Cours I : Thermodynamique

<u>Programme officiel</u> : On montre l'intérêt des écoulements permanents dans le cadre de systèmes industriels.

2 Thermodynamique industrielle des fluides en régime permanent d'écoulement

2.1 Thermodynamique des fluides en régime permanent d'écoulement

2.1.1 Définition d'un système ouvert

<u>Définition :</u>
Un système est **ouvert** s'il échange de la matière avec l'extérieur, contrairement à un système **fermé**. Cependant, il peut y avoir transfert d'énergie dans les deux cas (contrairement à un système **isolé**).

Types de systèmes ouverts utilisés au quotidien :

- pompes de circulation d'eau des installations de chauffage central
- chaudières
- moteurs

Les fluides sont admis par des accès (les entrées) et rejetés par d'autres accès (les sorties) après avoir subi un échange d'énergie ou une réaction chimique.

2.1.2 Débit massique

<u>Définition :</u>
On peut définir à chaque instant le **débit massique**, Dm, à travers une surface S comme le rapport de la masse δm, comptée algébriquement, qui traverse S entre les instants t et t+dt par :

$$D_m = \frac{\delta m}{dt} \qquad (1)$$

Avec :	D_m	=	Débit massique en $kg.s^{-1}$
	δm	=	Masse du système qui traverse S pendant dt en kg
	dt	=	Intervalle de temps en s

Si l'on raisonne sur un système Σ comportant N accès. La masse est conservative. Donc, si l'on somme les débits massiques D_{mk} entrant dans Σ par les différents accès k à l'instant t, on peut considérer que la masse total m contenue dans Σ s'accroit entre t et t+dt de dm par :

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{k=1}^{N} D_{m_k} \qquad (2)$$

Avec :	m	=	Masse total contenue dans Σ en kg
	dt	=	Intervalle de temps en s
	D_{mk}	=	Débit massique de l'accès k en $kg.s^{-1}$

2.1.3 Régime permanent

Exemple : chaudière de chauffage central. Elle possède deux régimes de fonctionnement :
- mise en route de la chaudière : l'eau est froide et va chauffer -> régime non permanent
- stabilisation du fonctionnement : les eaux admises et rejetées ont atteint une température stable dans le temps -> régime permanent

Définition :
Le **régime permanent** est défini comme le fonctionnement au cours duquel toute grandeur intensive est constante dans le temps, en tout point donné du système.

Un tel régime n'est souvent qu'un modèle. On peut néanmoins souvent étudier le régime nominal de fonctionnement dans l'approximation du régime permanent.

2.1.4 Conservation de la masse

Lors du régime permanent, la masse volumique du fluide conservant en tout point du système Σ une valeur constante dans le temps, la masse m(t) du système ne varie plus. On a donc :

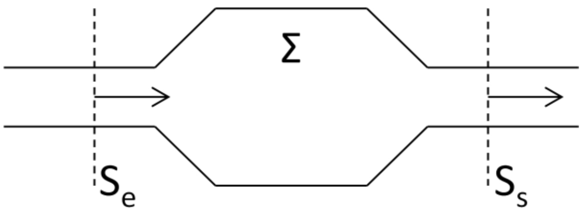
$$\sum_{k=1}^{N} D_{m_k} = 0 \qquad (3)$$

Avec : D_{mk} = Débit massique de l'accès k en $kg.s^{-1}$

Pour un système ne comportant qu'une entrée et une sortie, la conservation de la masse se traduit par :

$$D_{m_e} = D_{m_s} = D_m \qquad (4)$$

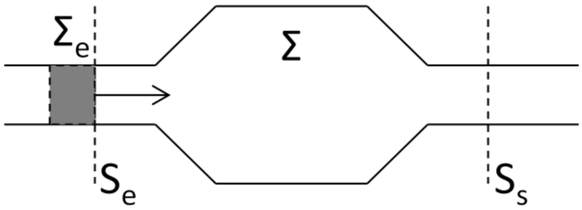
Avec : D_{me} = Débit massique en entrée du système Σ en $kg.s^{-1}$
D_{ms} = Débit massique en sortie du système Σ en $kg.s^{-1}$
D_m = Débit massique du système Σ en $kg.s^{-1}$



2.1.5 Bilan d'énergie en régime permanent

Soit un système ouvert Σ fonctionnant en régime permanent, comportant une entrée et une sortie. On observe son évolution entre t et t+dt. On néglige les énergies cinétiques et potentielles macroscopique.

A l'instant t : on a une réunion de Σ et Σ_e
- fluide contenu dans Σ à t
- fluide entrant dans Σ pendant dt

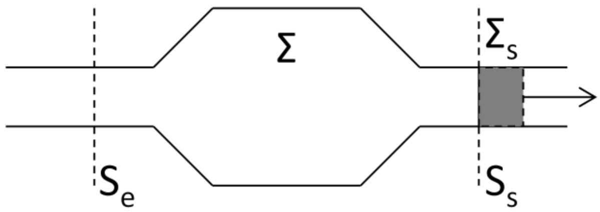


La masse du fluide dans Σ_e est :

$$dm = D_m dt = \mu_e v_e S_e dt$$

Avec : m = Masse total contenue dans Σ en kg
D_m = Débit massique en kg.s^{-1}
dt = Intervalle de temps en s
μ_e = Masse volumique du fluide dans Σ_e en kg.m^{-3}
v_e = Vitesse du fluide entrant dans Σ en m.s^{-1}
S_e = Section d'entrée de Σ en m^2

A l'instant t+dt : on a une réunion de Σ et Σ_s
- fluide contenu dans Σ à t+dt
- fluide sortant dans Σ pendant dt



On est en régime permanent : la masse de fluide dans Σ_s est égale à la masse de fluide dans Σ_e.

Prenons maintenant le système Σ', réunion de Σ et Σ_e à l'instant t et de Σ et Σ_s à l'instant t+dt. Ce système est un système fermé.
Le travail total reçu par Σ' est donné par :

$$\delta W = P_i dt + \frac{P_e}{\mu_e} dm - \frac{P_s}{\mu_s} dm \qquad (5)$$

Avec : δW = Travail total reçu par Σ' en J
P_i = **Puissance mécanique indiquée** en W : puissance reçue par le système, à l'exception de celle qui correspond aux forces pressantes, exercées par les fluides en amont et en aval. Les forces pressantes en amont et en aval sont définies par le produit de la pression par l'aire de la section.
dt = Intervalle de temps en s
P_e = Pression exercée en entrée en Pa
μ_e = Masse volumique du fluide en entrée en kg.m^{-3}
m = Masse total contenue dans Σ en kg
P_s = Pression exercée en sortie en Pa
μ_e = Masse volumique du fluide en sortie en kg.m^{-3}

2.1.6 Formulation du premier principe

Sur le système Σ', on a :

$$U_{\Sigma'}(t+dt) - U_{\Sigma'}(t) = \delta W + \phi_e dt \qquad (6)$$

Avec : $U_{\Sigma'}$ = Energie interne du système Σ' en J
δW = Travail total reçu par Σ' en J
ϕ_e = **Puissance (ou flux) thermique** en W reçu par le système à travers sa frontière

dt = Intervalle de temps en s

L'énergie interne est extensive, la réunion de deux systèmes donne la somme des énergies internes. On a donc :

$$U_{\Sigma'}(t+dt) = U_{\Sigma}(t+dt) + dm.u_{\Sigma_s}$$

$$U_{\Sigma'}(t) = U_{\Sigma}(t) + dm.u_{\Sigma_e}$$

Avec : $u_{\Sigma e}$ = Energie interne massique du système Σ_e en $J.kg^{-1}$
$u_{\Sigma s}$ = Energie interne massique du système Σ_s en $J.kg^{-1}$

Le régime est permanent, d'où :

$$U_{\Sigma}(t+dt) = U_{\Sigma}(t)$$

On a donc :

$$dm(u_{\Sigma_s} - u_{\Sigma_e}) = \delta W + \phi_e dt$$

En utilisant l'enthalpie massique avec :

$$h = u + \frac{P}{\mu}$$

On obtient :

$$dm(h_s - h_e) = P_i dt + \phi_e dt$$

Avec : h_e = Enthalpie massique du système Σ_e en $J.kg^{-1}$
h_s = Enthalpie massique du système Σ_s en $J.kg^{-1}$

Soit finalement :

$$\boxed{D_m(h_s - h_e) = P_i + \phi_e} \quad (7)$$

Avec : D_m = Débit massique en $kg.s^{-1}$
h_s = Enthalpie massique du système Σ_s en $J.kg^{-1}$
h_e = Enthalpie massique du système Σ_e en $J.kg^{-1}$
P_i = Puissance mécanique indiquée en W
ϕ_e = Puissance (ou flux) thermique en W reçu par le système

Ceci nous donne par unité de masse la formulation du premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert dont on néglige les énergies cinétiques et potentielles :

$$\boxed{h_s - h_e = \omega_i + q_e} \quad (8)$$

Avec : h_s = Enthalpie massique du système Σ_s en $J.kg^{-1}$
h_e = Enthalpie massique du système Σ_e en $J.kg^{-1}$
ω_i = **Travail massique indiqué** en $J.kg^{-1}$
q_e = **Transfert thermique massique** reçu en $J.kg^{-1}$

2.1.7 Prise en compte du mouvement

L'énergie cinétique totale du système est la somme de l'énergie cinétique d'agitation thermique E_c* et de l'énergie cinétique macroscopique (égale à $\frac{1}{2}mv^2$).

On a donc pour une masse m :

$$E_c = E_c^* + \frac{1}{2}mv^2 \quad (9)$$

Avec :	E_c	=	Energie cinétique total du système en J
	E^*_c	=	Energie cinétique d'agitation thermique en J
	m	=	Masse du système en kg
	v	=	vitesse du système en $m.s^{-1}$

L'énergie potentielle totale d'un fluide est la somme de l'énergie potentielle d'interaction E_{pint}, forces intérieures exercées mutuellement par les particules du fluide et de l'énergie potentielle de pesanteur (égale à mgz).

Seules l'énergie cinétique d'agitation thermique et l'énergie potentielle d'interaction entre particules du fluide sont comptées dans l'énergie interne par :

$$U = E_c^* + E_{p_{\text{int}}} \quad (10)$$

Avec :	U	=	Energie interne du système en J
	E^*_c	=	Energie cinétique d'agitation thermique en J
	E_{pint}	=	Energie potentielle d'interaction en J

L'énergie mécanique totale s'écrit :

$$E_m = U + \frac{1}{2}mv^2 + mgz \quad (11)$$

Avec :	Em	=	Energie mécanique total du système en J
	U	=	Energie interne du système en J
	m	=	Masse du système en kg
	v	=	Vitesse du système en $m.s^{-1}$
	g	=	Constante de pesanteur en $m.s^{-2}$
	z	=	Altitude du système en m

Le premier principe traduit la conservation d'énergie, il doit donc inclure toute les formes d'énergies cinétiques et potentielles. Soit au final :

$$(h_s + \frac{1}{2}v_s^2 + gz_s) - (h_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gz_e) = \omega_i + q_e \quad (12)$$

Avec :	h_s	=	Enthalpie massique du système Σ_s en $J.kg^{-1}$
	v_s	=	Vitesse du fluide en sortie en $m.s^{-1}$
	g	=	Constante de pesanteur en $m.s^{-2}$

z_s	=	Altitude du fluide en sortie en m
h_e	=	Enthalpie massique du système Σ_e en $J.kg^{-1}$
v_e	=	Vitesse du fluide en entrée en $m.s^{-1}$
z_e	=	Altitude du fluide en entrée en m
ω_i	=	Travail massique indiqué en $J.kg^{-1}$
q_e	=	Transfert thermique massique reçu en $J.kg^{-1}$

En utilisant Δ pour représenter la variation d'une fonction d'état du fluide entre l'entrée et la sortie de la machine considérée, on obtient la formulation du premier principe dans le cas d'un système ouvert simple, à une entrée et une sortie :

$$\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p = q_e + \omega_i \quad (13)$$

Avec :

h	=	Enthalpie massique du système en $J.kg^{-1}$
e_c	=	énergie cinétique macroscopique massique en $J.kg^{-1}$
e_p	=	énergie potentielle de pesanteur massique en $J.kg^{-1}$
q_e	=	Transfert thermique massique reçu en $J.kg^{-1}$
ω_i	=	Travail massique indiqué en $J.kg^{-1}$

2.1.8 Ordres de grandeur

Quelques exemples :

- énergie thermique nécessaire pour vaporiser un kg d'eau sous pression usuelle ≈ 2200 kJ pour atteindre une valeur comparable
- avec l'énergie cinétique, il faut une vitesse de 2.10^3 $m.s^{-1}$
- avec l'énergie potentielle de pesanteur, il faut une dénivellation de 200 km

Dans la plupart des cas usuels, les énergies cinétiques et potentielles de pesanteur seront négligeables.

Exceptions :

- usine de production d'énergie hydroélectrique, on va utiliser l'énergie potentielle de pesanteur
- tuyère de réacteur, on va utiliser l'énergie cinétique

2.2 Cycles industriels

2.2.1 Exemples usuels (pas au programme)

Pour tous les exemples, on fera les approximations suivantes :

- le régime est permanent
- les énergies cinétiques et potentielles macroscopique des fluides sont négligées
- les enceintes sont calorifugées

2.2.1.1 Echangeur thermique :

Il comprend une enceinte calorifugée dans laquelle circulent deux fluides. Il n'y a pas de mélange de matière entre les deux circuits, mais échange thermique.

Bilan massique :

- premier circuit : le débit massique entrant par l'accès (e) est égal au débit massique sortant par l'accès (s) = D_m
- second circuit : idem = D_m'

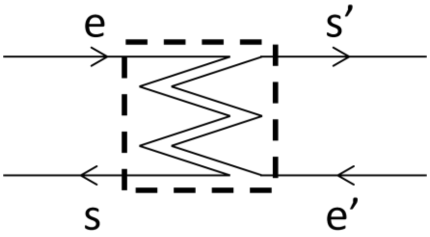
Bilan énergétique : en absence de travail fourni et du fait du caractère adiabatique

$$D_m(h_e - h_s) + D_m'(h_{e'} - h_{s'}) = 0$$

Exemple avec de l'eau, alors en prenant c, la capacité calorifique massique de l'eau:

$$dh = cdT$$

$$D_m(T_e - T_s) + D_m'(T_{e'} - T_{s'}) = 0$$



2.2.1.2 Turbine :

Un fluide vaporisé met en mouvement les pales d'une turbine. L'axe mis en rotation peut alors entrainer une autre machine, on récupère de l'énergie mécanique. On peut aussi produire de l'électricité en couplant un alternateur à la turbine.

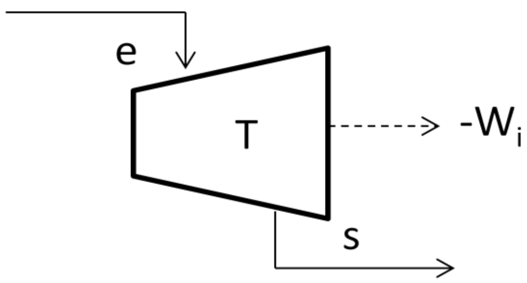
On cherche à maximiser la récupération d'énergie utile, au détriment de l'énergie cinétique du fluide, on peut donc la négliger.

Bilan massique :

$$D_{m_e} = D_{m_s} = D_m$$

Bilan énergétique : on a un signe négatif pour ω_i car le travail sort de la machine

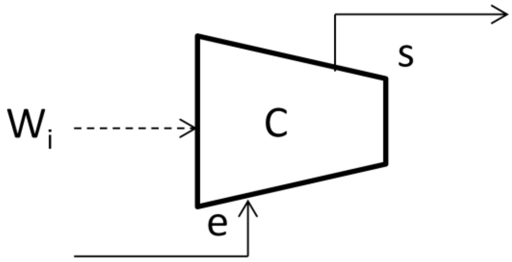
$$h_e - h_s = -\omega_i$$



2.2.1.3 Compresseur :

Il fonctionne à l'inverse d'une turbine. L'extérieur fournit un travail mécanique pour mettre en mouvement les pièces mobiles. Donc :

$$h_s - h_e = \omega_i$$



2.2.1.4 *Tuyère :*

Le gaz subit une détente spontanée dans une conduite de forme bien choisie. Au cours de cette évolution, l'énergie cinétique du fluide s'accroit. IL est donc raisonnable de négliger l'énergie cinétique massique d'entrée, mais pas celle de sortie. On peut par contre toujours négliger les énergies potentielles de pesanteur.

Bilan énergétique : aucun travail n'est fourni, l'évolution est adiabatique

$$h_s + \frac{1}{2}v_s^2 - h_e = 0$$

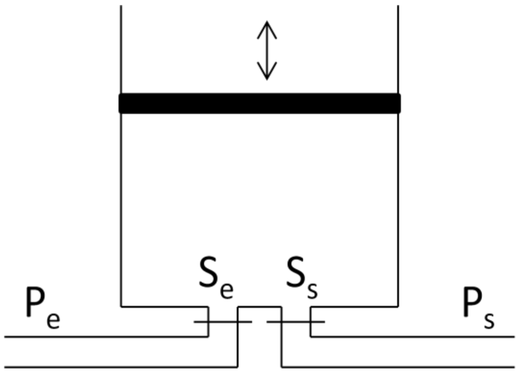
La vitesse de sortie est donc donnée par :

$$v_s = \sqrt{2(h_e - h_s)}$$

Dans les conditions énoncées, rien ne permet de distinguer la détente dans une tuyère de la détente de Joule-Kelvin.

2.2.2 Etude de la compression d'un fluide

La manière la plus simple de réaliser une compression est d'utiliser un compresseur à piston. Le volume au cours d'un cycle passe de la valeur maximale V_1 à la valeur nulle, puis revient à V_1. Deux valves ou soupapes permettent la liaison avec une conduite amont (S_e), dans la quelle la pression est constante (P_e) et une conduite aval (S_s) de pression constante (P_s). La section du cylindre est notée S. Les énergies cinétiques et potentielles massiques sont négligées, ainsi que tous les frottements.



L'action sur le piston s'exprime par l'intermédiaire de la force F avec l'expression suivante :

$$\vec{F} = -PS\vec{u}$$

Avec : P = pression régnant dans le cylindre
$\vec{u}$ = vecteur unitaire orienté vers le bas

On peut décomposer le cycle de fonctionnement en plusieurs étapes :

- (1) à (2) : la phase d'admission vient de s'achever, le soupape S_e vient de se fermer. Le piston amorce sa descente, la pression dans le cylindre augmente de P_e à P_s jusqu'à atteindre un volume V_2. Le système est délimité par la surface du cylindre, il est fermé.
- (2) à (3) : La soupape S_s s'ouvre. La phase de refoulement dure jusqu'à ce que le piston atteigne le fond du cylindre. La pression est constante, le système est ouvert.
- (3) à (1) : La soupape de sortie se ferme. Le piston remonte et le soupape d'entrée s'ouvre. La phase d'admission se fait sous pression constante égale à P_e. Le cylindre est un système ouvert

Il est possible de représenter l'évolution du système par l'intermédiaire de deux diagrammes :

- le **diagramme de Clapeyron** : pression P dans l'enceinte en fonction du volume massique du fluide
- le **diagramme de Watt** : pression P dans l'enceinte en fonction du volume V de l'enceinte.

A ne pas confondre.

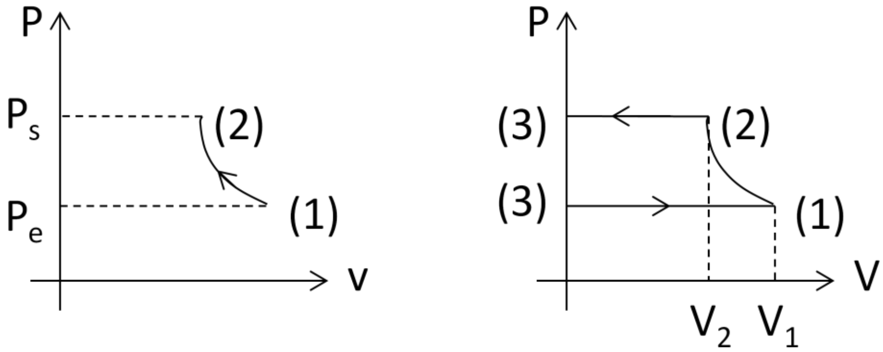


Diagramme de Clapeyron Diagramme de Watt

2.2.3 Exemple d'un cycle de machine frigorifique

La machine décrit le cycle suivant (ce cycle est décrit dans le diagramme (T,s) dans le paragraphe 1.2.5.2 :

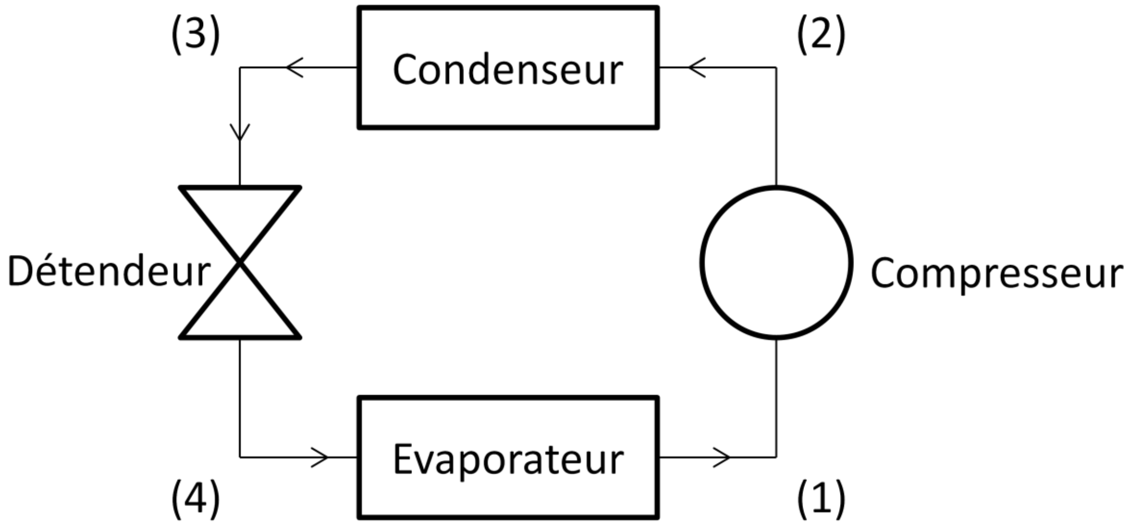
- (1) à (2) : le fluide est à l'état de vapeur saturante sèche à la température T_1. Il subit une compression adiabatique réversible le menant à la pression P_2. Cette transformation est donc isentropique et mène à un état de vapeur sèche.
- (2) à (3) : l'évolution est isobare. Un transfert thermique a lieu entre le fluide et une source chaude. Dans l'état (3), le liquide est saturant à la pression P_2.
- (3) à (4) : le fluide subit une détente isenthalpique (adiabatique). L'état (4) ramène à la même pression que l'état (1). On notera x_4 le taux de vapeur correspondant.
- (4) à (1) : l'évolution est isobare. Un transfert thermique a lieu entre le fluide et la source froide (enceinte réfrigérée).

On peut utiliser les tables de vapeur pour décrire chaque état.

- (1) : on se trouve sur la courbe de rosée (vapeur saturante sèche), on peut lire h_1 et s_1.

- (2) : l'évolution est isentropique : $s_2 = s_1$, on retrouve h_2 à partir de P_2.
- (3) : la transformation est isobare et l'on se retrouve sur la courbe d'ébullition, on a h_3 et s_3.
- (4) : l'évolution est isenthalpique et rejoint la même température qu'en (1)car transformation (4) à (1) est isobare. h_4=h_3 et on peut déterminer le taux de vapeur par :

$$h_4 = h_3 = h_l + (h_v - h_l)x_4$$



Les échanges thermiques sont déduits des valeurs précédentes :

- transfert thermique depuis la source froide :

$$q_f = h_1 - h_4$$

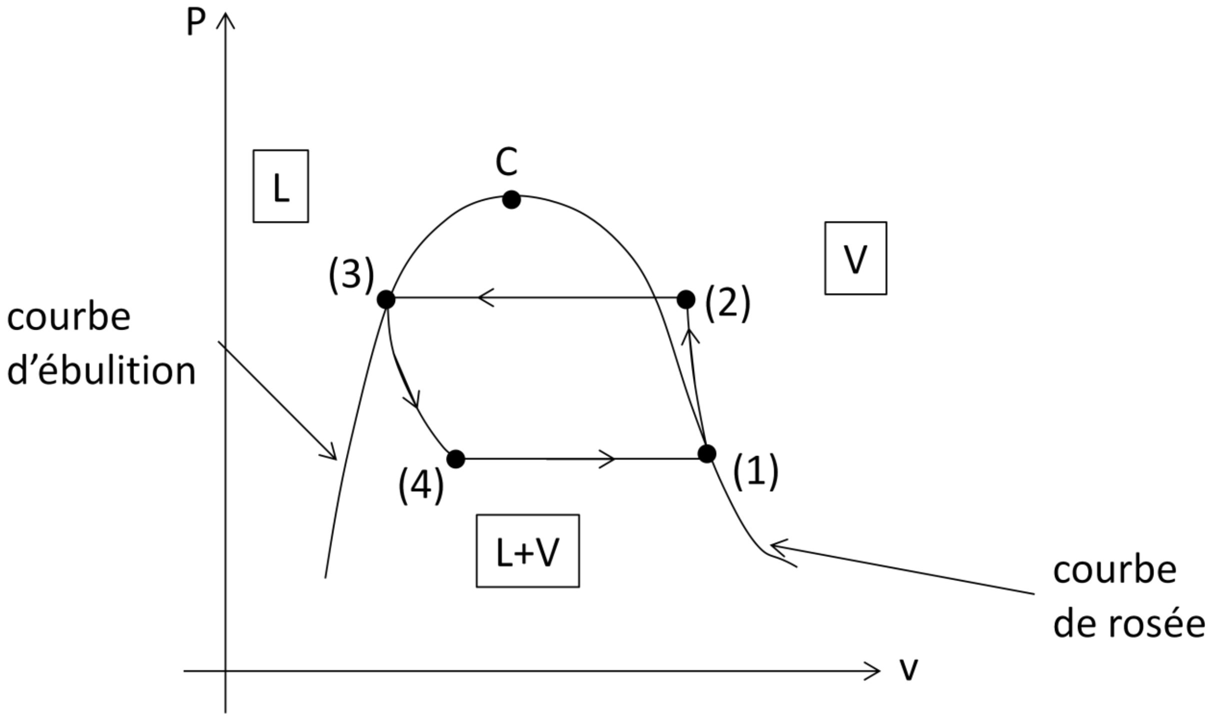
- travail indiqué de compression :

$$\omega_c = h_2 - h_1$$

On en déduit l'efficacité thermique définit par :

$$\varepsilon_f = \frac{q_f}{\omega_c}$$

De façon générale, l'efficacité d'un cycle (ou rendement dans le cas d'un moteur) se définit comme le rapport de la « puissance utile » sur la « puissance coûteuse » (associée à une dépense).



A retenir et savoir faire :

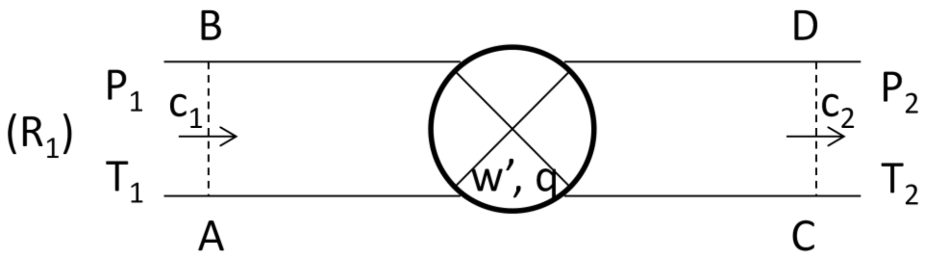
- Connaître l'expression du débit massique
- Connaître les expressions traduisant le premier principe pour un système en écoulement permanent
- Savoir que les énergies cinétiques et potentielles sont généralement négligées
- Savoir faire la distinction entre le diagramme de Clapeyron et de Watt
- Savoir étudier un cycle thermique avec ou sans changement d'état

2.3 Exercices d'application

2.3.1 Turbopropulseur (cycle de Joule)

2.3.1.1 Préliminaires

Un réservoir (R_1) alimente une canalisation en amont d'une machine (X) ; à l'entrée de la machine le gaz est aux conditions T_1 et P_1 de température et de pression, sa vitesse c_1 est négligeable.
La machine fournit à l'unité de masse du fluide qui la traverse le travail w' et l'énergie thermique q, puis refoule le fluide aux conditions T_2 et P_2 de température et de pression avec la vitesse c_2. La canalisation est calorifugée, c'est-à-dire que le fluide ne peut recevoir de chaleur ailleurs que dans la machine.



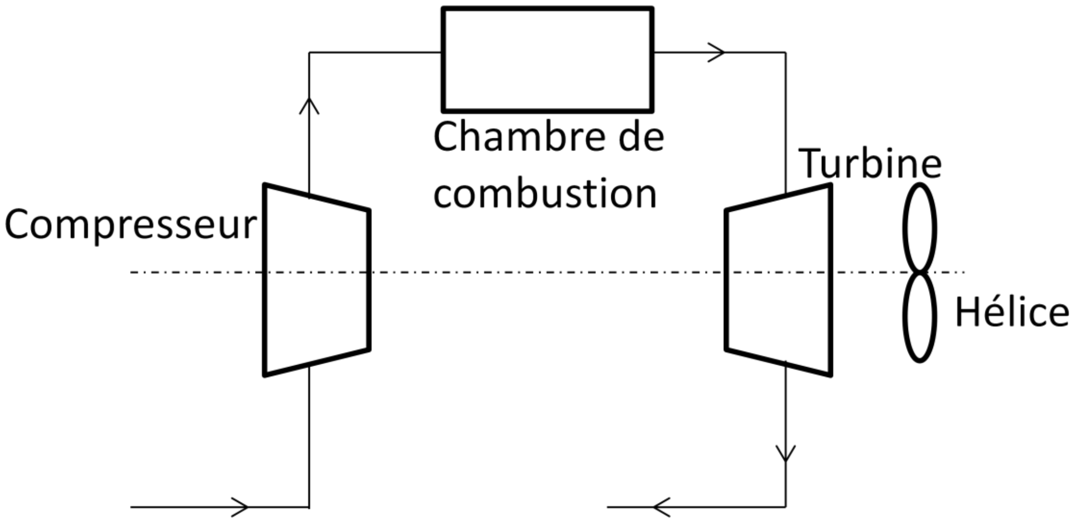
En raisonnant sur une portion du fluide telle que (AB,CD), montrer que l'on a en régime stationnaire la relation :

$$h_2 - h_1 + \frac{1}{2}c_2^2 = w' + q$$

où h_1 et h_2 désignent les enthalpies massique du fluide respectivement dans les conditions (P_1,T_1) et (P_2,T_2).

2.3.1.2 Application

Un turbopropulseur est un moteur à réaction dont l'organe essentiel est constitué par une turbine à gaz dont le rôle est d'entraîner, outre le compresseur, l'hélice propulsive.
Le cycle du turbopropulseur est assimilable à un cycle de Joule ; le gaz utilisé est assimilé à un gaz parfait, de capacité thermique massique isobare C_P constante.
On donne Υ = 1,4, M = 29 g.mol^{-1}, R = 8,32 J.mol^{-1}.K^{-1}



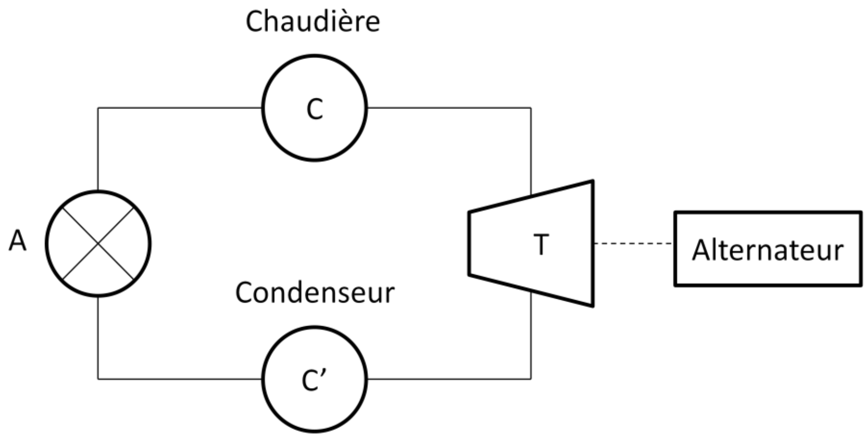
Première phase : l'air, à température T_0 = 280 K et à la pression P_0 = 1 bar est aspiré dans le compresseur qui le porte aux conditions P_1 = 10 bar et T_1 par une évolution supposée adiabatique et réversible. On appellera w_1' le travail fourni par le compresseur à l'unité de masse d'air. Les vitesses d'écoulement seront négligées.
Deuxième phase : à la sortie du compresseur, l'air pénètre dans le chambre de combustion où, sous pression constante P_1, sa température est portée à la valeur de T_1' = 1000 K. On appellera q l'énergie thermique fournie à l'unité de masse d'air dans cette transformation.
Troisième phase : l'air parvient alors à la turbine où il subit une détente adiabatique et réversible. On négligera les vitesses d'écoulement aussi bien à l'entrée qu'à la sortie de la turbine. A la fin de cette détente, la pression de l'air est $P_2 = P_0$ et sa température T_2. On appellera w_2' le travail que l'unité de masse d'air fournit à la turbine pendant la détente.
Quatrième phase : l'air est rejeté dans l'atmosphère extérieure où il se refroidit à pression constante P_0, de la température T_2 à la température T_0.

a) Donner l'allure du cycle dans le diagramme de Clapeyron. Ce cycle est dit cycle de Joule.
b) Donner les expressions littérales de T_1 et w_1'. Calculer T_1.
c) Exprimer littéralement q.
d) Donner les expressions littérales de T_2 et w_2'. Calculer T_2.
e) Quel est le travail massique disponible à l'hélice ? Le calculer, ainsi que q.
f) Définir le rendement du turbopropulseur, en fonction du taux de compression a = P1/P0. Le calculer.

2.4 Exercices

2.4.1 Turbomachine avec changement d'état

On considère une installation comportant une chaudière C, une turbine T, un condenseur C', et une pompe A.



Le fluide utilisé est l'eau, il décrit les cycles suivants :

- La pompe alimentaire amène le fluide saturant, pris à la sortie du condenseur (état F), jusqu'à la pression P_1 de la chaudière. Cette opération est pratiquement adiabatique et on peut considérer qu'à la sortie de la pompe le fluide est liquide (état G) pratiquement à la température T_2 du condenseur.

- L'eau est alors injectée dans la chaudière où elle se vaporise de façon isobare (P_1). A la sortie de la chaudière, la vapeur est saturante sèche à T_1 (état D).

- Elle subit ensuite une détente adiabatique et réversible dans une turbine T (partie active du cycle). A la sortie de la turbine, le fluide est à la température T_2 et à la pression P_2 du condenseur (point E), où il achève de se liquéfier de façon isobare (point F).

Données :

- T_1 = 523 K
- T_2 = 293 K
- Enthalpie de vaporisation à 523 K : l_1 = 1714 kJ.kg^{-1}
- Pression de vapeur saturante à 523 K : P_1 = 39,7.10^5 Pa
- Pression de vapeur saturante à 293 K : P_2 = 2300 Pa
- Enthalpie massique du liquide saturant à 293 K : h_l = 84 kJ.kg^{-1}
- Enthalpie massique de la vapeur saturante sèche à 293 K : h_v = 2538 kj.kg^{-1}
- Chaleur massique du liquide : c_{liq} = 4180 J.kg^{-1}.K^{-1}
- Volume massique du liquide : v_{liq} = 10-3 m^3.kg^{-1}

a) Quelle est l'enthalpie massique de vaporisation du fluide à 293 K ?
b) Déterminer le titre en vapeur du fluide à la sortie de la turbine.
c) Déterminer l'enthalpie massique au point E.
d) Au point D, l'enthalpie massique vaut 2800 kJ.kg^{-1}, quelle est le travail massique fourni par la turbine à l'alternateur ?
e) Justifier que le travail massique mis en jeu dans la pompe est négligeable devant celui fourni par la turbine.
f) Déterminer le rendement de l'installation et le comparer à celui du cycle réversible fonctionnant entre les mêmes températures extrêmes. D'où provient cet écart ?
g) Quel débit massique de fluide est nécessaire pour obtenir une puissance convertie par l'alternateur de 100kW ?

2.4.2 Machines à vapeur : cycle de Rankine

Dans une machine à vapeur, l'eau décrit un cycle de Rankine :

- AB : l'eau liquide (P_1, T_1) à saturation est comprimée de façon isentropique dans une pompe jusqu'à la pression P_2 de la chaudière. Cette transformation se fait pratiquement sans variation de volume. On raisonne sur l'unité de masse.

- BD et DE : l'eau liquide est injectée dans la chaudière, s'y réchauffe jusqu'à T_2 (BD) et s'y vaporise (DE) à la pression P_2.

- EF : la vapeur est admise dans le cylindre à T_2, P_2 et on effectue une détente isentropique (d'où travail mécanique) jusqu'à la température initiale T_1 : on obtient un mélange liquide-vapeur de titre massique x en vapeur.

- FA : le piston par son retour chasse le mélange dans le condenseur où il se liquéfie totalement.

a) Donner l'allure du cycle en coordonnée P, v en faisant figurer les deux isothermes T_1 et T_2. On justifiera que la température de B est très voisine de celle de A.

b) Exprimer le rendement de ce moteur thermique uniquement en termes enthalpiques : $\rho = f(H_A, H_B, H_D, H_E, H_F)$.

c) Donner l'allure du cycle en diagramme entropique T, S, puis en diagramme enthalpique (dit de Mollier) H, S.

d) En thermodynamique industrielle, le diagramme de Mollier, bâti à partir de données expérimentales, permet la lecture directe des enthalpies massiques et entropies massiques.

On donne :

		Liquide		Vapeur	
P (bar)	T (°C)	s_l (kJ.kg^{-1}.K^{-1})	h_l (kJ.kg^{-1})	s_v (kJ.kg^{-1}.K^{-1})	h_v (kJ.kg^{-1})
$P_1 = 0,2$	$T_1 = 60$	0,83	251	7,9	2608
$P_2 = 12$	$T_2 = 188$	2,2	798	6,52	2783

Calculer le rendement du cycle (on confondra H_A et H_B).