

Machines thermiques

Il est nécessaire de bien différencier les machines thermiques dont le principe est basé sur les transformations thermodynamiques d'un système fermé, des machines fonctionnant avec un système fluide en écoulement.

A. Concepts généraux

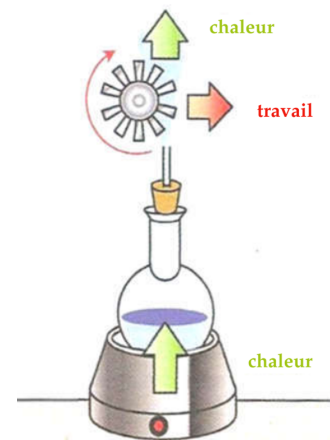
A.1 Conception d'une machine thermique simple

On place de l'eau dans une enceinte chauffée, puis, en autorisant la sortie de la vapeur à travers les pales d'une petite hélice.

Cette machine simple utilise le mouvement naturel de la chaleur qui se déplace des corps chauds vers les corps froids, pour produire du travail W (c'est donc un moteur). Le corps chaud est ici le chauffe-ballon et le corps froid est constitué par l'atmosphère.

On peut définir rapidement le rendement de ce moteur comme le rapport de l'énergie disponible sur l'arbre du moulin (le travail W) sur l'énergie fournie par le chauffe-ballon.

De manière prévisible, le rendement de ce moteur se révèle très nettement inférieur à 1. On serait en droit de se demander pourquoi, si on s'en tient à une application rapide du premier principe : conservation de l'énergie, donc la chaleur fournie par le chauffe-ballon se transforme à 100% en travail. Il manque dans ce raisonnement une partie de l'énergie qui est cédée sous forme de chaleur à l'atmosphère...



A.2 Machines thermiques et principes de la thermodynamique

A.2.1 Modélisation

Une machine thermique fait subir à un agent thermique, généralement un liquide ou un gaz, une succession de transformations au cours desquelles il échange de l'énergie (sous forme de travail et de chaleur) avec un (ou des) thermostat. Un thermostat peut échanger une très grande quantité de transfert thermique sans voir sa température varier ($C = \infty$).

On ne connaît pas a priori le sens réel des échanges énergétiques. Par convention, on les représente par des flèches dirigées vers le fluide-système, et on associe à ces flèches des grandeurs énergétiques algébriques. Ainsi, un travail cédé par le fluide sera compté négativement ($W < 0$).

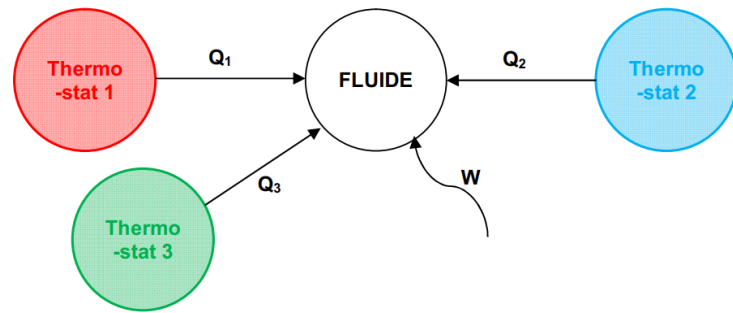


FIGURE 1 – Modélisation des transferts énergétiques

A.2.2 Écriture des deux principes

On considère un système fluide subissant des transformations cycliques, échangeant des énergies thermiques Q_i et fournissant un travail W , auquel on applique les deux principes de la thermodynamique.

① Premier Principe

Le fluide subit des transformations cycliques, donc $\Delta U_{\text{cycle}} = 0$.

$$\text{Ainsi, } W + \sum Q_i = 0.$$

② Second Principe

Le fluide subit des transformations cycliques, donc $\Delta S_{\text{cycle}} = 0$.

Ainsi, $S_e + S_c$, avec $S_c \geq 0$, donc $S_e \leq 0$.

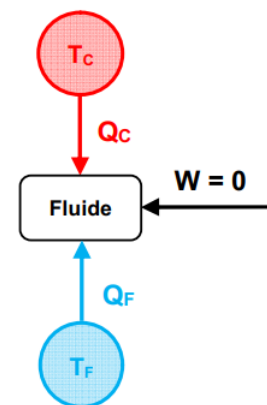
$$\text{De plus, } S_e = \sum \frac{Q_i}{T_i}$$

On obtient alors l'inégalité de CLAUSIUS, $\sum \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$.

A.2.3 Conséquence n°1 : Énoncé de CLAUSIUS du second principe

« Le transfert thermique ne s'effectue pas spontanément du corps le plus froid vers le plus chaud. »

Pour le démontrer, on considère un système pouvant échanger de la chaleur avec deux thermostats de température T_C (Source Chaude) et T_F (Source Froide), et ne pouvant pas recevoir de travail W (ce que traduit le terme *spontanément*).



$$\text{On a donc } Q_C \left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_F} \right) \leq 0.$$

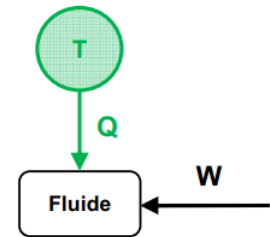
Comme $T_C > T_F$, $Q_C \geq 0$ et donc $Q_F \leq 0$: le transfert thermique se déroule bien de la source chaude vers la source froide, en l'absence de travail W .

A.2.4 Conséquence n°2 : Impossibilité du moteur monotherme

Considérons une machine thermique en contact avec un seul thermostat (*monotherme*) de température T avec lequel il échange un transfert thermique Q .

- L'application du premier principe donne $Q + W = 0$, soit $W = -Q$.
- Le second principe, via l'inégalité de CLAUSIUS, donne $\frac{Q}{T} \leq 0$

On en déduit que $Q \leq 0$ et par conséquent $W \geq 0$: la machine thermique ne peut que consommer du travail W et n'est donc pas un moteur, mais un récepteur.



A.2.5 Efficacité des machines thermiques

L'efficacité e d'une machine thermodynamique est définie comme le rapport de l'énergie utile fournie par la machine sur l'énergie coûteuse, consommée par la machine.

$$e = \left| \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie coûteuse, consommée}} \right|$$

B. Machines thermiques en système fermé

B.1 Cycle de CARNOT

Le cycle de CARNOT, qu'il soit moteur ou récepteur, est un cycle réversible imaginé par le français Sadi CARNOT en 1824. Il est constitué de deux isothermes au cours desquelles le fluide échange les transferts thermiques avec les sources froides et chaudes, et de deux adiabatiques. C'est le cycle universellement le plus efficace imaginé.

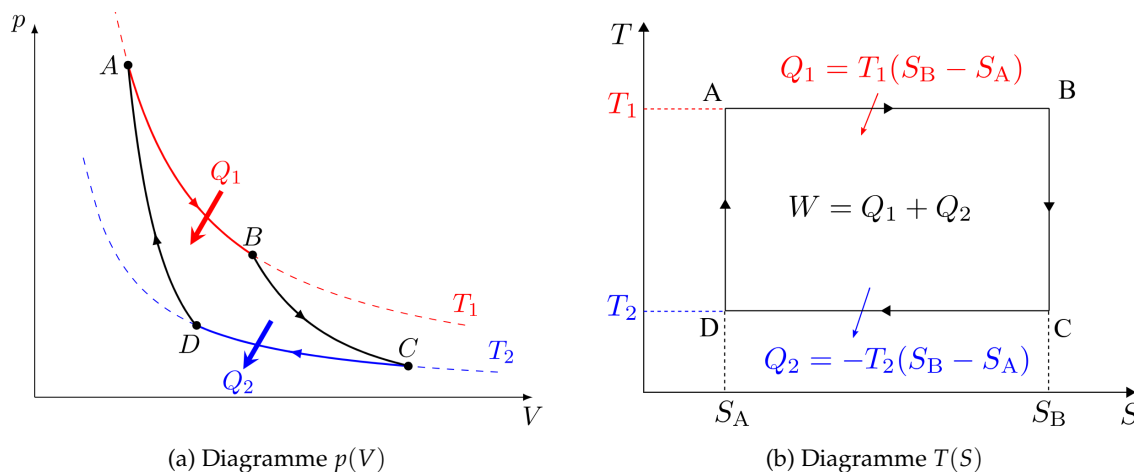


FIGURE 2 – Cycle de CARNOT

La figure 2 représente le cycle de CARNOT dans les diagrammes de WATT $p(V)$ et entropique $T(S)$.

Sur un diagramme de WATT, l'aire $\mathcal{A}$ du cycle représente le travail échangé par le fluide au cours d'un cycle. L'aire du cycle est positive si le cycle est parcouru dans le sens horaire ; or $W = - \int p dV = -\mathcal{A}$, donc $W < 0$ et le cycle est représenté ici est **moteur**.

Le diagramme entropique est intéressant car l'aire $\mathcal{A}$ du cycle représente le transfert thermique $Q_C + Q_F$ échangé par le fluide au cours d'un cycle. En effet, pour une transformation réversible, $\delta Q = T dS$. Si le cycle est parcouru dans le sens horaire, le cycle est moteur.

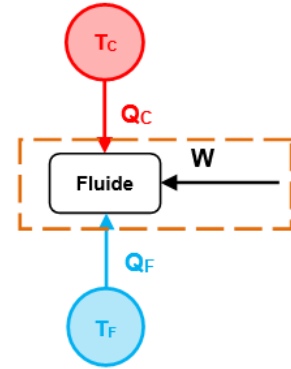
B.2 Cycle moteur

B.2.1 Efficacité d'un moteur

L'efficacité e d'un cycle moteur est appelée rendement et le plus souvent noté η . η est positif et contenu dans l'intervalle $[0, 1]$. La raison d'être d'un moteur est de fournir du travail : $W < 0$. En contrepartie, il consomme du transfert thermique en provenance de la source chaude $Q_C > 0$.

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

Le rendement d'un moteur thermique fonctionnant entre deux sources aux températures T_C et T_F est borné par le rendement η_C du moteur de CARNOT, qui constitue donc une référence.



B.2.2 Rendement du moteur de CARNOT

Exprimons le rendement du moteur de CARNOT.

① Premier Principe

$$\Delta U = Q_C + Q_F + W = 0 \quad \text{donc} \quad Q_C + W = -Q_F$$

② Second Principe

$$\Delta S = \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} + S_c = 0 \quad \text{donc} \quad \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = -S_c$$

③ Expression du rendement

On a donc

$$\begin{aligned} \frac{Q_C}{T_C} + \frac{-Q_C - W}{T_F} &= -S_c \\ T_F Q_C - T_C Q_C - T_C W &= -T_C T_F S_c \\ -T_C W &= (T_C - T_F) Q_C - T_C T_F S_c \\ \eta &= \left(1 - \frac{T_F}{T_C} \right) - T_F \frac{S_c}{Q_C}. \end{aligned}$$

Le moteur de CARNOT fonctionnant en cycle réversible, l'entropie créée S_c est nulle : $S_c = 0$. On obtient donc le rendement de CARNOT :

$$\eta_C = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Remarques

- ① On a montré ici que η_C était bien une limite supérieure du rendement : $\eta = \eta_C - T_F \frac{S_c}{Q_C}$, avec $T_F \frac{S_c}{Q_C} \geq 0$.
- ② Si la question posée est de déterminer directement η_C , il est bien plus efficace de considérer dès le début le cycle réversible ($S_c = 0$).

B.2.3 Autres cycles

De nombreux cycles existent ; des exemples seront traités en TD. On peut citer les cycles de STIRLING, de DIESEL, de BRAYTON-JOULES, de BEAU DE ROCHAS...

Les études théoriques de ces cycles sont réalisées avec des transformations idéales réversibles. Le problème de ces études réside dans le fait que, si les transformations sont réversibles, elles sont nécessairement quasi-statiques, et donc très lentes.

Se pose alors le problème de la puissance délivrée par de tels moteurs.

B.3 Cycle récepteur

Le principe de fonctionnement des cycles récepteurs est différent : le système reçoit du travail ($W > 0$) et pompe de la chaleur à la source froide ($Q_F > 0$) et en fournit à la source chaude ($Q_C < 0$).

Le travail W reçu par le fluide est « l'énergie couteuse, consommée ». La nature de « l'énergie utile » varie selon qu'on s'intéresse à la source froide ou à la source chaude.

Un récepteur thermodynamique, grâce au travail reçu W , « refroidit » la source froide et « réchauffe » la source chaude.

B.3.1 Cas de la pompe à chaleur (PAC)

Une pompe à chaleur fonctionne généralement avec le but suivant : **réchauffer la source chaude en refroidissant la source froide**. L'énergie à optimiser la chaleur fournie à la source chaude Q_C . L'efficacité est donc

$$e_{\text{PAC}} = \left| \frac{Q_C}{W} \right| = -\frac{Q_C}{W}$$

Le fluide subit un cycle de CARNOT : le fluide échange les chaleurs avec les sources au cours de deux isothermes. La compression et la détente sont adiabatiques.

Le **premier principe** indique que $-W = Q_C + Q_F$.

Le **second principe** donne (inégalité de CLAUSIUS) $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = 0$ car le cycle est réversible.

Ainsi, le premier principe permet d'écrire le rendement sous la forme

$$e_{\text{PAC},C} = -\frac{Q_C}{W} = \frac{Q_C}{Q_C + Q_F} = \frac{1}{1 + \frac{Q_F}{Q_C}}$$

Or le second principe indique que

$$\frac{Q_F}{Q_C} = -\frac{T_F}{T_C}$$

Donc

$$e_{\text{PAC},C} = \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_C}} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

On a donc l'efficacité de CARNOT, pour la pompe à chaleur

$$e_{\text{PAC},C} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

Remarques

- L'efficacité e d'une PAC est souvent appelée coefficient de performance (COP) et est supérieur à 1.
- Une PAC d'efficacité $e = 10$ signifie que la pompe à chaleur est 10 fois plus efficace d'un simple radiateur électrique d'efficacité $e = 1$.

B.3.2 Cas de la machine frigorifique ou du climatiseur

Une machine frigorifique fonctionne généralement avec le but suivant : **refroidir la source froide en réchauffant la source chaude**. L'énergie à optimiser la chaleur fournie à la source chaude Q_F . L'efficacité est donc

$$e_F = \left| \frac{Q_F}{W} \right| = \frac{Q_F}{W}$$

Le fluide subit un cycle de CARNOT : le fluide échange les chaleurs avec les sources au cours de deux isothermes. La compression et la détente sont adiabatiques.

Le **premier principe** indique que $-W = Q_C + Q_F$.

Le **second principe** donne (inégalité de CLAUSIUS) $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = 0$ car le cycle est réversible.

Ainsi, le premier principe permet d'écrire le rendement sous la forme

$$e_{F,C} = \frac{Q_F}{W} = -\frac{Q_F}{Q_C + Q_F} = -\frac{1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}}$$

Or le second principe indique que

$$\frac{Q_C}{Q_F} = -\frac{T_C}{T_F}$$

Donc

$$e_{F,C} = -\frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_F}} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

On a donc l'efficacité de CARNOT, pour la pompe à chaleur

$$e_{F,C} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

B.4 Bilan

Machine thermique	W	Q_F	Q_C	Efficacité	Efficacité de CARNOT
Moteur	< 0	< 0	> 0	$\eta = -\frac{W}{Q_C}$	$\eta_C = 1 - \frac{T_F}{T_C}$
Réfrigérateur	> 0	> 0	< 0	$e = \frac{Q_F}{W}$	$e_C = \frac{T_F}{T_C - T_F}$
Pompe à chaleur	> 0	> 0	< 0	$e = -\frac{Q_C}{W}$	$e_C = \frac{T_C}{T_C - T_F}$

TABLE 1 – Tableau des caractéristiques des machines thermiques

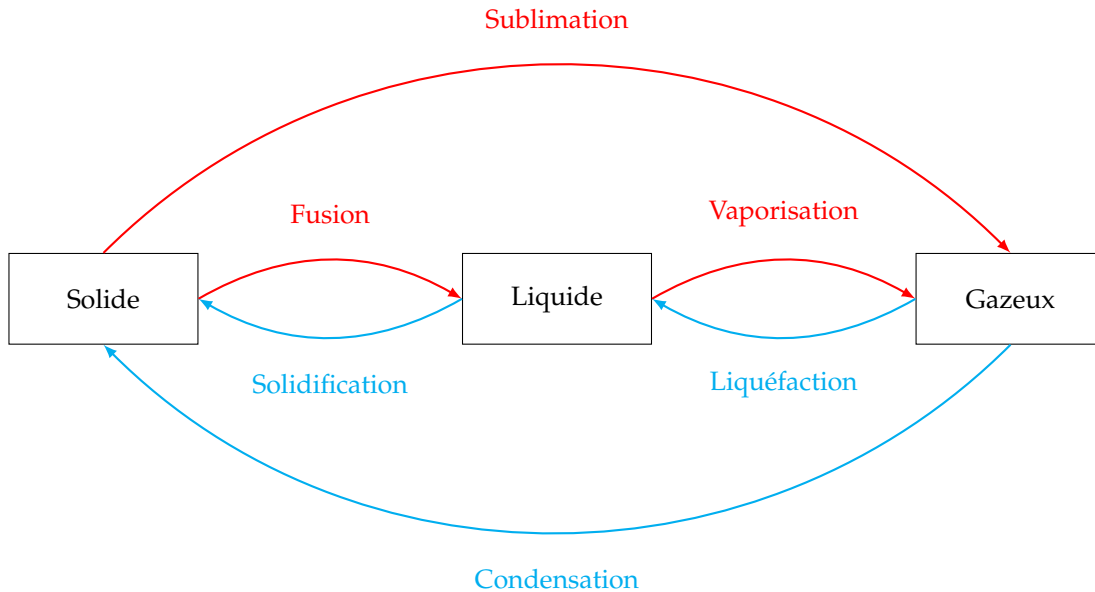
C. Changement d'état et machines thermiques

De nombreuses applications –industrielles notamment– font intervenir des fluides en écoulement permanent. On peut citer la PAC, la machine frigorifique, les centrales hydro-électriques... Au cours de cet écoulement, le fluide est souvent amené à changer d'état, totalement ou partiellement.

C.1 Diagrammes de changement d'état

C.1.1 Grandeurs énergétiques de changement d'état

Les changements d'état font intervenir des transferts énergétiques conséquents, qu'on a rapidement cherché à exploiter dans les machines thermiques.



Les **changements d'état** (à T et p constants), appelés aussi **transition de phase**, mettent en jeu des transferts énergétiques qu'il faut savoir manipuler.

On définit les grandeurs thermodynamiques de changement d'état de l'état 1 vers l'état 2, à la température T_{ch} , à savoir l'enthalpie massique et l'entropie massique de changement d'état :

$$\Delta_{12}h = h_2 - h_1 \quad \text{et} \quad \Delta_{12}s = \frac{\Delta_{12}h}{T_{ch}}$$

Ainsi, pour la fusion,

$$\Delta_{fus}h = h_\ell - h_s \quad \text{et} \quad \Delta_{fus}s = \frac{\Delta_{fus}h}{T_{fus}}$$

Seules les enthalpies de changement d'état sont fournies dans les données : il faut donc savoir en déduire les entropies de changement d'état. Il est aussi possible de déterminer ces grandeurs à partir de h_1 et h_2 , ou s_1 et s_2 , lues dans des tables ou graphiquement (voir TD).

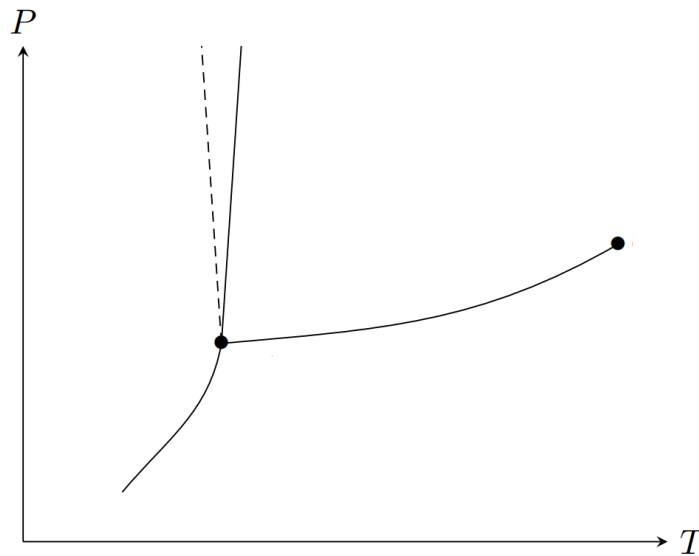
Les enthalpies tabulées sont toujours les enthalpies des changements d'état endothermiques : fusion, vaporisation et sublimation. Il est aisé de déterminer l'enthalpie du changement d'état opposé :

$$\Delta_{21}h = h_1 - h_2 = -\Delta_{12}h$$

C.1.2 Diagramme (p, T)

Le diagramme (p, T) est un diagramme qui permet de représenter plusieurs informations concernant les 3 états de la matière et leur transition de phase.

Dans un diagramme (p, T), on représente la pression du corps pur en fonction de sa température. On voit apparaître 3 domaines correspondants aux trois états physiques de la matière, séparés par des courbes figurant les changements d'état :

FIGURE 3 – Diagramme (p, T) du corps pur

- courbe de fusion (S-L),
- courbe de vaporisation (L-G)
- courbe de sublimation (S-G).

Sur ces courbes, deux états de matière coexistent : un changement d'état se fait donc bien à pression et température constante (la variance v vaut 1).

On distingue deux points particuliers :

- Le point triple T : il se trouve à l'intersection des trois domaines, donc le corps pur est présent sous trois phases. Il est invariant (la variance v est nulle). Pour l'eau, $T_T = 273,16$ K et $p_T = 611$ Pa. Ce [lien](#) montre le point triple du terbutanol.
- Le point critique C : c'est le point qui marque la fin de la courbe de vaporisation. Au delà du point C , on ne distingue plus l'état liquide de l'état gazeux. On parle alors de fluide hypercritique. Au cours de la vaporisation, il n'y a pas de surface de séparation entre le liquide et le gaz. Pour l'eau $T_C = 647$ K et $p_C = 230$ hPa. Ce [lien](#) montre des expériences autour du point critique du dioxyde de carbone : on y observe notamment l'opalescence du fluide critique.

C.1.3 Diagramme de CLAPEYRON (p, v)

L'un des inconvénients du diagramme (p, T) est que le phase de vaporisation est représentée par une courbe et ne permet pas de connaître précisément les variations de volume, qui sont importantes. Le diagramme de CLAPEYRON permet d'étudier plus particulièrement cet aspect de la vaporisation.

Le diagramme de CLAPEYRON représente la pression p en fonction du volume massique v . Il diffère légèrement du diagramme de WATT étudié en première année, qui représente la pression p en fonction du volume V .

Expérimentalement, on trace ce diagramme pour un corps pur (SF_6 par exemple) en comprimant de manière isotherme le gaz ; on note la valeur du volume V et de la pression p . On trace en réalité un réseau de courbes isothermes

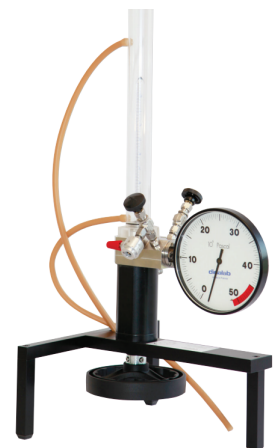


FIGURE 4 – Mesure d'isothermes

qui permettent d'en déduire le diagramme de la figure 5.

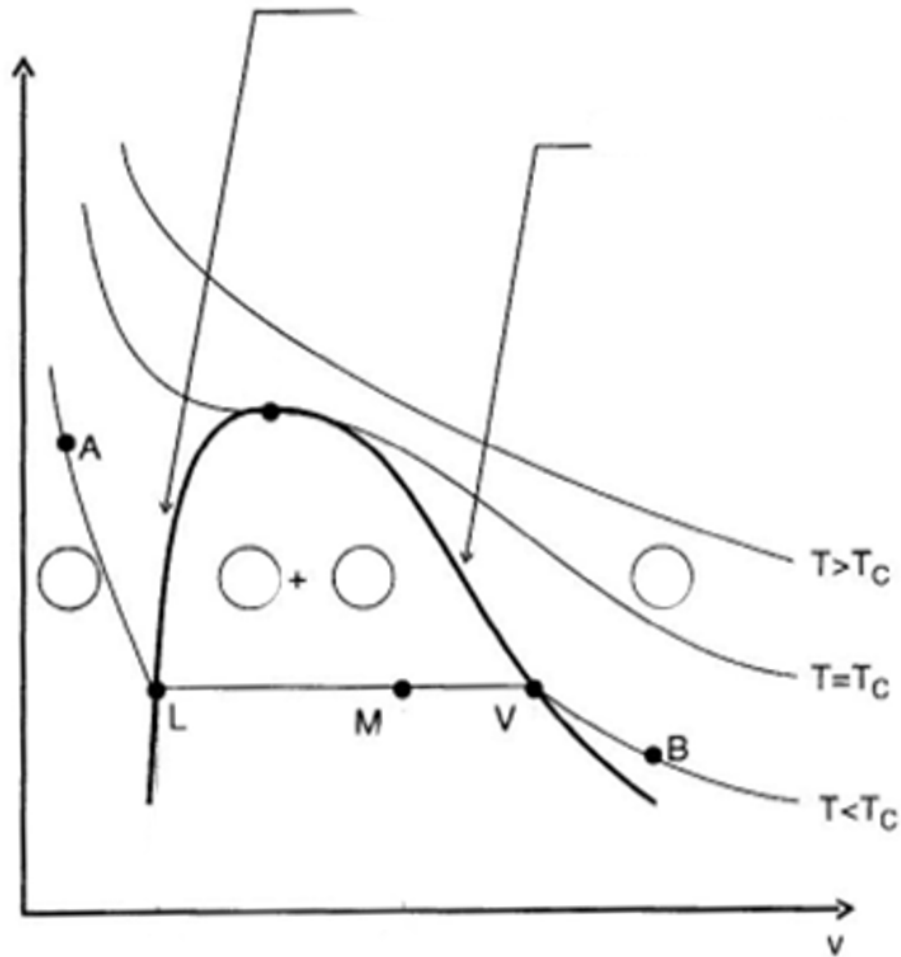


FIGURE 5 – Diagramme de CLAPEYRON (p, v)

On part du point B pour aller vers le point A, à la température constante T_1 :

- ① En B, le corps pur est sous forme gazeuse (V grand et p faible). En diminuant le volume, la pression augmente (compression). On est dans le domaine de la **vapeur sèche**.
- ② Au point V, la première goutte de liquide apparaît. Le changement d'état commence. On note v_V le volume massique correspondant. L'ensemble des points V forme la **courbe de rosée**.
- ③ On poursuit la compression en diminuant le volume. On observe un **palier de changement d'état** : la pression ne varie pas et on parle de pression de vapeur saturante p_s . Cette pression de vapeur saturante dépend de la température. Liquide et vapeur coexistent ; on parle alors de **vapeur saturante**.
- ④ Au point L, la dernière bulle de gaz disparaît. Le changement d'état est terminé. On note v_L le volume massique correspondant. L'ensemble des points L forme la **courbe d'ébullition**.
- ⑤ Au point A, le corps pur est sous forme liquide. La compression est difficile : il faut une forte augmentation de pression pour une faible diminution de volume.

Les courbes de rosée et d'ébullition se rejoignent au point critique C et forment la **courbe de saturation**.

Si $T = T_C$, l'isotherme passe par le point C, sans palier de changement d'état.
Si $T > T_C$, aucun palier n'est décrit (fluide hypercritique).

Sous la courbe de saturation, on est en présence d'un mélange diphasé (L + G) et il peut être très utile de déterminer la proportion de vapeur (ou de liquide).

D'autres diagrammes pourront être utilisés, notamment les diagrammes (p, h) ou (T, s) . Leur fonctionnement est similaire au diagramme de CLAPEYRON : courbe de saturation, théorème des moments...

C.2 Machines thermiques avec fluide en écoulement

Les définitions mises en place pour les machines thermiques à système fermé restent totalement valides, pour peu que les grandeurs utilisées (dans les rendements par exemple) restent homogènes. Les échanges énergétiques seront exprimés en J.kg⁻¹ ou en W.

De nombreux exemples seront traités en TD, TP, DL, DS, Colles.