

Cycles en diagramme $h - \log(p)$

Ce diagramme est principalement utilisé pour étudier les cycles des machines frigorifiques mais il convient aussi à la description du cycle moteur d'une machine à vapeur. Rappelons à cette occasion que les machines à vapeur sont très présentes dans les centrales de production d'électricité où elles entraînent en rotation l'alternateur qui permet de produire l'électricité par phénomène d'induction électromagnétique. Dans les centrales électriques : la vapeur est obtenue à hautes température ($\simeq 500^\circ\text{C}$) et pression ($\simeq 150\text{ bar}$) grâce l'énergie provenant de la combustion de charbon, de fuel, de gaz ou - majoritairement en France - de la fission nucléaire d'uranium dans une centrale nucléaire.

L'étude d'un cycle frigorifique sera réalisé en TP lors de l'étude d'une pompe à chaleur. Ici, nous n'étudierons que le cycle de la machine à vapeur simple.

1 Le diagramme $h - \log(p)$

1.1 Présentation

Le diagramme $h - \log(p)$ est utilisé pour décrire l'évolution de fluides qui s'écoulent dans une machine thermodynamique où h représente l'enthalpie massique. Il n'est pas étonnant dans ces conditions qu'il soit présenté pour les états liquide et vapeur du fluide en question, il est difficile de faire s'écouler les solides. . . Sur le graphique de la figure 1, on peut voir la structure du diagramme avec la courbe en cloche qui est la courbe de rosée-ébullition ainsi que les domaines liquide, vapeur et le domaine diphasé liquide-vapeur sous la courbe en cloche. Le point C est le point critique. On utilise en général une échelle logarithmique pour représenter car le domaine d'évolution de cette dernière est, en général, trop grand pour pouvoir être représenté en échelle linéaire : dans une machine à vapeur le rapport de la pression la plus élevée sur la pression la plus faible est de l'ordre de 1 000 d'où l'utilisation de l'échelle logarithmique sur 3 décades si l'on utilise le logarithme à base 10, on peut utiliser indifféremment le logarithme népérien ou le logarithme à base 10.

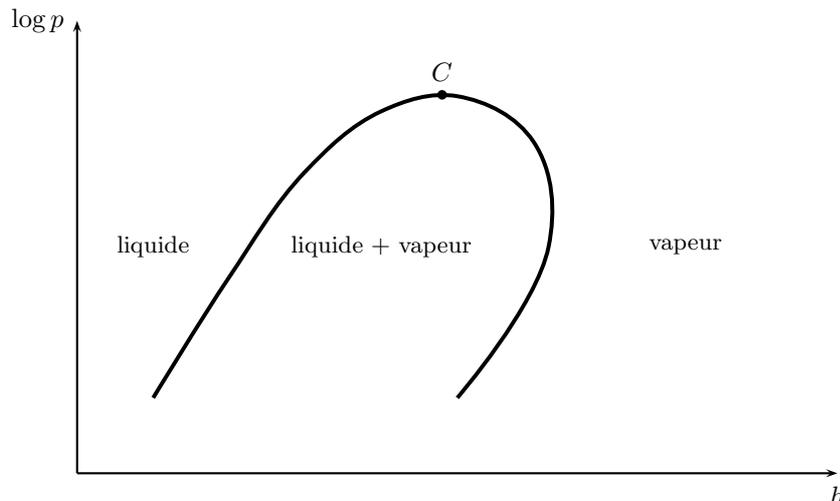


FIGURE 1 – Diagramme pression-enthalpie $h - \log(p)$

1.2 Courbes isoX

L'étude des cycles thermodynamiques est nettement facilitée lorsque le diagramme est enrichi par des courbes que j'ai appelée courbe isoX. Prenons un exemple simple : les courbes isothermes. Sur celles-ci la température est une constante. On représente, en fonction des besoins, un réseau de courbes plus ou moins denses, c'est-à-dire que l'on passe d'une courbe à l'autre avec un écart plus ou moins grand entre les deux températures. Cette situation a déjà été rencontrée dans l'étude du diagramme de CLAPEYRON vu en Sup que vous trouverez à la figure 2.

Revenons au diagramme des frigoristes. Il est évident que ce diagramme, les évolutions isobares sont représentées par des segments de droites horizontales. Les droites verticales sont des isenthalpiques. Dans le cycle simple d'une machine à vapeur, il n'y a pas d'opération de détente dans un robinet de laminage qui s'effectue à enthalpie constante. Par contre dans les machines frigorifiques, c'est le cas. Dans ce cas, l'étape de détente dans le robinet de laminage est donc représentée par un segment vertical.

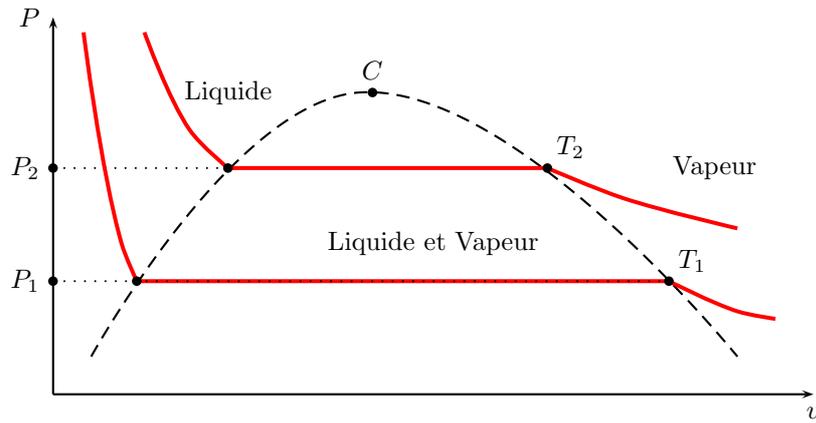


FIGURE 2 – Diagramme de CLAPEYRON

Dans le domaine liquide, les isothermes sont pratiquement verticales sauf à proximité du point critique car l'enthalpie des liquides est à peu près indépendante de leur pression. Dans le domaine diphasé liquide-vapeur, le système est monovariant. Si on fixe la température, la pression de vapeur saturante à une valeur aussitôt déterminée. L'isotherme est donc horizontale, c'est le pallier de changement d'état liquide-vapeur comme dans le diagramme de CLAPEYRON. Dans le domaine vapeur, il faut soit des mesures, soit des modèles assez évolués pour représenter l'évolution de l'isotherme. En effet, les interactions entre les molécules de gaz ne sont pas négligeables. Toutefois, si la pression devient faible on se rapproche du modèle du gaz parfait où les interactions entre les molécules peuvent être négligées en dehors des chocs élastiques. On doit donc retrouver le comportement des gaz parfaits. Or, nous savons que l'enthalpie du gaz parfait n'est fonction que de la température. Dans ces conditions, on peut donc dire qu'une isotherme est donc aussi une isenthalpique $h = Cte$, l'isotherme est donc verticale. Une isotherme a été représentée sur le graphique de la figure 3.

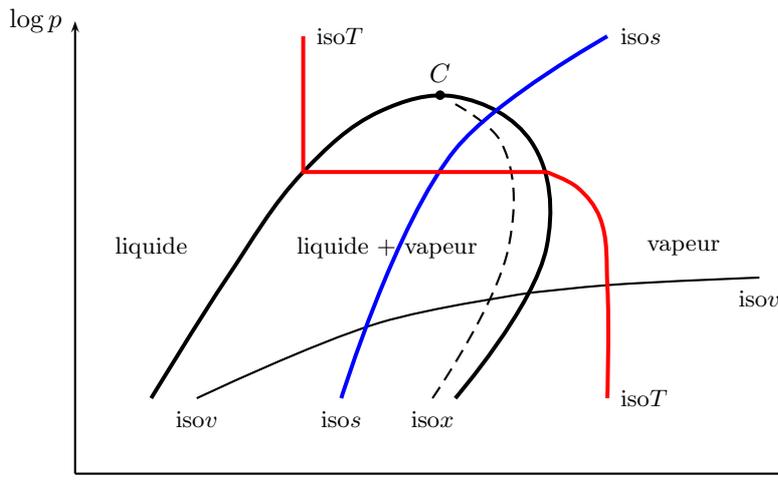


FIGURE 3 – Diagramme pression-enthalpie $h - \log(p)$ et courbes isoX

Dans ce diagramme, on représente aussi les isentropiques. Elles sont calculées à partir de l'identité thermodynamique $dh = Tds + vdp$ et du modèle utilisé pour représenter soit les phases liquide et vapeur, soit le mélange diphasé. On complète encore le diagramme traditionnellement par des courbes isovolumiques (massiques) et des courbes isotitres, ces dernières étant évidemment limitées au domaine diphasé liquide-vapeur puisque ce titre est la fraction massique de vapeur $x = \frac{m_{vap}}{m_{vap} + m_{liq}}$.

2 Machine à vapeur d'une centrale nucléaire

2.1 Principe de la machine

La machine à vapeur fournit de la puissance par détente dans deux turbines, ce qui met en rotation l'arbre de l'alternateur permettant ainsi la production d'électricité. Les principaux éléments constituant la machine à vapeur sont tout d'abord la pompe qui comprime fortement l'eau à l'état liquide lors d'une transformation qu'on peut estimer comme isenthalpique. Ensuite, l'eau traverse la chaudière où elle est chauffée à pression (élevée) constante. Pendant cette étape, elle est intégralement transformée en vapeur. La vapeur se détend dans la turbine HP (haute pression) au cours d'une détente supposée isentropique jusqu'à une pression intermédiaire. L'eau passe ensuite dans un surchauffeur qui la transforme à nouveau en vapeur sur une transformation isobare. Ensuite, cette vapeur se détend réversiblement dans une turbine BP (basse pression). C'est la mise en rotation des deux turbines qui est à l'origine du travail mécanique récupéré. Ce travail est lui-même converti en électricité par phénomène d'induction électromagnétique. Enfin, l'eau traverse un condenseur où elle perd de l'énergie au profit d'une source thermique extérieure lors d'une transformation isobare. Elle se transforme intégralement en eau liquide avant de revenir dans la pompe.

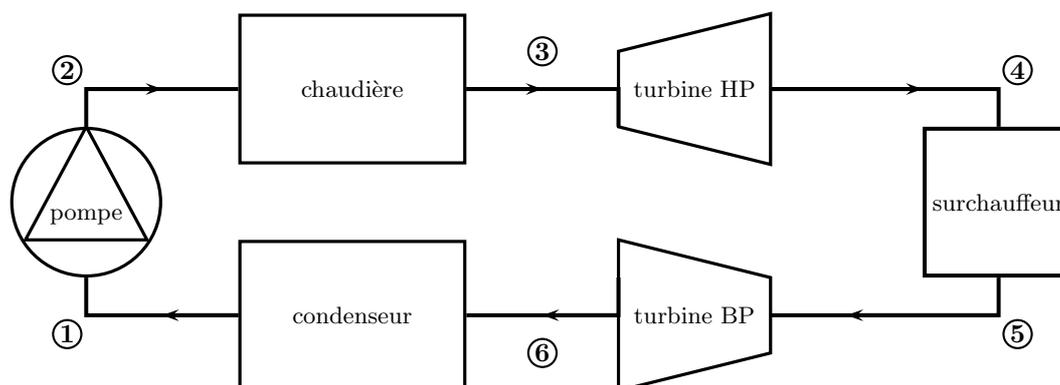


FIGURE 4 – Structure de la machine à vapeur

2.2 Cycle

Le cycle suivi par l'eau est précisé par les données du tableau suivant.

Point du cycle	1	2	3	4	5	6
État	liquide sat.	liquide	vapeur sat.	diphasé	vapeur sat.	diphasé
Pression (bar)	0,043	55	55	10	10	0,043
Température (°C)	30	30	270	180	180	30

Le tracé du cycle sera effectué sur le diagramme enthalpique de l'eau qui porte le nom de code R178.

2.3 Calcul du rendement

Faire le bilan de l'énergie utile. Faire le bilan de l'énergie coûteuse. En déduire le rendement de la machine thermique. Comparer le rendement trouvé avant au rendement de la machine idéale de CARNOT fonctionnant entre les températures extrêmes du cycle réel. Proposer un tracé du cycle qui soit plus réaliste prenant en compte des irréversibilités.

Le rendement de la machine à vapeur est très proche du rendement de production de l'électricité car l'alternateur possède un rendement de plus de 98% en général.

