

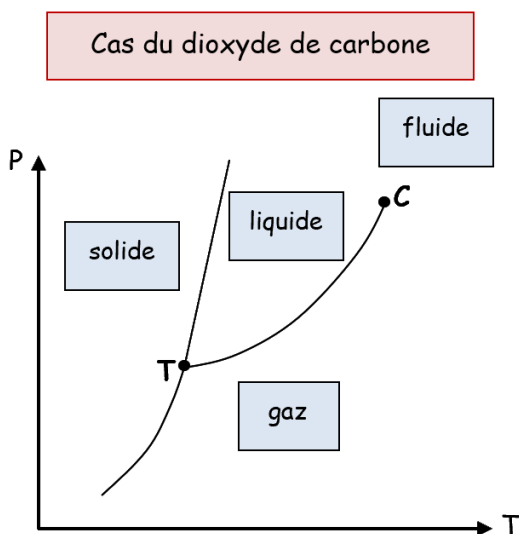
Chapitre 1 : Systèmes ouverts en régime stationnaire

I. Etude des systèmes fermés : Rappels de MPSI

1. Corps pur sous deux phases

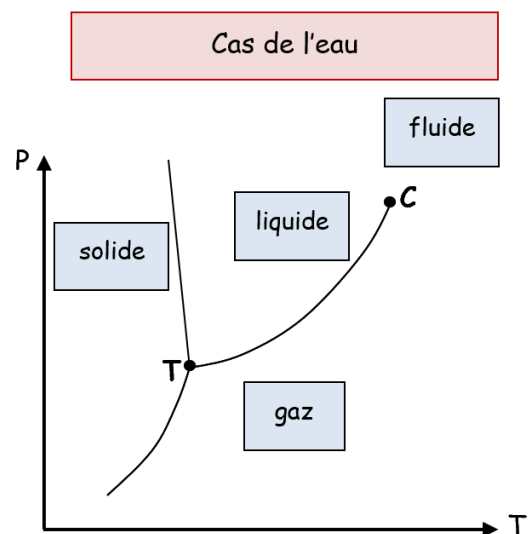
Changements de phases :

Diagramme d'état (P, T) :



T : point triple.

C : point critique.



2. Energie interne

Définition :

L'énergie interne d'un système est la somme des énergies cinétiques microscopiques et de l'énergie potentielle microscopique due aux interactions moléculaires.

Propriétés :

- L'énergie interne est une fonction d'état.
- L'énergie interne est une grandeur additive.
- L'énergie interne est définie à une constante additive près car toute énergie potentielle est définie à une constante additive près. Dans le cas d'un gaz parfait, il n'y a pas d'interaction entre les particules. L'énergie potentielle est nulle et l'énergie interne est définie sans constante additive.

Définition :

Capacité thermique à volume constant :

Première loi de Joule :

Pour un gaz parfait, l'énergie interne ne dépend que de la température.

Gaz parfait monoatomique :

3. Enthalpie

Définition :

L'enthalpie d'un système est définie par :

Définition :

Capacité thermique à pression constante :

Seconde loi de Joule :

Pour un gaz parfait, l'enthalpie ne dépend que de la température.

Gaz parfait monoatomique :

Relation de Mayer :

Pour un gaz parfait, on a :

Phase condensée :

Corps pur sous deux phases : On considère un corps pur sous deux phases 1 et 2.

Chaleur latente de changement d'état :

On appelle enthalpie massique de changement d'état à la température T , notée $l_{1 \rightarrow 2}$, la variation d'enthalpie de l'unité de masse de corps pur lors de la transition de phase $1 \rightarrow 2$ sous la pression $P^*(T)$:

$$l_{1 \rightarrow 2}(T) = h_2(T) - h_1(T) = \Delta h_{1 \rightarrow 2}(T) \quad (1)$$

$l_{1 \rightarrow 2}$ s'exprime en J.kg^{-1} .

Si on note Δm_2 la variation algébrique de masse dans la phase 2, on a :

$$\Delta H = \Delta m_2 l_{1 \rightarrow 2}$$

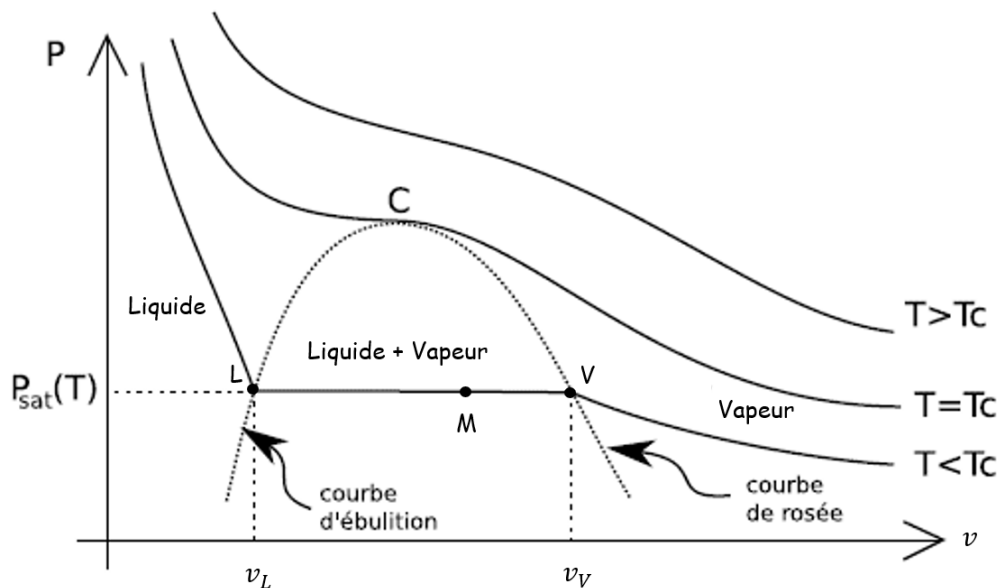
Equilibre liquide vapeur :

Pour une évolution isotherme, on obtient les isothermes d'Andrews.

Trois cas se présentent :

- La température est supérieure ou égale à la température critique : c'est le domaine du fluide, il n'y a pas de différence entre la vapeur et le liquide.
- La température est comprise entre la température critique et la température triple : le volume varie à pression constante lors du palier de changement d'état. $P = P^*(T)$ (pression de vapeur saturante).

- La température est inférieure à la température triple : le liquide n'existe plus. On ne peut avoir l'équilibre liquide - vapeur. L'isotherme triple est donc la dernière isotherme.



Théorème des moments :

Titre massique en vapeur : $x_V = \frac{m_V}{m_V + m_0}$

$$\underbrace{(1 - x_V)}_{\text{titre en liquide}} \overline{LM} = \underbrace{x_V}_{\text{titre en vapeur}} \overline{MV} \quad (2)$$

Ou

$$x_V = \frac{v - v_L}{v_V - v_L} = \frac{\overline{LM}}{\overline{LV}} \quad (3)$$

4. Entropie

L'entropie est une fonction mesurant le désordre d'un système.

Variation d'entropie d'un gaz parfait :

Evolution isentropique d'un gaz parfait : Lois de Laplace

Phase condensée :

Transition de phase d'un corps pur :

Etat initial	Etat final
<u>Phase 1 :</u> - Température T - Pression P - Nombre de moles : n_1 - Masse : m_1	<u>Phase 1 :</u> - Température T - Pression P - Nombre de moles : $n_1 - \Delta n$ - Masse : $m_1 - \Delta m$
<u>Phase 2 :</u> - Température T - Pression P - Nombre de moles : n_2 - Masse : m_2	<u>Phase 2 :</u> - Température T - Pression P - Nombre de moles : $n_2 + \Delta n$ - Masse : $m_2 + \Delta m$

Variation d'entropie :

5. Bilans d'énergie : premier principe

Enoncé du premier principe :

Soit un système fermé.

- Evolution entre deux instants t_1 et t_2 :

- Transformation infinitésimale entre t et $t + dt$:

Avec E_c l'énergie cinétique macroscopique, W le travail des forces extérieures et Q la chaleur échangée avec l'extérieur.

Remarques :

- W et Q sont des grandeurs algébriques. Elles dépendent du chemin suivi par le système au cours de son évolution. Il ne s'agit pas de variations mais de grandeurs reçues par le système.
- δW est le travail élémentaire des forces extérieures et δQ est le transfert thermique élémentaire.
- U et E_c sont des fonctions d'état du système. Elles apparaissent sous forme de variations qui ne dépendent que de l'état initial et de l'état final du système.

Travail des forces pressantes :

Evolution monobare :

Le premier principe s'écrit :

6. Bilans d'entropie : second principe

Enoncé du second principe :

Pour un système fermé, le second principe s'écrit :

— Evolution entre deux instants t_1 et t_2 :

- $S_{\text{crée}} = 0$ pour une évolution réversible et $S_{\text{crée}} > 0$ sinon
- $S_{\text{échangée}} = 0$ pour une évolution adiabatique
- Pour une évolution monotherme au contact avec une source de température T_s :

— Transformation infinitésimale entre t et $t + dt$:

- $\delta S_{\text{crée}} = 0$ pour une évolution réversible et $\delta S_{\text{crée}} > 0$ sinon
- $\delta S_{\text{échangée}} = 0$ pour une évolution adiabatique
- Pour une évolution monotherme au contact avec une source de température T_s :

7. Machines thermiques

Machine thermique :

Une machine thermique permet une conversion d'énergie thermique en énergie mécanique et inversement. Elle fonctionne en continu et effectue donc des cycles. Un fluide circule entre ces différents organes. Les transformations, que subit le fluide, permettent les échanges énergétiques entre la machine et l'extérieur.

Moteur thermique :

Une machine thermique est un moteur si elle fournit un travail. Le travail échangé au cours d'un cycle par la machine est négatif.

Exemple : moteur à explosion.

Récepteur thermique :

Un récepteur est une machine qui reçoit du travail. Le travail échangé au cours d'un cycle par la machine est positif. Exemple : climatiseur, réfrigérateur.

On étudie les machines thermiques sur un cycle. Le système étudié est le fluide circulant dans la machine. Il échange avec des sources thermiques à la température T_i .

Le premier principe nous donne :

$$\Delta U = 0 = W + \sum_i Q_i$$

Le second principe nous donne :

$$\Delta S = 0 = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} + \underbrace{S_c}_{\geq 0}$$

Machine monotherme :

Une machine monotherme n'échange de la chaleur qu'avec une seule source de chaleur à la température T_0 .

Le second principe donne :

Conclusion :

Un moteur monotherme est impossible.

Un cycle monotherme réversible est caractérisé par : $W = Q_0 = 0$.

Machine ditherme :

On appelle machine ditherme une machine qui effectue des transferts de chaleur avec :

- Une source chaude, de température T_C
- Une source froide, de température T_F avec $T_F < T_C$.

L'efficacité d'une machine thermique ditherme est inférieure à l'efficacité de Carnot. L'efficacité de Carnot est atteinte pour une machine évoluant réversiblement.

Machine	Moteur	Réfrigérateur	Pompe à chaleur
Signe de Q_C	$Q_C > 0$	$Q_C < 0$	$Q_C < 0$
Signe de Q_F	$Q_F < 0$	$Q_F > 0$	$Q_F > 0$
Signe de W	$W < 0$	$W > 0$	$W > 0$
Grandeur utile	W	Q_F	Q_C
Grandeur coûteuse	Q_C	W	W
Efficacité	$e = -\frac{W}{Q_C}$	$e = \frac{Q_F}{W}$	$e = -\frac{Q_C}{W}$
Efficacité maximale	$e_{\max} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$	$e_{\max} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$	$e_{\max} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$

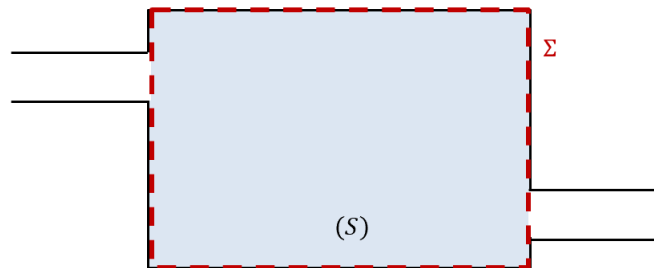
II. Etude des systèmes ouverts

1. Système ouvert

Définition :

Un système (S) est ouvert s'il échange de la matière avec l'extérieur.

Il est délimité par une surface Σ qui est traversée par de la matière.



On limite notre étude aux écoulements unidimensionnels.

Définition :

Le régime est stationnaire lorsque les caractéristiques du système ouvert (S) sont invariantes dans le temps.

2. Débit massique

Définition :

Le débit massique à travers une surface orientée $\vec{S}$ est la quantité de masse δm qui traverse la surface S par unité de temps : L'unité SI de D_m est le kg.s^{-1} .

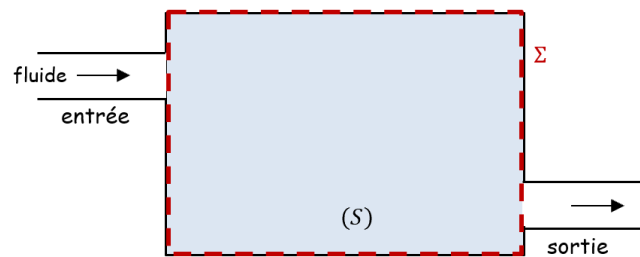
On note D_{me} et D_{ms} les débits massiques respectivement d'entrée et de sortie.

Entre t et $t + dt$, la masse entrant dans le système est : Entre t et $t + dt$, la masse sortant dans

le système est : On se limite à l'étude de systèmes ouverts en régime stationnaire.

3. Description du système

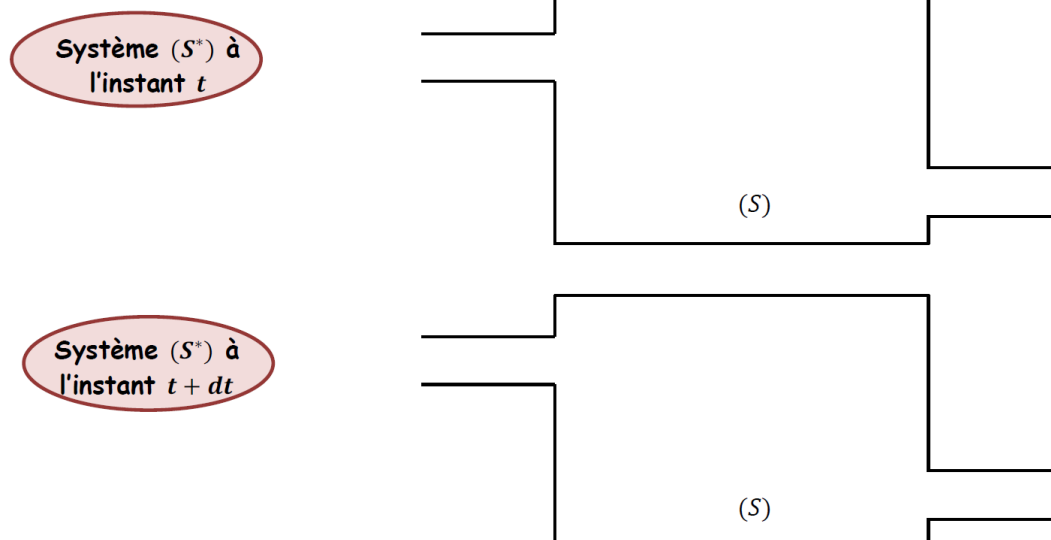
On considère le système (S) ouvert délimité par la surface Σ fixe. On étudie ce système en régime stationnaire.



Caractéristiques du fluide à l'entrée	Caractéristiques du fluide à la sortie
Température T_1	Température T_2
Pression P_1	Pression P_2
Vitesse c_1	Vitesse c_2
Altitude z_1	Altitude z_2
Volume massique v_1	Volume massique v_2
Energie interne massique : u_1	Energie interne massique : u_2

Les principes de la thermodynamique ont été énoncés pour des systèmes fermés. Pour pouvoir les appliquer, on construit un système fermé (S^*) à partir de (S) de la manière suivante :

- à l'instant t , le système est constitué de (S) et des particules qui entrent dans (S) entre t et $t + dt$: $(S^*)(t) = (S) \cup (S_1)$
- à l'instant $t + dt$, le système est constitué de (S) et des particules qui sortent de (S) entre t et $t + dt$: $(S^*)(t + dt) = (S) \cup (S_2)$



Bilan de masse :**4. Premier principe****a. Travail des forces pressantes**

Le système fermé reçoit du travail par le travail des forces pressantes amont et aval mais aussi par l'intermédiaire de parties mobiles (hélices, ailettes...) au cœur du système ouvert. On note δW_u ce travail reçu entre t et $t + dt$.

Définition :

Le travail utile massique w_u est défini par :

Travail du fluide amont entre t et $t + dt$: Travail du fluide aval entre t et $t + dt$: Travail des

forces pressantes :

b. Bilan d'énergie : premier principe

Entre t et $t + dt$, le système fermé reçoit le transfert thermique δQ .

Définition :

Le transfert thermique massique q est défini par :

Système : (S^*) fermé

Définition :

L'énergie mécanique massique s'écrit :

$$e = e_c + e_p = gz + \frac{1}{2}c^2 \quad (4)$$

Premier principe pour un système ouvert en régime stationnaire :

$$\Delta_{\text{entrée} \rightarrow \text{sortie}} h + \Delta_{\text{entrée} \rightarrow \text{sortie}} e = w_u + q \quad (5)$$

A partir d'un bilan temporel entre t et $t + dt$ sur un système fermé, nous avons obtenu un premier principe faisant intervenir une variation spatiale entre l'entrée et la sortie du système ouvert.

5. Second principe

Bilan d'entropie :

Second principe :

Définition :

L'entropie échangée s_e par unité de masse est définie par : L'entropie créée s_c par unité de masse est définie par :

Second principe pour un système ouvert en régime stationnaire :

$$\Delta_{\text{entrée} \rightarrow \text{sortie}} s = s_e + s_c \quad (6)$$

III. Utilisation de diagramme pour l'étude de machines thermiques réelles

1. Diagramme pression-enthalpie (P, h)

Définition :

Dans un diagramme pression (P, h), la pression est placée en ordonnée, souvent en échelle logarithmique et l'enthalpie massique en abscisse.

Conséquences :

Une évolution isobare est représentée par un segment horizontal.

Une évolution isenthalpique est représentée par un segment vertical.

Le diagramme (P, h) de l'eau est représenté en annexe 2.

Zones du diagramme :

On schématise le diagramme afin de faire apparaître les différentes zones et les différentes courbes. Trois zones apparaissent :

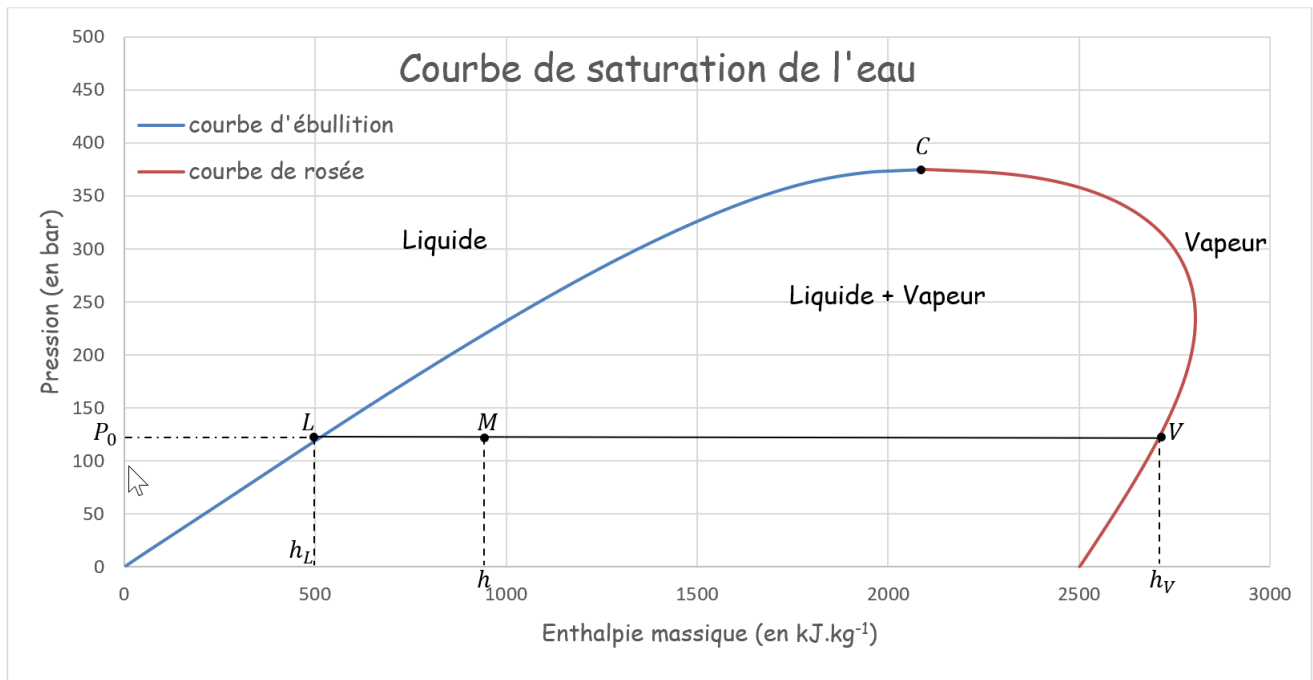
- une zone monophasée liquide
- une zone monophasée vapeur
- une zone diphasée liquide-vapeur

Ces zones sont séparées par des courbes :

- courbe d'ébullition : séparant les zones liquide et liquide-vapeur
- courbe de rosée : séparant les zones liquide-vapeur et vapeur

Ces deux courbes se rejoignent au point critique C .

L'ensemble de ces deux courbes constitue la courbe de saturation.



On considère un système diphasé à la température P_0 représenté par le point M sur le graphe ci-dessus. On note x le titre massique en vapeur du mélange. On cherche à calculer ce titre connaissant la position de M sur le graphe.

L'enthalpie du système s'écrit :

2. Réseaux de courbes

Sur ces diagrammes, on trace des réseaux de courbes :

- Courbes isothermes : ces courbes sont horizontales dans la partie liquide+vapeur. Elles sont décroissantes dans les zones liquide et vapeur.
- Courbes isochores : ce sont des courbes croissantes avec une rupture de pente à la traversée de la courbe de rosée.
- Courbes isentropiques : ce sont des courbes croissantes sans rupture de pente à la traversée de la courbe de rosée.
- Courbes isotitres