

T4 - MACHINES THERMIQUES

Programme ATS

10. Machines cycliques dithermes en système fermé	
Représentation schématique des machines cycliques dithermes.	Prévoir les signes des transferts d'énergie en fonction de l'application recherchée.
Cas des moteurs, pompes à chaleur et machines frigorifiques.	Définir le rendement d'un moteur. Définir le coefficient de performance (CoP) (ou efficacité) d'une machine frigorifique et celui d'une pompe à chaleur (PAC).
Inégalité de Clausius pour les machines cycliques dithermes. Théorème de Carnot.	Déterminer le rendement ou le coefficient de performance (CoP) maximum des machines cycliques dithermes. Exploiter le théorème de Carnot pour juger de la performance d'une machine thermique.
Diagramme de Watt (P,V) et diagramme entropique (T,S).	Donner une interprétation énergétique de l'aire des cycles et de leur sens de parcours dans les diagrammes (P,V) et (T,S) pour un cycle réversible. Tracer l'allure d'un cycle de Carnot d'un gaz parfait dans un diagramme de Watt et un diagramme entropique. Capacité numérique : à l'aide d'un langage de programmation, tracer le cycle d'un moteur dans un diagramme de Watt ou dans un diagramme entropique. Déterminer le travail fourni et le rendement.
Modélisation d'un moteur réel à pistons : exemples du moteur à combustion interne et du moteur diesel.	Associer les temps mécaniques (4 temps ou 2 temps) d'un moteur à piston aux différentes transformations du cycle moteur.
Puissance d'un moteur, consommation d'énergie.	Déterminer la puissance d'un moteur et la puissance thermique nécessaire à son fonctionnement connaissant les caractéristiques d'un cycle. Déterminer la consommation d'énergie nécessaire pour qu'un moteur fournit un travail donné.
11. Machines thermiques en système ouvert	
Premier principe de la thermodynamique appliqué à un système ouvert. Travail indiqué massique.	Citer le premier principe de la thermodynamique en système ouvert, par unité de masse et/ou par unité de temps, en tenant compte des variations massiques d'enthalpie, d'énergie potentielle et d'énergie cinétique. Appliquer le premier principe de la thermodynamique en système ouvert à une machine thermique avec écoulement de fluide en précisant le système ouvert considéré. Expliquer le rôle d'un compresseur, d'une pompe, d'un condenseur, d'un évaporateur et d'un détendeur. Associer ces organes à des transformations du cycle thermodynamique mis en œuvre dans une machine. Démontrer le caractère isenthalpique de la transformation subie par un fluide dans un détendeur adiabatique.
Système diphasé liquide-vapeur.	Représenter un cycle de transformations dans un diagramme entropique (T,s) et enthalpique (P,h) (entropies et enthalpies par unité de masse). Exploiter les diagrammes (T,s) et/ou (P,h) pour déterminer les échanges énergétiques se produisant lors d'un cycle.

Machine thermique selon les Shadoks :

<https://www.youtube.com/watch?v=xiCajZYCB1I>

I) PRINCIPE ET TECHNOLOGIE DES MACHINES THERMIQUES

- **Machine thermique** : dispositif fonctionnant en **cycles** dans lequel un fluide échange de l'énergie par transfert thermique et par travail, avec **conversion entre puissance mécanique et puissance thermique** (entre travail et chaleur).

Deux caractéristiques principales :

- × Dans une machine thermique, les **transferts thermiques** jouent un rôle central (contrairement à un moteur électrique par exemple)
- × D'un point de vue thermodynamique, le système étudié est l'agent thermique, dont le **fonctionnement cyclique** est primordial : l'état final du fluide est identique à son état initial, et **les variations de toutes les fonctions d'état (en particulier U , H et S) sur un cycle complet sont nulles**.

Deux types de fonctions

- **Moteur thermique** : machine qui fournit effectivement du travail à l'extérieur.
Exemples : Moteurs d'avion ou de voiture, turbines à vapeur dans les centrales électriques permettant de mettre en rotation l'alternateur.
- **Récepteur thermique**, aussi appelé **machine frigorifique** au sens large : machine qui réalise un transfert thermique effectif de sens contraire au sens naturel.
Exemples : Un frigo ou un climatiseur permet de refroidir la partie la plus froide de l'installation, alors qu'une pompe à chaleur permet de réchauffer la partie la plus chaude.

Deux types de structure

Machine à piston

Ensemble bielle – piston – vilebrequin assurant la rotation du moteur

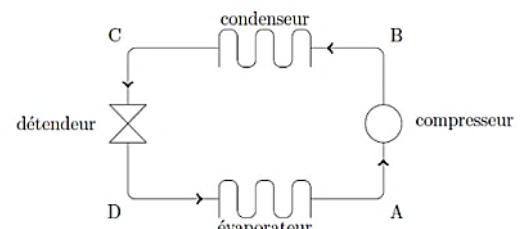


L'ensemble des transformations de l'agent thermique ont lieu dans un **même cylindre** (chambre cylindrique), dont le volume varie grâce à un **piston mobile**. Plusieurs chambres (pistons) peuvent être montées en parallèle.

Exemple : moteur à combustion.

Machine à écoulement

- **Machine à écoulement de fluide** : un **fluide** (dit caloporteur ou frigorigène selon les situations) **circule** dans la machine et **traverse successivement** différents organes élémentaires (*détendeur, compresseur, échangeur thermique, etc.*). A chaque organe correspond l'une des transformations caractéristiques du cycle réalisé dans la machine.
- **Une machine à écoulement peut** être un moteur ou un récepteur ; des changements d'état du fluide sont souvent mis en jeu.



Principe d'une machine frigorifique : écoulement d'un fluide dans une succession d'organes

Exemples : congélateur, circuit hydraulique d'une centrale électrique thermique.

Deux points de vue complémentaires

- **Approche de type « système fermé » : Voir I à V de ce cours**

On applique les principes de la thermodynamique au système constitué de la totalité du fluide contenu dans le circuit, correspondant à un **système fermé** (ou qu'on modélise comme un système fermé, cf. ci-dessous la modélisation du moteur à explosion) au cours d'une **transformation correspondant à exactement un cycle complet**.

- **Approche de type « système ouvert » : Voir VI de ce cours**

On applique les principes de la thermodynamique à **chaque organe élémentaire individuellement**, avec la différence essentielle qu'il s'agit alors d'un **système ouvert**, du fluide entrant et sortant de cet organe à tout instant.

Il faut alors adapter l'expression du bilan d'énergie issu du premier principe.

II) LES MOTEURS

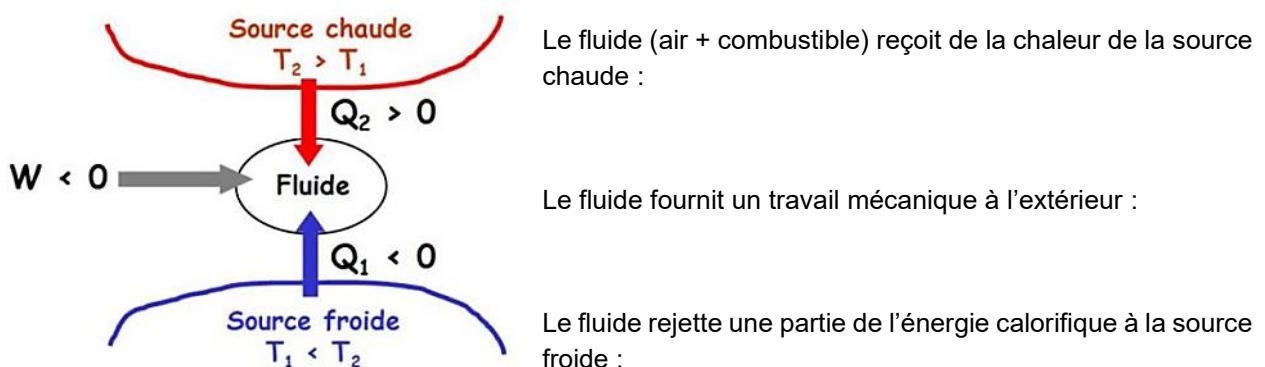
<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/moteurD.html>

Exemple de cycle ditherme : Cycle de Carnot (moteur)

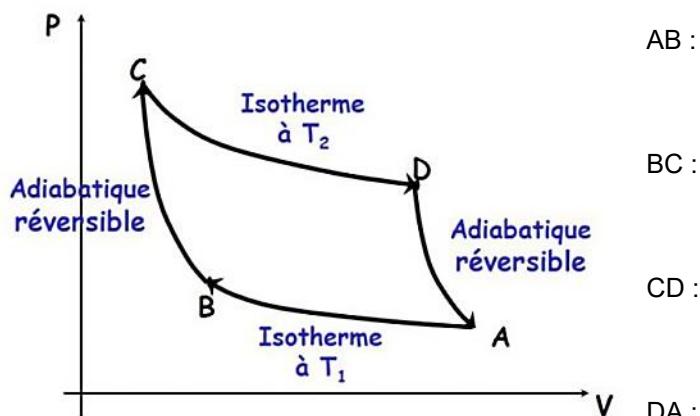
Simulation : <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/carnot.html>

<http://olivier.granier.free.fr/Seq08/co/rappels-de-cours-thermo-machines-thermiques.html>

Le schéma de principe est le suivant :



Rendement du moteur :



Moteur de Carnot réversible

1^{er} principe appliqué au fluide :

2^{ème} principe appliqué au fluide :

Détermination du rendement du moteur :

Ordre de grandeur du rendement de Carnot :

Moteur de Carnot irréversible

1^{er} principe appliqué au fluide :

2^{ème} principe appliqué au fluide :

Détermination du rendement du moteur :

Ordre de grandeur du rendement de Carnot :

Cycle de Beau de Rochas : moteur explosion à 4 temps (essence)

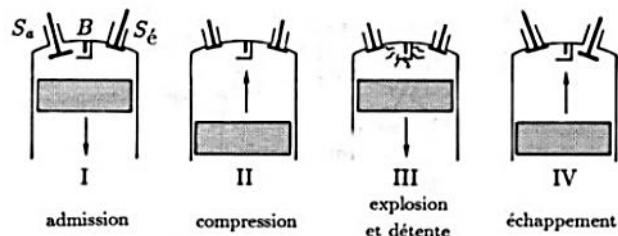
<http://olivier.granier.free.fr/Seq08/co/rappels-de-cours-thermo-machines-thermiques.html>

Simulation : <http://ressources.univ-lemans.fr/AccessLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/rochas.html>

Cycle théorique de Beau de Rochas (1862), réalisé par Otto (1876) - le moteur à explosion à 4 temps

 Exemple

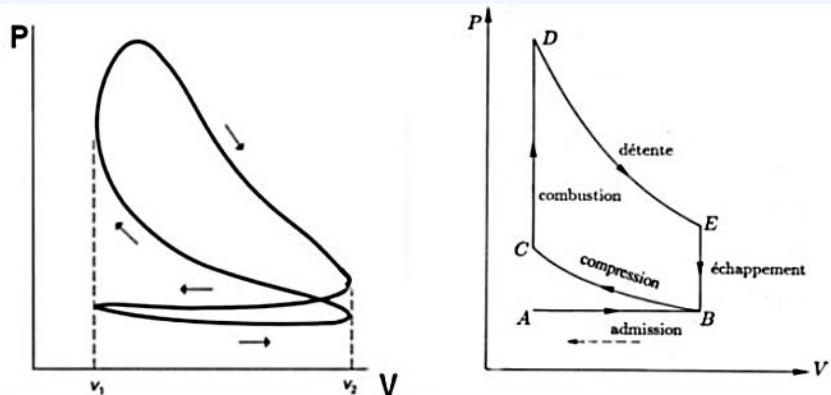
La figure suivante donne les 4 temps d'un moteur à explosion.



$$\begin{cases} S_a &= \text{soupe d'admission} & B &= \text{bougie} \\ S_e &= \text{soupe d'échappement} \end{cases}$$

Moteur à explosion à 4 temps

Les diagrammes expérimental (à gauche) et théorique (à droite) sont proposés sur la figure suivante.



Diagrammes dans le plan de Clapeyron (P, V)

Hypothèses :

BC :

CD :

DE :

EB :

1^{er} principe appliqué au fluide (air + combustible) :

Transformations isochores :

Rendement :

Isochores :

Transformations adiabatiques réversibles :

BC :

DE :

Rendement :

Moteurs 2 temps / moteurs 4 temps

[Animation d'un moteur 2 temps](#)

[Animation moteur à 4 temps](#)

III) LES RECEPTEURS : MACHINES FRIGORIFIQUES

<http://olivier.granier.free.fr/Seq08/co/rappels-de-cours-thermo-machines-thermiques.html>

Simulations :

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Thermo/Machines/Frigo_F.php?typanim=Flash

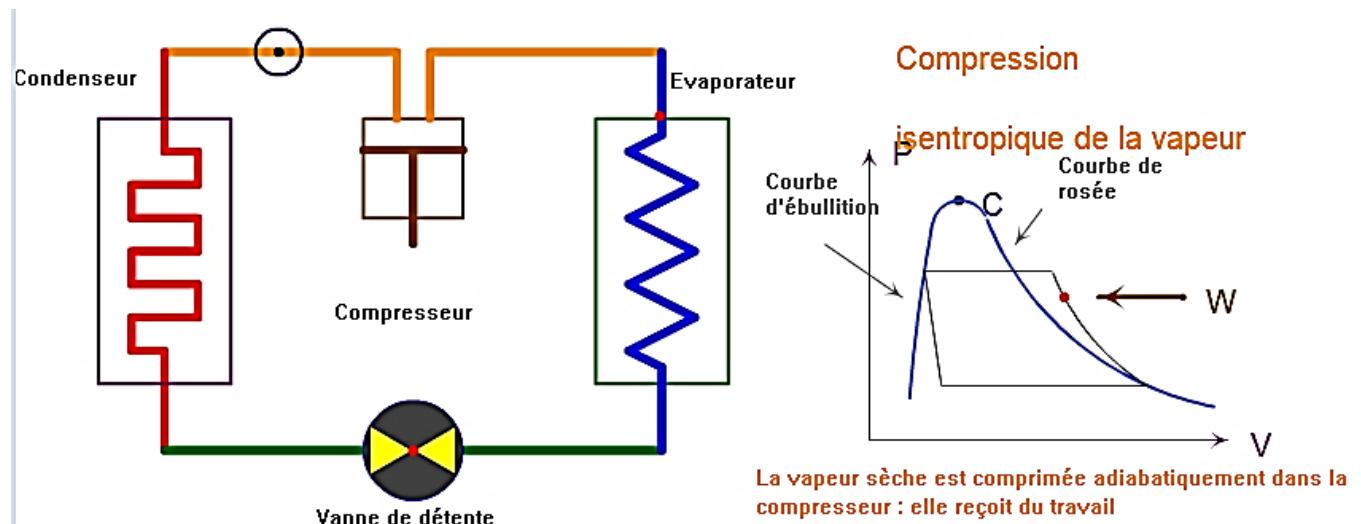
<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/frigo.html>

Le fonctionnement d'une **machine frigorifique** est basé sur le cycle thermodynamique d'un fluide, appelé **fluide frigorigène**, qui change d'état au **cours du cycle**.

Exemples de fluides frigorigènes :

- ✓ Fluides abandonnés : Ammoniaque NH_3 (toxique), R11, R12 (contiennent des chlorofluorocarbones CFC, qui détruisent la couche d'ozone), ...
- ✓ Fluides utilisés aujourd'hui : R125, R410A, ...

Le système étudié est le fluide frigorigène, que l'on pourra retrouver dans 3 états différents au cours du cycle :

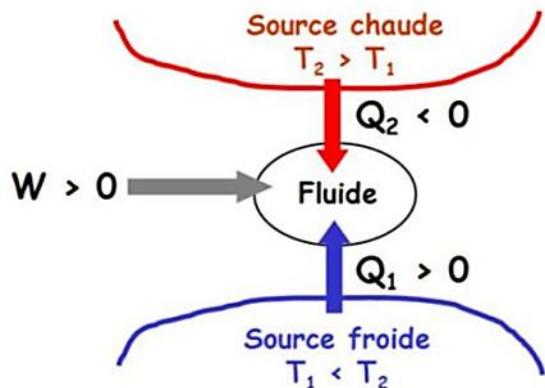


- Etape 1 - 2 : Compresseur
- Etape 2 – 3 : Condenseur (échangeur de chaleur avec la source chaude)
- Etape 3 – 4 : Détendeur

- Etape 4 – 1 : Evaporateur (échangeur de chaleur avec la source froide)

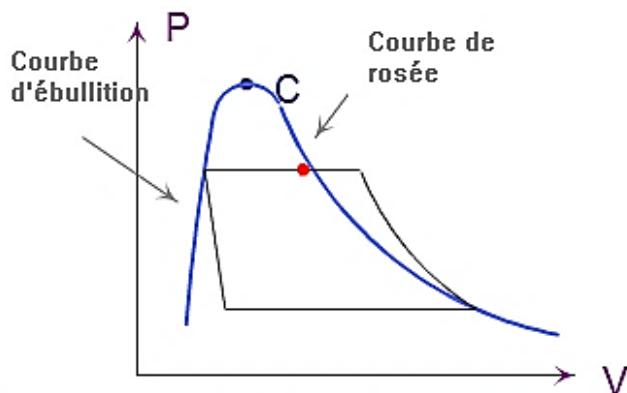
Exemple de cycle ditherme : cycle de Carnot (récepteur)

Le fluide frigorigène (gaz) reçoit du travail de la part du compresseur :



Le fluide frigorigène fournit de l'énergie calorifique à la source chaude et se condense :

Le fluide reçoit de l'énergie calorifique de la source froide et se vaporise :



Si on s'intéresse au refroidissement de la source froide :

Efficacité du **réfrigérateur** (ou **climatiseur**) :

1^{er} principe appliqué au fluide :

2^{ème} principe appliqué au fluide :

Détermination de l'efficacité du réfrigérateur :

Ordre de grandeur :

Si on s'intéresse au chauffage de la source chaude :

Efficacité de la **pompe à chaleur** :

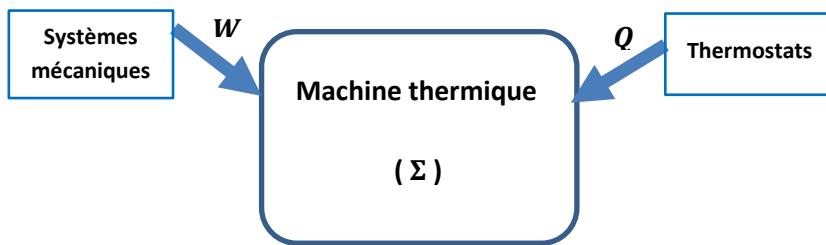
1^{er} principe appliqué au fluide :

2^{ème} principe appliqué au fluide :

Détermination de l'efficacité de la PAC :

Ordre de grandeur :

IV) BILAN SUR LES MACHINES THERMIQUES DITHERMES



Une **machine thermique ditherme** fonctionne au contact de **2 thermostats aux températures T_c et T_f** , avec $T_c > T_f$.

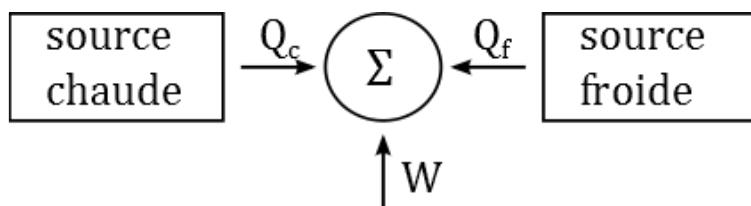
Source de chaleur à la température la plus faible T_f : **source froide**, l'autre **source chaude**.

IV)1) Représentation schématique d'une machine cyclique ditherme

On s'intéresse aux transferts d'énergie **reçus par le fluide (Σ) qui décrivent des cycles**.

Ces transferts sont comptés positivement s'ils sont réellement reçus par le fluide, négativement dans le cas contraire.

On note Q_c et Q_f les transferts thermiques échangés avec les sources chaude et froide au cours d'un cycle et W le travail échangé sur l'ensemble du cycle.



W, Q_c et Q_f sont ALGEBRIQUES.

IV)2) Moteurs et récepteurs

On distingue deux types de machines thermiques : les machines thermiques **motrices ou moteurs thermiques**, et les machines thermiques **réceptrices (ou récepteurs)**.

- **Moteur thermique** : le système (fluide caloporteur) **cède / fournit de l'énergie mécanique au milieu extérieur** ; le **travail reçu par le fluide** caloporteur au cours du cycle est donc $W_{cycle} < 0$

Exemples : moteurs essence, diesel, turboréacteurs pour la propulsion des avions, etc.).

- **Récepteur thermique** : le système (fluide caloporteur) **reçoit de l'énergie mécanique du milieu extérieur** pour pouvoir fonctionner ; le **travail reçu par le fluide** caloporteur au cours du cycle est donc $W_{cycle} > 0$.

Exemples : machine frigorifique au sens large du terme (climatiseurs, réfrigérateurs, pompes à chaleurs...).

- Pour un cycle décrit par le fluide représenté dans un diagramme de Clapeyron, le **cycle** pour un **moteur** sera parcouru dans le sens **horaire** et le **cycle** pour un **récepteur** sera parcouru dans le sens **trigonométrique**.

Parmi les machines dithermes réceptrices, certaines n'ont que peu d'intérêt ; l'utilisateur fournissant du travail, les **récepteurs** sont dits « **utiles** » lorsqu'ils permettent des échanges thermiques qui ne se feraient pas spontanément (frigos, pompes à chaleur ou climatiseur par exemple).

IV)3) Efficacité d'une machine thermique

Définition

On caractérise l'efficacité d'une machine thermique en comparant sur un cycle :

- La quantité d'énergie recherchée pour l'utilisateur (= le « **BUT** » du fonctionnement de la machine)
- La quantité d'énergie ayant un coût économique pour l'utilisateur (= le « **COUT** » du fonctionnement de la machine)

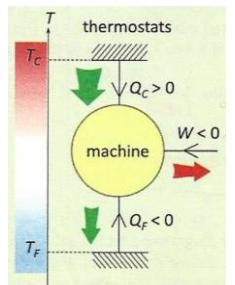
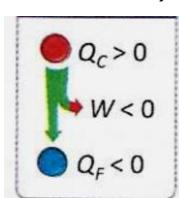
Efficacité d'une machine thermique

$$\text{efficacité} = \frac{\text{"grandeur utile"}}{\text{"grandeur de coût"}} = \frac{\text{énergie recherchée sur un cycle}}{\text{énergie ayant un coût sur un cycle}}$$

Les principaux types de machines thermiques et leur principe de fonctionnement

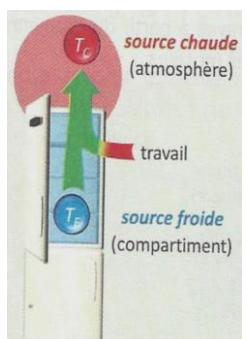
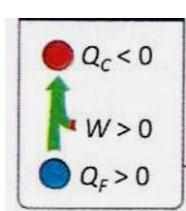
a) Principe de fonctionnement d'un moteur ditherme

Pour qu'un système réalise un **cycle moteur**, il doit échanger de l'énergie thermique avec **au moins 2 sources** à des températures différentes, en recevant de l'énergie thermique de la source chaude : $q_c > 0$, et en fournissant à l'extérieur un travail mécanique : $w < 0$, tout en cédant de l'énergie thermique à la source froide : $q_f < 0$.



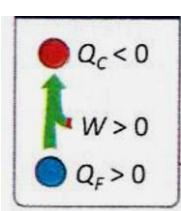
b) Principe de fonctionnement d'un réfrigérateur

Une machine frigorifique sert à refroidir, l'extérieur correspondant à la source chaude, l'intérieur de la machine frigorifique, qui doit être refroidit, à la source froide.

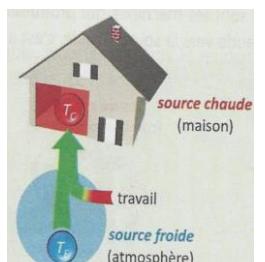


c) Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC)

Une PAC sert de « chauffage », la pièce à chauffer correspondant à la source chaude, l'extérieur (au sens large du terme) à la source froide.



Il faut donc que le fluide cède de l'énergie à la source chaude, soit $q_c < 0$, après l'avoir reçue de la source froide, soit $q_f > 0$, et ce grâce à un travail reçu, soit $w > 0$ (machine réceptrice).



Rendements et coefficients de performance (COP)

Efficacité d'une machine thermique

$$\text{efficacité} = \frac{\text{"grandeur utile"}}{\text{"grandeur de coût}} = \frac{\text{énergie recherchée sur un cycle}}{\text{énergie ayant un coût sur un cycle}}$$

Machine thermique	Moteur ditherme	Machine frigorifique	Pompe à chaleur
Signes des échanges			
Efficacités	$e_m = \frac{-W}{Q_c}$	$CoP_{frigo} = \frac{Q_f}{W}$	$CoP_{PAC} = \frac{-Q_c}{W}$

V) CHANGEMENTS D'ETAT (OU TRANSITION DE PHASE) ET DIAGRAMMES ASSOCIES

Un changement d'état (*ou transition de phase*) vers une phase moins condensée pour un corps pur est **endothermique**, et nécessite un **apport d'énergie** : le système doit réellement recevoir de l'énergie (il faut mettre la casserole d'eau pour les pâtes sur une plaque ou une flamme pour la faire bouillir !) ; à l'inverse, le passage vers une phase plus condensée (liquéfaction, condensation, solidification) est **exothermique et libère de l'énergie**.

Les changements d'état ont le plus souvent lieu à **pression constante** (égale à la pression extérieure), et donc à **température constante** puisqu'au cours du changement d'état, l'équilibre est diphasé, donc monovariant.

La transformation phase 1 → phase 2 est monobare et monotherme, «avec équilibre mécanique dans les états initial et final», donc la chaleur reçue par le corps pur **est égale à sa variation d'enthalpie en l'absence de travail utile (ou indiqué, ou différent des forces de pression)**.

VAPEUR SATURANTE

Vapeur en présence de liquide (état diphasique), soit tant qu'il existe au moins une **goutte de liquide dans le gaz (rosée)** ou une **bulle de gaz dans le liquide**.

Pour une température T donnée, il existe une unique pression $P^*(T)$ pour laquelle l'équilibre diphasique est atteint (avec un titre en liquide variable).

PRESSION DE VAPEUR SATURANTE $P_{SAT}(T)$

La pression de vapeur saturante est la Pression **maximale d'existence de la vapeur sèche**, ou encore la pression **d'équilibre de l'état diphasique liquide / gaz à température T fixée**

A) Enthalpie de changement d'état

1) Définition (rappels)

■ Enthalpie massique de changement d'état

L'enthalpie massique de changement d'état ou de transition de phase, ou **chaleur latente**, à $T, P^*(T)$, est la différence entre les enthalpies massiques du corps pur dans la phase 2 et dans la phase 1 à T :

Unité : en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$

■ Enthalpie massique $\Delta_{vap}h(T)$ de vaporisation (liquide → vapeur) :

■ Enthalpie massique $\Delta_{liq}h(T)$ de liquéfaction (vapeur → liquide) :

avec $h_v(T)$ enthalpie massique de la phase vapeur saturante à la température T et à la pression $P^*(T)$,
 $h_L(T)$ enthalpie massique de la phase liquide saturant à la température T et à la pression $P^*(T)$

■ Enthalpie massique $\Delta_{fus}h(T)$ de fusion (solide → liquide) :

$$\Delta_{fus}h(T) = h_l(T) - h_s(T) = l_{fus}(T) = -\Delta_{sol}h(T)$$

avec $h_s(T)$ enthalpie massique de la phase solide saturant à la température T et à la pression $P^*(T)$,
 $h_L(T)$ enthalpie massique de la phase liquide saturant à la température T et à la pression $P^*(T)$,
 $\Delta_{sol}h(T)$ enthalpie massique de solidification

2) Variations d'enthalpie lors d'une transition de phase isotherme réversible

- L'enthalpie étant une grandeur extensive, l'enthalpie massique h d'un mélange diphasique (phases 1 et 2) à une température T donnée peut s'exprimer en fonction des enthalpies massiques h_1 et h_2 de chacune des phases à la température T ainsi que du titre massique en l'une des phases (par exemple titre x_2 en phase 2) :
- **Enthalpie d'un mélange diphasique liquide – vapeur**, avec h_l et h_v enthalpies massiques respectivement de la phase liquide et de la phase vapeur à la température de l'équilibre diphasique et x_v titre en vapeur :

Considérons un système de masse m_{tot} subissant un changement d'état isotherme et isobare de la phase 1 vers la phase 2, caractérisé par une enthalpie massique de changement d'état $\Delta_{12}h$.

On note $x_{2,I}$ le titre en phase 2 dans l'état initial et $x_{2,F}$ le titre en phase 2 dans l'état final.

Masse m_{12} ayant subit le changement d'état :

Variation d'enthalpie :

Variation d'enthalpie massique :

B) Diagramme des frigoristes d'un corps pur

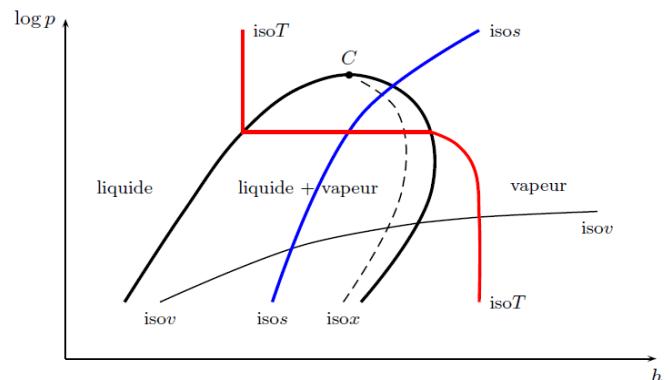
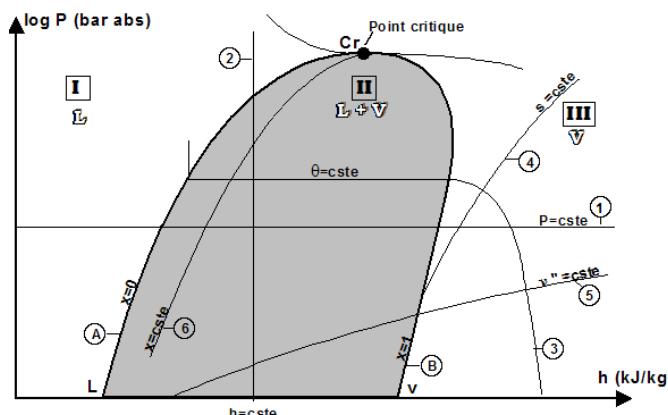
Abscisse : enthalpie massique du fluide, en $J \cdot kg^{-1}$ (souvent en $kJ \cdot kg^{-1}$)

Ordonnée : pression du fluide (bar), avec une échelle logarithmique pour couvrir une échelle plus

On lira Δh en abscisse sur le diagramme.

La courbe de saturation sépare la zone de coexistence des deux phases.

La phase liquide est à gauche, la phase gazeuse à droite (enthalpie plus grande).



C) Entropie de changement d'état (rappel)

■ **Entropie massique de changement d'état**¹ ou de transition de phase, à $T, P^*(T)$ (en $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$) : différence entre les entropies massiques du corps pur dans la phase 2 et dans la phase 1 à T :

$$() \quad () \quad ()$$

■ **Entropie massique de vaporisation (liquide / vapeur) :** () () ()

■ **Entropie massique de liquéfaction (vapeur / liquide) :** () () () ()

avec $s_v(T)$ entropie massique de la phase vapeur saturante à la température T et à la pression $P^*(T)$,
 $s_L(T)$ entropie massique de la phase liquide saturant à la température T et à la pression $P^*(T)$

■ **Entropie massique de fusion (solide / liquide) :** () () () ()

avec $s_s(T)$ entropie massique de la phase solide saturant à la température T et à la pression $P^*(T)$,
 $s_L(T)$ entropie massique de la phase liquide saturant à la température T et à la pression $P^*(T)$

S étant une fonction d'état, ΔS ne dépend pas du chemin suivi au cours de la transformation. Considérons, pour un corps pur, la transition de phase $1 \rightarrow 2$ réalisée de manière réversible et isotherme à la température T_{12} .

Soit $\Delta s_{1 \rightarrow 2}(T)$ la variation d'entropie massique du corps pur au cours de cette transition de phase $1 \rightarrow 2$, avec $q_{1 \rightarrow 2}$ la quantité de chaleur massique reçue par le système : $\Delta s_{1 \rightarrow 2}(T) =$

$$\frac{q_{1 \rightarrow 2}}{T_{12}} = \frac{\Delta_{1 \rightarrow 2}h}{T_{12}}$$

■ **Variation d'entropie massique du corps pur** au cours d'une transition de phase $1 \rightarrow 2$ réversible et isotherme :

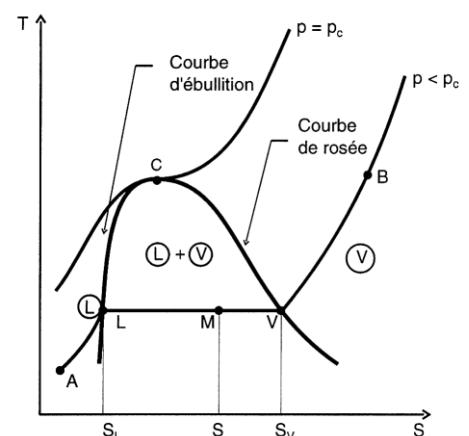
d'où :

■ **Variation d'entropie globale du corps pur** au cours de cette transition de phase $1 \rightarrow 2$ à la température T_{12} :

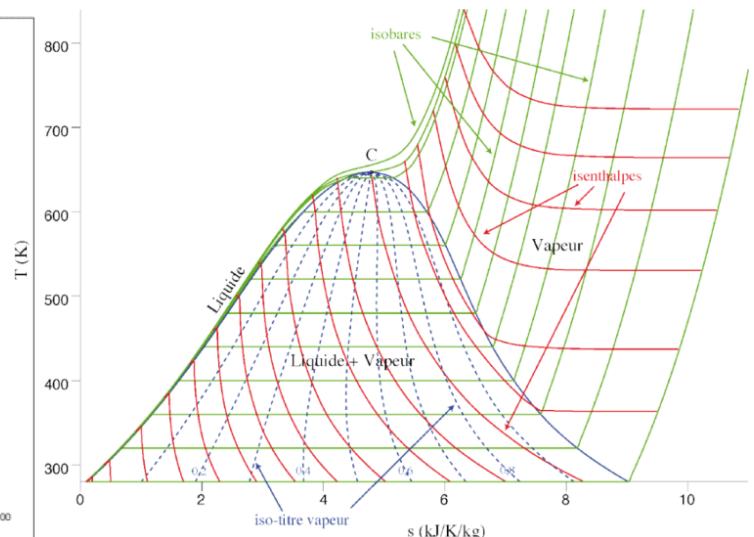
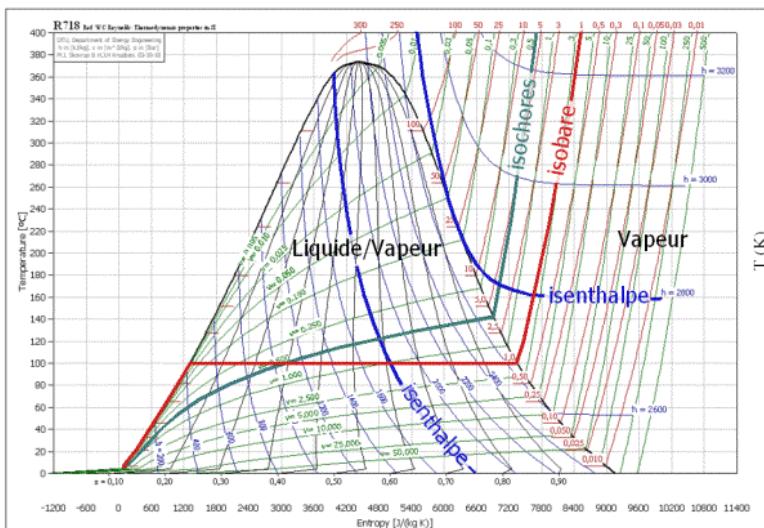
$$\Delta S_{1 \rightarrow 2}(T) = \frac{q_{1 \rightarrow 2}}{T_{12}} = \frac{\Delta_{1 \rightarrow 2}H}{T_{12}} = m_{\text{qui change de phase}} \frac{\Delta_{1 \rightarrow 2}h}{T_{12}} = m_{\text{tot}}(x_{2f} - x_{2i}) \frac{\Delta_{1 \rightarrow 2}h}{T_{12}}$$

D) Diagramme entropique (T, S) pour l'équilibre liquide vapeur

- Parfois utile de décrire le changement d'état dans le diagramme **entropique** (entropie *massique* en abscisse, température en ordonnée), en particulier pour des transformations **isentropiques** (souvent le cas dans les machines thermiques).
- Paliers de changement d'état** : correspondent toujours à des *portions horizontales* (température constante).



- Allure générale : analogue à celle du diagramme (p, v) ; courbe de saturation en forme de « cloche », point critique à son sommet, délimitant la zone de coexistence des deux phases. La phase liquide est à gauche, la phase gazeuse à droite (entropie plus grande, liée au désordre).



E) Récapitulatif sur le théorème des moments

On s'intéresse ici à un **corps en équilibre sous deux phases**, dont le point représentatif est donc sous cette courbe.

Soit un point E sur le palier d'équilibre liquide-vapeur.

Soit y la grandeur massique en abscisse (c'est-à-dire v , s ou h).

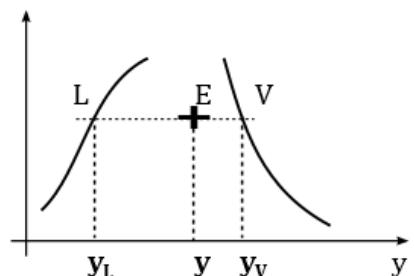
On note :

m , m_l , m_v la masse totale, la masse de liquide, la masse de vapeur

Y , Y_l , Y_v la grandeur Y de l'ensemble, du liquide, de la vapeur

y , my_l , y_v la grandeur massique y de l'ensemble, du liquide, de la vapeur

x le **titre en vapeur** au point E

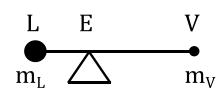


Le corps pur est constitué de deux phases. Y (c'est-à-dire V , S ou H) est **extensive** : $Y = Y_l + Y_v$

$$\Rightarrow my = m_l y_l + m_v y_v \Rightarrow y = \frac{m_l}{m} y_l + \frac{m_v}{m} y_v$$

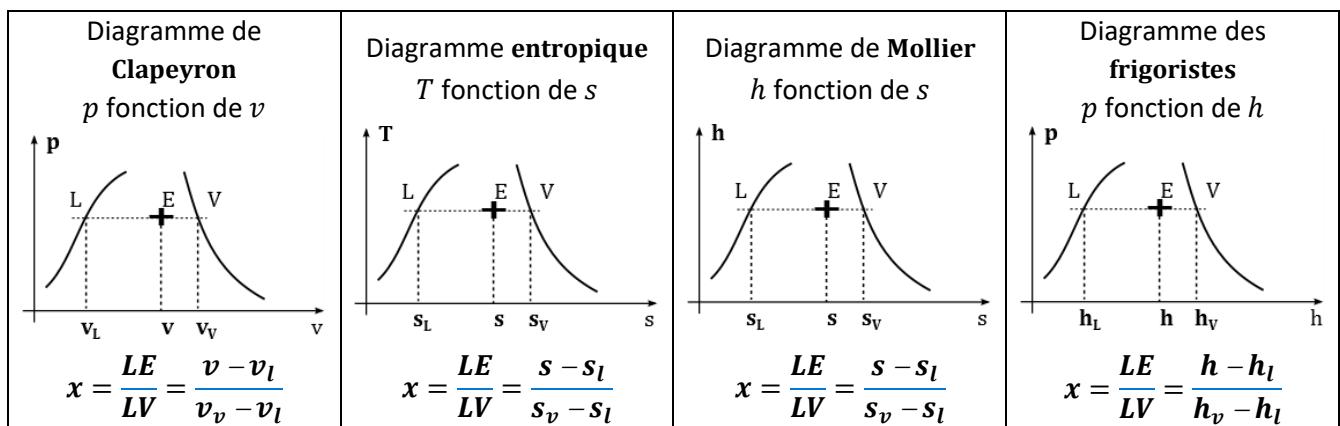
Le nom de théorème des moments est à rapprocher de l'équilibre des moments sur une balance :

$$\Rightarrow y = (1-x)y_l + xy_v \Rightarrow y - y_l = x(y_v - y_l)$$



$$\Rightarrow x = \frac{y - y_l}{y_v - y_l} = \frac{m_L}{m_V}$$

Ce résultat constitue le **théorème des moments**.



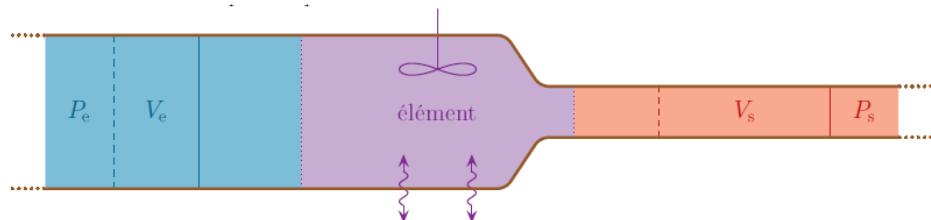
VI) MACHINES AVEC ECOULEMENT : SYSTEMES OUVERTS

A) Premier principe appliqué à un système en écoulement permanent

1) Présentation

Dans les exemples étudiés précédemment, le fluide subit des transformations en vase clos dans un cylindre, mais dans de nombreuses autres situations, le fluide est en **écoulement** à travers un certain nombre **d'organes (ou éléments)** qui constituent la machine thermique ; chaque organe définit un volume de contrôle à travers lequel le fluide s'écoule en subissant des transformations.

Tout organe (élément) peut être schématisé ainsi, et constituant un **système ouvert** :



Système fermé : Système pour lequel il n'y a ni entrée ni sortie de matière.

Système ouvert : Le système va être caractérisé par une surface fictive, appelée « surface de contrôle », qui reste fixe au cours du temps. La masse située dans le « volume de contrôle » varie (ou peut varier) au cours du temps.

Système en écoulement permanent : Système ouvert dont les paramètres caractéristiques sont **stationnaires**, c'est-à-dire constants au cours du temps.

La plupart des machines industrielles traversées par un fluide (compresseur, détendeur, échangeur thermique, chambre de combustion...) sont des systèmes en écoulement permanent.

On cherche une formulation du premier principe plus adaptée à ces fluides en écoulement permanent.

2) Définition du système

Le système considéré est défini par la **surface de contrôle** (Σ) ou (Σ_0) (dans le cas de l'étude d'un organe, elle englobe l'organe étudié), et constitue un **système ouvert**, avec une masse dm_e de fluide entrant dans (Σ) entre les instants t et $t + dt$ et une masse dm_s de fluide qui en sort entre les instants t et $t + dt$.

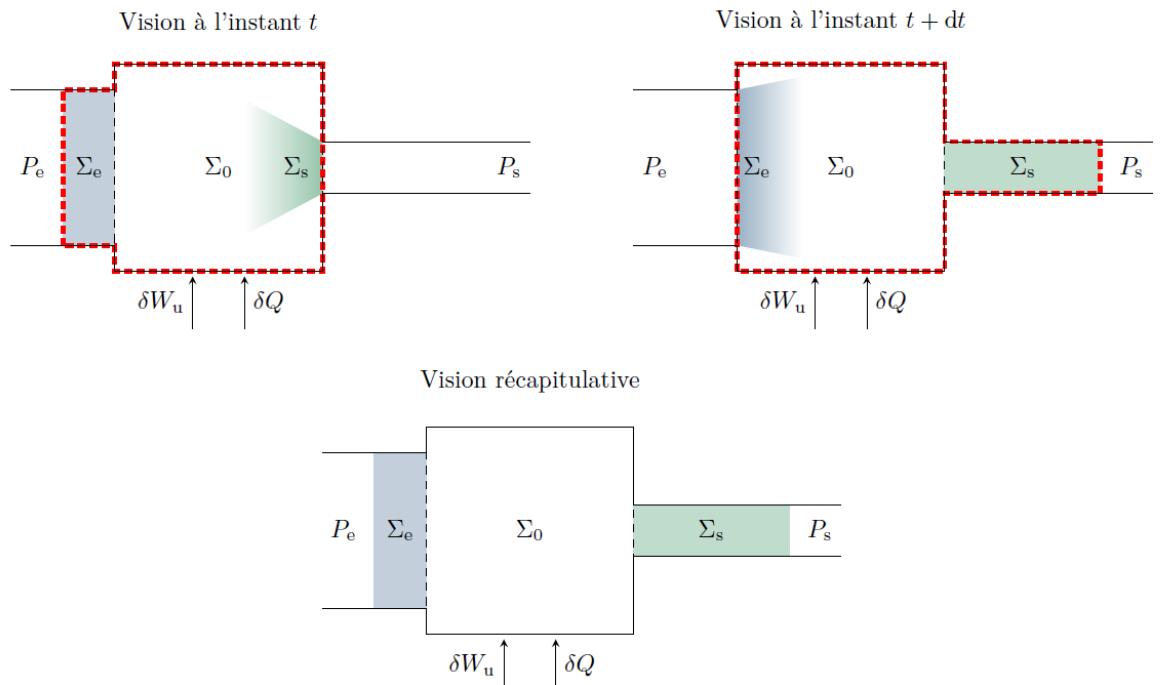
La masse dm_e entrant pendant dt constitue le système (Σ_e), tandis que la masse dm_s sortant pendant dt constitue le système (Σ_s).

On définit alors le système (Σ^*) associé à (Σ) de la manière suivante :

A l'instant t , $(\Sigma^*)(t) = (\Sigma)(t) + (\Sigma_e)$ (volume de contrôle plus matière qui va entrer dans ce volume pendant la durée dt)

A l'instant $t + dt$, $(\Sigma^*)(t + dt) = (\Sigma)(t + dt) + (\Sigma_s)$ (volume de contrôle plus matière qui va sortir de ce volume pendant la durée dt).

Ainsi défini, ce système (Σ^*) constitue un système fermé (ses frontières se déplacent avec le fluide en écoulement).

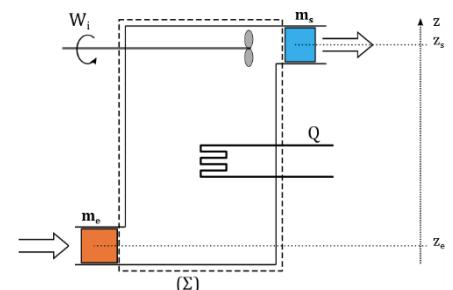


Se ramener d'un système ouvert à un système fermé.

Pendant ce temps dt , le système (Σ) reçoit :

- un **transfert thermique** δQ (algébrique)
- un **travail indiqué** δW_i (algébrique), ou travail machine, ou **travail utile** δW_u (travail directement échangé entre la machine et le fluide en écoulement, dû aux pièces mobiles de la machine, **sans prendre en compte le travail des forces pressantes** à l'entrée et à la sortie de la machine).

Pendant ce temps dt ,



La masse dm_e entrant dans le système a les caractéristiques suivantes :

p_e pression

T_e température

v_e volume massique

u_e énergie interne massique

h_e enthalpie massique

c_e vitesse

z_e altitude

La masse dm_s sortant du système a les caractéristiques suivantes :

p_s pression

T_s température

v_s volume massique

u_s énergie interne massique

h_s enthalpie massique

c_s vitesse

z_s altitude

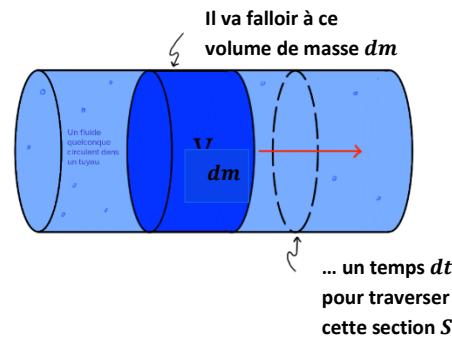
On se place dans le cadre d'un fluide en **écoulement permanent**

■ **Régime permanent** : Les caractéristiques du fluide contenu dans (Σ) sont constantes au cours du temps : masse, énergie totale, pressions, températures, etc. Les paramètres intensifs à l'entrée et à la sortie sont également indépendants du temps.

■ **Débit massique** : Si une masse dm traverse une section de conduite pendant un temps dt , alors le débit massique au niveau de cette conduite est défini par :

$$D_m =$$

Unité S.I. :



3) Conservation de la masse

En régime permanent, il n'y a pas d'accumulation de matière dans (Σ), dont la masse M est constante :

$$M(t) = M(t + dt) \quad (1).$$

De plus, le système (Σ^*) étant fermé, par conservation de la matière, sa masse M^* est constante, soit

$$M^*(t) = M^*(t + dt) \quad (2)$$

Or $M^*(t) = M(t) + dm_e$ et $M^*(t + dt) = M(t + dt) + dm_s$

Dans (2) : $M^*(t) = M(t) + dm_e = M^*(t + dt) = M(t + dt) + dm_s$,

Avec (1) : $dm_e = dm_s = dm$

La masse dm_e entrant pendant dt dans la machine est égale à la masse dm_s sortant de la machine pendant dt :

$$dm_e = dm_s = dm$$

Le débit massique D_m , ici défini par : $D_m = \frac{dm}{dt}$, est constant.

4) Exploitation du premier principe

■ BILAN ISSU DU PREMIER PRINCIPE

Soient	E^*	l'énergie totale de (Σ^*)	E	l'énergie totale de (Σ)
	U^*	l'énergie interne de (Σ^*)	U	l'énergie interne de (Σ)
	E_m^*	l'énergie mécanique de (Σ^*)	E_m	l'énergie mécanique de (Σ)
	E_c^*	l'énergie cinétique de (Σ^*)	E_c	l'énergie cinétique de (Σ)
	E_p^*	l'énergie potentielle de (Σ^*)	E_p	l'énergie potentielle de (Σ)

On peut appliquer le premier principe à (Σ^*) , qui constitue un système fermé, sur l'intervalle de temps dt :

$$dE^* = E^*(t + dt) - E^*(t) = \delta Q + \delta W$$

Avec δQ quantité de chaleur algébriquement reçue par (Σ^*) entre t et $t + dt$

δW travail algébriquement reçu par (Σ^*) entre t et $t + dt$

$$E^* = U^* + E_m^* = U^* + E_c^* + E_p^*$$

■ VARIATIONS D'ENERGIE

En régime stationnaire, les différentes grandeurs X associées à (Σ) sont indépendantes du temps : $X(t) = X(t + dt)$.

$$\begin{aligned} U^*(t + dt) - U^*(t) &= [U(t + dt) + dm_s u_s] - [U(t) + dm_e u_e] \\ U^*(t + dt) - U^*(t) &= dm_s u_s - dm_e u_e \quad \text{car } U \text{ est constante au cours du temps} \\ &\quad (\text{stationnaire}) \\ &= dm (u_s - u_e) \end{aligned}$$

Il en va de même pour E_c^* et E_p^*

$$dE^* = dm (u_s - u_e) + dm (e_{cs} - e_{ce}) + dm (e_{ps} - e_{pe}) = dm (u_s - u_e) + dm (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + dm g (z_s - z_e) \quad (1)$$

■ TRAVAIL DES FORCES DE PRESSION

$$\begin{aligned} \delta W &= \delta W_{\text{pression}} + \delta W_i \\ \delta W_{\text{pression}} &= (\delta W_{\text{pression}})_{\text{entrée}} + (\delta W_{\text{pression}})_{\text{sortie}} \\ (\delta W_{\text{pression}})_{\text{entrée}} &= -p_e dV_e \end{aligned}$$

avec dV_e volume balayé par dm_e , correspondant en valeur absolue au volume occupé par dm_e à l'instant t , soit $v_e dm$.

De plus, ce volume occupé par la masse entrant diminue, soit $dV_e(t) = -v_e dm$. Finalement :

$$(\delta W_{\text{pression}})_{\text{entrée}} = + p_e v_e dm$$

On peut vérifier le signe de ce travail : il faut réellement fournir un travail au fluide afin de le faire entrer dans le système ; en pratique il est poussé par le fluide arrivant en amont. Ceci est cohérent avec l'expression établie correspondant bien à un travail positif : $(\delta W_{\text{pression}})_{\text{entrée}} = + p_e v_e dm > 0$

$$(\delta W_{\text{pression}})_{\text{sortie}} = - p_s (V_s(t + dt) - V_s(t)) = - p_s (dV_s(t)) = - p_s v_s dm$$

$$dE^* = \delta Q + \delta W = \delta Q + \delta W_i + dm (p_e v_e - p_s v_s) \quad (2)$$

En identifiant (1) et (2) on obtient :

$$dm (u_s - u_e) + dm (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + dm g (z_s - z_e) = \delta Q + \delta W_i + dm (p_e v_e - p_s v_s)$$

$$dm (u_s + p_s v_s - u_e - p_e v_e) + dm (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + dm g (z_s - z_e) = \delta Q + \delta W_i$$

On voit apparaître **l'enthalpie** comme fonction d'état importante pour cette étude de système en écoulement permanent :

$$dm [(h_s - h_e) + (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + (gz_s - gz_e)] = \delta Q + \delta W_i$$

Si on divise cette équation par dt , on obtient une **équation en termes de puissances** :

- **Puissance indiquée (utile) reçue P_i :** $P_i =$
- **Puissance thermique reçue P_{th} :** $P_{th} =$
- **Premier principe appliqué à un écoulement permanent, équation en termes de puissance :**

Où $D_m = \frac{dm}{dt}$ débit massique (en kg.s^{-1}),

On peut aussi écrire l'**équation relative à une unité de masse** en divisant la première équation par dm .

On note alors $w_i = \frac{\delta W_i}{dm}$ le **travail indiqué massique** (ou travail massique net) et $q = \frac{\delta Q}{dm}$ le **transfert thermique massique**. Ce sont donc le travail indiqué et la chaleur reçus par la machine pour une unité de masse de fluide traversant la machine.

- **Premier principe appliqué à un écoulement permanent, équation massique :**

Résultats à connaître. Attention à l'homogénéité des relations écrites !

B) Application à l'étude des machines thermiques en écoulement permanent

Expressions du premier principe industriel

Chaque organe étudié constitue un **système ouvert**, pour lequel il faudra utiliser le premier principe industriel.

- **Premier principe industriel simplifié** appliqué à un élément quelconque d'une machine thermique à écoulement fonctionnant en régime stationnaire :

Cas usuel : en négligeant les variations d'énergie mécanique macroscopique du fluide :

$$h_s - h_e = w_i + q$$

$\Delta h = h_s - h_e$ = **variation d'enthalpie massique entre l'entrée et la sortie de l'élément, au même instant t considéré**

w_i travail massique indiqué reçu par le fluide dans l'élément (forces autres que les forces de pression)

q transfert thermique massique reçu par le fluide dans l'élément

- **Bilan en terme de puissance :**

$$D_m.(h_s - h_e) = \dot{Q} + \dot{W}_u = \mathcal{P}_{th} + \mathcal{P}_u$$

$$D_m = \frac{dm}{dt}$$
 débit massique (en kg.s^{-1}),

Les équations obtenues ne concernent plus les variations des fonctions d'état au cours d'une transformation de durée finie, mais les différences entre les fonctions d'état massiques en entrée et en sortie de chaque organe en régime permanent.

Les deux approches « système ouvert » et « système fermé » sont complémentaires l'une de l'autre, mais ne doivent être ni confondues, ni mélangées.

C) Etude des principaux organes des machines

1. Détendeur, vanne de détente

Dans un détendeur, l'écoulement rencontre un obstacle (soupape, bouchon poreux, robinet).

Le détendeur est destiné à abaisser la pression du fluide : $p_s < p_e$.



La détente se fait le plus souvent dans une conduite horizontale, sans variation conséquente d'énergie cinétique. Le fluide ne reçoit ni transfert thermique ni travail utile.

On parle de **détente de Joule-Thomson**.

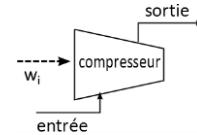
Avec $(h_s - h_e) + (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + (gz_s - gz_e) = w_i + q$,

le premier principe industriel s'écrit donc :



2. Compresseur, pompe

Compresseur : destiné à augmenter la pression d'un gaz :
 $p_s > p_e$.
(Pompe pour un liquide).



On apporte un travail mécanique pour mettre en mouvement les pièces mobiles et augmenter l'enthalpie du fluide.

Sauf indication contraire, on suppose que l'évolution du fluide est adiabatique ($q = 0$).

On néglige d'autre part les variations d'énergie cinétique et potentielle.

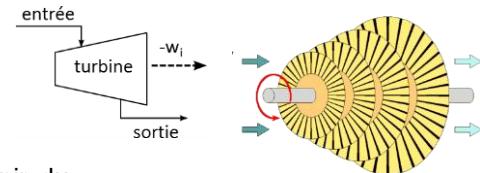
Avec $(h_s - h_e) + (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + (gz_s - gz_e) = w_i + q$,

le premier principe industriel s'écrit donc :

à savoir retrouver

3. Turbine

Le but de la turbine est de fournir un travail utile ; elle fonctionne à l'envers du compresseur.



Le fluide passe à travers des pales attachées à un arbre rotatif pour fournir du travail.

Dans les turbines à vapeur ou à gaz, la vapeur ou le gaz surchauffé entre dans la turbine et se détend à une pression plus basse à la sortie, en faisant tourner les pales. $p_s < p_e$.

Sauf indication contraire, on suppose que l'évolution du fluide est adiabatique ($q = 0$) ; on néglige d'autre part les variations d'énergie cinétique et potentielle.

L'utilisateur veut **récupérer un travail utile** :

Avec $(h_s - h_e) + (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + (gz_s - gz_e) = w_i + q$



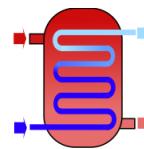
le 1^{er} principe industriel s'écrit donc :

à savoir retrouver

Remarque : Dans les turbines hydrauliques, l'eau en tombant à travers les pales les fait tourner.

4. Échangeur thermique, condenseur, évaporateur, chambre de combustion

Ces organes ne comportent **pas de parties mobiles**, donc $w_i = 0$; on néglige de plus les variations d'énergie cinétique et potentielle.



Avec $(h_s - h_e) + (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + (gz_s - gz_e) = w_i + q$



le premier principe industriel s'écrit donc :

à savoir retrouver

- **Échangeur thermique** : dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre, sans les mélanger, à travers une surface d'échange qui sépare les fluides.

La plupart du temps, on utilise cette méthode pour refroidir ou réchauffer un liquide ou un gaz qu'il est impossible ou difficile de refroidir ou chauffer directement, par exemple l'eau d'un circuit primaire de refroidissement de centrale nucléaire.

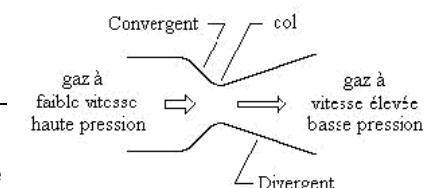
- **Condenseur** : permet à la vapeur de se liquéfier (c'est-à-dire de se condenser), partiellement ou totalement. Le fluide cède de la chaleur dans le condenseur : $q < 0$.
- **Évaporateur** : permet au liquide de se vaporiser, partiellement ou totalement. Le fluide absorbe de la chaleur dans l'évaporateur : $q > 0$.
- **Chambre de combustion** : enceinte dans laquelle on déclenche volontairement une combustion, afin de fournir des gaz chauds à la turbine et de participer à la propulsion à travers leur détente dans la tuyère d'éjection.

5) Tuyère

But de la tuyère : **accroître l'énergie cinétique du fluide**.

Principe : conduit de section droite variable placé à l'arrière d'un moteur produisant des gaz de combustion chauds qui permet de transformer l'énergie thermique de ceux-ci en énergie cinétique.

Modélisation : tuyère supposée parfaitement calorifugée, aucun échange de travail utile avec l'extérieur, fluide entrant dans la tuyère avec une vitesse en général négligeable devant la vitesse de sortie c_s .



Avec $(h_s - h_e) + (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + (gz_s - gz_e) = w_i + q$

le premier principe industriel s'écrit donc :

à savoir retrouver

6) Résumé des caractéristiques des principaux organes

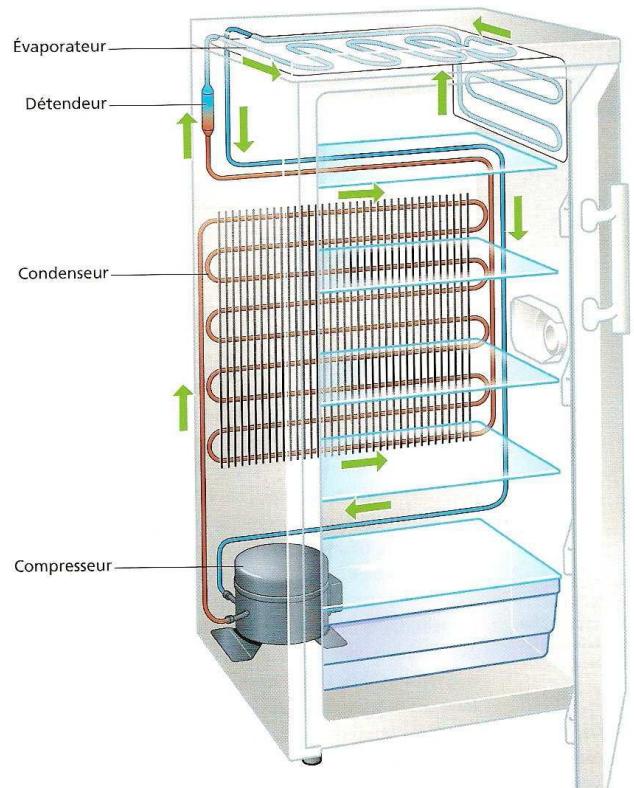
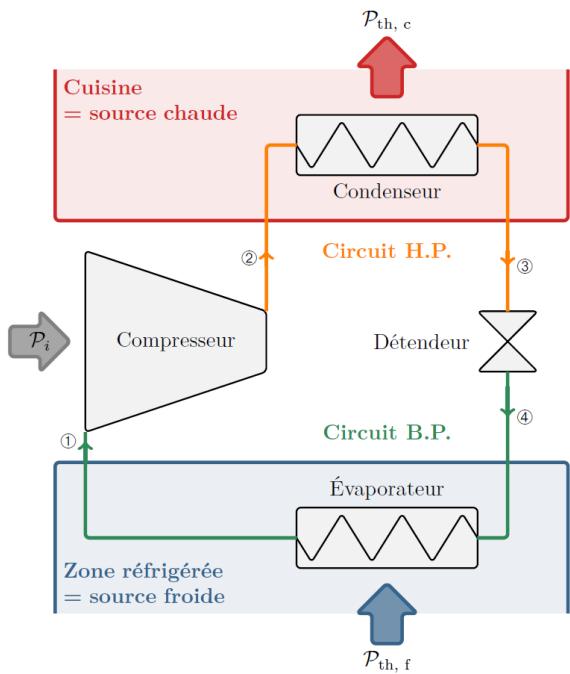
Chaque organe a un rôle spécifique, consistant à réaliser un transfert thermique ou à échanger un travail utile.

Organe	rôle	Nature de la transformation	Echanges d'énergie
Compresseur	augmenter la pression d'un gaz	Adiabatique, modèle classique : isentropique	
Pompe	augmenter la pression d'un liquide	Adiabatique	
Vanne de détente (détendeur)	diminuer la pression d'un fluide	Isenthalpique	
Turbine	mise en mouvement par le fluide	Adiabatique	
Echangeur thermique ; chaudière, etc.	Faire varier la température du fluide ou faire un changement d'état		
Evaporateur	Echangeur thermique particulier dans lequel il y a vaporisation	Monobare	
Condenseur	Echangeur thermique particulier dans lequel il y a liquéfaction	Monobare	

Il faut connaître la fonction de chacun de ces éléments et savoir retrouver l'écriture pertinente du premier principe industriel pour chacune d'elles.

D) Exemples

1) Réfrigérateur à fréon



2) Exemple d'un moteur : cycle de Rankine

Le cycle de Rankine réel est celui de la plupart des thermiques dites à combustion externe actuellement utilisées : machines à propulsion de bateaux, de sous-marins, ou pour la d'électricité dans le sens moteur (centrales nucléaires).

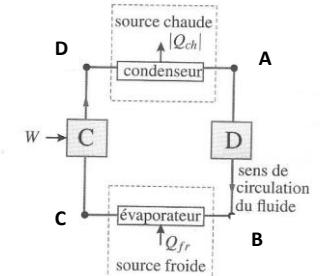
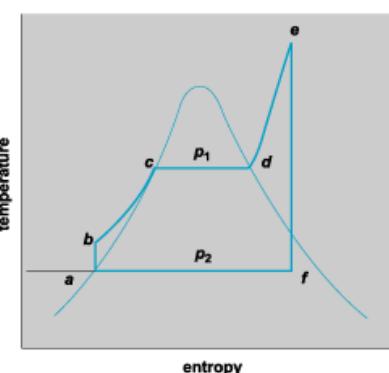
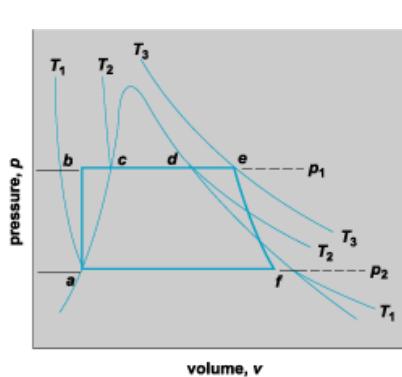
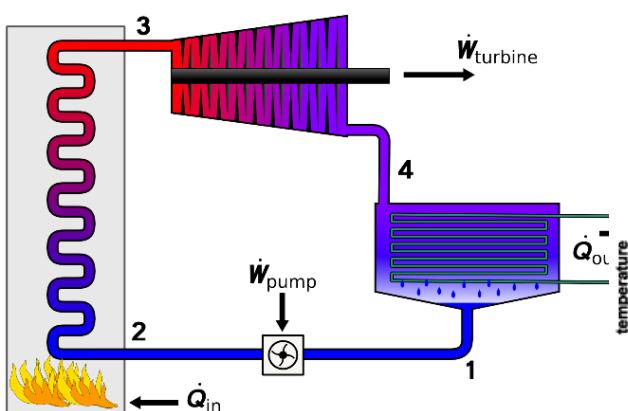


Figure 25.8 – Schéma d'un système à condensation.