2 769,1	7,2810	0,63402	2 571,0	2 761,2	7,0792	0,47088	2 564,4	2 752,8	6,9306
200	1,08049	2 654,6	2 870,7	7,5081	0,71643	2 651,0	2 865,9	7,3132	0,53434	2 647,2	2 860,9	7,1723
250	1,19890	2 731,4	2 971,2	7,7100	0,79645	2 728,9	2 967,9	7,5180	0,59520	2 726,4	2 964,5	7,3804
300	1,31623	2 808,8	3 072,1	7,8941	0,87535	2 807,0	3 069,6	7,7037	0,65489	2 805,1	3 067,1	7,5677
400	1,54934	2 967,2	3 277,0	8,2236	1,03155	2 966,0	3 275,5	8,0347	0,77265	2 964,9	3 273,9	7,9003
500	1,78142	3 131,4	3 487,7	8,5153	1,18672	3 130,6	3 486,6	8,3271	0,88936	3 129,8	3 485,5	8,1933
600	2,01302	3 302,2	3 704,8	8,7793	1,34139	3 301,6	3 704,0	8,5915	1,00558	3 301,0	3 703,3	8,4580
700	2,24434	3 479,9	3 928,8	9,0221	1,49580	3 479,5	3 928,2	8,8345	1,12152	3 479,0	3 927,6	8,7012
800	2,47550	3 664,7	4 159,8	9,2479	1,65004	3 664,3	4 159,3	9,0605	1,23730	3 663,9	4 158,9	8,9274
900	2,70656	3 856,3	4 397,7	9,4598	1,80417	3 856,0	4 397,3	9,2725	1,35298	3 855,7	4 396,9	9,1394
1 000	2,93755	4 054,8	4 642,3	9,6599	1,95824	4 054,5	4 642,0	9,4726	1,46859	4 054,3	4 641,7	9,3396
1 100	3,16848	4 259,6	4 893,3	9,8497	2,11226	4 259,4	4 893,1	9,6624	1,58414	4 259,2	4 892,9	9,5295
1 200	3,39938	4 470,5	5 150,4	10,0304	2,26624	4 470,3	5 150,2	9,8431	1,69966	4 470,2	5 150,0	9,7102
1 300	3,63026	4 687,1	5 413,1	10,2029	2,42019	4 686,9	5 413,0	10,0157	1,81516	4 686,7	5 412,8	9,8828
	$P = 0,50 \text{ MPa (151,83 °C)}$				$P = 0,60 \text{ MPa (158,83 °C)}$				$P = 0,80 \text{ MPa (170,41 °C)}$			
Sat.	0,37483	2 560,7	2 748,1	6,8207	0,31560	2 566,8	2 756,2	6,7593	0,24035	2 576,0	2 768,3	6,6616
200	0,42503	2 643,3	2 855,8	7,0610	0,35212	2 639,4	2 850,6	6,9683	0,26088	2 631,1	2 839,8	6,8177
250	0,47443	2 723,8	2 961,0	7,2725	0,39390	2 721,2	2 957,6	7,1833	0,29321	2 715,9	2 950,4	7,0402
300	0,52261	2 803,3	3 064,6	7,4614	0,43442	2 801,4	3 062,0	7,3740	0,32416	2 797,5	3 056,9	7,2345
350	0,57015	2 883,0	3 168,1	7,6346	0,47428	2 881,6	3 166,1	7,5481	0,35442	2 878,6	3 162,2	7,4107
400	0,61731	2 963,7	3 272,4	7,7956	0,51374	2 962,5	3 270,8	7,7097	0,38429	2 960,2	3 267,7	7,5735
500	0,71095	3 129,0	3 484,5	8,0893	0,59200	3 128,2	3 483,4	8,0041	0,44332	3 126,6	3 481,3	7,8692
600	0,80409	3 300,4	3 702,5	8,3544	0,66976	3 299,8	3 701,7	8,2695	0,50186	3 298,7	3 700,1	8,1354
700	0,89696	3 478,6	3 927,0	8,5978	0,74725	3 478,1	3 926,4	8,5132	0,56011	3 477,2	3 925,3	8,3794
800	0,98966	3 663,6	4 158,4	8,8240	0,82457	3 663,2	4 157,9	8,7395	0,61820	3 662,5	4 157,0	8,6061
900	1,08227	3 855,4	4 396,6	9,0362	0,90179	3 855,1	4 396,2	8,9518	0,67619	3 854,5	4 395,5	8,8185
1 000	1,17480	4 054,0	4 641,4	9,2364	0,97893	4 053,8	4 641,1	9,1521	0,73411	4 053,3	4 640,5	9,0189
1 100	1,26728	4 259,0	4 892,6	9,4263	1,05603	4 258,8	4 892,4	9,3420	0,79197	4 258,3	4 891,9	9,2090
1 200	1,35972	4 470,0	5 149,8	9,6071	1,13309	4 469,8	5 149,6	9,5229	0,84980	4 469,4	5 149,3	9,3898
1 300	1,45214	4 686,6	5 412,6	9,7797	1,21012	4 686,4	5 412,5	9,6955	0,90761	4 686,1	5 412,2	9,5625

* Température de saturation qui correspond à la pression indiquée entre parenthèses.

† Variables de la vapeur saturée à la pression donnée.

TABLE A.6

Variables de la vapeur d'eau surchauffée (suite)

T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg·K))	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg·K))	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg·K))
	$P = 1,00 \text{ MPa (179,88 °C)}$				$P = 1,20 \text{ MPa (187,96 °C)}$				$P = 1,40 \text{ MPa (195,04 °C)}$			
Sat.	0,19437	2 582,8	2 777,1	6,5850	0,16326	2 587,8	2 783,8	6,5217	0,14078	2 591,8	2 788,9	6,4675
200	0,20602	2 622,3	2 828,3	6,6956	0,16934	2 612,9	2 816,1	6,5909	0,14303	2 602,7	2 803,0	6,4975
250	0,23275	2 710,4	2 943,1	6,9265	0,19241	2 704,7	2 935,6	6,8313	0,16356	2 698,9	2 927,9	6,7488
300	0,25799	2 793,7	3 051,6	7,1246	0,21386	2 789,7	3 046,3	7,0335	0,18233	2 785,7	3 040,9	6,9553
350	0,28250	2 875,7	3 158,2	7,3029	0,23455	2 872,7	3 154,2	7,2139	0,20029	2 869,7	3 150,1	7,1379
400	0,30661	2 957,9	3 264,5	7,4670	0,25482	2 955,5	3 261,3	7,3793	0,21782	2 953,1	3 258,1	7,3046
500	0,35411	3 125,0	3 479,1	7,7642	0,29464	3 123,4	3 477,0	7,6779	0,25216	3 121,8	3 474,8	7,6047
600	0,40111	3 297,5	3 698,6	8,0311	0,33395	3 296,3	3 697,0	7,9456	0,28597	3 295,1	3 695,5	7,8730
700	0,44783	3 476,3	3 924,1	8,2755	0,37297	3 475,3	3 922,9	8,1904	0,31951	3 474,4	3 921,7	8,1183
800	0,49438	3 661,7	4 156,1	8,5024	0,41184	3 661,0	4 155,2	8,4176	0,35288	3 660,3	4 154,3	8,3458
900	0,54083	3 853,9	4 394,8	8,7150	0,45059	3 853,3	4 394,0	8,6303	0,38614	3 852,7	4 393,3	8,5587
1 000	0,58721	4 052,7	4 640,0	8,9155	0,48928	4 052,2	4 639,4	8,8310	0,41933	4 051,7	4 638,8	8,7595
1 100	0,63354	4 257,9	4 891,4	9,1057	0,52792	4 257,5	4 891,0	9,0212	0,45247	4 257,0	4 890,5	8,9497
1 200	0,67983	4 469,0	5 148,9	9,2866	0,56652	4 468,7	5 148,5	9,2022	0,48558	4 468,3	5 148,1	9,1308
1 300	0,72610	4 685,8	5 411,9	9,4593	0,60509	4 685,5	5 411,6	9,3750	0,51866	4 685,1	5 411,3	9,3036
	$P = 1,60 \text{ MPa (201,37 °C)}$				$P = 1,80 \text{ MPa (207,11 °C)}$				$P = 2,00 \text{ MPa (212,38 °C)}$			
Sat.	0,12374	2 594,8	2 792,8	6,4200	0,11037	2 597,3	2 795,9	6,3775	0,09959	2 599,1	2 798,3	6,3390
225	0,13293	2 645,1	2 857,8	6,5537	0,11678	2 637,0	2 847,2	6,4825	0,10381	2 628,5	2 836,1	6,4160
250	0,14190	2 692,9	2 919,9	6,6753	0,12502	2 686,7	2 911,7	6,6088	0,11150	2 680,3	2 903,3	6,5475
300	0,15866	2 781,6	3 035,4	6,8864	0,14025	2 777,4	3 029,9	6,8246	0,12551	2 773,2	3 024,2	6,7684
350	0,17459	2 866,6	3 146,0	7,0713	0,15460	2 863,6	3 141,9	7,0120	0,13860	2 860,5	3 137,7	6,9583
400	0,19007	2 950,8	3 254,9	7,2394	0,16849	2 948,3	3 251,6	7,1814	0,15122	2 945,9	3 248,4	7,1292
500	0,22029	3 120,1	3 472,6	7,5410	0,19551	3 118,5	3 470,4	7,4845	0,17568	3 116,9	3 468,3	7,4337
600	0,24999	3 293,9	3 693,9	7,8101	0,22200	3 292,7	3 692,3	7,7543	0,19962	3 291,5	3 690,7	7,7043
700	0,27941	3 473,5	3 920,5	8,0558	0,24822	3 472,6	3 919,4	8,0005	0,22326	3 471,7	3 918,2	7,9509
800	0,30865	3 659,5	4 153,4	8,2834	0,27426	3 658,8	4 152,4	8,2284	0,24674	3 658,0	4 151,5	8,1791
900	0,33780	3 852,1	4 392,6	8,4965	0,30020	3 851,5	4 391,9	8,4417	0,27012	3 850,9	4 391,1	8,3925
1 000	0,36687	4 051,2	4 638,2	8,6974	0,32606	4 050,7	4 637,6	8,6427	0,29342	4 050,2	4 637,1	8,5936
1 100	0,39589	4 256,6	4 890,0	8,8878	0,35188	4 256,2	4 889,6	8,8331	0,31667	4 255,7	4 889,1	8,7842
1 200	0,42488	4 467,9	5 147,7	9,0689	0,37766	4 467,6	5 147,3	9,0143	0,33989	4 467,2	5 147,0	8,9654
1 300	0,45383	4 684,8	5 410,9	9,2418	0,40341	4 684,5	5 410,6	9,1872	0,36308	4 684,2	5 410,3	9,1384
	$P = 2,50 \text{ MPa (223,95 °C)}$				$P = 3,00 \text{ MPa (233,85 °C)}$				$P = 3,50 \text{ MPa (242,56 °C)}$			
Sat.	0,07995	2 602,1	2 801,9	6,2558	0,06667	2 603,2	2 803,2	6,1856	0,05706	2 603,0	2 802,7	6,1244
225	0,08026	2 604,8	2 805,5	6,2629								
250	0,08705	2 663,3	2 880,9	6,4107	0,07063	2 644,7	2 856,5	6,2893	0,05876	2 624,0	2 829,7	6,1764
300	0,09894	2 762,2	3 009,6	6,6459	0,08118	2 750,8	2 994,3	6,5412	0,06845	2 738,8	2 978,4	6,4484
350	0,10979	2 852,5	3 127,0	6,8424	0,09056	2 844,4	3 116,1	6,7450	0,07680	2 836,0	3 104,9	6,6601
400	0,12012	2 939,8	3 240,1	7,0170	0,09938	2 933,6	3 231,7	6,9235	0,08456	2 927,2	3 223,2	6,8428
450	0,13015	3 026,2	3 351,6	7,1768	0,10789	3 021,2	3 344,9	7,0856	0,09198	3 016,1	3 338,1	7,0074
500	0,13999	3 112,8	3 462,8	7,3254	0,11620	3 108,6	3 457,2	7,2359	0,09919	3 104,5	3 451,7	7,1593
600	0,15931	3 288,5	3 686,8	7,5979	0,13245	3 285,5	3 682,8	7,5103	0,11325	3 282,5	3 678,9	7,4357
700	0,17835	3 469,3	3 915,2	7,8455	0,14841	3 467,0	3 912,2	7,7590	0,12702	3 464,7	3 909,3	7,6855
800	0,19722	3 656,2	4 149,2	8,0744	0,16420	3 654,3	4 146,9	7,9885	0,14061	3 652,5	4 144,6	7,9156
900	0,21597	3 849,4	4 389,3	8,2882	0,17988	3 847,9	4 387,5	8,2028	0,15410	3 846,4	4 385,7	8,1304
1 000	0,23466	4 049,0	4 635,6	8,4897	0,19549	4 047,7	4 634,2	8,4045	0,16751	4 046,4	4 632,7	8,3324
1 100	0,25330	4 254,7	4 887,9	8,6804	0,21105	4 253,6	4 886,7	8,5955	0,18087	4 252,5	4 885,6	8,5236
1 200	0,27190	4 466,3	5 146,0	8,8618	0,22658	4 465,3	5 145,1	8,7771	0,19420	4 464,4	5 144,1	8,7053
1 300	0,29048	4 683,4	5 409,5	9,0349	0,24207	4 682,6	5 408,8	8,9502	0,20750	4 681,8	5 408,0	8,8786

TABLE A.6

Variables de la vapeur d'eau surchauffée (suite)

T (°C)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg·K))	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg·K))	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg·K))
	P = 4,0 MPa (250,35 °C)				P = 4,5 MPa (257,44 °C)				P = 5,0 MPa (263,94 °C)			
Sat.	0,04978	2 601,7	2 800,8	6,0696	0,04406	2 599,7	2 798,0	6,0198	0,03945	2 597,0	2 794,2	5,9737
275	0,05461	2 668,9	2 887,3	6,2312	0,04733	2 651,4	2 864,4	6,1429	0,04144	2 632,3	2 839,5	6,0571
300	0,05887	2 726,2	2 961,7	6,3639	0,05138	2 713,0	2 944,2	6,2854	0,04535	2 699,0	2 925,7	6,2111
350	0,06647	2 827,4	3 093,3	6,5843	0,05842	2 818,6	3 081,5	6,5153	0,05197	2 809,5	3 069,3	6,4516
400	0,07343	2 920,8	3 214,5	6,7714	0,06477	2 914,2	3 205,7	6,7071	0,05784	2 907,5	3 196,7	6,6483
450	0,08004	3 011,0	3 331,2	6,9386	0,07076	3 005,8	3 324,2	6,8770	0,06332	3 000,6	3 317,2	6,8210
500	0,08644	3 100,3	3 446,0	7,0922	0,07652	3 096,0	3 440,4	7,0323	0,06858	3 091,8	3 434,7	6,9781
600	0,09886	3 279,4	3 674,9	7,3706	0,08766	3 276,4	3 670,9	7,3127	0,07870	3 273,3	3 666,9	7,2605
700	0,11098	3 462,4	3 906,3	7,6214	0,09850	3 460,0	3 903,3	7,5647	0,08852	3 457,7	3 900,3	7,5136
800	0,12292	3 650,6	4 142,3	7,8523	0,10916	3 648,8	4 140,0	7,7962	0,09816	3 646,9	4 137,7	7,7458
900	0,13476	3 844,8	4 383,9	8,0675	0,11972	3 843,3	4 382,1	8,0118	0,10769	3 841,8	4 380,2	7,9619
1 000	0,14653	4 045,1	4 631,2	8,2698	0,13020	4 043,9	4 629,8	8,2144	0,11715	4 042,6	4 628,3	8,1648
1 100	0,15824	4 251,4	4 884,4	8,4612	0,14064	4 250,4	4 883,2	8,4060	0,12655	4 249,3	4 882,1	8,3566
1 200	0,16992	4 463,5	5 143,2	8,6430	0,15103	4 462,6	5 142,2	8,5880	0,13592	4 461,6	5 141,3	8,5388
1 300	0,18157	4 680,9	5 407,2	8,8164	0,16140	4 680,1	5 406,5	8,7616	0,14527	4 679,3	5 405,7	8,7124
	P = 6,0 MPa (275,59 °C)				P = 7,0 MPa (285,83 °C)				P = 8,0 MPa (295,01 °C)			
Sat.	0,03245	2 589,9	2 784,6	5,8902	0,027378	2 581,0	2 772,6	5,8148	0,023525	2 570,5	2 758,7	5,7450
300	0,03619	2 668,4	2 885,6	6,0703	0,029492	2 633,5	2 839,9	5,9337	0,024279	2 592,3	2 786,5	5,7937
350	0,04225	2 790,4	3 043,9	6,3357	0,035262	2 770,1	3 016,9	6,2305	0,029975	2 748,3	2 988,1	6,1321
400	0,04742	2 893,7	3 178,3	6,5432	0,039958	2 879,5	3 159,2	6,4502	0,034344	2 864,6	3 139,4	6,3658
450	0,05217	2 989,9	3 302,9	6,7219	0,044187	2 979,0	3 288,3	6,6353	0,038194	2 967,8	3 273,3	6,5579
500	0,05667	3 083,1	3 423,1	6,8826	0,048157	3 074,3	3 411,4	6,8000	0,041767	3 065,4	3 399,5	6,7266
550	0,06102	3 175,2	3 541,3	7,0308	0,051966	3 167,9	3 531,6	6,9507	0,045172	3 160,5	3 521,8	6,8800
600	0,06527	3 267,2	3 658,8	7,1693	0,055665	3 261,0	3 650,6	7,0910	0,048463	3 254,7	3 642,4	7,0221
700	0,07355	3 453,0	3 894,3	7,4247	0,062850	3 448,3	3 888,3	7,3487	0,054829	3 443,6	3 882,2	7,2822
800	0,08165	3 643,2	4 133,1	7,6582	0,069856	3 639,5	4 128,5	7,5836	0,061011	3 635,7	4 123,8	7,5185
900	0,08964	3 838,8	4 376,6	7,8751	0,076750	3 835,7	4 373,0	7,8014	0,067082	3 832,7	4 369,3	7,7372
1 000	0,09756	4 040,1	4 625,4	8,0786	0,083571	4 037,5	4 622,5	8,0055	0,073079	4 035,0	4 619,6	7,9419
1 100	0,10543	4 247,1	4 879,7	8,2709	0,090341	4 245,0	4 877,4	8,1982	0,079025	4 242,8	4 875,0	8,1350
1 200	0,11326	4 459,8	5 139,4	8,4534	0,097075	4 457,9	5 137,4	8,3810	0,084934	4 456,1	5 135,5	8,3181
1 300	0,12107	4 677,7	5 404,1	8,6273	0,103781	4 676,1	5 402,6	8,5551	0,090817	4 674,5	5 401,0	8,4925
	P = 9,0 MPa (303,35 °C)				P = 10,0 MPa (311,00 °C)				P = 12,5 MPa (327,81 °C)			
Sat.	0,020489	2 558,5	2 742,9	5,6791	0,018028	2 545,2	2 725,5	5,6159	0,013496	2 505,6	2 674,3	5,4638
325	0,023284	2 647,6	2 857,1	5,8738	0,019877	2 611,6	2 810,3	5,7596				
350	0,025816	2 725,0	2 957,3	6,0380	0,022440	2 699,6	2 924,0	5,9460	0,016138	2 624,9	2 826,6	5,7130
400	0,029960	2 849,2	3 118,8	6,2876	0,026436	2 833,1	3 097,5	6,2141	0,020030	2 789,6	3 040,0	6,0433
450	0,033524	2 956,3	3 258,0	6,4872	0,029782	2 944,5	3 242,4	6,4219	0,023019	2 913,7	3 201,5	6,2749
500	0,036793	3 056,3	3 387,4	6,6603	0,032811	3 047,0	3 375,1	6,5995	0,025630	3 023,2	3 343,6	6,4651
550	0,039885	3 153,0	3 512,0	6,8164	0,035655	3 145,4	3 502,0	6,7585	0,028033	3 126,1	3 476,5	6,6317
600	0,042861	3 248,4	3 634,1	6,9605	0,038378	3 242,0	3 625,8	6,9045	0,030306	3 225,8	3 604,6	6,7828
650	0,045755	3 343,4	3 755,2	7,0954	0,041018	3 338,0	3 748,1	7,0408	0,032491	3 324,1	3 730,2	6,9227
700	0,048589	3 438,8	3 876,1	7,2229	0,043597	3 434,0	3 870,0	7,1693	0,034612	3 422,0	3 854,6	7,0540
800	0,054132	3 632,0	4 119,2	7,4606	0,048629	3 628,2	4 114,5	7,4085	0,038724	3 618,8	4 102,8	7,2967
900	0,059562	3 829,6	4 365,7	7,6802	0,053547	3 826,5	4 362,0	7,6290	0,042720	3 818,9	4 352,9	7,5195
1 000	0,064919	4 032,4	4 616,7	7,8855	0,058391	4 029,9	4 613,8	7,8349	0,046641	4 023,5	4 606,5	7,7269
1 100	0,070224	4 240,7	4 872,7	8,0791	0,063183	4 238,5	4 870,3	8,0289	0,050510	4 233,1	4 864,5	7,9220
1 200	0,075492	4 454,2	5 133,6	8,2625	0,067938	4 452,4	5 131,7	8,2126	0,054342	4 447,7	5 127,0	8,1065
1 300	0,080733	4 672,9	5 399,5	8,4371	0,072667	4 671,3	5 398,0	8,3874	0,058147	4 667,3	5 394,1	8,2819

TABLE A.6

Variables de la vapeur d'eau surchauffée (suite)

T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg · K))	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg · K))	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg · K))
	$P = 15,0 \text{ MPa (342,16 °C)}$				$P = 17,5 \text{ MPa (354,67 °C)}$				$P = 20,0 \text{ MPa (365,75 °C)}$			
Sat.	0,010341	2 455,7	2 610,8	5,3108	0,007932	2 390,7	2 529,5	5,1435	0,005862	2 294,8	2 412,1	4,9310
350	0,011481	2 520,9	2 693,1	5,4438								
400	0,015671	2 740,6	2 975,7	5,8819	0,012463	2 684,3	2 902,4	5,7211	0,009950	2 617,9	2 816,9	5,5526
450	0,018477	2 880,8	3 157,9	6,1434	0,015204	2 845,4	3 111,4	6,0212	0,012721	2 807,3	3 061,7	5,9043
500	0,020828	2 998,4	3 310,8	6,3480	0,017385	2 972,4	3 276,7	6,2424	0,014793	2 945,3	3 241,2	6,1446
550	0,022945	3 106,2	3 450,4	6,5230	0,019305	3 085,8	3 423,6	6,4266	0,016571	3 064,7	3 396,2	6,3390
600	0,024921	3 209,3	3 583,1	6,6796	0,021073	3 192,5	3 561,3	6,5890	0,018185	3 175,3	3 539,0	6,5075
650	0,026804	3 310,1	3 712,1	6,8233	0,022742	3 295,8	3 693,8	6,7366	0,019695	3 281,4	3 675,3	6,6593
700	0,028621	3 409,8	3 839,1	6,9573	0,024342	3 397,5	3 823,5	6,8735	0,021134	3 385,1	3 807,8	6,7991
800	0,032121	3 609,3	4 091,1	7,2037	0,027405	3 599,7	4 079,3	7,1237	0,023870	3 590,1	4 067,5	7,0531
900	0,035503	3 811,2	4 343,7	7,4288	0,030348	3 803,5	4 334,6	7,3511	0,026484	3 795,7	4 325,4	7,2829
1 000	0,038808	4 017,1	4 599,2	7,6378	0,033215	4 010,7	4 592,0	7,5616	0,029020	4 004,3	4 584,7	7,4950
1 100	0,042062	4 227,7	4 858,6	7,8339	0,036029	4 222,3	4 852,8	7,7588	0,031504	4 216,9	4 847,0	7,6933
1 200	0,045279	4 443,1	5 122,3	8,0192	0,038806	4 438,5	5 117,6	7,9449	0,033952	4 433,8	5 112,9	7,8802
1 300	0,048469	4 663,3	5 390,3	8,1952	0,041556	4 659,2	5 386,5	8,1215	0,036371	4 655,2	5 382,7	8,0574
	$P = 25,0 \text{ MPa}$				$P = 30,0 \text{ MPa}$				$P = 35,0 \text{ MPa}$			
375	0,001978	1 799,9	1 849,4	4,0345	0,001792	1 738,1	1 791,9	3,9313	0,001701	1 702,8	1 762,4	3,8724
400	0,006005	2 428,5	2 578,7	5,1400	0,002798	2 068,9	2 152,8	4,4758	0,002105	1 914,9	1 988,6	4,2144
425	0,007886	2 607,8	2 805,0	5,4708	0,005299	2 452,9	2 611,8	5,1473	0,003434	2 253,3	2 373,5	4,7751
450	0,009176	2 721,2	2 950,6	5,6759	0,006737	2 618,9	2 821,0	5,4422	0,004957	2 497,5	2 671,0	5,1946
500	0,011143	2 887,3	3 165,9	5,9643	0,008691	2 824,0	3 084,8	5,7956	0,006933	2 755,3	2 997,9	5,6331
550	0,012736	3 020,8	3 339,2	6,1816	0,010175	2 974,5	3 279,7	6,0403	0,008348	2 925,8	3 218,0	5,9093
600	0,014140	3 140,0	3 493,5	6,3637	0,011445	3 103,4	3 446,8	6,2373	0,009523	3 065,6	3 399,0	6,1229
650	0,015430	3 251,9	3 637,7	6,5243	0,012590	3 221,7	3 599,4	6,4074	0,010565	3 190,9	3 560,7	6,3030
700	0,016643	3 359,9	3 776,0	6,6702	0,013654	3 334,3	3 743,9	6,5599	0,011523	3 308,3	3 711,6	6,4623
800	0,018922	3 570,7	4 043,8	6,9322	0,015628	3 551,2	4 020,0	6,8301	0,013278	3 531,6	3 996,3	6,7409
900	0,021075	3 780,2	4 307,1	7,1668	0,017473	3 764,6	4 288,8	7,0695	0,014904	3 749,0	4 270,6	6,9853
1 000	0,023150	3 991,5	4 570,2	7,3821	0,019240	3 978,6	4 555,8	7,2880	0,016450	3 965,8	4 541,5	7,2069
1 100	0,025172	4 206,1	4 835,4	7,5825	0,020954	4 195,2	4 823,9	7,4906	0,017942	4 184,4	4 812,4	7,4118
1 200	0,027157	4 424,6	5 103,5	7,7710	0,022630	4 415,3	5 094,2	7,6807	0,019398	4 406,1	5 085,0	7,6034
1 300	0,029115	4 647,2	5 375,1	7,9494	0,024279	4 639,2	5 367,6	7,8602	0,020827	4 631,2	5 360,2	7,7841
	$P = 40,0 \text{ MPa}$				$P = 50,0 \text{ MPa}$				$P = 60,0 \text{ MPa}$			
375	0,001641	1 677,0	1 742,6	3,8290	0,001560	1 638,6	1 716,6	3,7642	0,001503	1 609,7	1 699,9	3,7149
400	0,001911	1 855,0	1 931,4	4,1145	0,001731	1 787,8	1 874,4	4,0029	0,001633	1 745,2	1 843,2	3,9317
425	0,002538	2 097,5	2 199,0	4,5044	0,002009	1 960,3	2 060,7	4,2746	0,001816	1 892,9	2 001,8	4,1630
450	0,003692	2 364,2	2 511,8	4,9449	0,002487	2 160,3	2 284,7	4,5896	0,002086	2 055,1	2 180,2	4,4140
500	0,005623	2 681,6	2 906,5	5,4744	0,003890	2 528,1	2 722,6	5,1762	0,002952	2 393,2	2 570,3	4,9356
550	0,006985	2 875,1	3 154,4	5,7857	0,005118	2 769,5	3 025,4	5,5563	0,003955	2 664,6	2 901,9	5,3517
600	0,008089	3 026,8	3 350,4	6,0170	0,006108	2 947,1	3 252,6	5,8245	0,004833	2 866,8	3 156,8	5,6527
650	0,009053	3 159,5	3 521,6	6,2078	0,006957	3 095,6	3 443,5	6,0373	0,005591	3 031,3	3 366,8	5,8867
700	0,009930	3 282,0	3 679,2	6,3740	0,007717	3 228,7	3 614,6	6,2179	0,006265	3 175,4	3 551,3	6,0814
800	0,011521	3 511,8	3 972,6	6,6613	0,009073	3 472,2	3 925,8	6,5225	0,007456	3 432,6	3 880,0	6,4033
900	0,012980	3 733,3	4 252,5	6,9107	0,010296	3 702,0	4 216,8	6,7819	0,008519	3 670,9	4 182,1	6,6725
1 000	0,014360	3 952,9	4 527,3	7,1355	0,011441	3 927,4	4 499,4	7,0131	0,009504	3 902,0	4 472,2	6,9099
1 100	0,015686	4 173,7	4 801,1	7,3425	0,012534	4 152,2	4 778,9	7,2244	0,010439	4 130,9	4 757,3	7,1255
1 200	0,016976	4 396,9	5 075,9	7,5357	0,013590	4 378,6	5 058,1	7,4207	0,011339	4 360,5	5 040,8	7,3248
1 300	0,018239	4 623,3	5 352,8	7,7175	0,014620	4 607,5	5 338,5	7,6048	0,012213	4 591,8	5 324,5	7,5111

TABLE A.12

Variables du réfrigérant R-134a saturé : table de la pression

Pression P (kPa)	Température de saturation T_{sat} (°C)	Volume massique (m ³ /kg)		Énergie interne (kJ/kg)			Enthalpie (kJ/kg)			Entropie (kJ/(kg · K))		
		Liquide saturé v_f	Vapeur saturée v_g	Liquide saturé u_f	Évaporation u_{fg}	Vapeur saturée u_g	Liquide saturé h_f	Évaporation h_{fg}	Vapeur saturée h_g	Liquide saturé s_f	Évaporation s_{fg}	Vapeur saturée s_g
60	-36,95	0,0007098	0,311210	3,798	205,32	209,12	3,841	223,95	227,79	0,01634	0,94807	0,96441
70	-33,87	0,0007144	0,269290	7,680	203,20	210,88	7,730	222,00	229,73	0,03267	0,92775	0,96042
80	-31,13	0,0007185	0,237530	11,150	201,30	212,46	11,210	220,25	231,46	0,04711	0,90999	0,95710
90	-28,65	0,0007223	0,212630	14,310	199,57	213,88	14,370	218,65	233,02	0,06008	0,89419	0,95427
100	-26,37	0,0007259	0,192540	17,210	197,98	215,19	17,280	217,16	234,44	0,07188	0,87995	0,95183
120	-22,32	0,0007324	0,162120	22,400	195,11	217,51	22,490	214,48	236,97	0,09275	0,85503	0,94779
140	-18,77	0,0007383	0,140140	26,980	192,57	219,54	27,080	212,08	239,16	0,11087	0,83368	0,94456
160	-15,60	0,0007437	0,123480	31,090	190,27	221,35	31,210	209,90	241,11	0,12693	0,81496	0,94190
180	-12,73	0,0007487	0,110410	34,830	188,16	222,99	34,970	207,90	242,86	0,14139	0,79826	0,93965
200	-10,09	0,0007533	0,099867	38,280	186,21	224,48	38,430	206,03	244,46	0,15457	0,78316	0,93773
240	-5,38	0,0007620	0,083897	44,480	182,67	227,14	44,660	202,62	247,28	0,17794	0,75664	0,93458
280	-1,25	0,0007699	0,072352	49,970	179,50	229,46	50,180	199,54	249,72	0,19829	0,73381	0,93210
320	2,46	0,0007772	0,063604	54,920	176,61	231,52	55,160	196,71	251,88	0,21637	0,71369	0,93006
360	5,82	0,0007841	0,056738	59,440	173,94	233,38	59,720	194,08	253,81	0,23270	0,69566	0,92836
400	8,91	0,0007907	0,051201	63,620	171,45	235,07	63,940	191,62	255,55	0,24761	0,67929	0,92691
450	12,46	0,0007985	0,045619	68,450	168,54	237,00	68,810	188,71	257,53	0,26465	0,66069	0,92535
500	15,71	0,008059	0,041118	72,930	165,82	238,75	73,330	185,98	259,30	0,28023	0,64377	0,92400
550	18,73	0,008130	0,037408	77,100	163,25	240,35	77,540	183,38	260,92	0,29461	0,62821	0,92282
600	21,55	0,008199	0,034295	81,020	160,81	241,83	81,510	180,90	262,40	0,30799	0,61378	0,92177
650	24,20	0,008266	0,031646	84,720	158,48	243,20	85,260	178,51	263,77	0,32051	0,60030	0,92081
700	26,69	0,008331	0,029361	88,240	156,24	244,48	88,820	176,21	265,03	0,33230	0,58763	0,91994
750	29,06	0,008395	0,027371	91,590	154,08	245,67	92,220	173,98	266,20	0,34345	0,57567	0,91912
800	31,31	0,008458	0,025621	94,790	152,00	246,79	95,470	171,82	267,29	0,35404	0,56431	0,91835
850	33,45	0,008520	0,024069	97,870	149,98	247,85	98,600	169,71	268,31	0,36413	0,55349	0,91762
900	35,51	0,008580	0,022683	100,830	148,01	248,85	101,610	167,66	269,26	0,37377	0,54315	0,91692
950	37,48	0,008641	0,021438	103,690	146,10	249,79	104,510	165,64	270,15	0,38301	0,53323	0,91624
1 000	39,37	0,008700	0,020313	106,450	144,23	250,68	107,320	163,67	270,99	0,39189	0,52368	0,91558
1 200	46,29	0,008934	0,016715	116,700	137,11	253,81	117,770	156,10	273,87	0,42441	0,48863	0,91303
1 400	52,40	0,009166	0,014107	125,940	130,43	256,37	127,220	148,90	276,12	0,45315	0,45734	0,91050
1 600	57,88	0,009400	0,012123	134,430	124,04	258,47	135,930	141,93	277,86	0,47911	0,42873	0,90784
1 800	62,87	0,009639	0,010559	142,330	117,83	260,17	144,070	135,11	279,17	0,50294	0,40204	0,90498
2 000	67,45	0,009886	0,009288	149,780	111,73	261,51	151,760	128,33	280,09	0,52509	0,37675	0,90184
2 500	77,54	0,010566	0,006936	166,990	96,47	263,45	169,630	111,16	280,79	0,57531	0,31695	0,89226
3 000	86,16	0,011406	0,005275	183,040	80,22	263,26	186,460	92,63	279,09	0,62118	0,25776	0,87894

Références

- [1] THERMODYNAMIQUE une approche pragmatique, Yunus A. Çengel, Michael A. Boles, Marcel Lacroix, 2008, Chenelière McGraw-Hill, ISBN 978-2-7651-4
- [2] THEORY AND PROBLEMS OF THERMODYNAMICS FOR ENGINNERS, MERLE C. POTTER Ph.D., CRAIG W. SOMERTON, Ph.D., 1993, SCHAUM'S OUTLINE SERIES, McGRAW-HILL, ISBN 0-07-050707-4
- [3] Aide-mémoire Thermodynamique de l'ingénieur, Énergétique, Changement climatique, Francis Meunier, Dunod, Paris, 2009, ISBN 978-2-10-054177-5
- [4] THERMODYNAMIQUE DE L'INGENIEUR, OLIVIER CLEYNEN THERMODYNAMIQUE.FR, ISBN 9781794848207

Matière 1:Thermodynamique 2
VHS: 45h00 (Cours: 1h30,TD : 1h30)
Crédits:4
Coefficient: 2

Objectifs de l'enseignement :Fixer les idées générales de la thermodynamique et mettre en exergue leurs utilités dans les sciences de l'ingénieur. L'objectif est d'arriver à analyser des systèmes énergétiques par l'utilisation des pré requis de la première année et de montrer ce qu'il faut mettre en œuvre pour l'étude de la vapeur d'eau et introduire l'étude des cycles des machines thermiques et frigorifiques.

Connaissances préalables recommandées : Thermodynamique du S2,Mathématiques de base.

Contenu de la matière :

Chapitre 1: Rappels sur les Concepts de Base de la Thermodynamique 1semaine
Rappel des trois principes de la thermodynamique.

Chapitre 2: Propriétés Thermodynamiques des Substances Pures 2 semaines
Diagrammes d'Etat (Diagramme T-s, Diagramme p-h, Diagramme h-s), Tables Thermodynamiques (Tables des propriétés à la saturation, Tables des propriétés de la vapeur surchauffée), Equations d'Etat (Equation d'état d'un gaz parfait, Développements du viriel, Equation de Van Der Waals, Equations d'état dérivées de l'équation de Van Der Waals, Variables Réduites et Loi des Etats Correspondants, Equations d'Etat Semi-Empiriques)

Chapitre 3: Thermodynamique des Vapeurs et de l'Air Humide 2 semaines
Thermodynamique des Vapeurs (Changement de Phase d'un Corps Pur, Calcul des Variables d'Etat, Titre en Vapeur, Diagrammes et Tables Thermodynamiques), Air Humide (Caractérisation de l'air humide, Diagramme de Mollier, Opérations élémentaires sur l'air humide).

Chapitre 4: Compression des Gaz 2 semaines
Classification des Machines de Compression, Compression Isentropique, Compression Polytropique, Compresseurs à Pistons, Compresseur Volumétriques Rotatifs (Définitions).

Chapitre 5: Détente des Gaz 2 semaines
Machines de Détente, Détente adiabatique, Détente non adiabatique, Travail, Rendement et Puissance Produite, Compresseur Volumétriques Rotatifs

Chapitre 6: Cycles Moteurs 3 semaines
Cycle de Carnot, Cycle Otto, Cycle Diesel, Cycle de Brayton, Turbines à Vapeur, Cycle de Rankine (Cycle à resurchauffe, Cycle à soutirages, Cogénération)

Chapitre 7: Cycles Frigorifiques 3 semaines