

Machines thermodynamiques

Plan du cours

I	Classification des machines thermiques	1
I.A	Par leur fonction.	1
I.B	Par leur structure	2
II	Machines dithermes cycliques	4
II.A	Source chaude et source froide	4
II.B	Performances	5
II.C	Cycle d'une machine à pistons dans le diagramme de Watt	7
II.D	Exemple : moteur de Lenoir	8
III	Bilan d'énergie pour un système ouvert	9
III.A	Premier principe industriel	9
III.B	Exemple : puissance consommée par un compresseur	11

(R) Résultat à connaître par cœur.

(M) Méthode à retenir, mais pas le résultat.

(D) Démonstration à savoir refaire.

(Q) Aspect qualitatif uniquement.

Les paragraphes sans mention en marge sont là pour faciliter votre compréhension ou pour votre culture mais n'ont pas forcément besoin d'être appris en tant que tel.

Contrairement à la majorité des domaines de la physique, la thermodynamique n'est pas née de l'observation de phénomènes naturels. Elle a été créée au XIX^e siècle, en pleine Révolution industrielle, en réponse aux besoins croissants d'efficacité des machines thermiques, notamment les machines à vapeur. Les ingénieurs et scientifiques de l'époque cherchaient à comprendre et à optimiser la conversion de la chaleur en travail mécanique. Ce chapitre constitue une première approche des machines thermodynamiques, qui sera approfondie dans les chapitres suivants.



On appelle **machine thermique** un dispositif dans lequel un fluide échange de l'énergie par transfert thermique et par travail.

I - Classification des machines thermiques

I.A - Par leur fonction

• Machine motrice



On appelle **moteur thermique** une machine qui fournit un travail mécanique à son environnement.



Exemples :

Moteur d'avion ou de voiture, mais aussi centrale thermique dans laquelle la détente de vapeur d'eau permet la mise en rotation d'un alternateur produisant de l'électricité.

Espace 1

- Machine frigorifique

R



On appelle **machine frigorifique** une machine qui réalise un transfert thermique effectif de sens contraire au sens naturel.

« Sens naturel » = du chaud vers le froid

→ une machine frigorifique refroidit la partie la plus froide de l'installation et réchauffe la partie la plus chaude.

Exemples :

Un frigo a pour but de refroidir son compartiment intérieur ... mais il réchauffe la cuisine dans laquelle il se trouve !

Une pompe à chaleur est destinée à réchauffer la maison ... mais elle refroidit le jardin.

Espace 2

Selon la finalité de la machine, le fluide peut être dit **caloporteur** ou **frigorigène** ... mais ça ne change rien sur sa nature : un même fluide peut être utilisé dans une pompe à chaleur ou un réfrigérateur.

Q

Pour que cela soit possible, le fluide d'une machine frigorifique doit recevoir du travail mécanique au cours du cycle, c'est pourquoi les machines frigorifiques sont qualifiées de **machines réceptrices** ou **récepteurs thermiques**.

💣💣💣 **Attention !** Ne pas dire qu'une machine réceptrice « reçoit de l'énergie » ... c'est le cas de *toutes* les machines, ce qui compte est la forme sous laquelle ce transfert a lieu.

- Autres

De nombreuses autres fonctions sont possibles : liquéfier un gaz (production d'oxygène liquide, ou de gaz naturel liquéfié GNL), extraire un composé (captage de CO_2), séparer un mélange, etc. ... sans même parler de tous les réacteurs chimiques ! Vous en rencontrerez certaines l'an prochain.

I.B - Par leur structure

- Machine à pistons

Q

Toutes les transformations ont lieu successivement dans une même chambre cylindrique, dont le volume varie grâce à un piston mobile. Plusieurs chambres peuvent être montées en parallèle (« moteur quatre cylindres »). Les machines à piston usuelles sont toutes des moteurs, généralement de petites dimensions, ce qui permet de les utiliser dans des installations mobiles.

Exemples : *moteur à combustion d'une voiture, d'une moto ou encore d'un groupe électrogène, etc.*

- Machine à écoulement de fluide

Q

Un fluide circule dans la machine et traverse successivement différents composants élémentaires dans lesquels il subit des transformations. Le fluide utilisé est qualifié selon les situations de **fluide caloporteur** ou de **fluide frigorigène**. Une machine à écoulement de fluide peut aussi bien être un moteur qu'une machine frigorifique.

Exemples : *réfrigérateur, réacteur d'avion, circuit hydraulique d'une centrale électrique, etc.*

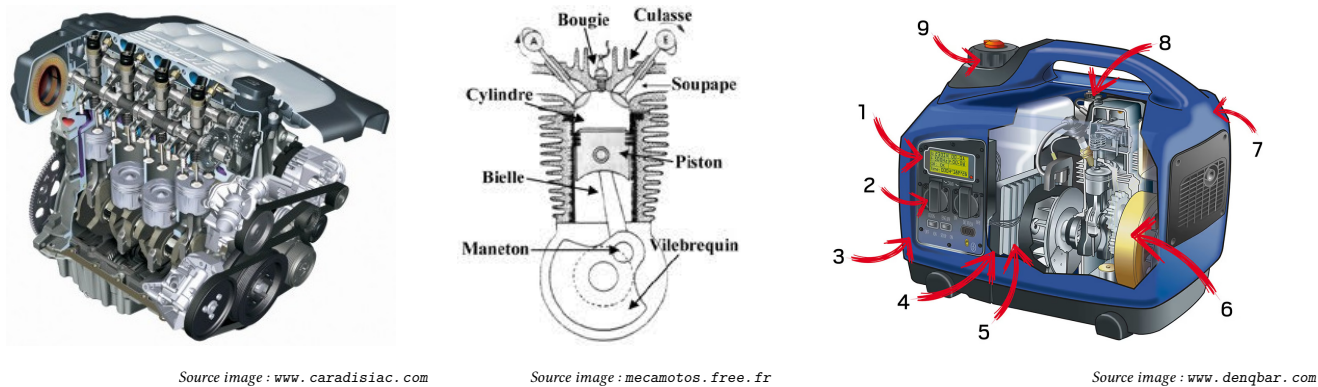


Figure 1 – Exemples de machines à piston. Gauche : cylindres d’un moteur essence. Droite : schéma de principe d’un groupe électrogène

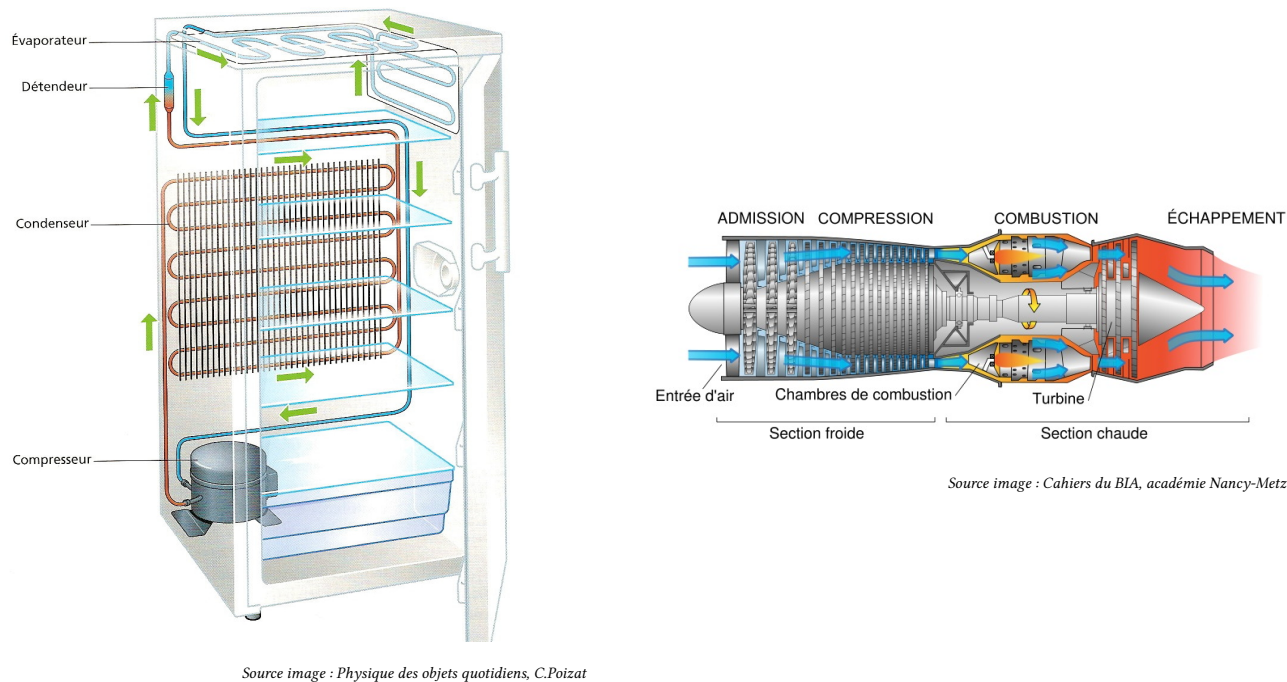
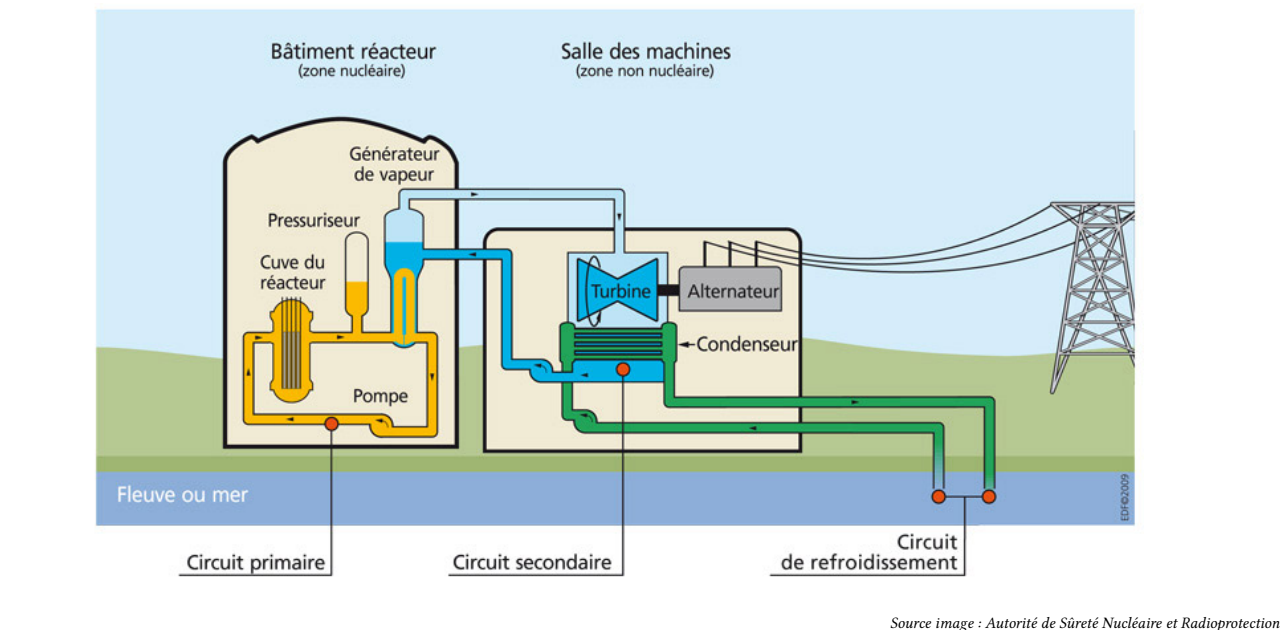


Figure 2 – Exemples de machines à écoulement de fluide. Haut : centrale nucléaire REP. Gauche : réfrigérateur domestique. Droite : turboréacteur d’un avion.

- **Machine cyclique**



Une machine est **cyclique** lorsque le même fluide en circuit fermé reproduit la même suite de transformations indéfiniment. De nombreuses machines à écoulement sont cycliques, c'est rarement (jamais ?) le cas pour les machines à pistons. Cependant, de nombreuses machines, même à pistons, peuvent se modéliser par des machines cycliques.

II - Machines dithermes cycliques

II.A - Source chaude et source froide

- **Définition**



Une machine est dite **ditherme** lorsque le fluide y échange du transfert thermique avec deux milieux de températures différentes, appelés **source chaude** et **source froide**, modélisés par deux thermostats de température T_c et T_f .

Le fluide y échange aussi du travail, par l'intermédiaire de pièces en mouvement.

Une machine ditherme peut être aussi bien motrice que frigorifique.

- Une des deux sources est généralement le milieu naturel (atmosphère, eau d'un fleuve, etc.), si bien qu'il n'y a qu'une seule source « à créer », ce qui est technologiquement plus facile.
- En pratique, les sources n'ont pas toujours de réalité physique et il peut s'agir d'une modélisation de processus comme une réaction chimique.



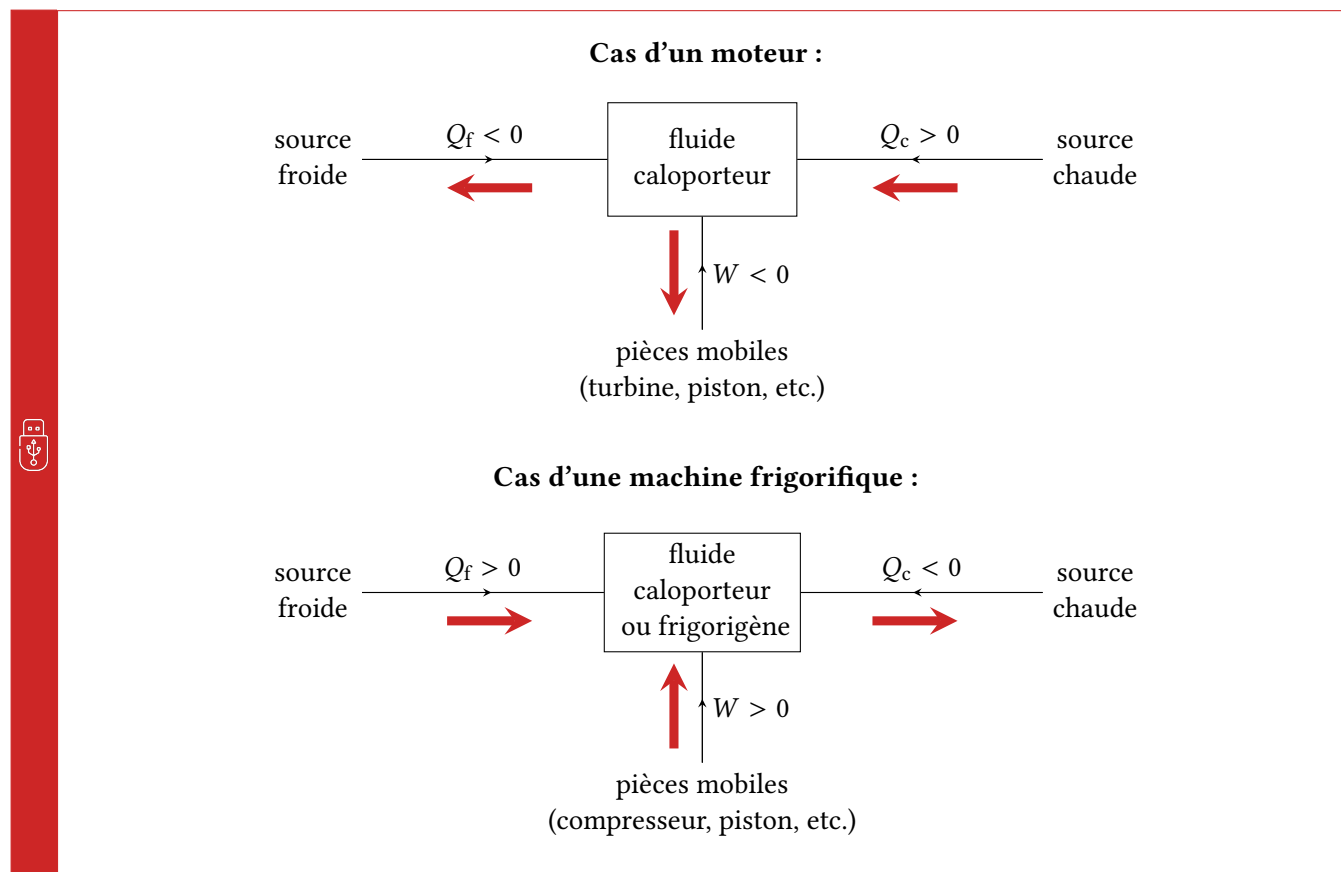
Application 1 : Identifier les sources

Pour les exemples discutés ci-dessus, identifier le fluide qui subit les transformations, les deux sources, et les pièces en mouvement permettant l'échange de travail.

Machine	Fluide	Source chaude	Source froide	Pièces en mouvement
Moteur à essence	Mélange air + carburant	Modèle pour la réaction de combustion	Modèle pour le renouvellement du mélange	Piston
Centrale nucléaire	Eau du circuit secondaire	Eau du circuit primaire	Eau du circuit de refroidissement	Turbine
Réfrigérateur	Fluide frigorigène (isobutane R600a)	Air intérieur au frigo	Air de la cuisine	Compresseur
Turboréacteur	Mélange air + carburant	Modèle pour la réaction de combustion	Atmosphère	Compresseur et turbine

• Diagramme des échanges

Le sens des échanges entre le fluide d'une machine et les sources dépend bien sûr de sa fonction.



Le fonctionnement de principe est donc exactement symétrique entre un moteur et une machine frigorifique ... ce qui ne veut pas dire qu'une machine donnée peut fonctionner dans les deux sens !

• Application du premier principe

Dans une machine cyclique, le fluide retrouve exactement son état initial à la fin du cycle.

Le premier principe appliqué à l'ensemble du fluide sur un cycle complet s'écrit donc

$$\Delta U = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er P}}}{W} + Q_c + Q_f = 0$$

$\uparrow$ cycle

II.B - Performances

De façon très générale, la performance d'une machine thermique est décrite par un nombre sans dimension :

$$\text{performance} = \left| \frac{\text{énergie intéressante récupérée}}{\text{énergie coûteuse dépensée}} \right|$$

Le transfert thermique échangé avec le milieu naturel extérieur est toujours considéré gratuit, les deux énergies qui interviennent dans le calcul des performances sont donc le travail échangé et l'autre transfert thermique.

Remarque : On peut donc noter que les performances d'une machine sont définies sur un critère relevant davantage de l'économie que de la physique. On rencontrera donc quelques « bizarreries » associées à ces définitions, notamment le fait que même le moteur le plus « parfait » sur le plan de la physique ne peut pas obtenir un rendement de 100 %.



Type de machine	Énergie intéressante	Énergie coûteuse	Performance
Moteur	W	Q_c	Rendement $\eta = -\frac{W}{Q_c}$
Réfrigérateur	Q_f	W	Efficacité $e = \frac{Q_f}{W}$
Pompe à chaleur	Q_c	W	Efficacité $e = -\frac{Q_c}{W}$

Le rendement d'un moteur est toujours compris entre 0 et 1, mais une efficacité peut être supérieure à 1.

En effet :

Pour un moteur, $Q_f + Q_c + W = 0$ donc $-W = Q_c + Q_f < Q_c$ car $Q_f < 0$.

Pour une pompe à chaleur, $-Q_c = W + Q_f > W$ car $Q_f > 0$.

Pour un réfrigérateur on ne peut rien dire en général.

Espace 3

Ordres de grandeur :

Rendement d'installations motrices	Efficacité machines frigorifiques
Moteur voiture essence : $\eta \sim 30\%$	Efficacité pompe à chaleur air-eau : $e \sim 4$
Moteur avion de tourisme : $\eta \sim 20\%$	Efficacité pompe à chaleur air-air : $e \sim 3$
Moteur bateau porte-container : $\eta \sim 50\%$	Efficacité climatiseur : $e \sim 3$
Centrale nucléaire : $\eta \sim 30\%$	Efficacité réfrigérateur : $e \sim 1,5$
Centrale à gaz : $\eta \sim 35\%$	Efficacité congélateur : $e \sim 1$

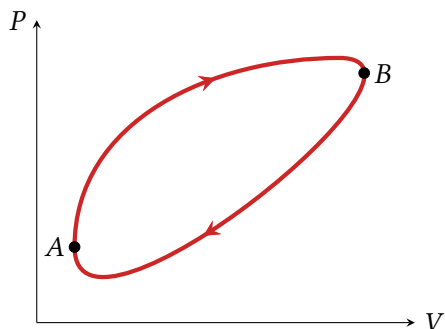
II.C - Cycle d'une machine à pistons dans le diagramme de Watt

Hypothèse : toutes les transformations sont mécaniquement réversibles, donc la pression P au sein du gaz est égale à la pression extérieure apparente P_{app} , qui inclut toutes les forces s'exerçant sur les parois du système.

→ travail algébrique reçu par le gaz au cours du cycle :

$$W = \oint_{\text{cycle}} -P_{\text{app}} dV = - \oint_{\text{cycle}} P dV.$$

Cas d'un cycle orienté en sens horaire :

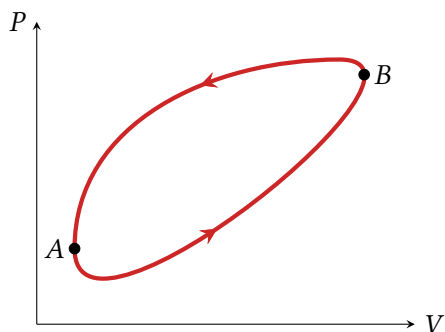


$$W = - \int_{\widehat{AB}} P dV - \int_{\widehat{BA}} P dV = -\mathcal{A}_{\widehat{AB}} + \mathcal{A}_{\widehat{BA}}$$

en notant $\mathcal{A}_C > 0$ l'aire sous la courbe C .

Concl : W est relié à l'aire du cycle, et ici $\mathcal{A}_{\widehat{AB}} > \mathcal{A}_{\widehat{BA}}$ donc $W < 0$ donc le cycle est moteur.

Cas d'un cycle orienté en sens trigonométrique :



Même raisonnement, mais cette fois $\mathcal{A}_{\widehat{AB}} < \mathcal{A}_{\widehat{BA}}$ donc $W > 0$ donc le cycle est celui d'une machine frigorifique.

Généralisation :

L'aire du cycle représentant la suite de transformations dans le diagramme de Watt est reliée au travail échangé par la machine au cours d'un cycle.

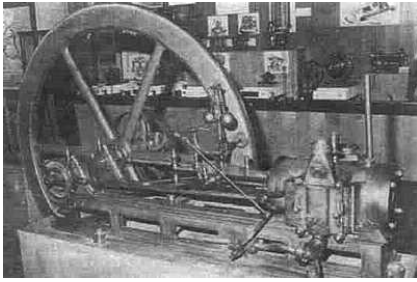
Le cycle d'une machine frigorifique tourne toujours en sens trigonométrique, celui d'un moteur dans le sens horaire.



→ « Cycle frigo en sens trigo, cycle moteur dans le sens de l'heure »

II.D - Exemple : moteur de Lenoir

Un peu d'histoire :



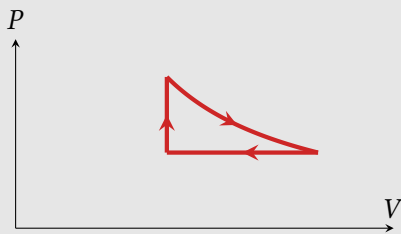
Source image : Musée des Arts et Métiers

Le moteur développé par l'ingénieur belge Étienne Lenoir au tournant des années 1860 est l'un des tous premiers moteurs à combustion interne. Ce moteur utilisait un mélange air-gaz inflammable allumé par une étincelle électrique. Il ne comprimait pas le mélange avant l'allumage, ce qui limitait fortement son rendement. Malgré cela, il marqua une avancée majeure dans l'histoire de la motorisation. Tournant à 100 tours par minute, son moteur développait environ 0,5 cheval-vapeur (autant qu'un vélo électrique) pour un rendement de seulement 4 à 5 %, mais il permit de faire rouler un véhicule sur 18 km en 1863 ... en trois heures, c'est-à-dire à la vitesse d'un piéton.

M

Application 2 : Modélisation historique du moteur de Lenoir

On s'intéresse à une modélisation historique du moteur de Lenoir, développée dans les années 1870. On raisonne sur le mélange gazeux présent dans la chambre de combustion du moteur, modélisé par un gaz parfait d'exposant adiabatique γ formant un système fermé de quantité de matière n_0 . Après l'admission d'air dans la chambre de combustion, l'état du mélange (P_1, V_1, T_1) est supposé connu.



Le cycle qu'il subit se compose des étapes suivantes :

- 1 $\rightarrow$ 2 : explosion isochore jusqu'à la pression $P_2 = 2P_1$;
- 2 $\rightarrow$ 3 : détente isotherme jusqu'à un volume $V_3 = 2V_1$;
- 3 $\rightarrow$ 1 : compression isobare modélisant le renouvellement du mélange (échappement, admission, injection de carburant, inflammation).

Un défaut majeur de ce modèle historique est la modélisation de la deuxième étape. Considérer la détente adiabatique plutôt qu'isotherme serait plus conforme à la réalité ... mais ces notions étaient encore en construction à l'époque !

- 1 - Pourquoi un modèle de détente adiabatique paraît-il plus adapté ?
- 2 - Le cycle est représenté ci-dessus dans le diagramme de Watt. Identifier les différentes étapes et justifier leur allure. À quoi reconnaît-on qu'il s'agit d'un moteur ?
- 3 - Calculer le transfert thermique Q_c reçu par le gaz de la part de la source chaude en fonction de P_1, V_1 et γ .
- 4 - Calculer le travail W reçu au cours du cycle complet, en fonction de P_1 et V_1 .
- 5 - En déduire le rendement du cycle.

III - Bilan d'énergie pour un système ouvert

Nous avons jusqu'à présent procédé à des bilans d'énergie interne que pour des systèmes fermés, ce qui n'est pas suffisant pour étudier les machines à écoulement de fluide.

Pour quantifier les échanges d'énergie, il faut connaître l'état du fluide non plus en fonction du temps mais en fonction de la partie de la machine où il se trouve. Ainsi, les grandeurs pertinentes ne sont plus des grandeurs extensives mais des grandeurs locales, en l'occurrence massiques. La « version massique » du diagramme de Watt est appelée **diagramme de Clapeyron** (P, v).



III.A - Premier principe industriel

Considérons un fluide en écoulement stationnaire, c'est-à-dire indépendant du temps, traversant un composant d'une machine, où il reçoit du travail et du transfert thermique.

Entre l'entrée et la sortie d'un composant thermodynamique en régime d'écoulement stationnaire,

$$\Delta h + \Delta e_m = (h_s + e_{m,s}) - (h_e + e_{m,e}) = w_i + q,$$

avec w_i et q le travail indiqué et le transfert thermique massiques (= par unité de masse traversant) algébriques reçus par le fluide dans le composant.



Les grandeurs « par unité de masse traversant » s'expriment en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, et s'interprètent comme étant reçues par 1 kg de fluide entre son entrée et sa sortie du composant.



Remarque : en pratique, Δe_m est souvent négligeable devant Δh .

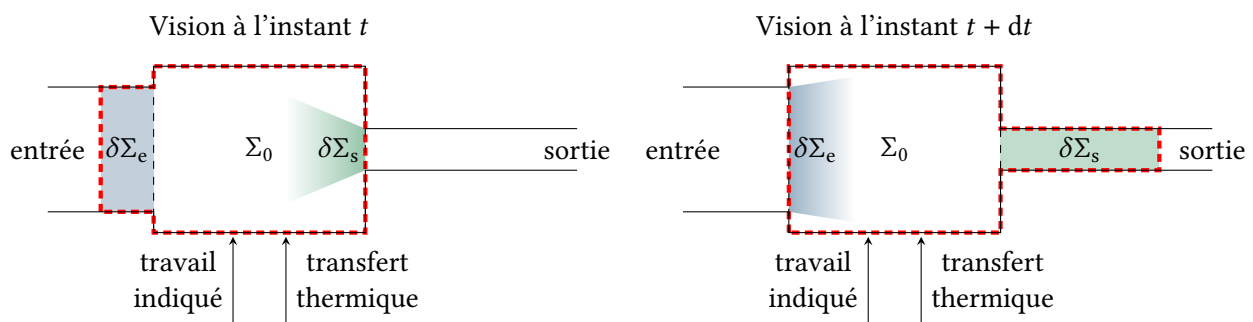
Attention ! Dans ce contexte, Δ ne désigne pas les variations des fonctions d'état du fluide contenu dans le composant entre un instant initial et un instant final n'a pas d'intérêt : l'écoulement étant stationnaire, elles ne varient pas.

Démonstration : le fluide contenu dans le composant définit un système *ouvert* Σ_0 . L'idée de la démonstration consiste à identifier un système *fermé* englobant Σ_0 pour lui appliquer la version que nous connaissons du premier principe.

① *Construction du système fermé.* Considérons deux instants proches t et $t + dt$. On définit le système fermé Σ_f de la façon suivante :

- à l'instant t : $\Sigma_f(t) = \Sigma_0 + \delta\Sigma_e$ avec $\delta\Sigma_e$ la portion infinitésimale de fluide qui va rentrer dans le composant entre t et $t + dt$;
- à l'instant $t + dt$: $\Sigma_f(t + dt) = \Sigma_0 + \delta\Sigma_s$, avec $\delta\Sigma_s$ la portion infinitésimale de fluide qui est sortie du composant entre t et $t + dt$.

L'écoulement étant stationnaire, le système ouvert Σ_0 contient la même masse de fluide à tout instant, $\delta\Sigma_e$ et $\delta\Sigma_s$ ont donc la même masse également, appelée masse traversant δm .



② *Énergies échangées par Σ_f .* Entre t et $t + dt$, le système fermé Σ_f reçoit :

- Le travail indiqué δW_i , qui désigne le travail apporté au fluide par les pièces en mouvement de la machine ;
- Le transfert thermique δQ ;
- Le travail δW_P des forces de pression à l'entrée et à la sortie :

La pression n'est a priori pas la même en entrée et en sortie, il n'est donc pas possible d'utiliser une expression de la forme $-PdV$.

▸ Côté entrée, la paroi (fictive) délimitant Σ_f se déplace d'une longueur $d\ell_e$, la force de pression est motrice et son travail vaut

$$\delta W_{Pe} = \vec{F}_{P,e} \cdot \vec{d\ell}_e = +P_e S_e d\ell_e = +P_e v_e \delta m$$

puisque le produit $S_e d\ell_e$ s'identifie au volume de $\delta \Sigma_e$, égal à $\delta m v_e$ avec v_e le volume massique en entrée.

▸ Côté sortie, le calcul est analogue mais le travail est résistant, d'où

$$\delta W_{Ps} = -P_s v_s \delta m.$$

Espace 4

③ *Bilan d'énergie pour le système fermé.* Par stationnarité, l'énergie interne et l'énergie mécanique de Σ_0 sont indépendantes du temps, toutes les variations se retrouvent donc dans $\delta \Sigma_e$ et $\delta \Sigma_s$.

Le premier principe appliqué à Σ_f s'écrit

$$\Delta U \underset{\substack{\uparrow \\ \text{additivité}}}{=} \delta m (u_s + e_{m,s}) - \delta m (u_e + e_{m,e}) \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er P}}}{=} \delta W_i + \delta Q + P_e v_e \delta m - P_s v_s \delta m$$

soit en réorganisant

$$(u_s + P_s v_s + e_{m,s}) - (u_e + P_e v_e + e_{m,e}) = \frac{\delta W_i}{\delta m} + \frac{\delta Q}{\delta m}.$$

Espace 5

④ *Conclusion.* On voit apparaître dans le membre de gauche la variation d'enthalpie massique du fluide entre l'entrée et la sortie du composant, et on introduit pour le membre de droite le travail indiqué et le transfert thermique par unité de masse traversant. Qualitativement, ils représentent le travail ou le transfert thermique reçu par 1 kg de fluide entre son entrée et sa sortie du composant. On écrit finalement

$$\Delta h + \Delta e_m = w_i + q,$$

ce qui est bien le résultat annoncé.

III.B - Exemple : puissance consommée par un compresseur

Application 3 : Puissance consommée par un compresseur

Considérons un compresseur industriel, destiné à comprimer de l'air aspiré dans l'atmosphère ($T_0 = 20^\circ\text{C}$, $P_0 = 1\text{ bar}$) jusqu'à $P_1 = 10\text{ bar}$, avec un débit $D = 10\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. La compression est adiabatique réversible.

Donnée : $c_p = 1,0\text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.

- 1 - Représenter l'évolution dans le diagramme de Clapeyron.
- 2 - Déterminer la température T_1 de l'air en sortie du compresseur.
- 3 - Déterminer le travail massique reçu par l'air.
- 4 - En déduire la puissance consommée par le compresseur.

M

Correction des applications de cours

Application 2 : Cycle de Lenoir

- 1 Transformations rapides.
- 2 Isochore $V = \text{cte}$; isotherme $P = \text{cte}/V$; isobare $P = \text{cte}$. Moteur car cycle en sens horaire.
- 3 Source chaude = modèle pour l'explosion.
- 4 Bilan d'énergie interne au cours de l'étape 1-2,

$$\Delta U \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er P}}}{=} Q_c + \underbrace{0}_{\substack{\uparrow \\ \text{iso-V}}} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{GP}}}{=} \frac{n_0 R}{\gamma - 1} (T_2 - T_1) \quad \text{soit} \quad Q_c = \frac{n_0 R}{\gamma - 1} (2T_1 - T_1) = \frac{n_0 R}{\gamma - 1} T_1$$

et en réutilisant l'équation d'état d'un gaz parfait

$$Q_{\text{expl}} = \frac{P_1 V_1}{\gamma - 1}.$$

- 5 Le travail reçu vaut

$$\begin{aligned} W_m &= - \int_{1 \rightarrow 2} P dV - \int_{2 \rightarrow 3} P dV - \int_{3 \rightarrow 1} P dV \\ &= 0 - \int_{V_2}^{V_3} \frac{n_0 R T_2}{V} dV - \int_{3 \rightarrow 1} P_1 dV \\ &= -n_0 R T_2 \int_{V_2}^{V_3} \frac{dV}{V} - P_1 \int_{V_3}^{V_1} dV \\ &= -n_0 R T_2 \ln \frac{V_3}{V_2} - P_1 (V_1 - V_3) \\ &= -2n_0 R T_1 \ln 2 - P_1 V_1 \end{aligned}$$

et en utilisant une dernière fois l'équation d'état des gaz parfaits,

$$W = - (2 \ln 2 - 1) P_1 V_1.$$

- 6 Conclusion :

$$\eta = (\gamma - 1) (2 \ln 2 - 1) \simeq 0,15.$$

Application 3 : Puissance consommée par un compresseur

- 1 Loi de Laplace massique : $P = \text{cte}/v^\gamma$.
- 2 Loi de Laplace : $T^\gamma P^{1-\gamma} = \text{cte}$ d'où

$$T_1 = \left(\frac{P_0}{P_1} \right)^{(1-\gamma)/\gamma} T_0 = \tau^{(\gamma-1)/\gamma} T_0 = 565 \text{ K} = 292^\circ \text{C}$$

en partant de $T_0 = 20^\circ \text{C}$.

- 3 Premier principe industriel :

$$w = c_P (T_1 - T_0) = 272 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

- 4 Si le rendement du compresseur est parfait,

$$\mathcal{P} = D w = 2,7 \text{ kW}.$$