
Thème 6 : Thermodynamique industrielle

Cours



FIGURE 1 – Ingénieur et physicien français, Sadi Carnot (1796–1832) est considéré comme le père de la thermodynamique. Dans son ouvrage *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824), il étudie le fonctionnement idéal des machines thermiques et introduit le cycle de Carnot, modèle réversible atteignant le rendement maximal possible. Ses idées, formulées avant même la définition rigoureuse de la chaleur, ouvrent la voie au deuxième principe de la thermodynamique.

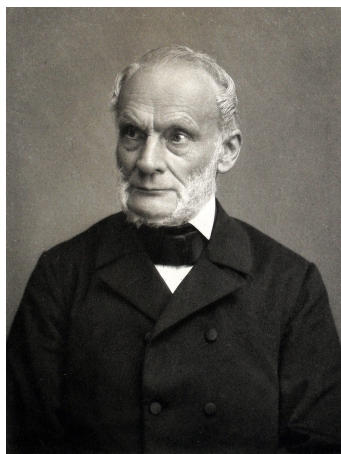


FIGURE 2 – Physicien allemand, Rudolf Clausius (1822–1888) formalise les concepts fondamentaux de la thermodynamique. Il énonce le deuxième principe sous sa forme irréversible (« la chaleur ne peut pas passer spontanément d’un corps froid à un corps chaud ») et introduit la notion d’entropie, mesurant l’irréversibilité des transformations. Il joue un rôle central dans la formulation mathématique des bilans d’énergie et de la thermodynamique des cycles.

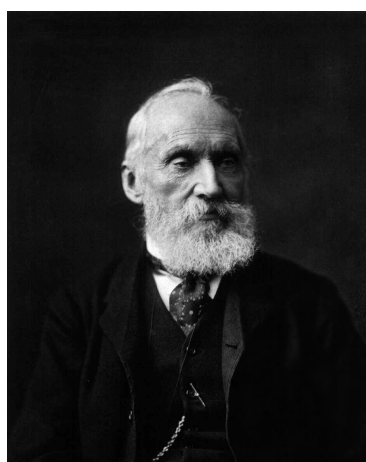


FIGURE 3 – Physicien et ingénieur britannique, Lord Kelvin (né William Thomson) (1824–1907) contribue à la formulation du deuxième principe et définit une échelle absolue de température indépendante des propriétés d’un fluide. Il étudie les limites du rendement des machines thermiques et participe aux débats sur la dégradation de l’énergie. L’unité de température thermodynamique (K) porte son nom.

Table des matières

1	Deuxième principe de la thermodynamique	4
1.1	Entropie	4
1.1.1	Définition thermodynamique et interprétation statistique	4
1.1.2	Expression pour un gaz parfait	5
1.1.3	Expression pour un thermostat	6
1.2	Second principe de la thermodynamique	7
1.2.1	Transformations réversibles	7
1.2.2	Énoncés et commentaires	7
1.2.3	Retour sur la loi de Laplace	8
2	Machines cycliques dithermes en système fermé	10
2.1	Exemple introductif des moteurs thermiques	10
2.2	Cycle réel d'un moteur à essence et modélisation	12
2.3	Propriétés des machines dithermes	15
2.4	Étude de machines cycliques dithermes	16
2.4.1	Moteur ditherme	16
2.4.2	Machine frigorifique	18
2.4.3	Pompe à chaleur (PAC)	19
2.5	Cycle de Carnot	21
3	Machines thermiques en système ouvert	25
3.1	Introduction aux systèmes mésoscopiques	25
3.1.1	Échelles d'étude d'un système	25
3.1.2	Grandeurs massiques	25
3.2	Bilan d'énergie en système ouvert	27
3.2.1	Description du problème	27
3.2.2	Adaptation du premier principe à un système ouvert	27
3.2.3	Lien avec la puissance	30
3.3	Description de quelques organes de machines thermiques	31
3.3.1	Détendeur, compresseur et pompe	31
3.3.2	Condenseur et évaporateur	32
3.4	Diagrammes thermodynamiques	34
3.4.1	Diagramme des frigoristes	34
3.4.2	Diagramme entropique	37
3.4.3	Application au CoP d'un cycle	39
3.4.4	Théorèmes des moments	40

Chapitre 1 : Deuxième principe de la thermodynamique

🔑 Objectifs :

- Déterminer une variation d'entropie pour une transformation, les entropies des systèmes en présence (gaz parfait ou phase condensée) étant fournies.
- Exploiter l'extensivité de l'entropie.
- Identifier des situations où un système peut être modélisé par un thermostat.
- Relier l'entropie échangée par un système avec un thermostat au transfert thermique reçu par le système et à la température du thermostat.
- Énoncer le deuxième principe de la thermodynamique.
- Justifier que le deuxième principe de la thermodynamique est un principe d'évolution.
- Identifier des causes d'irréversibilité dans une transformation.
- Exploiter le fait qu'une transformation adiabatique et réversible est isentropique.
- L'entropie molaire d'un gaz parfait étant fournie, établir une loi de Laplace exprimée en fonction des variables (p, V) , (p, T) ou (T, V) et faisant apparaître le rapport γ des capacités thermiques à pression et volume constants.
- Exploiter les lois de Laplace dans le cas des transformations isentropiques des gaz parfaits.

1.1 Entropie

1.1.1 Définition thermodynamique et interprétation statistique

On peut définir l'entropie S d'un système thermodynamique à partir de sa différentielle :

$$dS = \frac{dU}{T} + \frac{p}{T}dV$$

où U , T , p et V représentent respectivement l'énergie interne, la température, la pression et le volume dudit système.

L'entropie S est une fonction d'état extensive.

Question 1 : Quelle est l'unité de l'entropie ?

Question 2 : On donne les entropies molaires à $p = 1$ bar de l'eau sous ses trois états classiques en unité SI : solide : 41 ; liquide : 70 ; vapeur : 189. Quel lien peut-on faire entre l'entropie et l'organisation microscopique d'un système thermodynamique ?

Interprétation statistique de l'entropie

En thermodynamique classique, l'entropie d'un système est une grandeur extensive correspondant grossièrement à une mesure du désordre dans ce système.

Pour un même corps pur, la phase solide, dont les constituants microscopiques sont statiques, a une entropie molaire inférieure à celle de la phase liquide, qui est elle-même inférieure à celle de la phase gazeuse.

1.1.2 Expression pour un gaz parfait

Étudions dans cette partie n moles de gaz parfait constituant un système fermé.

Question 3 : Exprimer $\frac{p}{T}$ en fonction de n , R et V . Exprimer également dU en fonction de n , R (constante des GP), γ (indice adiabatique) et dT .

Question 4 : Montrer alors que $S = \frac{nR}{\gamma - 1} \times \ln(TV^{\gamma-1})$.

Question 5 : En déduire que, pour une transformation d'un gaz parfait à entropie constante, on a $pV^\gamma = \text{cste}$.

Loi de Laplace

Pour une transformation **isentropique** ($S = \text{cste}$) d'un gaz parfait, on a $pV^\gamma = \text{cste}$.
On peut réécrire cette loi sous deux autres formes : $TV^{\gamma-1} = \text{cste}'$ et $T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{cste}''$.

1.1.3 Expression pour un thermostat

Question 6 : Soit un thermostat \mathbb{T} en contact avec un système thermodynamique Σ . Expliquer pourquoi $dV_{\mathbb{T}} = 0$, et pourquoi $dU_{\mathbb{T}} = -\delta Q$, où δQ la chaleur reçue par le système Σ .

Variation d'entropie d'un thermostat

Si un thermostat \mathbb{T} de température constante T_0 est en contact avec un système thermodynamique Σ , on a :

$$\Delta S_{\mathbb{T}} = \frac{Q_{\Sigma \rightarrow \mathbb{T}}}{T_0} = -\frac{Q_{\mathbb{T} \rightarrow \Sigma}}{T_0}$$

1.2 Second principe de la thermodynamique

1.2.1 Transformations réversibles

On dit qu'une transformation thermodynamique est réversible si :

- Elle est quasi-statique ;
- Provoquée par une série de modifications extérieures, elle peut être effectuée en sens inverse en soumettant le système aux modifications inverses ;
- À l'issue de cette transformation inverse, l'extérieur est lui aussi revenu dans le même état qu'au début.

Par exemple, la (petite) déformation d'un élastique est une opération réversible. En revanche, la brisure d'un verre est une opération irréversible. De manière générale, en thermodynamique, l'irréversibilité est due à de la dissipation énergétique, par exemple à cause de frottements.

L'irréversibilité n'est pas forcément une chose que l'on cherche à éviter : beaucoup de phénomènes physiques reposent sur cette caractéristique. Par exemple, la dissipation de la chaleur des hautes températures vers les basses températures est recherchée lorsque l'on veut réchauffer un objet : cette opération est alors irréversible (la chaleur ne va pas spontanément aller « du froid vers le chaud »).

1.2.2 Énoncés et commentaires

Second principe de la thermodynamique

L'entropie d'un système thermodynamique isolé ne peut qu'augmenter (au sens large) au cours d'une transformation thermodynamique :

$$\Delta S \geq 0$$

Le cas d'égalité n'est valable que si la transformation est réversible.

☛ *Remarque* : Un système isolé n'interagit pas avec son environnement. Cela ne s'applique donc qu'à des cas bien particuliers, mais nous allons pouvoir le généraliser à des systèmes fermés en contact avec des thermostats juste après.

Sous son apparente complexité, ce principe reflète en réalité quelque chose que nous observons dans la vie de tous les jours : une transformation thermodynamique ne peut spontanément qu'augmenter le désordre de l'Univers !

Par exemple, si l'on laisse un glaçon dans une pièce à température ambiante, l'Univers est initialement assez bien ordonné : les basses températures d'un côté, les hautes températures de l'autre. Mais si on laisse suffisamment de temps s'écouler, le glaçon fondra, et l'eau liquide passera à température ambiante : on a spontanément gagné du désordre. De même, le fait que les gaz prennent la place du vide s'explique par cette volonté d'homogénéité et de désordre.

Le fait que le cas d'égalité corresponde à une transformation réversible est également logique. Lorsque l'eau est à température ambiante, son entropie est maximale : la nature ne voudra pas en faire quoi que ce soit d'autre spontanément. Ainsi, si le système évolue tout de même spontanément à entropie constante, c'est que cette évolution peut se passer dans l'autre sens « sans aucun souci » : c'est le critère de réversibilité.

De par l'inégalité de ce principe, on peut également en déduire que de nombreuses limites thermodynamiques (en termes de rendement, en particulier) en découleront.

Considérons à présent un système thermodynamique Σ en contact avec plusieurs thermostats $\mathbb{T}_1, \mathbb{T}_2$, etc. Chaque thermostat \mathbb{T}_i a une température constante T_i . On suppose que les thermostats ne sont pas en contact, et que l'ensemble $\{ \Sigma + \mathbb{T}_1 + \mathbb{T}_2 + \dots \}$ est isolé.

Puisque l'entropie est une grandeur additive, on a :

$$\Delta S(\Sigma + \mathbb{T}_1 + \mathbb{T}_2 + \dots) = \Delta S(\Sigma) + \Delta S(\mathbb{T}_1) + \Delta S(\mathbb{T}_2) + \dots$$

Question 7 : En notant Q_i la chaleur reçue par le système Σ de la part du thermostat \mathbb{T}_i , montrer que $\Delta S(\Sigma) \geq \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \dots$

Réécriture du second principe pour un système fermé

Soit Σ un système fermé en contact avec n thermostats $\mathbb{T}_1, \dots, \mathbb{T}_n$ de températures respectives T_1, \dots, T_n . La variation d'entropie de Σ pendant une transformation thermodynamique vérifie alors :

$$\Delta S(\Sigma) = S_{\text{éch}} + S_c$$

- $S_{\text{éch}} \triangleq \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i}$ est l'entropie échangée entre le système Σ et les thermostats ;
- S_c est l'entropie créée au cours de la transformation thermodynamique. On a $S_c > 0$ si la transformation est irréversible, et $S_c = 0$ si elle est réversible.

1.2.3 Retour sur la loi de Laplace

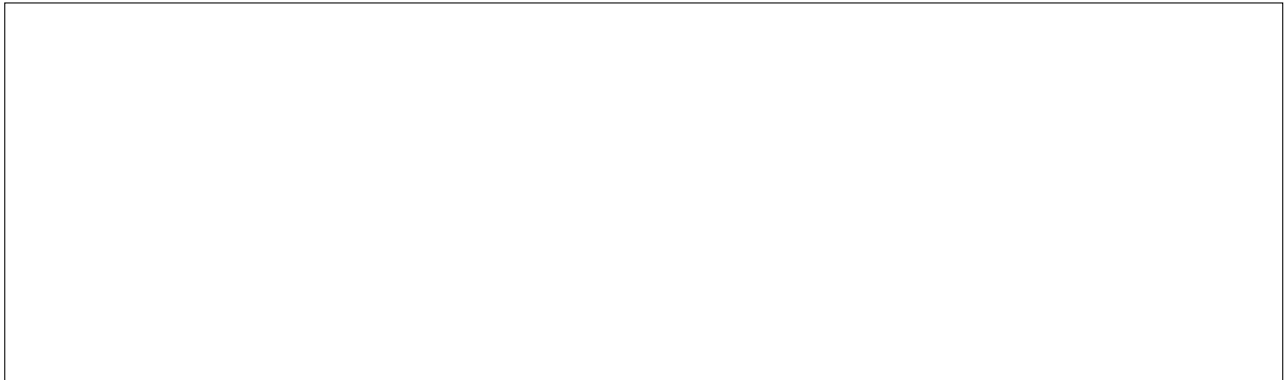
Question 8 : Montrer qu'une transformation adiabatique et réversible est nécessairement isentropique.

Loi de Laplace

Une transformation adiabatique et réversible est forcément isentropique. On a donc, pour un gaz parfait suivant une transformation **adiabatique et réversible** : $pV^\gamma = \text{cste}$.

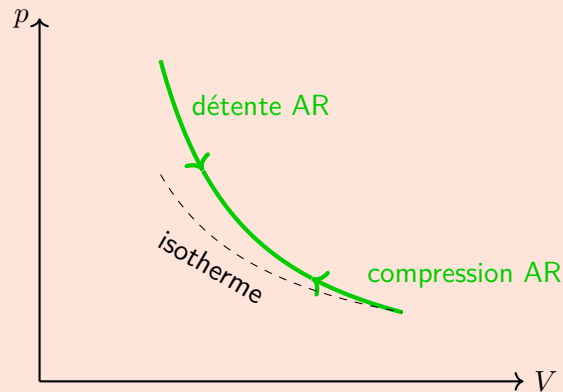
☛ **Remarque :** Une transformation adiabatique est nécessairement rapide, afin de limiter les transferts de chaleur avec l'extérieur, mais une transformation réversible doit être lente car quasi-statique... Derrière ce paradoxe apparent réside en réalité une comparaison d'ordres de grandeur. Si l'on note Δt la durée d'un processus élémentaire, τ_Q la durée caractéristique de diffusion de la chaleur entre le système et l'extérieur, et τ_m la durée caractéristique pour que le système thermodynamique soit à l'équilibre mécanique, on doit donc avoir $\tau_m \ll \Delta t \ll \tau_Q$ pour qu'un processus adiabatique réversible puisse avoir du sens.

Question 9 : Tracer, en justifiant, l'allure d'une transformation adiabatique et réversible d'un gaz parfait dans un diagramme de Clapeyron.



Transformation adiabatique et réversible sur un diagramme de Clapeyron

Les transformations adiabatiques et réversibles ^a d'un gaz parfait se représentent ainsi sur un diagramme de Clapeyron :



On observe qu'une transformation isentropique est toujours plus « pentue » qu'une transformation isotherme.

^a. Donc isentropiques.



En plus du cours : une vidéo très intéressante de David Louapre (Science Étonnante) sur l'entropie, qui permet en plus de faire des révisions et des approfondissements sur le premier principe de la thermodynamique.

Questions de cours

À cocher quand vous savez y répondre par vous-même...

- ☐ Donner l'expression du second principe de la thermodynamique pour un système fermé en précisant à quoi correspond chaque terme. Justifier qu'il s'agit d'un principe d'évolution.
- ☐ À partir du second principe de la thermodynamique appliqué à un système fermé, montrer qu'une évolution adiabatique et réversible de ce système est isentropique.
- ☐ On donne l'entropie molaire d'un gaz parfait : $S_m = C_{V,m} \ln(T) + R \ln(V) + \text{cste}$. Démontrer la loi de Laplace.
- ☐ Citer la loi de Laplace ainsi que ses conditions d'application. On donnera la première forme en p et V , et on retrouvera les deux autres formes à l'aide de la loi des gaz parfaits.

Chapitre 2 : Machines cycliques dithermes en système fermé

Objectifs :

- Prévoir les signes des transferts d'énergie en fonction de l'application recherchée.
- Exprimer le rendement d'un moteur. Exprimer le coefficient de performance (CoP) (ou efficacité) d'une machine frigorifique et celui d'une pompe à chaleur (PAC).
- 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.
- 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.
- Associer les temps mécaniques (4 temps ou 2 temps) d'un moteur à piston aux différentes transformations du cycle moteur.
- 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 fournisse un travail donné.

2.1 Exemple introductif des moteurs thermiques

Les moteurs thermiques à combustion-explosion sont souvent séparés en deux catégories : les moteurs à deux temps et les moteurs à quatre temps. Les « temps » correspondent à un mouvement du piston (du haut vers le bas, ou inversement).

Moteurs à deux temps

Les moteurs à deux temps consistent donc en deux mouvements du piston : sa montée et sa redescende dans le cylindre, qui correspondent donc à un tour du vilebrequin à l'aide de la bielle (figure 2.1).

- Initialement, le piston est au point mort bas : c'est la phase d'**admission** du gaz dans le cylindre (et les anciens gaz brûlés sont refoulés en même temps en sortie). Lors de la remontée du piston, il y a **compression** du nouveau gaz puis, lorsque le piston est au point mort haut, **explosion** de celui-ci à l'aide d'un injecteur de carburant ;
- Le piston redescend alors dans le cylindre, ce qui permet une **détente** du gaz puis son **échappement** vers l'extérieur (et on fait entrer un gaz imbrûlé en même temps).

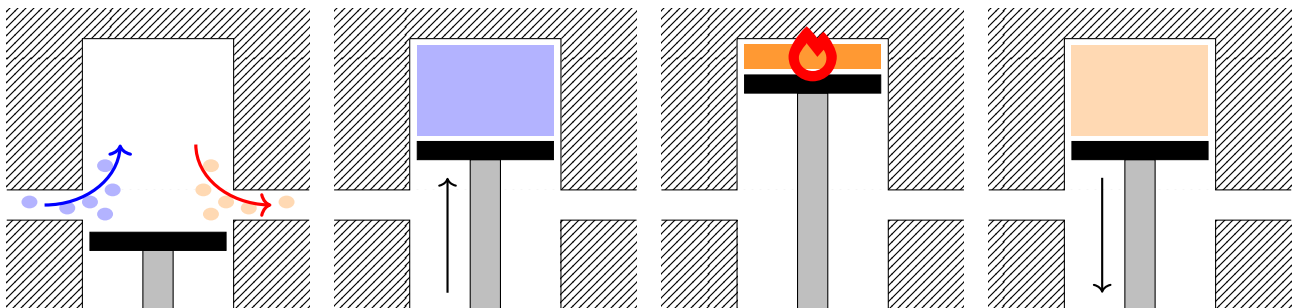


FIGURE 2.1 – Fonctionnement d'un moteur à deux temps. De gauche à droite : admission du nouveau gaz et échappement de l'ancien gaz (point mort bas) ; compression du nouveau gaz (montée) ; explosion du nouveau gaz (point mort haut) ; détente du nouveau gaz (descente). Il s'agit d'un cycle : on repart ensuite à la première image pour le refoulement du nouveau gaz brûlé.

On en déduit que la puissance $\mathcal{P}_{2T} \triangleq -\frac{W_{1 \text{ cycle}}}{\Delta t_{1 \text{ cycle}}}$ fournie par un moteur deux temps est proportionnelle au nombre de tours par minute N du vilebrequin :

$$\mathcal{P}_{2T} = \frac{N}{60} \times |W_{1 \text{ cycle}}|$$

Moteurs à quatre temps

Les moteurs à quatre temps font, dans l'idée, la même chose que les moteurs à deux temps, mais en deux descentes et deux montées du piston (figure 2.2).

- Initialement, le piston est au point mort haut. Lors de sa descente, le gaz rentre par la soupape d'**admission**. Comme nous le verrons plus tard, aucun gaz brûlé n'est présent dans le cylindre à ce moment ;
- Arrivé à son premier point mort bas, le piston remonte : c'est la **compression** du gaz. Les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées : le gaz est piégé dans le cylindre ;
- Lorsque le piston est au second point mort haut, l'injecteur enclenche l'**explosion** du gaz. Le piston redescend alors pour permettre la **détente** du gaz ;
- Arrivé à son second point mort bas, le piston remonte à nouveau. La soupape d'**échappement** étant ouverte, le gaz peut être refoulé vers l'extérieur.

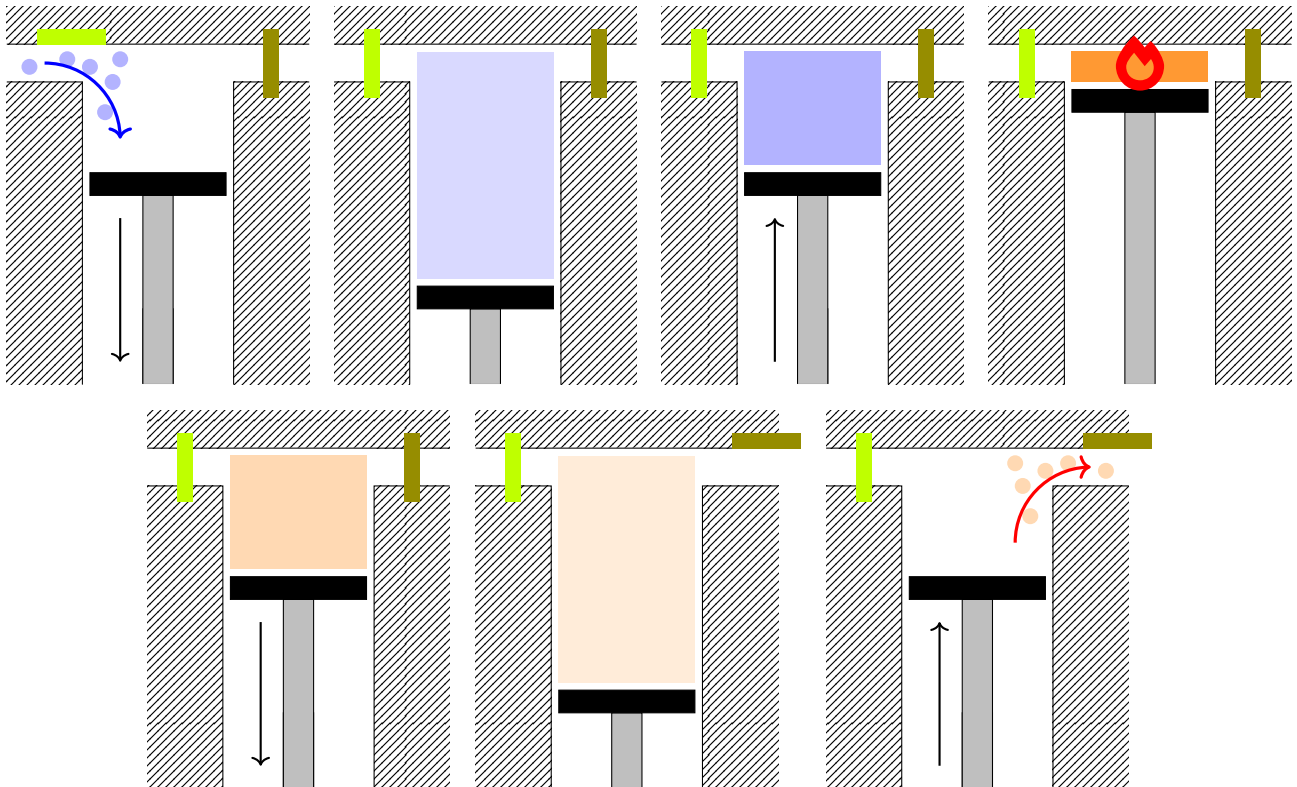


FIGURE 2.2 – Fonctionnement d'un moteur à quatre temps. De gauche à droite puis de haut en bas : admission du gaz (descente) ; fermeture de la soupape d'admission (point mort bas) ; compression (montée) ; explosion (point mort haut) ; détente (descente) ; ouverture de la soupape d'échappement (point mort bas) ; échappement du gaz (montée). Il s'agit d'un cycle : on repart ensuite à la première image pour l'admission d'un nouveau gaz, après avoir fermé la soupape d'échappement et ouvert la soupape d'admission.

Le travail cédé étant le même lors du cycle, mais la durée étant deux fois plus longue, la puissance \mathcal{P}_{4T} est divisée par deux :

$$\mathcal{P}_{4T} = \frac{1}{2} \times \frac{N}{60} \times |W_{1 \text{ cycle}}|$$

En réalité, même si le moteur à deux temps possède une meilleure puissance théorique, celui à quatre temps possède de nombreux avantages : davantage de couple, une consommation réduite en carburant, une pollution moindre en sortie et une usure moins importante des pièces en mouvement. On a donc tendance à préférer ce dernier dans les motorisations des véhicules automobiles.

2.2 Cycle réel d'un moteur à essence et modélisation

Observons en figure 2.3 le cycle d'un moteur à essence. La particularité des moteurs à essence est que l'on force l'explosion par apparition d'une étincelle après injection de carburant : la combustion se fait donc à volume constant mais en augmentant la pression (et la température).

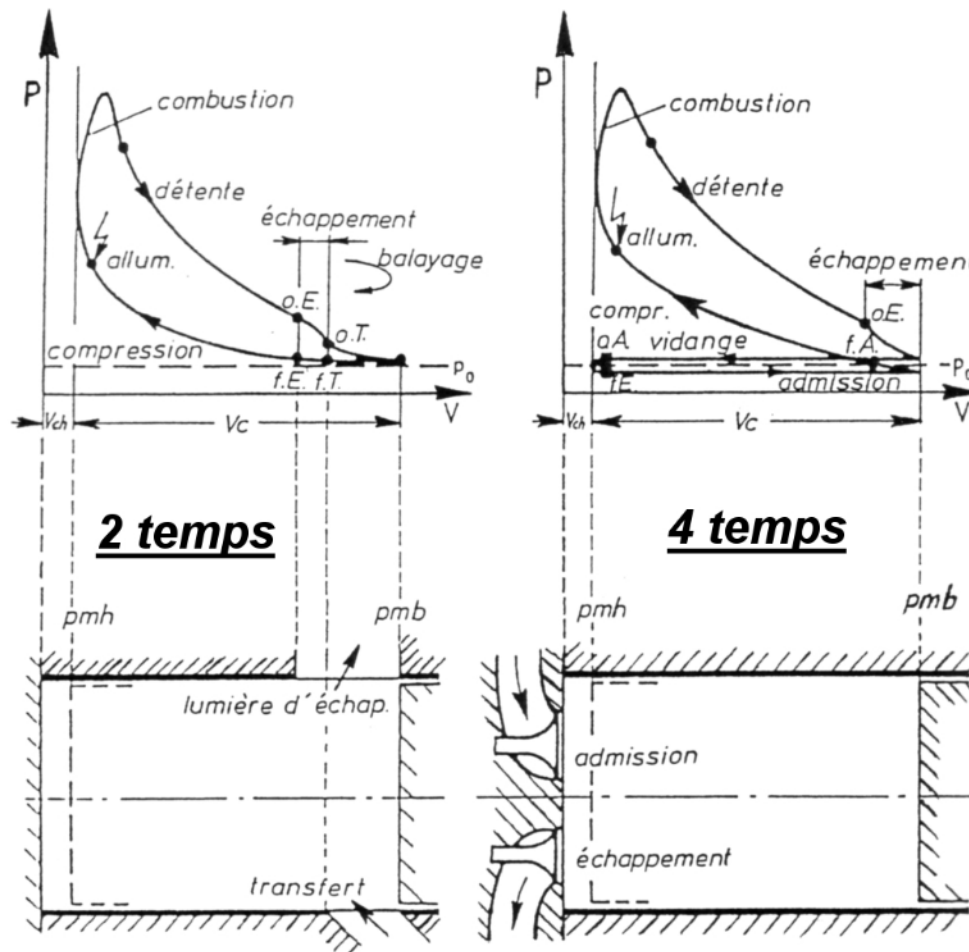


FIGURE 2.3 – Cycle d'un moteur à essence dans un diagramme de Watt.

Tentons de modéliser le cycle à quatre temps, davantage utilisé dans l'industrie :

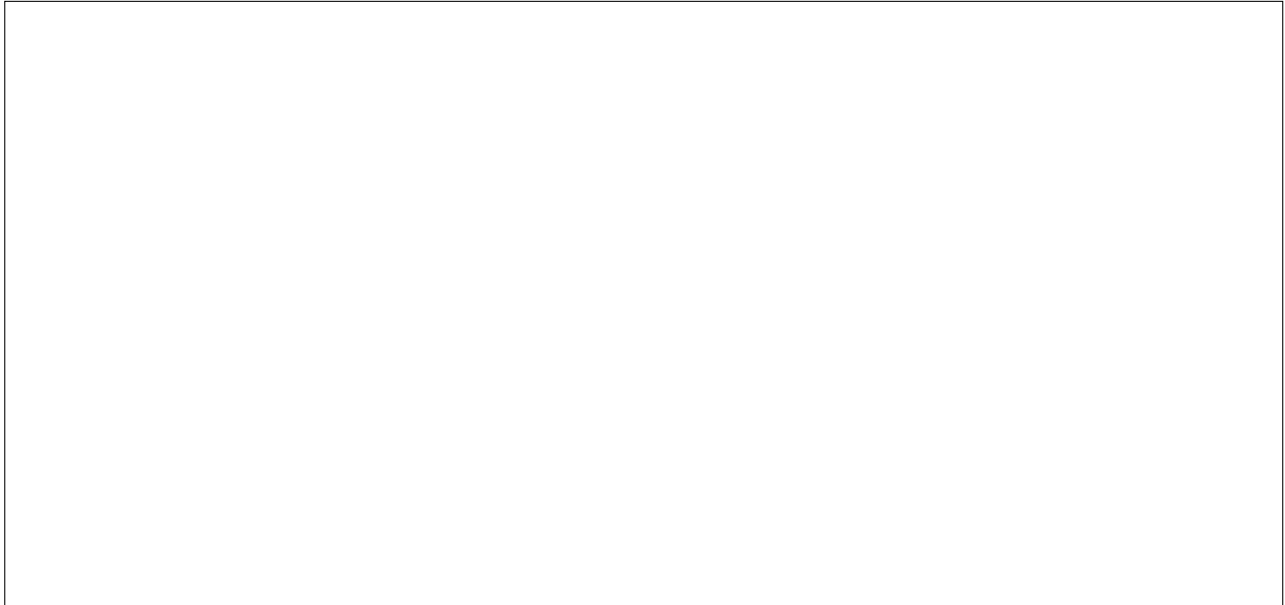
1. On ouvre la soupape d'admission pour faire entrer le gaz : c'est une transformation ;
2. On comprime le gaz en essayant de limiter les échanges de chaleur : c'est une transformation ;
3. On enflamme le gaz à volume constant : c'est une transformation ;
4. On détend le gaz en essayant de limiter les échanges de chaleur : c'est une transformation ;
5. On ouvre la soupape d'échappement : c'est une transformation ;
6. On relâche le gaz dans l'atmosphère : c'est une transformation .

Très souvent, le fluide circulant dans la machine thermique parcourt un cycle : l'état initial est alors toujours égal à l'état final. On peut citer par exemple le moteur à combustion et explosion (Stirling, Diesel, essence...), qui fonctionne de manière cyclique, ou bien les cycles frigorifiques, que l'on étudiera plus tard.

Diagramme de Watt pour un cycle

Pour un cycle thermodynamique, on a forcément $p_i = p_f$ et $V_i = V_f$, ce qui induit la formation d'une courbe fermée sur le diagramme de Watt.

Question 1 : Tracer l'allure du cycle à quatre temps dans un diagramme de Watt à l'aide des modélisations précédentes. On notera 0 l'état initial, 1 l'état suivant, etc.



Prenons l'exemple du cycle présent sur la figure 2.4.

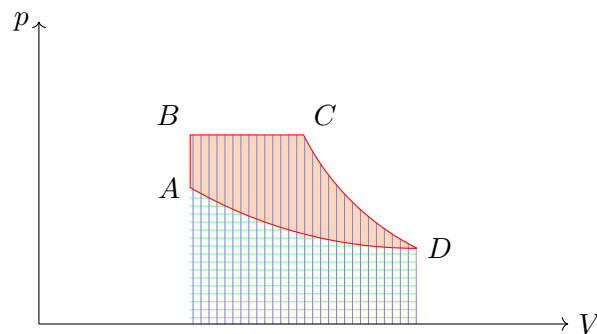


FIGURE 2.4 – Évolution du système dans un diagramme de Watt.

On rappelle que le travail reçu de la part des forces de pression est $W = \int_{\text{cycle}} -p_{\text{ext}} dV$, avec $p_{\text{ext}} = p$ pour des transformations quasi-statiques.

Par ailleurs, pour une fonction f définie sur un intervalle $[a, b]$, l'intégrale $\int_a^b f(x)dx$ représente l'aire entre la courbe et l'axe des abscisses.

Question 2 : On suppose que l'on effectue le cycle dans le sens horaire $ABCD A$. Expliquer graphiquement pourquoi $W < 0$.

Question 3 : Quel est le signe de W si l'on effectue le cycle dans le sens anti-horaire $ADCBA$?

Travail sur un diagramme de Watt

Un cycle peut être représenté sur un diagramme de Watt.

L'aire décrite par ce cycle représente le travail W_{cycle} fourni ou reçu sur un cycle :

- Si la courbe est parcourue dans le sens horaire, le cycle est **moteur** et $W_{\text{cycle}} < 0$: le système fournit globalement du travail à l'extérieur ;
- Si la courbe est parcourue dans le sens trigonométrique, le cycle est **récepteur** et $W_{\text{cycle}} > 0$: le système reçoit globalement du travail de l'extérieur.

Question 4 : Que dire du cycle quatre temps ? Est-ce cohérent ?

2.3 Propriétés des machines dithermes

On étudie dans cette partie un fluide quelconque au sein d'une machine ditherme, dont l'évolution est cyclique.

On suppose que le fluide au sein de la machine thermique est au contact de deux thermostats \mathbb{T}_C (la **source chaude**) et \mathbb{T}_F (la **source froide**) de températures respectives T_C et T_F durant le cycle, avec $T_C > T_F$. On note Q_C la chaleur fournie du thermostat \mathbb{T}_C vers le fluide au cours d'un cycle (de même pour Q_F de la part du thermostat \mathbb{T}_F et W le travail (pas forcément de pression !) reçu par le fluide au cours d'un cycle.

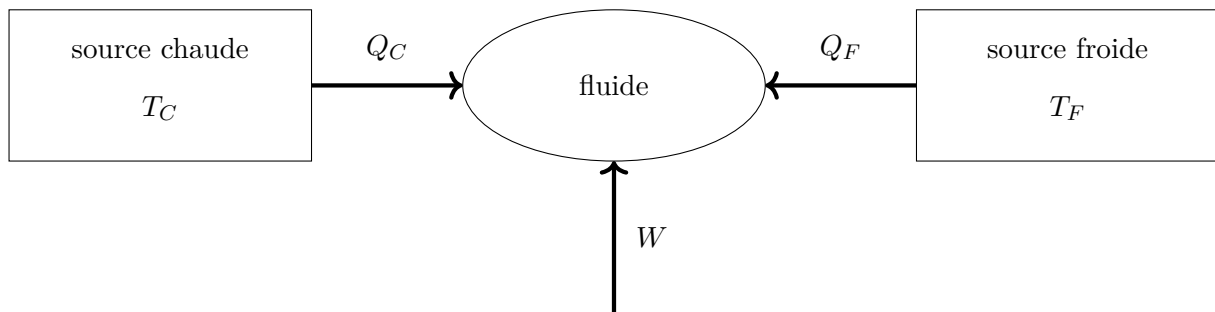


FIGURE 2.5 – Modélisation d'une machine ditherme.

Question 5 : Quelle égalité entre W , Q_C et Q_F le premier principe impose-t-il au cours d'un cycle ?

Question 6 : Quelle inégalité liant Q_C , Q_F , T_C et T_F le second principe impose-t-il au cours d'un cycle ?

Inégalité de Clausius pour une machine ditherme

Soit un fluide au contact de deux thermostats \mathbb{T}_C et \mathbb{T}_F , de températures respectives T_C et T_F . Si l'on note Q_C (respectivement : Q_F) la chaleur fournie par \mathbb{T}_C (respectivement : T_F) au fluide au cours d'un cycle, on a :

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$$

On parle de l'**inégalité de Clausius**. Le cas d'égalité n'arrive que pour un cycle réversible.

Une « bonne » machine thermique transfère beaucoup d'énergie désirée pour une très faible dépense d'énergie. On mesure donc la **performance** d'une machine thermique à l'aide du rapport :

$$\text{performance} = \frac{|\text{transfert énergétique désiré}|}{|\text{transferts énergétiques dépensés}|}$$

Pour un moteur, la performance est souvent notée η , et appelée rendement.

Pour une machine frigorifique ou une pompe à chaleur, la performance est souvent notée CoP (coefficient de performance) ou e (efficacité).

2.4 Étude de machines cycliques dithermes

2.4.1 Moteur ditherme

Moteur ditherme

Un **moteur ditherme** est une machine thermique qui convertit une part de la chaleur s'écoulant de la source chaude vers la source froide en travail mécanique.

Question 7 : Tracer une modélisation du moteur en représentant les échanges en valeur absolue. Donner le signe réel de chaque échange.

Question 8 : Quelle grandeur en sortie du moteur est utile ? Quelle grandeur sert à l'alimenter ? En déduire l'expression du rendement η d'un moteur thermique.

Rendement d'un moteur ditherme

Le rendement η d'un moteur ditherme est défini par :

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_C|} = -\frac{W}{Q_C}$$

Question 9 : En utilisant le premier principe pour réexprimer W , puis le second principe pour réexprimer $\frac{Q_F}{Q_C}$, en déduire une expression pour le rendement maximal du moteur thermique.

Rendement de Carnot d'un moteur ditherme

Le rendement d'un moteur ditherme est toujours inférieur à $\eta_{\text{Carnot}} \triangleq 1 - \frac{T_F}{T_C}$.

Question 10 : Montrer que le rendement de Carnot est toujours compris entre 0 et 1.

2.4.2 Machine frigorifique

Machine frigorifique

Une **machine frigorifique** est une machine thermique qui reçoit du travail pour transférer la chaleur de la source froide (l'intérieur d'un réfrigérateur ou d'une pièce à rafraîchir) vers la source chaude (l'extérieur).

Question 11 : Tracer une modélisation de la machine frigorifique en représentant les échanges en valeur absolue. Donner le signe réel de chaque échange.

Question 12 : Quelle grandeur est utile pour l'utilisateur ? Quelle grandeur sert à alimenter la machine ? En déduire l'expression du CoP d'une machine frigorifique.

Coefficient de performance d'une machine frigorifique

Le **CoP d'une machine frigorifique** est défini par :

$$\text{CoP}^{\text{MF}} = \frac{|Q_F|}{|W|} = \frac{Q_F}{W}$$

Question 13 : En utilisant le premier principe pour réexprimer W , puis le second principe pour réexprimer $\frac{Q_C}{Q_F}$, en déduire une expression pour le CoP maximal de la machine frigorifique.

CoP de Carnot d'une machine frigorifique

Le CoP d'une machine frigorifique est toujours inférieur à $\text{CoP}_{\text{Carnot}}^{\text{MF}} \triangleq \frac{T_F}{T_C - T_F}$.

☛ *Remarque :* Le CoP d'une machine frigorifique peut être inférieur ou supérieur à 1. Cela ne signifie pas que l'on crée de l'énergie ! En effet, le travail n'est pas converti en chaleur : il aide seulement à la déplacer de la source froide vers la source chaude, ce qui est bien plus simple.

2.4.3 Pompe à chaleur (PAC)

Pompe à chaleur

Une **pompe à chaleur** est une machine thermique qui reçoit du travail pour injecter la chaleur de la source froide vers la source chaude.

Question 14 : Tracer une modélisation de la pompe à chaleur en représentant les échanges en valeur absolue. Donner le signe réel de chaque échange.

Question 15 : Quelle grandeur est utile pour l'utilisateur ? Quelle grandeur sert à alimenter la machine ? En déduire l'expression du CoP d'une pompe à chaleur.

Coefficient de performance d'une pompe à chaleur

Le **CoP d'une pompe à chaleur** est défini par :

$$\text{CoP}^{\text{PAC}} = \frac{|Q_C|}{|W|} = -\frac{Q_C}{W}$$

Question 16 : En utilisant le premier principe pour réexprimer W , puis le second principe pour réexprimer $\frac{Q_F}{Q_C}$, en déduire une expression pour le CoP maximal de la pompe à chaleur.

CoP de Carnot d'une pompe à chaleur

Le CoP d'une pompe à chaleur est toujours inférieur à $\text{CoP}_{\text{Carnot}}^{\text{PAC}} \triangleq \frac{T_C}{T_C - T_F}$.

👉 *Remarque :* Même remarque que pour la machine frigorifique.

2.5 Cycle de Carnot

Pour s'approcher des performances maximales, il faut accéder au cas d'égalité dans l'inégalité de Clausius, c'est-à-dire au cas de réversibilité pour chaque étape. On a donc quatre étapes :

$A \rightarrow B$ Le fluide est au contact de la source chaude : évolution isotherme à la température T_1 ($\triangleq T_C$) ;

$B \rightarrow C$ Le fluide passe de T_1 à T_2 ($\triangleq T_F$) de manière réversible. Il ne peut pas y avoir de transfert de chaleur (qui est une transformation irréversible) lors de cette étape : évolution adiabatique de T_1 vers T_2 ;

$C \rightarrow D$ Le fluide est au contact de la source froide : évolution isotherme à la température T_2 ;

$D \rightarrow A$ Le fluide passe de T_2 à T_1 de manière réversible : évolution adiabatique de T_2 vers T_1 .

Ce cycle est appelé cycle de Carnot (figure 2.6). C'est l'unique cycle qui permet d'obtenir les meilleures performances pour une machine thermique.

Cependant, ce dispositif présente peu d'intérêt en pratique. Effectivement, un cycle de Carnot est forcément décrit de manière quasi-statique, donc par des mouvements infiniment lents. Une machine utilisant ce cycle fournit alors une énergie $\Delta\mathcal{E}$ en une durée Δt infinie : la puissance $\mathcal{P} = \frac{\Delta\mathcal{E}}{\Delta t}$ est donc nulle...

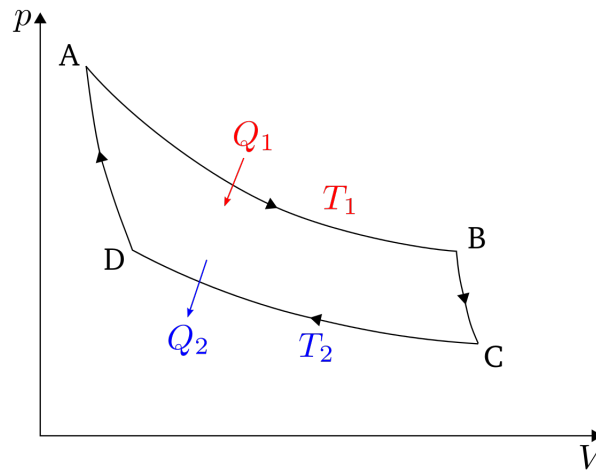


FIGURE 2.6 – Cycle de Carnot en disposition « moteur ».

Question 17 : À l'aide du deuxième principe de la thermodynamique, établir que la chaleur $Q_{\alpha \rightarrow \beta}$ échangée avec l'extérieur lors d'une transformation réversible entre deux états α et β peut s'écrire :

$$Q_{\alpha \rightarrow \beta} = \int_{\alpha}^{\beta} T dS.$$

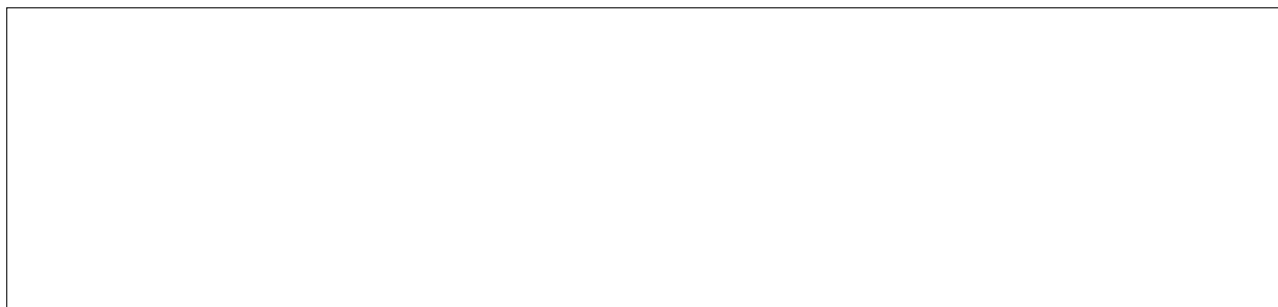
Diagramme entropique

On appelle **diagramme entropique** un diagramme (T, S) , où la température est en ordonnées et l'entropie est en abscisses.

Pour un cycle réversible, l'aire du cycle correspond au transfert thermique échangé avec l'extérieur :

- Si la courbe est parcourue dans le sens horaire, le système reçoit globalement de la chaleur de l'extérieur ;
- Si la courbe est parcourue dans le sens trigonométrique, le système fournit globalement de la chaleur vers l'extérieur.

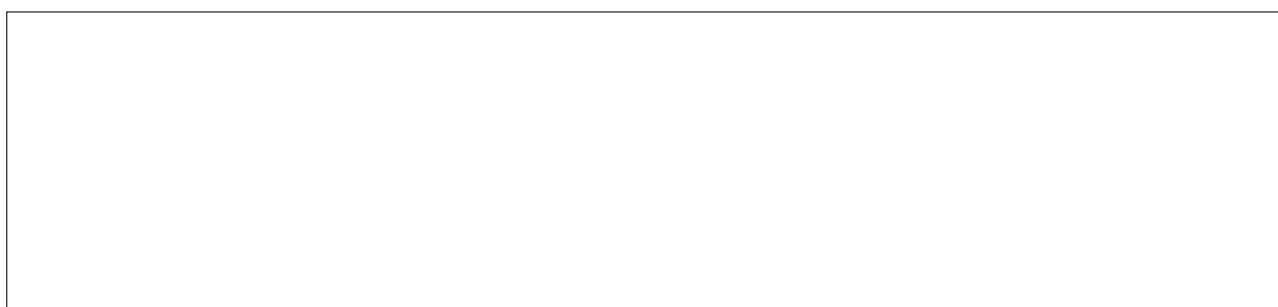
Question 18 : Tracer le cycle de Carnot dans un diagramme entropique.



Question 19 : On donne l'expression de l'entropie pour un gaz parfait : $S(T, V) = nR \left[\frac{1}{\gamma - 1} \ln(T) + \ln(V) \right]$. Établir les expressions de ΔS_{AB} et ΔS_{CD} en fonction de n , R et des différents volumes.



Question 20 : À l'aide de la loi de Laplace $TV^{\gamma-1} = \text{cste}$, montrer que l'on a $\frac{V_B}{V_A} = \frac{V_D}{V_C}$. On notera ce rapport volumétrique K .



Question 21 : En déduire les transferts thermiques Q_{AB} et Q_{CD} avec l'extérieur. Identifier quelle étape correspond à quelle source thermique.



Question 22 : Déterminer à l'aide du premier principe de la thermodynamique et de la question précédente le travail W_{cycle} reçu par le fluide lors d'un cycle.

Question 23 : En déduire le rendement du moteur. Commenter.

Théorème de Carnot

Soit une machine cyclique ditherme. Le **théorème de Carnot** énonce que la performance de cette machine est maximale si les transformations thermodynamiques ayant lieu lors du cycle sont réversibles.

☛ *Remarque :* Cela signifie donc que l'on vérifie l'égalité de Clausius $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = 0$.

Questions de cours

À cocher quand vous savez y répondre par vous-même...

- ☐ Définir ce que sont un cycle moteur et un cycle récepteur. Comment peut-on les distinguer sur un diagramme de Watt ?
- ☐ Soit un fluide appartenant à une machine thermique au contact d'une source chaude et d'une source froide. Établir avec détail le lien entre Q_C , chaleur reçue de la part de la source chaude au cours d'un cycle, Q_F , chaleur reçue de la part de la source froide au cours d'un cycle, et W , travail reçu au cours d'un cycle.
- ☐ Rappeler l'inégalité de Clausius, en expliquant à quoi correspondent chacun des termes. Quand arrive le cas d'égalité ?
- ☐ Définir ce qu'est un moteur ditherme. Tracer une représentation schématique d'une telle machine, en faisant également figurer les échanges énergétiques réels (c'est-à-dire en valeur absolue). Déterminer alors l'expression du rendement d'un moteur ditherme.
À l'aide du premier principe de la thermodynamique et de l'inégalité de Clausius, montrer que le rendement d'un moteur ditherme est majoré par $1 - \frac{T_F}{T_C}$, où T_F et T_C sont les températures respectives de la source froide et de la source chaude.
- ☐ Définir ce qu'est une machine frigorifique. Tracer une représentation schématique d'une telle machine, en faisant également figurer les échanges énergétiques réels (c'est-à-dire en valeur absolue). Déterminer alors l'expression du CoP d'une machine frigorifique.

À l'aide du premier principe de la thermodynamique et de l'inégalité de Clausius, montrer que le CoP d'une machine frigorifique est majoré par $\frac{T_F}{T_C - T_F}$, où T_F et T_C sont les températures respectives de la source froide et de la source chaude.

- ☐ Définir ce qu'est une pompe à chaleur. Tracer une représentation schématique d'une telle machine, en faisant également figurer les échanges énergétiques réels (c'est-à-dire en valeur absolue). Déterminer alors l'expression du CoP d'une pompe à chaleur.

À l'aide du premier principe de la thermodynamique et de l'inégalité de Clausius, montrer que le CoP d'une pompe à chaleur est majoré par $\frac{T_C}{T_C - T_F}$, où T_F et T_C sont les températures respectives de la source froide et de la source chaude.

- ☐ Un cycle de Carnot est constitué de deux transformations isothermes et de deux transformations adiabatiques et réversibles. Tracer ce cycle dans un diagramme de Watt et dans un diagramme entropique. Comment interpréter l'aire du cycle dans le diagramme entropique ?

Chapitre 3 : Machines thermiques en système ouvert

Objectifs :

- Citer le premier principe de la thermodynamique en système ouvert en régime stationnaire, 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 en régime stationnaire 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.
- 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.

3.1 Introduction aux systèmes mésoscopiques

3.1.1 Échelles d'étude d'un système

Dans un fluide, les molécules sont libres de se déplacer. On appelle **libre parcours moyen**, noté ℓ_p , la distance moyenne parcourue par les molécules d'un fluide entre deux chocs successifs :

- Dans un liquide, où les molécules sont au contact les unes des autres, on a $\ell_p \sim 10^{-10}\text{m}$;
- Dans un gaz à pression et température ambiantes, les molécules peuvent se déplacer avant de subir un choc sur des distances correspondant à plusieurs centaines de fois leurs tailles. On a donc $\ell_p \sim 10^{-7}\text{m}$.

Lorsque l'on veut étudier un fluide, il se pose alors la question de l'échelle d'étude. Doit-on étudier ce qu'il se passe dans un volume **microscopique** de l'ordre de ℓ_p^3 , où seuls quelques molécules tout au plus sont contenues ? Ou bien dans un volume **macroscopique** d'échelle (sur-)humaine de l'ordre¹ de L^3 ?

La réponse est comprise entre les deux : on va étudier à l'échelle **mésoscopique**. C'est une échelle intermédiaire de volume ℓ^3 tel que $\ell_p \ll \ell \ll L$. Un volume de cet ordre de grandeur est suffisamment petit à l'échelle macroscopique pour pouvoir être considéré comme ponctuel, et contient toutefois suffisamment de molécules pour que l'on puisse effectuer des moyennes statistiques.

3.1.2 Grandeurs massiques

Dans de nombreuses machines industrielles, les fluides ne sont pas conservés au cours du temps. Par exemple, on peut faire entrer de l'air chaud, utiliser l'énergie thermique pour la convertir en chaleur puis en travail utile, et relâcher l'air refroidi. Cet air refroidi ne sera a priori pas réutilisé, sauf s'il revient d'une manière ou d'une autre en étant réchauffé.

Ainsi, si l'on étudie l'air en tant que système thermodynamique, les frontières sont assez floues : où les commencer et où les finir ?

Pour remédier à ce problème, on s'intéresse souvent aux grandeurs massiques. Par exemple, on ne cherchera pas à calculer la chaleur que peut apporter l'air de manière générale, mais plutôt la chaleur qu'un kilogramme d'air peut apporter.

1. $L \sim 10^{-1}\text{m}$ pour une flaque ; $L \sim 10^2$ à 10^3m pour un lac...

Sous quelques hypothèses (régime permanent, essentiellement), on peut alors en déduire le gain en énergie cinétique d'un kilogramme d'air, la perte d'énergie potentielle d'un kilogramme d'air, etc.

Certaines grandeurs peuvent cependant dépendre du point de mesure : elles ne sont pas homogènes (par exemple : vitesse d'un fluide). On choisit alors un volume mésoscopique pour les définir localement ; par exemple, la masse volumique d'un fluide en un point M correspond au quotient de la masse δm par le volume mésoscopique δV encerclant le point M : $\rho(M) = \frac{\delta m}{\delta V}$.

Grandeur massique

Soit une grandeur X extensive associée à une substance. On appelle **grandeur massique** x le rapport de cette grandeur par unité de masse de ladite substance :

$$x = \frac{X}{m}$$

Si la grandeur X n'est pas homogène, on définit localement la grandeur massique $x(M)$ par :

$$x(M) = \frac{\delta X_M}{\delta m_M}$$

où δX_M est la grandeur infinitésimale du volume mésoscopique associé au point M , et δm_M sa masse.

Question 1 : Définir et exprimer l'énergie cinétique massique et l'énergie potentielle de pesanteur massique.

Question 2 : Définir et exprimer l'énergie interne massique et l'enthalpie massique.

Question 3 : Définir et exprimer le volume massique. Établir son lien avec la masse volumique.

3.2 Bilan d'énergie en système ouvert

3.2.1 Description du problème

Étudions un fluide pouvant entrer et sortir librement d'une machine thermique. On définit le système d'étude comme le fluide remplissant le compartiment ainsi qu'une petite portion en entrée. Si l'on attend une durée infinitésimale dt , ce fluide va se déplacer vers la sortie.

On note $\Sigma_{E \rightarrow S}(t)$ le système propre à l'enceinte à l'instant t , et $\Sigma_E(t)$ le méso-système contenu en entrée à l'instant t et $\Sigma_S(t + dt)$ le méso-système contenu en sortie à l'instant $t + dt$. Ainsi :

$$\Sigma = \Sigma_E(t) \cup \Sigma_{E \rightarrow S}(t) = \Sigma_{E \rightarrow S}(t + dt) \cup \Sigma_S(t + dt)$$

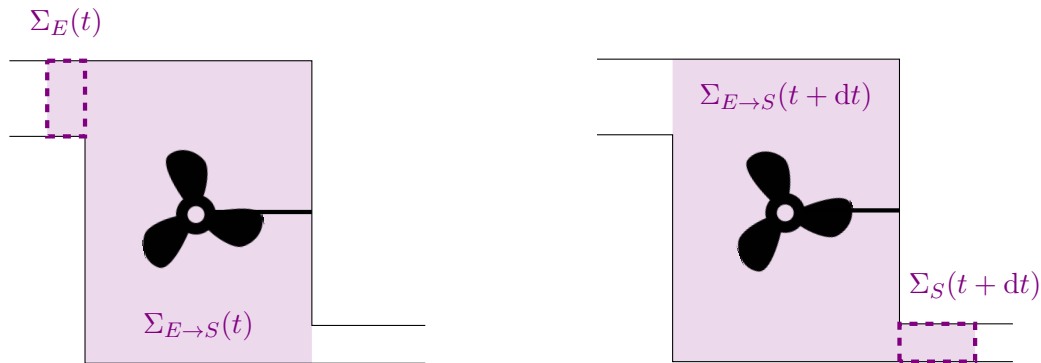


FIGURE 3.1 – Définition du système. Gauche : à l'instant t ; droite : à l'instant $t + dt$.

On fait l'importante hypothèse d'écoulement stationnaire, ce qui signifie que les grandeurs ne dépendent pas du temps (on est en régime permanent).

On note :

- S_E la section du tuyau d'entrée et S_S la section du tuyau de sortie ;
- $\mathcal{E}(t)$ l'énergie du système $\Sigma_{E \rightarrow S}(t)$;
- $\delta\mathcal{E}_E$ l'énergie de $\Sigma_E(t)$ et $\delta\mathcal{E}_S$ l'énergie de $\Sigma_S(t + dt)$;
- δm_E la masse de $\Sigma_E(t)$ et δm_S la masse de $\Sigma_S(t)$;
- $e_E = \frac{\delta\mathcal{E}_E}{\delta m_E}$ l'énergie massique de $\Sigma_E(t)$ et $e_S = \frac{\delta\mathcal{E}_S}{\delta m_S}$ l'énergie massique de $\Sigma_S(t)$;
- $\mathcal{E}^*(t)$ l'énergie totale du système Σ à l'instant t .

3.2.2 Adaptation du premier principe à un système ouvert

Question 4 : Exprimer $\mathcal{E}^*(t)$ en fonction notamment de $\mathcal{E}(t)$ et e_E , puis $\mathcal{E}^*(t + dt)$ en fonction notamment de $\mathcal{E}(t + dt)$ et e_S .

Question 5 : En écoulement stationnaire, quel lien peut-on faire entre $\mathcal{E}(t)$ et $\mathcal{E}(t + dt)$? Montrer également que $\delta m_E = \delta m_S \triangleq \delta m$.

Question 6 : En appliquant le premier principe à Σ , montrer que l'on a $\delta m(e_S - e_E) = \delta W + \delta Q$, où δW et δQ sont respectivement le travail et la chaleur apportés à Σ pendant δt .

Question 7 : En déduire que $\Delta(e_c + e_p + u) = w + q$, où chaque grandeur en minuscule représente la grandeur massique associée ($w = \frac{\delta W}{\delta m}$, etc.).

Une partie du travail w est lié au transfert de masse et donné au fluide pour ce transfert (on le « pousse » pour qu'il avance). Il est d'usage de différencier ce travail de transfert w_p du reste du travail, appelé travail « utile » w_u (c'est celui qui va permettre de faire tourner une turbine, par exemple). On écrit donc :

$$w = w_p + w_u$$

On rappelle que $w = \frac{\delta W}{\delta m}$, et donc $w_p = \frac{\delta W_p}{\delta m}$. En exprimant δW_p , on peut donc exprimer w_p .

Question 8 : Exprimer le travail élémentaire δW_E apporté au fluide pour se déplacer en entrée en fonction de p_E , pression en entrée, et de δV_E , volume déplacé en entrée.

Question 9 : De même, exprimer le travail élémentaire δW_S cédé par le fluide en sortie pour se déplacer en fonction de p_S , pression en sortie, et de δV_S , volume déplacé en sortie.

Question 10 : Exprimer δW_p en fonction de δW_S et δW_E . En déduire que $w_p = -\Delta(pv)$, où $v = \frac{\delta V}{\delta m}$ est le volume massique en entrée ou en sortie.

Question 11 : Réinjecter cette expression de w_p dans celle de la question 4 pour en déduire une équation sur e_c , e_p , h (enthalpie massique), w_u et q .

Premier principe de la thermodynamique en système ouvert

Soit un fluide caractérisé en entrée et en sortie par son énergie cinétique massique e_c , son énergie potentielle massique e_p et son enthalpie massique h . On a alors, en régime permanent :

$$\Delta(e_c + e_p + h) = q + w_u$$

où q est la chaleur massique absorbée par le fluide et w_u le travail massique utile (parfois noté w_i pour « travail massique indiqué ») apporté au fluide.

On peut réécrire explicitement cette loi sous la forme :

$$(e_c(S) - e_c(E)) + (e_p(S) - e_p(E)) + (h(S) - h(E)) = w_u + q$$

où les indices E et S se réfèrent respectivement aux états du fluide en entrée et en sortie de la machine. C'est le **premier principe de la thermodynamique en système ouvert**.

3.2.3 Lien avec la puissance

L'étude d'une machine thermique en système ouvert n'est pas la même pour l'utilisateur et le producteur. En effet, ce dernier ne doit répondre qu'à un besoin de puissance : si le consommateur veut davantage d'énergie, il n'a qu'à attendre plus longtemps !

Débit massique

Le débit massique \mathcal{D}_m d'un fluide en écoulement correspond à la masse se déplaçant en une unité de temps :

$$\mathcal{D}_m = \frac{\delta m}{\delta t}$$

Pour une installation en régime stationnaire, le débit massique ne dépend pas de l'endroit où on le mesure.

Question 12 : Montrer que $\mathcal{D}_m \times w_u$ et $\mathcal{D}_m \times q$ correspondent respectivement à la puissance utile et à la puissance thermique reçues par le fluide.

Réécriture du premier principe de la thermodynamique en système ouvert

Soit un fluide caractérisé en entrée et en sortie par son énergie cinétique massique e_c , son énergie potentielle massique e_p et son enthalpie massique h . On a alors, en régime permanent :

$$\mathcal{D}_m \times \Delta(e_c + e_p + h) = \mathcal{P}_{th} + \mathcal{P}_u$$

où \mathcal{P}_{th} est la puissance thermique absorbée par le fluide et \mathcal{P}_u la puissance utile apportée au fluide.

👉 **Remarque :** En thermodynamique industrielle, on a dans la plupart des cas² Δe_p et Δe_c négligeables devant Δh .

2. Voir DM pour une idée des ordres de grandeur.

3.3 Description de quelques organes de machines thermiques

Une machine thermique est constituée d'organes ayant différents rôles. On note w_u le travail massique utile et q la quantité de chaleur massique qu'ils peuvent recevoir.

3.3.1 Détendeur, compresseur et pompe

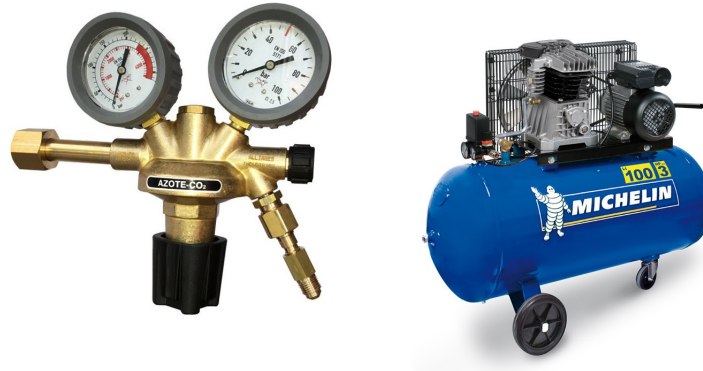


FIGURE 3.2 – Gauche : détendeur ; droite : compresseur.

Un **détendeur** (figure 3.2) est un dispositif permettant d'abaisser la pression d'un fluide entre son entrée et sa sortie. On en retrouve sur les bouteilles de gaz, de plongée...

Le mode de fonctionnement est généralement fondé sur le principe de ralentissement du fluide lors de la détente (voir figure 3.3). Un frittage poreux permet de ne libérer le fluide sous haute pressions par petits volumes, ce qui diminue la pression en sortie.

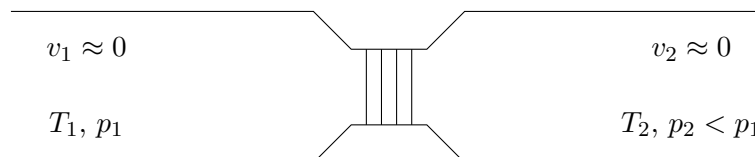


FIGURE 3.3 – Ralentissement d'un fluide par un détendeur.

Les vitesses très loin en amont et en aval du détendeur sont considérées comme quasi-nulles, même si elles augmentent en approchant le frittage poreux. On considère que la détente est tellement rapide que les transferts thermiques à travers les parois du détendeur sont négligeables.

Question 13 : Y a-t-il des parties mobiles dans le détendeur ? En déduire les valeurs de w_u et q .

Question 14 : Que valent Δe_c et Δe_p ? En déduire que la réaction est isenthalpique ($h = \text{cste}$).

Un **compresseur** (figure 3.2) a le rôle opposé d'un détendeur : c'est un dispositif actif qui augmente la pression d'un fluide. Une de ses utilités est de pouvoir stocker des gaz sous forme liquide mais à température ambiante. Il faut l'alimenter (en général électriquement), d'où $w_u > 0$. Le fonctionnement explicite est donné en figure 3.4.

Lorsque le fluide est un liquide, on parle plutôt de **pompe** que de compresseur.

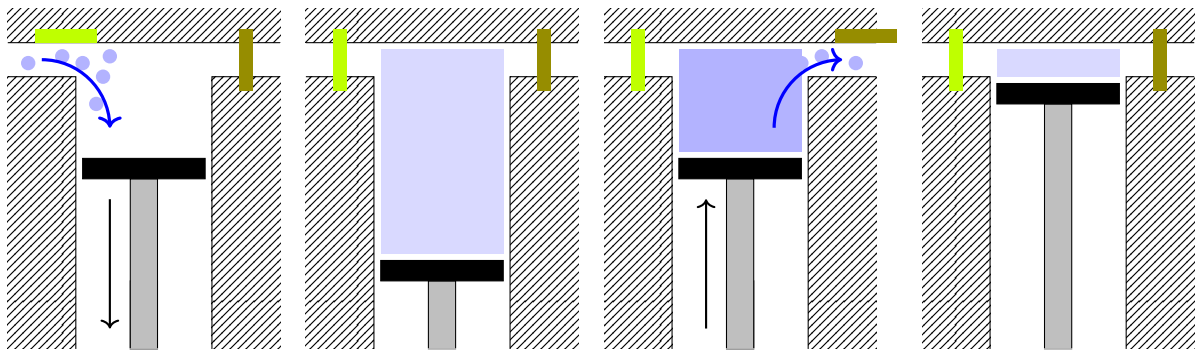


FIGURE 3.4 – Fonctionnement d'un compresseur. De gauche à droite : admission du gaz (descente) ; fermeture de la soupape d'admission (point mort bas) ; compression, ouverture de la soupape d'échappement et échappement du gaz (montée) ; fermeture de la soupape d'échappement (point mort haut). Il s'agit d'un cycle : on repart ensuite à la première image pour l'admission d'un nouveau gaz, après avoir ouvert la soupape d'admission.

3.3.2 Condenseur et évaporateur

Les **condenseurs** et **évaporateurs** (figure 3.5) sont souvent présents sous forme de canalisations en serpentin, au contact d'un thermostat, dans lesquels on cherche à provoquer la liquéfaction d'un gaz ou la vaporisation d'un liquide. Les changements d'état nécessitant des transferts de chaleur, on a nécessairement $q \neq 0$.

Question 15 : Quel est le signe de q pour un condenseur ? Pour un évaporateur ? Justifier.

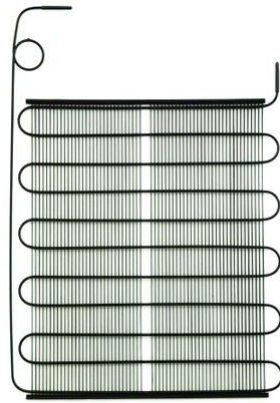


FIGURE 3.5 – Condenseur-évaporateur (serpentin), associé à des ailettes (traits verticaux) permettant de meilleurs échanges de chaleur.

Ces éléments sont généralement couplés avec des détendeurs et compresseurs (voir figure 3.6 pour l'exemple d'une machine frigorifique).

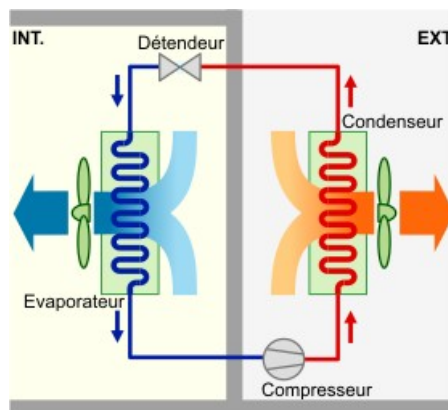


FIGURE 3.6 – Fonctionnement schématique d'une machine frigorifique.

3.4 Diagrammes thermodynamiques

Jusqu'à présent, nous avons modélisé les liquides et les gaz respectivement par des phases condensées idéales et des gaz parfaits. Cependant, ces modélisations ne sont pas toujours satisfaisantes :

- La pression et la température ont un effet sur les propriétés des liquides ;
- Les hautes pressions et basses températures ont un effet sur les propriétés des gaz (les interactions molécules ne sont plus négligeables) ;
- Lors d'un changement d'état, aucun des deux modèles n'est adapté.

Le but de cette partie est d'étudier des fluides réels *via* des diagrammes thermodynamiques, tout en conservant les équations maîtresses de la thermodynamique (le premier et le second principe).

3.4.1 Diagramme des frigoristes

Diagramme des frigoristes (ou diagramme (p, h))

Le diagramme des frigoristes d'un équilibre liquide-gaz consiste à tracer la pression p (en échelle logarithmique) d'un système diphasé en fonction de son enthalpie massique h : on parle donc souvent de diagramme (p, h) ou $(\log(p), h)$.

On aperçoit, sur ce diagramme (voir page suivante), une courbe en cloche :

- Le côté gauche de cette courbe représente l'état où la première bulle de vapeur peut se former : c'est **la courbe d'ébullition** ($x_\ell = 1$ et $x_v = 0$) ;
- Le côté droit de cette courbe représente l'état où la première goutte de liquide peut se former : c'est **la courbe de rosée** ($x_\ell = 0$ et $x_v = 1$) ;
- L'intérieur de la cloche représente l'**équilibre liquide-vapeur**.

Le sommet de la cloche représente le point critique C , où la vapeur et le liquide commencent à être confondus.

Sont également présentes des isothermes $T = \text{cste}$ commençant et finissant horizontalement dans le domaine de l'équilibre liquide-vapeur et des isentropiques $s = \text{cste}$.

Les unités de chacune des grandeurs sont généralement données soit sur les axes, soit dans un encadré du diagramme (ici : en haut à gauche).

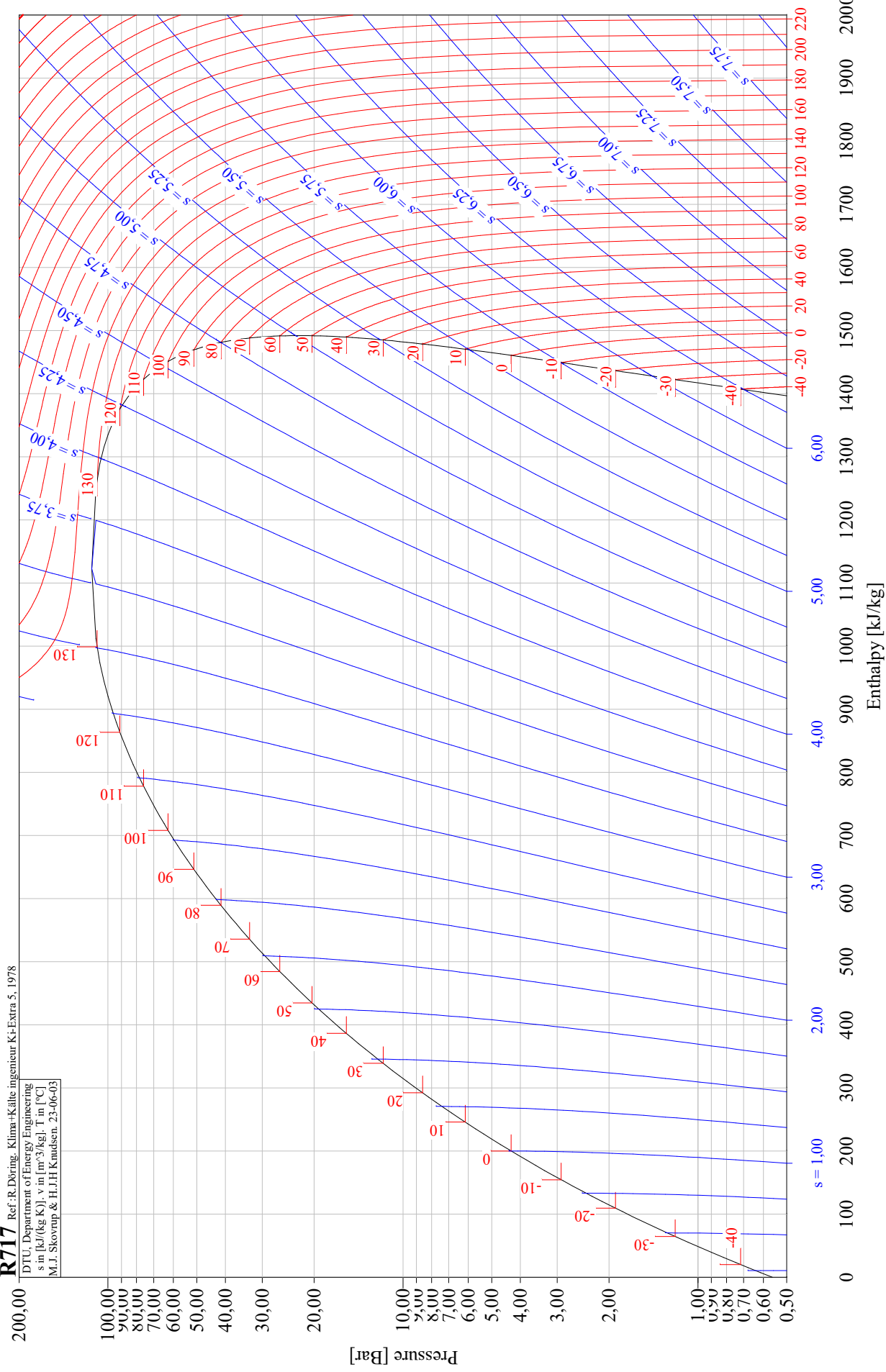
Question 16 : Que peut-on dire des isothermes dans le domaine du mélange liquide-vapeur ? Commenter.

Question 17 : À quoi peuvent servir les isentropiques lorsque l'on étudie un cycle thermodynamique ?

R717

Ref: R. Döring, Klima-Kälte ingenieur Ki-Extra 5, 1978

DTU, Department of Energy Engineering
s in [kJ/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 23-06-03



Le cycle frigorifique utilisé par de nombreuses machines frigorifiques à ammoniac est le suivant (voir figure 3.7) :

1. Le fluide sort de l'évaporateur sous forme de vapeur saturante sèche à l'état A à la température $T_A = 263\text{ K}$;
2. Il subit, dans le compresseur, une compression adiabatique réversible qui l'amène à l'état B , de pression $p_B = 10,0\text{ bar}$;
3. La vapeur subit dans le condenseur une transformation à pression constante : refroidissement jusqu'à la température $T_C = 298\text{ K}$, puis liquéfaction totale à cette température (état C) ;
4. Le liquide passe dans le détendeur et y subit une détente isenthalpique qui le ramène à la pression initiale p_A et à la température T_D (état D). La vaporisation du liquide se termine dans l'évaporateur pour un retour à l'état A .

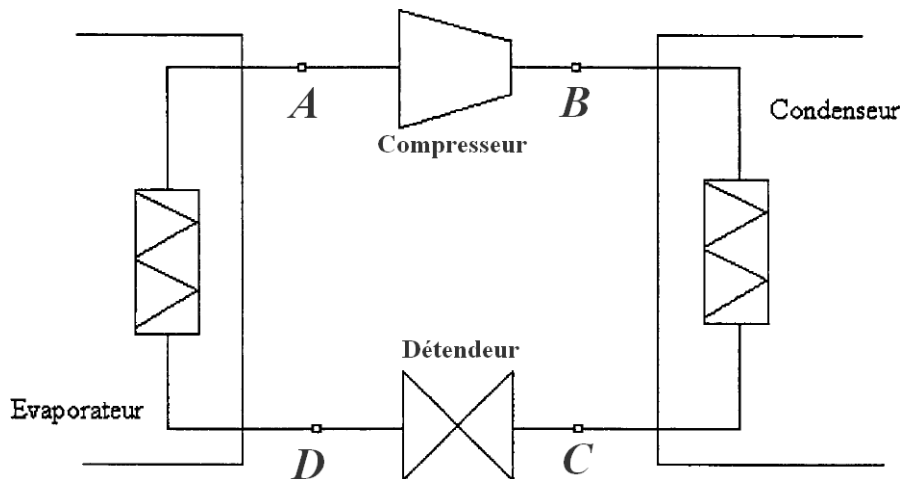


FIGURE 3.7 – Modélisation de la machine frigorifique.

Question 18 : Placer le point A sur le diagramme des frigoristes de l'ammoniac. Que vaut p_A ?

Question 19 : Placer le point B ainsi que la courbe AB du cycle. Relever graphiquement T_B .

Question 20 : Placer le point C ainsi que la courbe BC du cycle. Déterminer graphiquement la chaleur échangée par le fluide avec l'extérieur. Commenter son signe.

Question 21 : Placer le point D ainsi que la courbe CD du cycle. Relever graphiquement T_D . Est-il étonnant que $T_D \neq T_C$ pour une transformation isenthalpique ?

Question 22 : Finir l'allure du cycle $ABCD A$.

3.4.2 Diagramme entropique

Diagramme entropique (ou diagramme (T, s))

Le diagramme entropique d'un équilibre liquide-gaz consiste à tracer la température T d'un système diphasé en fonction de son entropie massique s : on parle donc souvent de diagramme (T, s) .

On aperçoit, sur ce diagramme, une courbe en cloche :

- Le côté gauche de cette courbe représente l'état où la première bulle de vapeur peut se former : c'est **la courbe d'ébullition** ($x_\ell = 1$ et $x_v = 0$) ;
- Le côté droit de cette courbe représente l'état où la première goutte de liquide peut se former : c'est **la courbe de rosée** ($x_\ell = 0$ et $x_v = 1$) ;
- L'intérieur de la cloche représente l'**équilibre liquide-vapeur**.

Le sommet de la cloche représente le point critique C , où la vapeur et le liquide commencent à être confondus.

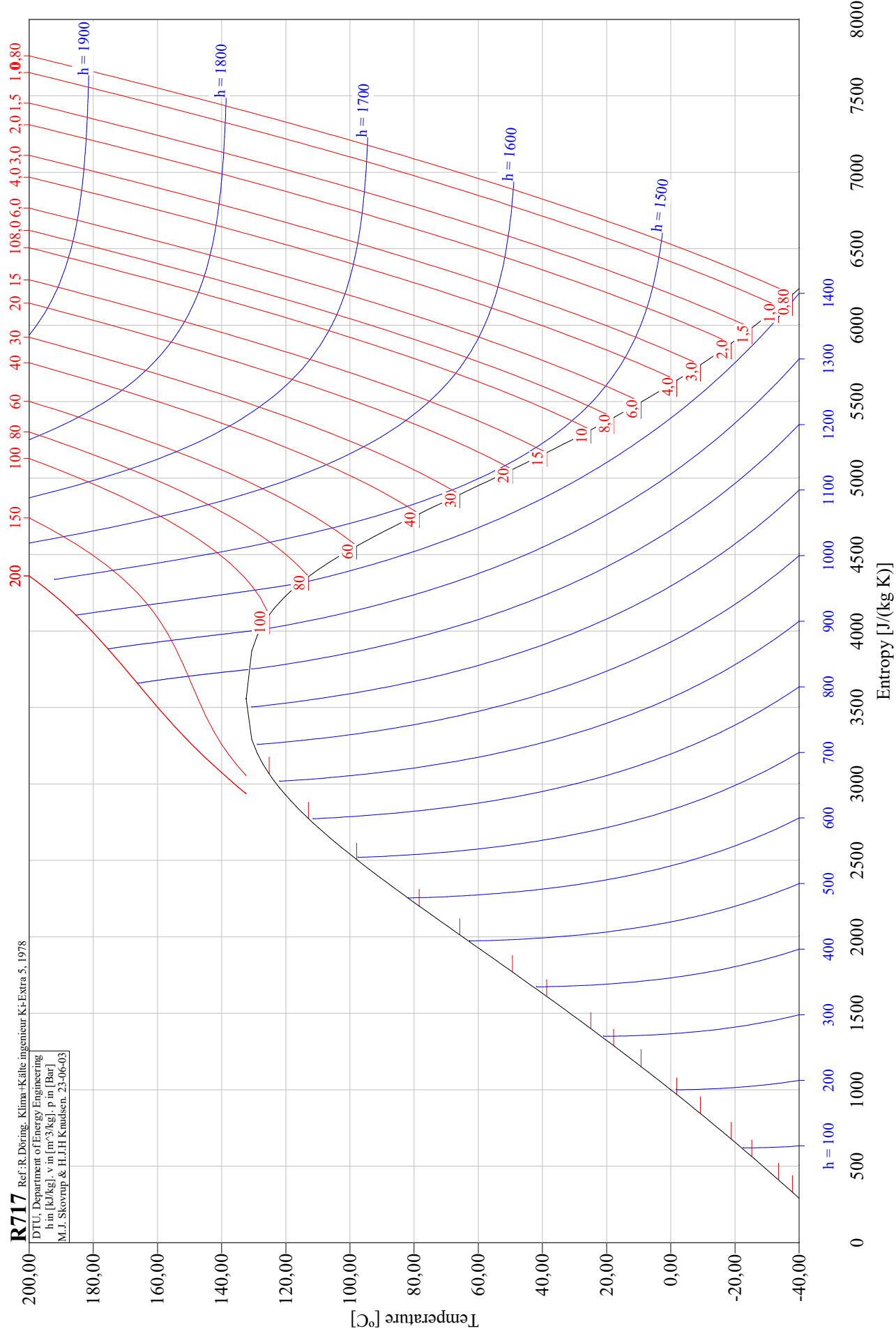
Sont également présentes des isobares $p = \text{cste}$ commençant et finissant horizontalement dans le domaine de l'équilibre liquide-vapeur et des isenthalpiques $h = \text{cste}$.

Les unités de chacune des grandeurs sont généralement données soit sur les axes, soit dans un encadré du diagramme (ici : en haut à gauche).

R717

Ref.: R. Döring, Klima-Kälte ingenieur Ki-Extra 5, 1978

DTU, Department of Energy Engineering
h in [kJ/kg], v in [m³/kg], p in [Bar]
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 23-06-03



Question 23 : Que peut-on dire des isobares sous la cloche ?

Question 24 : Pourquoi les isobares sont-elles proches les unes des autres près de la courbe d'ébullition ?

Question 25 : Tracer l'allure du cycle ABCDA donné dans la première partie.

3.4.3 Application au CoP d'un cycle

On rappelle que, pour une machine frigorifique, on a $\text{CoP} = \frac{Q_f}{W}$ avec Q_f la chaleur reçue par l'ammoniac de la part de la source froide et W le travail « coûteux » perçu au cours du cycle par l'ammoniac. Ce CoP est majoré par $\frac{T_f}{T_c - T_f}$ avec T_f la température de la source froide et T_c celle de la source chaude.

On rappelle également le premier principe industriel, valable entre l'entrée et la sortie d'un organe, lorsque l'on néglige les variations d'énergie cinétique et potentielle :

$$\Delta h = w_u + q$$

où w_u représente le travail massique utile (celui des pièces mobiles) et q la chaleur massique échangée.

Question 26 : Justifier que l'on puisse écrire $\text{CoP} = \frac{q_{BC}}{w_{AB}}$.

Question 27 : À la lumière du premier principe industriel, donner les valeurs de q_{BC} et w_{AB} . En déduire la valeur du coefficient de performance.

Question 28 : Que valent T_f et T_c ? Calculer le CoP^{\max} ; commenter.

3.4.4 Théorèmes des moments

Théorème des moments pour un diagramme (p, h)

Soit un corps pur à l'équilibre liquide-gaz. Si l'on connaît la valeur h de l'enthalpie massique de ce système, on peut en déduire sa composition :

- Le titre massique en liquide vaut $x_\ell = \frac{h_v - h}{h_v - h_\ell}$;
- Le titre massique en vapeur vaut $x_v = \frac{h - h_\ell}{h_v - h_\ell}$.

Théorème des moments pour un diagramme (T, s)

Soit un corps pur à l'équilibre liquide-gaz. Si l'on connaît la valeur de l'entropie massique s de ce système, on peut en déduire sa composition :

- Le titre massique en liquide vaut $x_\ell = \frac{s_v - s}{s_v - s_\ell}$;
- Le titre massique en vapeur vaut $x_v = \frac{s - s_\ell}{s_v - s_\ell}$.

☛ **Remarque :** Ce théorème est utile car si l'on note M le point courant, L le point correspondant à l'état liquide pur et V celui correspondant à l'état vapeur pure, on a alors $x_\ell = \frac{MV}{LV}$ et $x_v = \frac{ML}{LV}$.

Question 29 : Déterminer le titre massique en vapeur x_D à l'aide du diagramme des frigoristes, puis à l'aide du diagramme entropique.

Questions de cours

À cocher quand vous savez y répondre par vous-même...

- ☐ Donner les expressions du premier principe industriel (ou premier principe appliqué à un système ouvert) en termes d'énergie et en termes de puissance. On donnera les significations physiques et unités de chacune des grandeurs, ainsi que toutes les hypothèses de travail.
- ☐ Expliquer le rôle d'un compresseur, d'une pompe, d'un condenseur, d'un évaporateur et d'un détendeur. Montrer que la transformation subie par un fluide dans un détendeur adiabatique est isenthalpique.
- ☐ Tracer l'allure du diagramme des frigoristes (p, h) , en faisant apparaître la courbe de rosée, la courbe d'ébullition, les domaines du gaz, du liquide et du mélange liquide-vapeur et une courbe isotherme.
- ☐ Tracer l'allure du diagramme entropique (T, s) , en faisant apparaître la courbe de rosée, la courbe d'ébullition, les domaines du gaz, du liquide et du mélange liquide-vapeur et une courbe isobare.