

CHAPITRE 2

SYSTEME, ETAT ET TRANSFORMATION

I. NOTION DE SYSTEME

1. Système

Un système est **le corps** ou **l'ensemble de corps** que l'on étudie. On le sépare de l'extérieur par une paroi imaginaire à travers laquelle se produisent les échanges entre le système et l'extérieur: matière et énergie (sous forme de travail et de chaleur).

2. Système isolé

Un **système isolé** est un système pour lequel il n'y a **aucun échange avec l'extérieur** (ni d'énergie sous forme de travail ou de chaleur, ni de matière); l'univers est un exemple de système isolé.

3. Système fermé

Un **système fermé** est un système n'échangeant **pas de matière** avec l'extérieur mais qui échange de l'énergie; le moteur à combustion interne est un exemple de système fermé. La compression, la combustion, la détente se déroulant sous soupapes fermées.

4. Système ouvert

Un **système ouvert** est un système pour lequel il y a **échange de matière** et de l'énergie avec l'extérieur; les turbines sont des exemples de systèmes ouverts.

Dans ces systèmes on constate l'apparition d'un débit de matière .

II. CONVENTION DE SIGNE

Ce qui est **reçu** par le système étudié sera compté **positivement** alors que ce qui est **cédé** sera considéré comme **négatif**. Pour un **moteur** $W < 0$.

III. ETAT D'EQUILIBRE

1. Notion d'équilibre

Un système est en **équilibre** thermodynamique lorsque les **paramètres** le définissant sont **constants**: Pour un système thermodynamique ces paramètres sont la **température T**, la **pression P**, le **volume V**, et la **structure St** (arrangement des atomes dans la molécule et des molécules entre elles).

2. Equilibre stable

Un système est en **équilibre stable** lorsque, même écarté sensiblement de cet équilibre, il y retourne dès qu'il est laissé à lui-même.

3. Equilibre instable

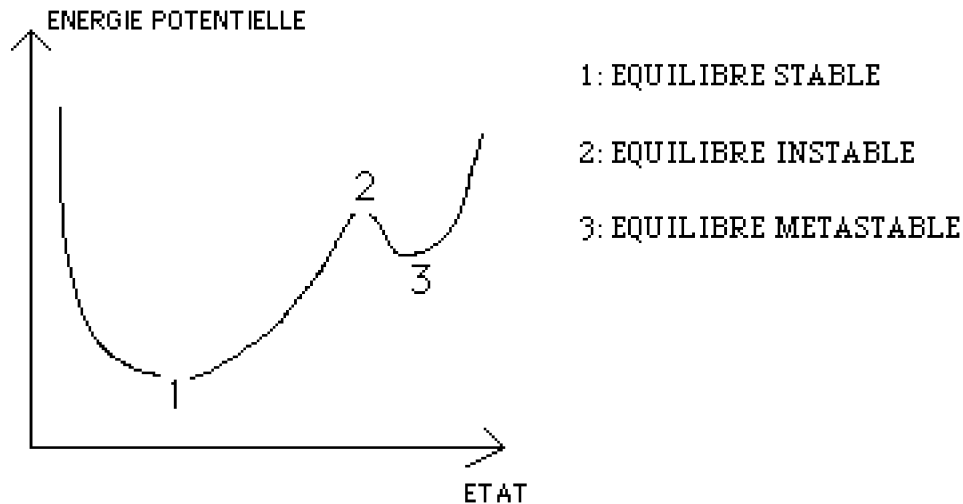
Un système est dans un état d'équilibre instable lorsqu'une impulsion suffit à le faire passer dans un état d'équilibre plus stable.

4. Equilibre métastable

Un système est dans un état d'équilibre métastable lorsque, s'il est écarté suffisamment de cet état, il passe dans un état d'équilibre plus stable.

Ex : équilibre mécanique

2



IV. VARIABLES THERMODYNAMIQUES

Les variables thermodynamiques sont:

la **température** :

T

Le **volume** :

V

La **pression** :

P

La **Structure** :

St.

On distingue les variables intensives des variables extensives. Une variable **extensive** est une variable qui dépend de la quantité de matière: **V**.

Une variable **intensive** est une variable qui ne dépend pas de la quantité de matière: **T, P**

En thermodynamique il y a toujours une relation entre les variables T, P et V:

$$f(P, V, T) = 0$$

exemple: dans le cas des **gaz parfaits** on a $PV = nRT$

avec n = nombre de moles et R = constante universelle $R = 8,3144 \text{ J/Mole. K}$

Le paramètre structure est traité séparément.

V. TRANSFORMATIONS

Une transformation correspond à une variation des paramètres. On supposera que ces paramètres peuvent toujours être définis tout au long des transformations.

1. Transformations ouvertes (1)

Une transformation ouverte est une transformation où l'état final du système est différent de l'état initial.

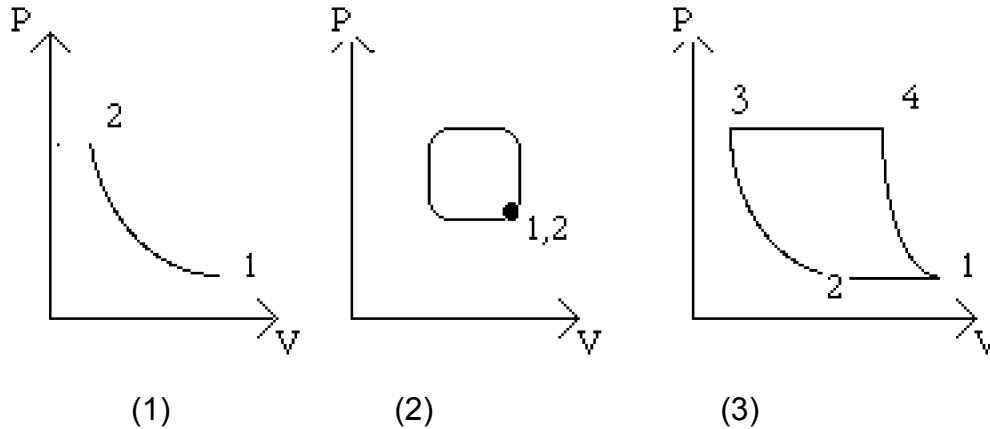
2. Transformations fermées (2)

Une transformation fermée est une transformation où l'état final est identique à l'état initial.

3. Notion de cycle thermodynamique (3)

Un cycle thermodynamique est une suite de transformations ouvertes.

3



4. Notion de transformation réversible

Une transformation réversible est une transformation qui peut se décrire dans les deux sens.

Tous les états dans lesquels se trouve le système sont des états d'équilibre. Si l'on inverse l'échelle des temps, la transformation est inversée (le système repasse par les mêmes états d'équilibre). Une telle transformation est idéale et ne correspond pas à la réalité. Les transformations réversibles fournissent un travail maximum avec en général un échange de chaleur nul.

Une transformation réversible est infiniment lente. Les transformations quasi statiques approchent ainsi de la transformation réversible: le système évolue en passant par une suite d'états d'équilibre aussi rapprochés que l'on veut.

Au cours de ces transformations, les valeurs des paramètres sont toujours définis.

5. Notion de transformation irréversible

Une transformation irréversible est une transformation qui ne passe pas par une suite d'états d'équilibres: elle ne peut donc se décrire dans les deux sens. Les transformations totalement irréversibles fournissent un travail nul avec un échange de chaleur maximal; les irréversibilités sont la cause du phénomène d'hystérésis.

Les transformations spontanées, qui fournissent essentiellement de la chaleur, sont essentiellement irréversibles (combustion d'essence ou de gaz à l'air libre). Pour en tirer un travail on les rend en partie réversibles (combustion dans un moteur, dans une pile).

Dans ces transformations, les paramètres ne sont pas toujours définis, un paramètre n'ayant pas forcément la même valeur en tout les points du système en un instant donné (par exemple, lors de la combustion, il y a propagation d'un front de combustion, la température en amont de ce front est différente de la température en aval). Pour pouvoir continuer l'étude de telles transformations, on suppose alors une température moyenne.

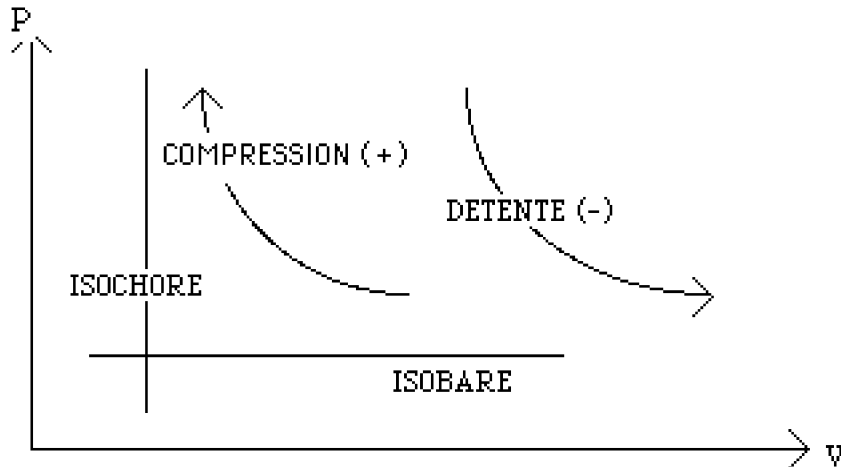
VI. DIAGRAMME DE CLAPEYRON

Pour étudier les transformations subies par un gaz, on utilise les paramètres P , V et T . Comme ils sont liés entre eux ($f(P, V, T) = 0$), 2 paramètres suffisent pour étudier le système.

Il existe 3 couples de variables thermodynamiques: (T, P) ; (T, V) ; (P, V)

Chacun de ces couples permet de suivre l'évolution thermodynamique d'un système. La représentation des variations de la pression en fonction du volume donne le diagramme de **CLAPEYRON**, très utilisé (diagramme P, V)

4



VII. TRAVAIL

Pour exprimer le travail mécanique W dans le cas d'une transformation thermodynamique, on utilise les paramètres P et V .

Formule générale: $W = F.L$

Sous forme différentielle

$$\delta W = F.dl$$

$$\delta W = P.S dl$$

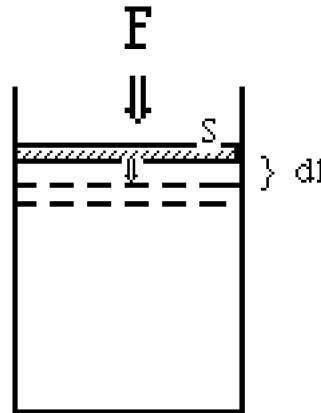
d'où d'après la convention de signe:

$$\delta W = -P.dV$$

P étant la pression du système. P est fonction des autres paramètres et notamment de V :

$P = f(V)$ et on a donc:

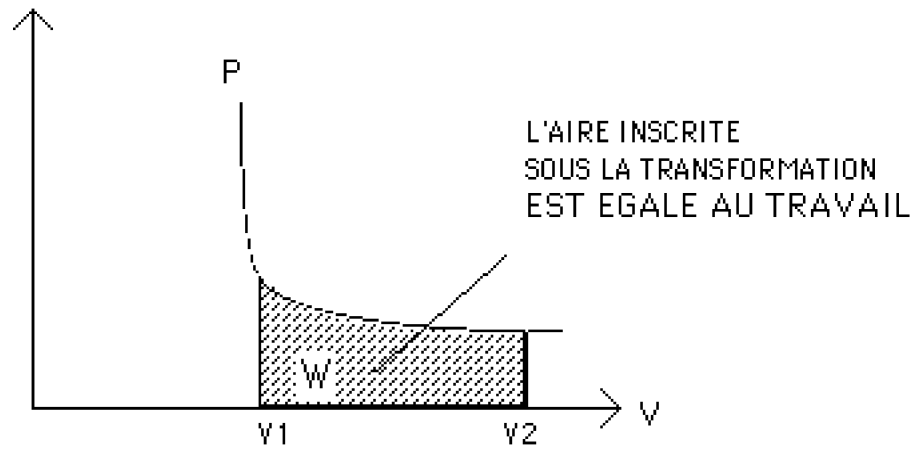
$$\boxed{\delta W = -P(V) dV}$$



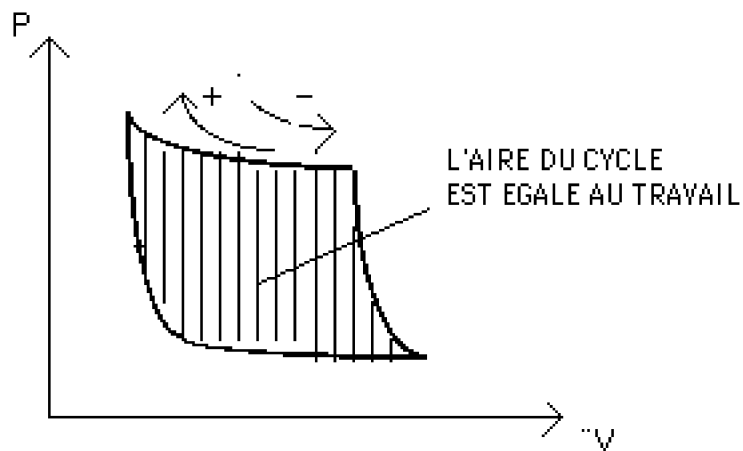
Pour calculer W , il est nécessaire de connaître cette fonction $P(V)$, c'est à dire de connaître le chemin suivi par la transformation, le travail échangé n'est pas une fonction d'état:

$$\boxed{W = \int_{P(V)} -P(V) dV}$$

Cette relation est valable pour des transformations réversibles puisqu'elle suppose la définition de la fonction $P(V)$. Dans ce cas la pression extérieure est égale à la pression du système. Le calcul se fait avec la pression du système.



Pour une telle transformation et dans le cas d'un cycle tracé dans le diagramme de Clapeyron, l'aire du cycle est égale à W , le signe étant donné par le sens de parcours :



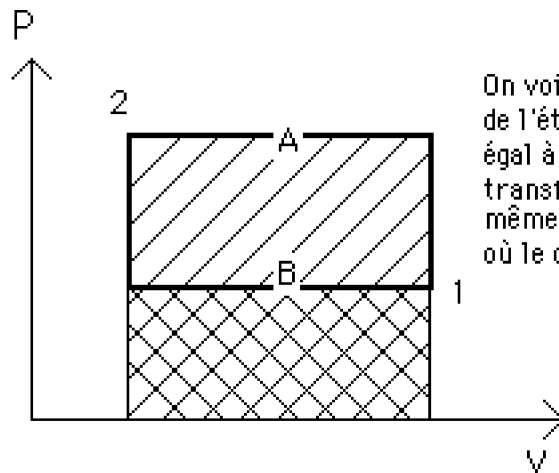
Pour une transformation isochore $W = 0$

Pour une transformation isobare, $W = P (V_1 - V_2)$

Le travail W est le travail total échangé entre le système et l'extérieur, c'est le travail moteur dans le cadre d'un système fermé.

W dépend du chemin suivi entre les deux états, ce n'est pas une fonction d'état.

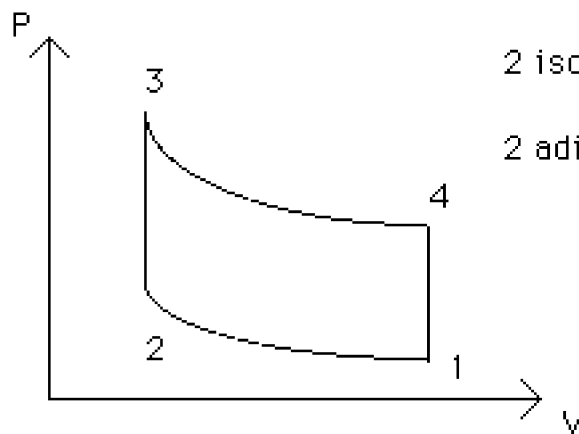
6



On voit bien que pour aller de l'état 1 à l'état 2, le travail, égal à l'aire inscrite sous la transformation, n'est pas le même si l'on prend le chemin A où le chemin B

Exemple de cycle pour un **système fermé**:

Moteur à allumage commandé: CYCLE DE BEAU DE ROCHAS (OTTO)



2 isochores 2,3 et 4,1

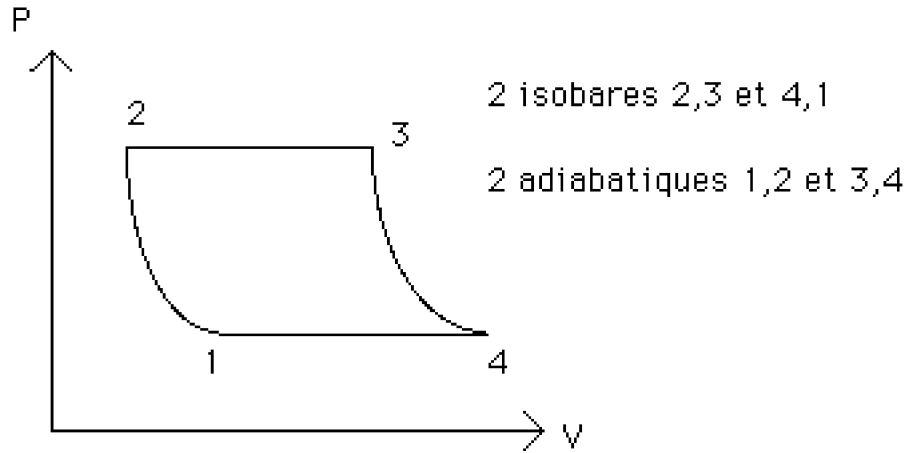
2 adiabatiques 1,2 et 3,4

VIII. TRAVAIL AVEC TRANSVASEMENT (SYSTEME OUVERT)

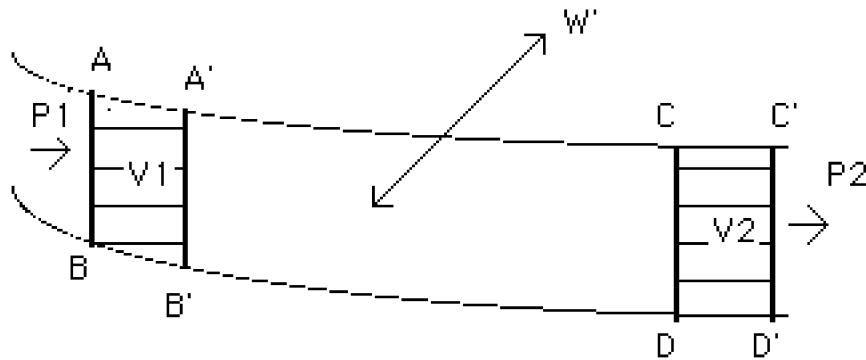
Exemple de **système ouvert**: les **turbines**, les **compresseurs**.

Par exemple, le cycle théorique des transformations qui se déroulent dans une turbine à gaz est le **CYCLE DE JOULE**

7



Calcul du travail mécanique dans un système ouvert, W' :



Le travail total échangé entre le système et l'extérieur W est égal au travail moteur W' (récupéré sur l'arbre d'une turbine par exemple, où fourni par un compresseur) plus le travail dû à l'écoulement du fluide, travail de transvasement, égal à $P_1 V_1 - P_2 V_2$.

$$W = P_1 V_1 - P_2 V_2 + W'$$

$$W' = W + P_2 V_2 - P_1 V_1$$

l'utilisation de la formule d'intégration par partie donne:

$$d(PV) = PdV + VdP \rightarrow \int_1^2 d(PV) = \int_{V_1}^{V_2} P dV + \int_{P_1}^{P_2} V dP = P_2 V_2 - P_1 V_1$$

$$\text{soit} \quad -W + W' = P_2 V_2 - P_1 V_1$$

$$W' = W + P_2 V_2 - P_1 V_1 = \int_{V_1}^{V_2} -P dV + P_2 V_2 - P_1 V_1 = \int_{P_1}^{P_2} V dP$$

Travail total

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} P(V) dV$$

Travail avec transvasement

$$W' = \int_{P_1}^{P_2} V(P) dP$$

C'est le travail moteur dans le cas d'un système ouvert (travail récupéré sur l'arbre d'une turbine).

Autres formes de travail

Linéaire $\delta W = F dL$

Surface $\delta W = A dS$

Fluide $\delta W = -P dV$

Couple $\delta W = C d\omega$

Electrique $\delta W = E dq$

Magnétique $\delta W = B dM$

Remarquons que l'expression différentielle du travail est toujours égale à une grandeur intensive multipliée par la différentielle d'une grandeur extensive.