

LP 2020 : UTILISATION DES DIAGRAMMES ENTHALPIQUES

Niveau

L2

Commentaires du jury

—

Bibliographie

—

pré-requis

- Efficacité de Carnot
- thermodynamique classique
- Diagramme de Clapeyron
- Premier principe industriel

Expériences

—

Table des matières

1 Diagramme des frigoristes	2
1.1 Présentation	2
1.2 Courbes	2
1.3 Exploitation	2
2 La machine frigorifique	4
2.1 Principe du réfrigérateur	4
2.2 Utilisation du diagramme	5
3 Autre exemple : la machine à vapeur	6
3.1 Cycle de Rankine	6
3.2 Echanges énergétiques et rendement	6
4 Diagramme de Mollier (ne pas faire parce qu'on a trouvé 0 utilisatoin mdr)	7
4.1 Courbes représentées	7
4.2 Utilisation du diagramme de Mollier	7

Introduction

En physique industrielle, on appelle diagramme enthalpique un diagramme de coordonnées (s, h) . On appelle aussi ces diagrammes *diagrammes de Mollier*. Par extension, on nome également diagramme enthalpique le diagramme des frigoristes ,de coordonnées (h, p) . Aujourd'hui, nous allons voir comment lire et utiliser ces 2 diagrammes à l'aide des lois de la thermodynamique classique.

1 Diagramme des frigoristes

1.1 Présentation

Le diagramme des frigoristes, ou diagramme enthalpique, a pour abscisse l'enthalpie massique d'un fluide, en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, et en ordonnée la pression, en bar. L'échelle de la pression est usuellement logarithmique. L'utilisation de grandeurs intensives permet d'appliquer le diagramme à une masse quelconque de fluide.

Ce diagramme est spécifique à un fluide : son allure est différente selon le fluide utilisé. Son tracé est obtenu expérimentalement.

Il contient beaucoup d'information, et comporte de nombreuses courbes, que nous allons voir en détail.

1.2 Courbes

Courbe de rosée et d'ébullition : les gammes d'enthalpie et de pression représentées sur le diagramme des frigoristes sont telles que des changements d'état liquide-gaz sont possibles. On représente donc les courbes de rosée, d'ébullition et le point critique, de la même manière que sur le diagramme de clapeyron. On ditingue alors les domaines du liquide et de la vapeur.

Isothermes : on représente alors les isothermes, comme dans le diagramme de Clapeyron.

Leur allure est similaire : pour le domaine liquide, le modèle de la phase condensée indilatable et incompressible implique que l'enthalpie du liquide est indépendante de la pression. Les isothermes sont des droites verticales.

Lorsque le fluide est biphasé, la pression est fixée : c'est un palier de changement d'état. Les isothermes sont des droites horizontales. La largeur du palier est la chaleur latente massique de changement d'état.

Dans le domaine du gaz, on tend vers un comportement de gaz parfait à basse pression. Hors d'après la seconde loi de Joule, l'enthalpie d'un gaz parfait ne dépend que de la température. On a $\Delta h = c_P \Delta T$, les isothermes sont des droites verticales.

Dans les domaines où ce sont des droites verticales, on ne trace pas complètement les isothermes, on les amorce.

Isochores : les isochores croissent dans le domaine diphasique. Le fait d'apporter de la chaleur à un mélange liquide-gaz fait augmenter sa pression. Il y a une rupture de pente sur la courbe de rosée : c'est du au fait que l'apport d'énergie dans le domaine diphasé fait varier les proportions liquide gaz, tandis que dans le domaine du gaz, l'énergie est uniquement accumulée par le gaz.

Isotitres : les isotitres sont représentées dans le domaine diphasé. Ici, on donne le titre massique de la phase vapeur.

Isentropiques : elles sont croissantes : une compression adiabatique réversible augmente l'enthalpie du fluide ($dh = Tds + vdP = vdP$). Leur pente diminue à mesure que l'on se rapproche du gaz car le volume massique du gaz est plus important que celui du liquide.

Le diagramme des frigoristes est donc la superposition de toutes ces données.

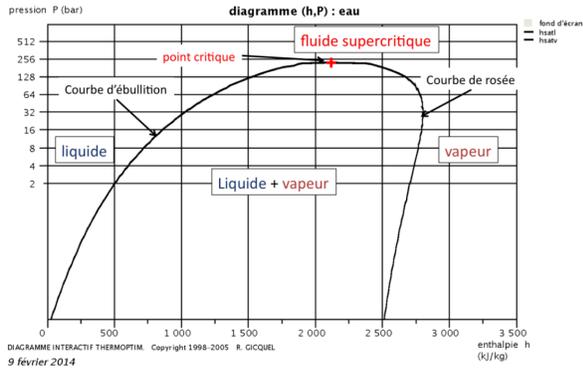
1.3 Exploitation

On l'a vu, on peut lire la chaleur latente de changement d'état du fluide considéré, à température donnée : c'est la largeur du palier. Plus généralement, on peut calculer la différence d'enthalpie entre 2 points A et B quelconque du diagramme, correspondant aux points de départ et d'arrivée d'une transformation thermodynamique.

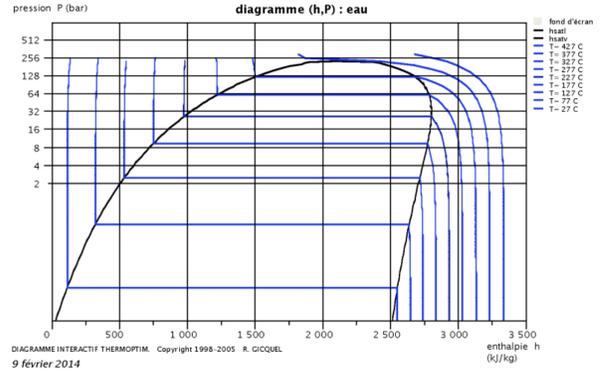
Premier principe industriel : Pour rappel :

$$\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_P = w + q$$

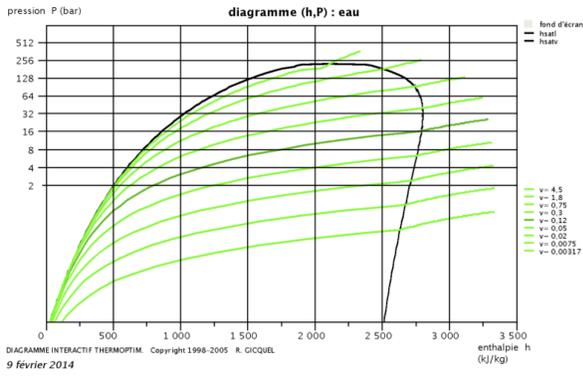
Dans la plupart des machines thermiques, on néglige les variations d'énergie cinétique et potentielle. Par exemple, la variation d'enthalpie liée à un changement d'état pour l'eau s'élève à $2265 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ dans les CNTP. Pour avoir une variation d'énergie cinétique comparable, il faudrait faire passer le fluide d'un état de repos à un état à la vitesse $v = \frac{2l}{\rho} \approx 4530 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$! Pour l'énergie potentielle, il faut une variation de hauteur de $h = \frac{l}{\rho g} \approx 231 \text{ m}$.



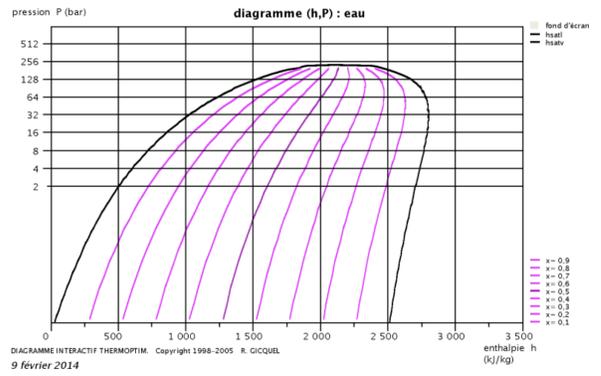
(a) Rosée, ébullition.



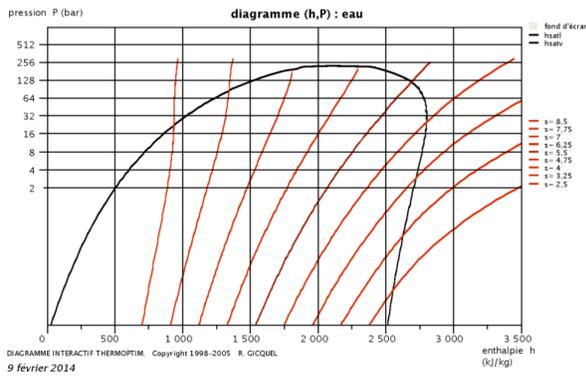
(b) Isothermes.



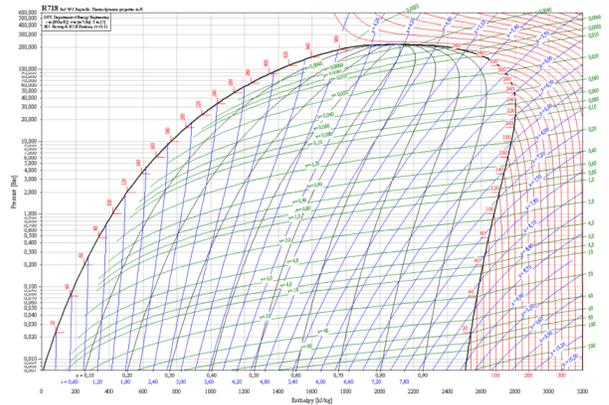
(c) Isochores.



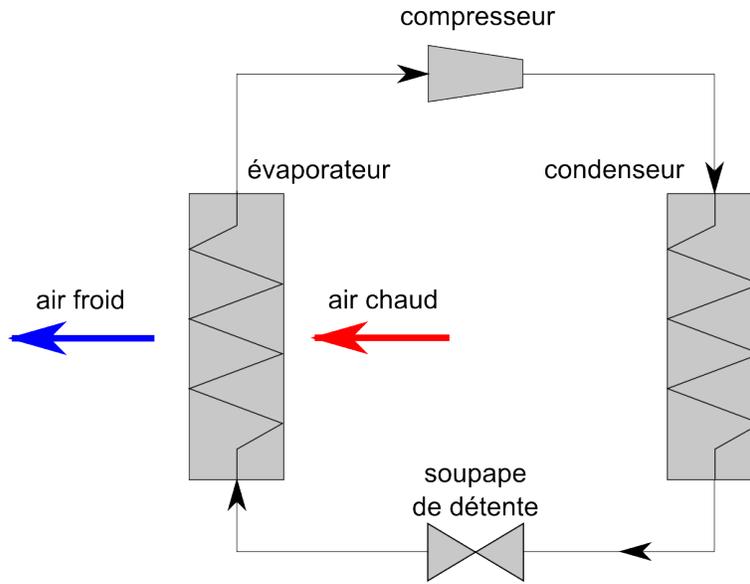
(d) Isotitres.



(e) Isentropiques.



(f) Tout superposé.



Cycle frigorifique

FIGURE 2 – Représentation schématique du réfrigérateur.

Alors le premier principe se simplifie en :

$$\Delta h = w + q$$

La lecture de la variation d'enthalpie permet de remonter au travail et à la chaleur échangés par le fluide, selon les hypothèses formulées : transformation adiabatique, transformation sans pièce mobile donc sans travail, ou encore transformation isenthalpe.

Théorème des moments :

Le théorème des moments s'applique sur un point du domaine diphasé. Il permet de calculer le titre massique en vapeur en un point M, à partir de la lecture de l'enthalpie en ce point, et des enthalpies du liquide et du gaz au mêmes températures.

On considère un point M de titre vapeur x , correspondant à une enthalpie massique h . Sur le palier isotherme, on lit h^{vap} et h^{liq} . On utilise alors les 2 relations suivantes, de conservation de la masse et de conservation de l'enthalpie :

$$\begin{aligned} x_{vap} + x_{liq} &= 1 \\ h &= x_{vap}h^{vap} + x_{liq}h^{liq} \end{aligned}$$

Il vient :

$$x = \frac{h - h^{liq}}{h^{vap} - h^{liq}}$$

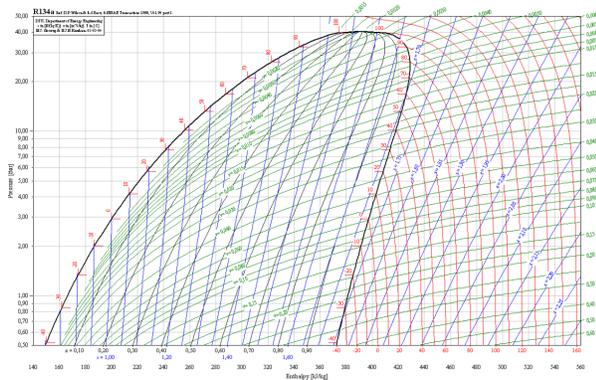
Ceci pose les bases de l'utilisation du diagramme des frigoristes. Nous allons l'utiliser dans le cadre d'une machine frigorifique.

2 La machine frigorifique

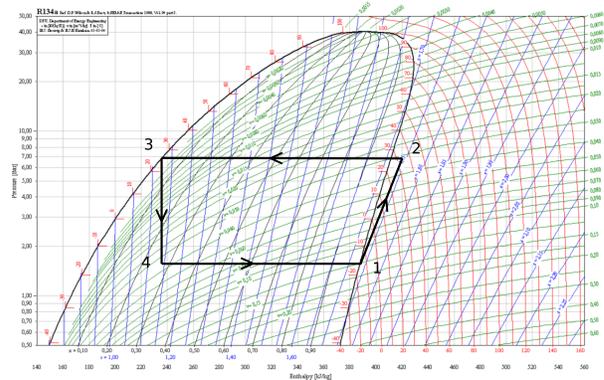
Dans un réfrigérateur, un des fluides caloporteurs utilisés est le R134A, le 1,1,1,2-tétrafluoroéthane (facile à évaporer dans les conditions d'utilisation du frigo).

2.1 Principe du réfrigérateur

Description du cycle : (faire le schéma des différents composants au fur et à mesure).



(a)



(b)

- Compresseur : Compression du fluide de 1.64 à 6.65 bar
- Condenseur : Liquéfaction à pression constante. La liquéfaction est exothermique, de l'énergie est cédée à l'air ambiant (on réchauffe l'air extérieur au frigo)
- Détendeur : Le fluide subit une détente isenthalpique (Joule Thomson). La pression redescend à 1.64 bar. La température diminue à -15°C
- Évaporateur : Évaporation endothermique du fluide. C'est l'étape qui refroidit le réfrigérateur.

2.2 Utilisation du diagramme

Spécifications du modèle :

- Compression supposé adiabatique car très rapide. On la suppose également réversible, donc la transformation est isentropique
- Condenseur à pression constante
- Détente isenthalpique
- Évaporateur : Pression constante, on veut bien évaporer tout le liquide pour qu'il n'y ait pas de problème dans la compression.

On repère sur le diagramme les différentes portions de transformation correspondant à chaque élément du cycle frigorifique :

Application numérique :

- 1 : $h_1 = 390 \text{ kJ kg}$, $P_1 = 1.64 \text{ bar}$
- 2 : $h_2 = 418 \text{ kJ kg}$, $P_2 = 6.65 \text{ bar}$
- 3 : $h_3 = 232 \text{ kJ kg}$, $P_3 = 6.65 \text{ bar}$
- 4 : $h_4 = 232 \text{ kJ kg}$, $P_4 = 1.64 \text{ bar}$

$$e = \frac{Q_f}{W}$$

Or avec le premier principe industriel :

$$q_f = h_1 - h_4 = 390 - 232 = 158 \text{ kJ kg}$$

$$w = h_2 - h_1 = 418 - 390 = 28 \text{ kJ kg}$$

Donc

$$e = \frac{q_f}{w} = 5.64$$

On peut comparer à l'efficacité de Carnot qui n'est pas très loin :

$$e = \frac{T_c}{T_c - T_f} = 6.45$$

Ne pas confondre rendement et efficacité...

Titre massique en vapeur en 4 :

On applique le théorème des moments pour trouver :

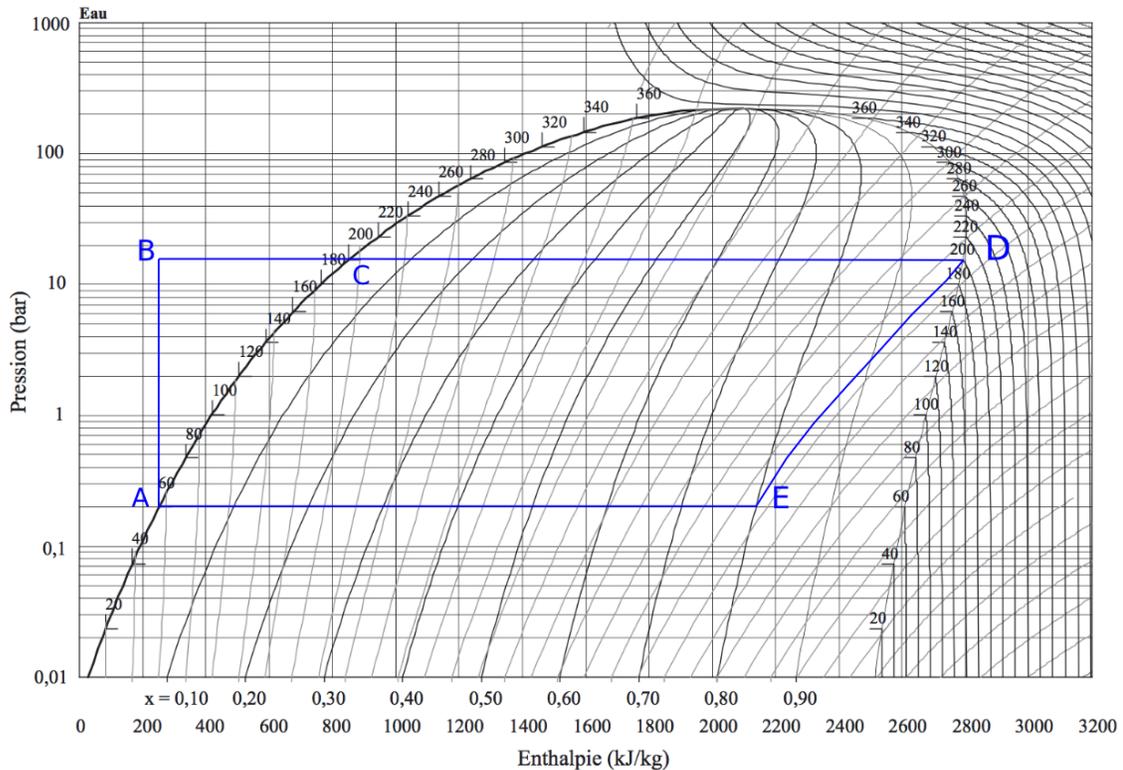


FIGURE 4 – Cycle de Rankine sur le diagramme des frigorisques de l'eau.

$$x = \frac{h_4 - h^{liq}}{h^{vap} - h^{liq}} = \frac{232 - 180}{390 - 180} = 24.8\%$$

Cette fraction massique représente la fraction de fluide qui ne s'évapore pas lors de l'étape d'évaporation (puisqu'elle est déjà en phase vapeur). Il serait plus rentable d'arriver à un état proche de la courbe d'ébullition.

3 Autre exemple : la machine à vapeur

(grosse kasdédi à vdorel et achauchat)

Une approximation du cycle suivi par l'eau dans une machine à vapeur est le cycle de Rankine.

3.1 Cycle de Rankine

On trace le cycle en même temps sur le diagramme des frigorisques de l'eau.

- A : liquide saturant, $P_A = 0.2 \text{ bar}$, $T_A = 60 \text{ °C}$.
- L'eau subit une compression **adiabatique réversible** dans une pompe, ce qui la mène à l'état B : $P_B = 15 \text{ bar}$.
- de B à C, l'eau est injectée dans la chaudière et subit un chauffage **isobare** jusqu'à $T_C = 200 \text{ °C}$, telle que la pression de vapeur saturante à cette température soit la pression du système : $P_{sat}(T_C) = P_B$.
- L'eau se vaporise à la température T_C jusqu'à l'état D.
- La vapeur est admise dans un cylindre à $T_D = T_C$ et $P_D = P_B$. Elle suit une détente adiabatique réversible jusqu'à l'état E tel que $T_E = T_A$. On obtient un mélange liquide-vapeur.
- Le piston chasse le mélange dans le condenseur, où il se liquéfie totalement jusqu'à l'état A.

3.2 Echanges énergétiques et rendement

On va de nouveau calculer un rendement par lecture graphique... On néglige toujours les énergies cinétiques et potentielles de pesanteur dans l'écriture du premier principe industriel.

- $A \rightarrow B$: compression adiabatique : $q_{AB} = 0$. Pas de travail utile : la compression est isenthalpe.
 - $B \rightarrow C$: il s'agit de chauffer un liquide à pression constante sans travail : $q_{BC} = h_C - h_B = 830 - 230 = 600 \text{ kJ/kg}$.
 - $C \rightarrow D$: on effectue un changement d'état, à pression et température constante. On lit : $q_{CD} = h_D - h_C = 2800 - 830 = 1970 \text{ kJ/kg}$.
 - $D \rightarrow E$: détente adiabatique : $q_{DE} = 0$. On a $w_{DE} = 2150 - 2800 = -650 \text{ kJ/kg}$. C'est le moment moteur du cycle.
 - $E \rightarrow A$: liquéfaction à pression constante sans travail utile. $q_{EA} = 2150 - 230 = -1920 \text{ kJ/kg}$.
- On en déduit le rendement du cycle moteur :

$$\eta = \frac{-w_{DE}}{q_{BC} + q_{CD}}$$

Application numérique : $\eta = 26\%$.

Comparaison avec le rendement de Carnot : $\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c} = 1 - \frac{333}{573} = 42\%$.

On peut aussi lire le titre vapeur en E... Afin d'augmenter la portion motrice du cycle, on peut imaginer que l'on effectue une détente suivant la courbe de saturation : la quantité d'eau qui se liquéfie est plus grande, donc l'énergie récupérée plus grande.

4 Diagramme de Mollier (ne pas faire parce qu'on a trouvé 0 utilisatoin mdr)

Le diagramme de Mollier est un diagramme comportant l'entropie en abscisse (en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) et l'enthalpie (même unité qu'avant) en ordonnée.

4.1 Courbes représentées

Les courbes présentes sur un diagramme de Mollier sont habituellement les isobares, les isothermes et les courbes de saturation. On croise parfois les isotitres et les isopycnes ("iso-masse volumique").

Courbes de saturation : elles forment également une bosse, mais on dirait qu'elle est étirée. Le point critique n'est plus le point culminant.

Contrairement aux représentations dans le diagrammes de Clapeyron ou le diagramme des frigoristes, le palier de changement n'est plus horizontal, mais incliné. La deuxième identité fondamentale de la thermodynamique permet de justifier ce point. En effet : $dh = Tds + vdP \implies dh = TdscardP = 0$ le long d'une isobare. Comme un changement d'état est un processus isotherme, la température est constante sur le palier si bien que l'équation de l'isobare, à l'intérieur de la courbe de saturation, s'écrit $h = Ts + \text{Cste}$. Il s'agit là de l'équation d'un segment de pente T.

Les isothermes et les isobares : Les isothermes et les isobares sont confondues à l'intérieur de la courbe de saturation. *Une fois que la pression de vapeur saturante est fixée, la température de changement d'état est imposée par la relation de Clapeyron.* Cette observation nous rappelle qu'on ne peut choisir indépendamment la pression et la température de changement d'état.

4.2 Utilisation du diagramme de Mollier

Ce diagramme permet de lire facilement le rendement entropique d'une transformation. Prenons le cas de la transformation dans le compresseur : il s'agit de la transformation 1-2. Dans une première approche, on la considère comme adiabatique réversible, et donc isentropique. La courbe correspondante sur le diagramme est une droite verticale.

La transformation de 1 à 2 correspond au passage de $h_1 = 390 \text{ kJ/kg}$, $P_1 = 1.64 \text{ bar}$ à $h_2 = 418 \text{ kJ/kg}$, $P_2 = 6.65 \text{ bar}$.

Conclusion

Blabla

On a étudié 2 machines qui fonctionnent avec des changements d'état : ceux-ci sont une énorme réserve d'énergie ! (en ordre de grandeur, l'énergie pour vaporiser un litre d'eau à 100 degrés est la même que l'énergie potentielle

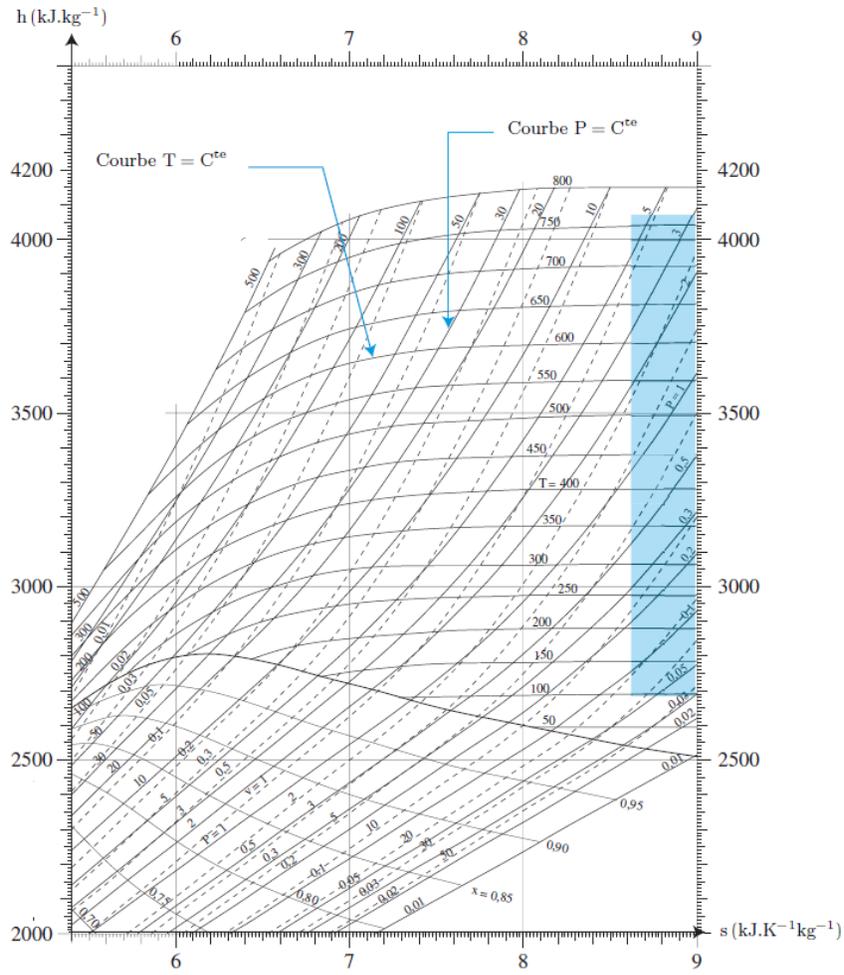


FIGURE 5 – Diagramme de Mollier de l'eau. Source : Capprépa thermodynamique PT, Portelli.

d'une petite voiture au sommet de la tour Eiffel :O). Les diagrammes des frigoristes sont très utiles dans ce genre de cas.