

# LP 2020 – Utilisation des diagrammes enthalpiques

11 juin 2021

Antoine Chauchat & Valentin Dorel

## Niveau : L2

## Bibliographie

✍ ,

→

## Prérequis

- Premier et second principes thermodynamiques
- Machine thermique idéale
- Diagramme de Clapeyron
- Premier principe industriel

## Expériences

👤

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Présentation du diagramme enthalpique</b>	<b>2</b>
1.1	Coordonnées et zones du diagramme . . . . .	2
1.2	Courbes présentes . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Étude d'une machine frigorifique</b>	<b>4</b>
2.1	Description du cycle . . . . .	5
2.2	Étude énergétique . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Étude d'une machine à vapeur</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Questions et commentaires</b>	<b>7</b>
4.1	Questions . . . . .	7
4.2	Commentaires . . . . .	7

## Introduction

On a étudié jusqu'ici en thermodynamique classique des transformations idéales comme le cycle de Carnot ou bien des fluides idéales comme le gaz parfait. En réalité dans les machines thermiques on emploie des fluides réels et des cycle irréversibles. Comment peut-on alors accéder aux grandeurs thermodynamiques d'intérêt lors de tels cycles ?

## 1 Présentation du diagramme enthalpique

Regardons à quoi ressemble un diagramme enthalpique, par exemple celui de l'isobutane R600a, fluide réfrigérant utilisé en alternative aux CFC.

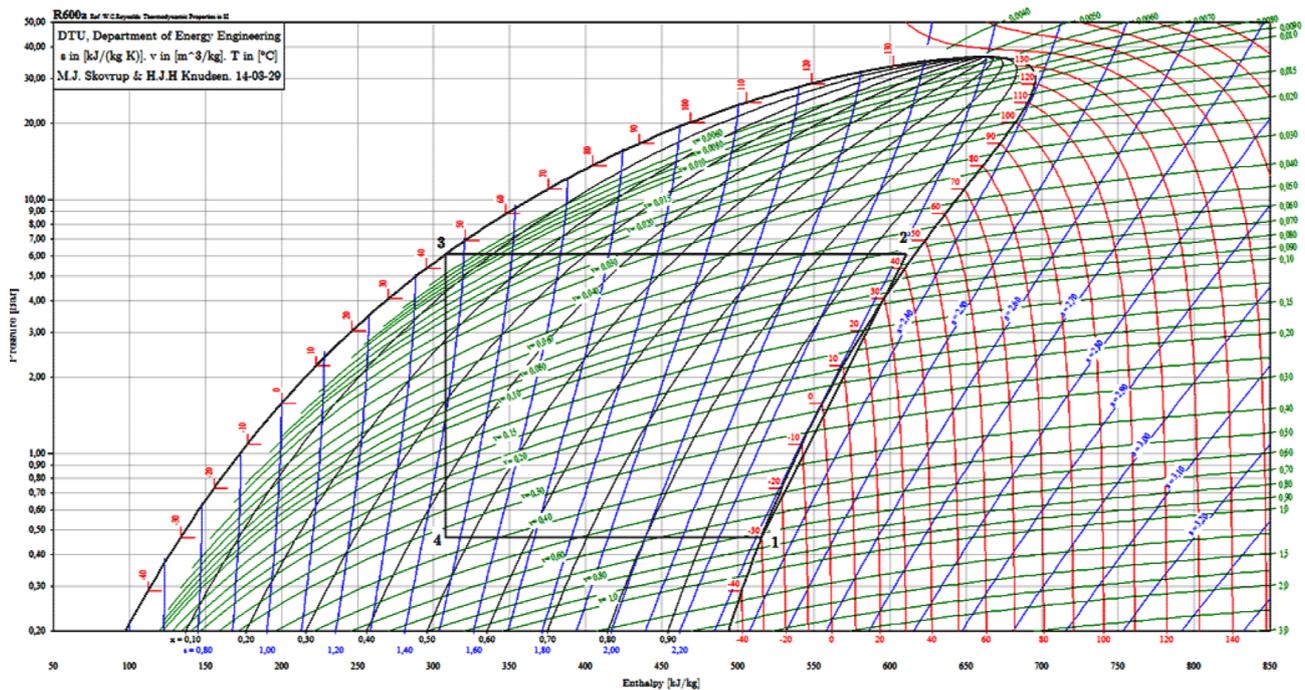


Fig. 1 : Diagramme de Mollier de l'isobutane R600a

Comme on peut le voir ce diagramme porte beaucoup d'informations. On va donc tout d'abord présenter les différents éléments qui sont présentés dessus sur le diagramme de l'eau afin d'y voir plus clair.

### 1.1 Coordonnées et zones du diagramme

C'est un diagramme de Mollier, on a la pression en ordonnée et l'enthalpie massique  $H$  en abscisse. On voit la courbe de changement d'état, qui est composée des courbes de rosée et d'ébullition qui se rejoignent en un point critique. On peut se demander où se situent les phases liquides et gaz.

La phase liquide correspond à des hautes pressions et basses températures. Or l'enthalpie est une fonction croissante de la température ainsi le liquide pur correspond à la zone à gauche. Le gaz correspond donc à la zone à droite, et sous la courbe on a l'équilibre liquide-vapeur.

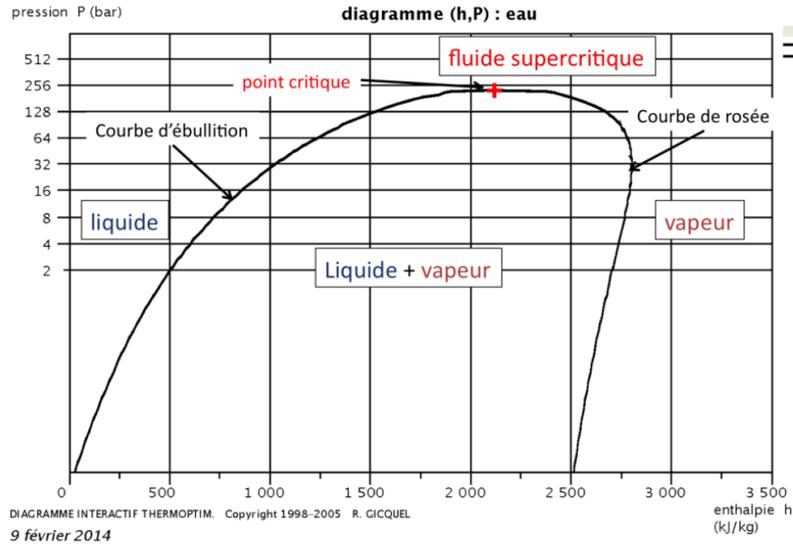


Fig. 2 : Zones du diagramme enthalpique de l'eau (crédits R.Gicquel)

### 1.2 Courbes présentes

On va décrire le comportement des courbes présentes dans chacune des zones du diagramme. De même que l'enthalpie, les autres grandeurs extensives sont massiques dans ce diagramme.

#### Isothermes :

- À l'état liquide, les isothermes sont presque verticales, l'enthalpie est indépendante de la pression. En effet on peut écrire :

$$dH = C_p dT + \left( V - \frac{\partial V}{\partial T} \Big|_P \right) dP \tag{1.1}$$

- Dans la zone d'équilibre les isothermes sont horizontales. En effet on a changement d'état d'un corps pur donc à pression fixée la température est fixée.
- À l'état vapeur, les isothermes sont des courbes décroissantes d'asymptote verticale à basse pression. On retrouve en effet le comportement de gaz parfait et la deuxième loi de Joule.

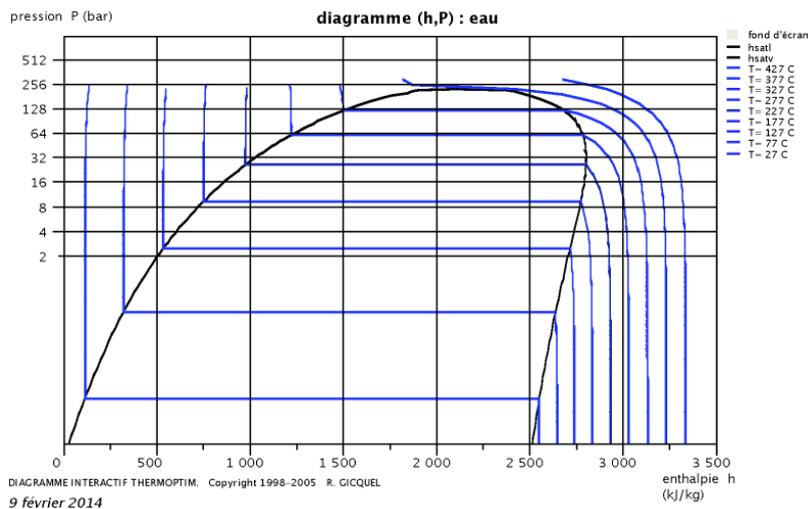


Fig. 3 : Isothermes du diagramme de l'eau

À une pression donnée la longueur du palier correspond à la chaleur latente de vaporisation  $L_v$ .

On voit notamment sur ce diagramme les écarts au modèle du gaz parfait. On étudie en effet des fluides réels dont le comportement n'est pas régi par des équations mais que l'on mesure expérimentalement. C'est d'ailleurs tout l'intérêt de ces diagrammes.

**Isentropique :** Les isentropiques sont croissantes, quasiment verticales dans la zone de phase liquide. Elles sont croissantes car en effet :

$$dH = TdS + VdP = VdP \tag{1.2}$$

Et  $V > 0$  ainsi les courbes sont croissantes

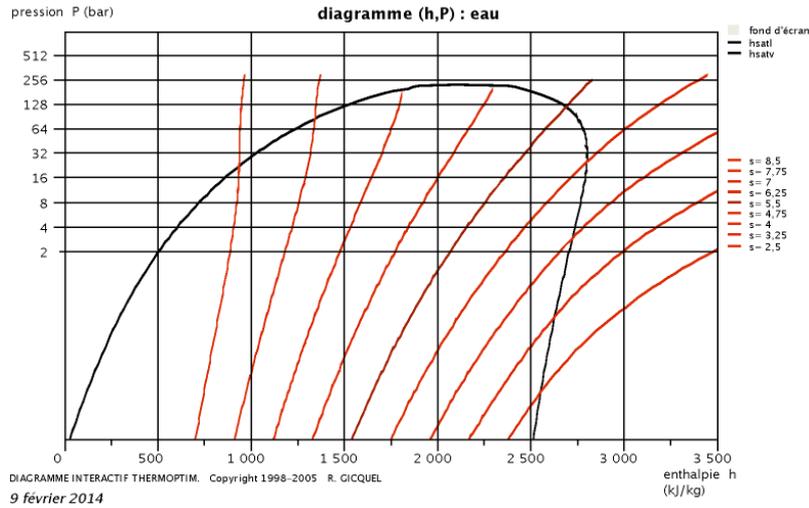


Fig. 4 : Isentropiques du diagramme de l'eau

Il y a également les isochores (à volume constant) et les isotitres (seulement sous la courbe d'équilibre).

Maintenant que l'on a vu de quoi se constituait un tel diagramme on va pouvoir l'étudier et l'utiliser dans deux cas concrets.

↓ *Ce diagramme s'appelle diagramme des frigoristes car il est surtout utilisé dans le cas de machines frigorifiques.*

## 2 Étude d'une machine frigorifique

On va donc étudier la machine frigorifique qui est modélisée sur la figure 5.

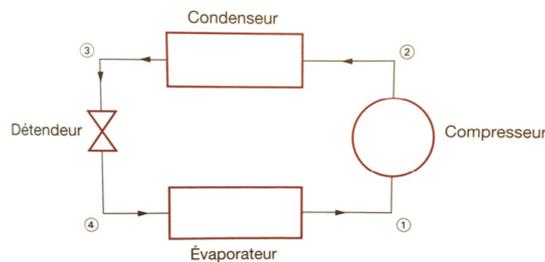


Fig. 5 : Cycle de la machine frigorifique

Le diagramme du fluide réfrigérant est celui présenté au début de la leçon, le cycle que l'on va étudier est donc celui que l'on voit sur la figure 1.

## 2.1 Description du cycle

Au point 1 le fluide est dans un état de vapeur saturante  $x = 1$  (point de rosée) à la température  $T_1 = -30^\circ\text{C}$ .

- 1  $\rightarrow$  2 Dans le compresseur, le fluide subit une transformation que l'on suppose *adiabatique* et *réversible*, menant à l'état 2 à la pression  $P_2 = 6$  bar. Sur le diagramme, le fluide suit l'isentropique  $s = 2.3 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$  passant par un état de vapeur sèche avant de devenir diphasé.
- 2  $\rightarrow$  3 Dans le condenseur, l'évolution est *isobare*, le fluide change d'état de manière isotherme ( $T_2 = 45^\circ\text{C}$ ). Au cours de cette transformation il y a transfert thermique du fluide vers la source chaude, thermostat qui est joué par l'atmosphère de la pièce. Au point 3, le fluide est liquide.
- 3  $\rightarrow$  4 Dans le détendeur le fluide subit une détente *isenthalpique* (Joule-Kelvin). L'état 4 a même pression que l'état 1, on note  $x_4 = 0.46$  le titre vapeur correspondant.
- 4  $\rightarrow$  1 Transformation isobare dans l'évaporateur. Vaporisation du fluide pour retrouver l'état initial. Il y a transfert thermique de la source froide (le milieu à réfrigérer) vers le fluide. C'est la phase utile au cours de laquelle on extrait de l'énergie thermique à l'enceinte que l'on veut maintenir à basse température.

## 2.2 Étude énergétique

On suppose l'écoulement du fluide stationnaire, on peut alors à chaque étape utiliser le premier principe industriel :

$$\Delta h = w_u + q \quad (2.1)$$

Avec  $w_u$  le travail massique utile et  $q$  le transfert thermique massique.

Intéressons nous à l'étape utile 4  $\rightarrow$  1. Sur cette étape, le premier principe industriel s'écrit  $h_1 - h_4 = q_f$  avec  $h_1 = 516 \text{ kJ kg}^{-1}$  et  $h_4 = 308 \text{ kJ kg}^{-1}$ . On trouve  $q_f = 208 \text{ kJ kg}^{-1}$ . On a donc  $q_f > 0$ , le fluide a reçu de la chaleur ce qui correspond bien au fonctionnement d'une machine frigorifique.

On s'intéresse aussi au travail de compression, qui représente la dépense énergétique. La compression étant *adiabatique*, on a  $h_2 - h_1 = w_c$ , on a également  $h_2 = 611 \text{ kJ kg}^{-1}$  ainsi  $w_c = 95 \text{ kJ kg}^{-1}$ . On a  $w_c > 0$  en effet on a du fournir du travail au fluide.

On en déduit donc l'efficacité frigorifique :

$$e_f = \frac{q_f}{w_c} = 2.2 \quad (2.2)$$

On peut la comparer à l'efficacité frigorifique de Carnot :

$$c_{fc} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = 3.2 \quad (2.3)$$

L'efficacité est bien inférieure à celle de Carnot.

## 3 Étude d'une machine à vapeur

On peut également utiliser les diagrammes enthalpiques pour étudier un cycle moteur. Voyons ça avec l'exemple d'une machine à vapeur. On va donc employer le diagramme enthalpique de l'eau. Dans une machine à vapeur, l'eau suit un *cycle de Rankine*.

- Au point A l'eau est à l'état de liquide saturant seul, à la pression  $P = 0.2$  bar et  $T_1 = 60^\circ\text{C}$ .
- A  $\rightarrow$  B, l'eau est comprimée de façon adiabatique et isentropique dans une pompe jusqu'à la pression  $P_2 = 15$  bar.
- B  $\rightarrow$  C, l'eau est injectée dans la chaudière et s'y réchauffe de manière isobare jusqu'à la température  $T_2 = 200^\circ\text{C}$ , telle que  $P_{\text{sat}}(T_2) = P_2$ .
- C  $\rightarrow$  D, l'eau se vaporise entièrement à la température  $T_2$ .
- D  $\rightarrow$  E, la vapeur est admise dans le cylindre à  $T_2$  et  $P_2$  et effectue une détente adiabatique et isentropique jusqu'à la température  $T_1$ , on obtient un mélange liquide-vapeur
- E  $\rightarrow$  A, le piston chasse le mélange liquide-vapeur dans le condenseur où il se liquéfie totalement

On peut alors représenter le cycle de Rankine sur le diagramme enthalpique de l'eau Figure 6.

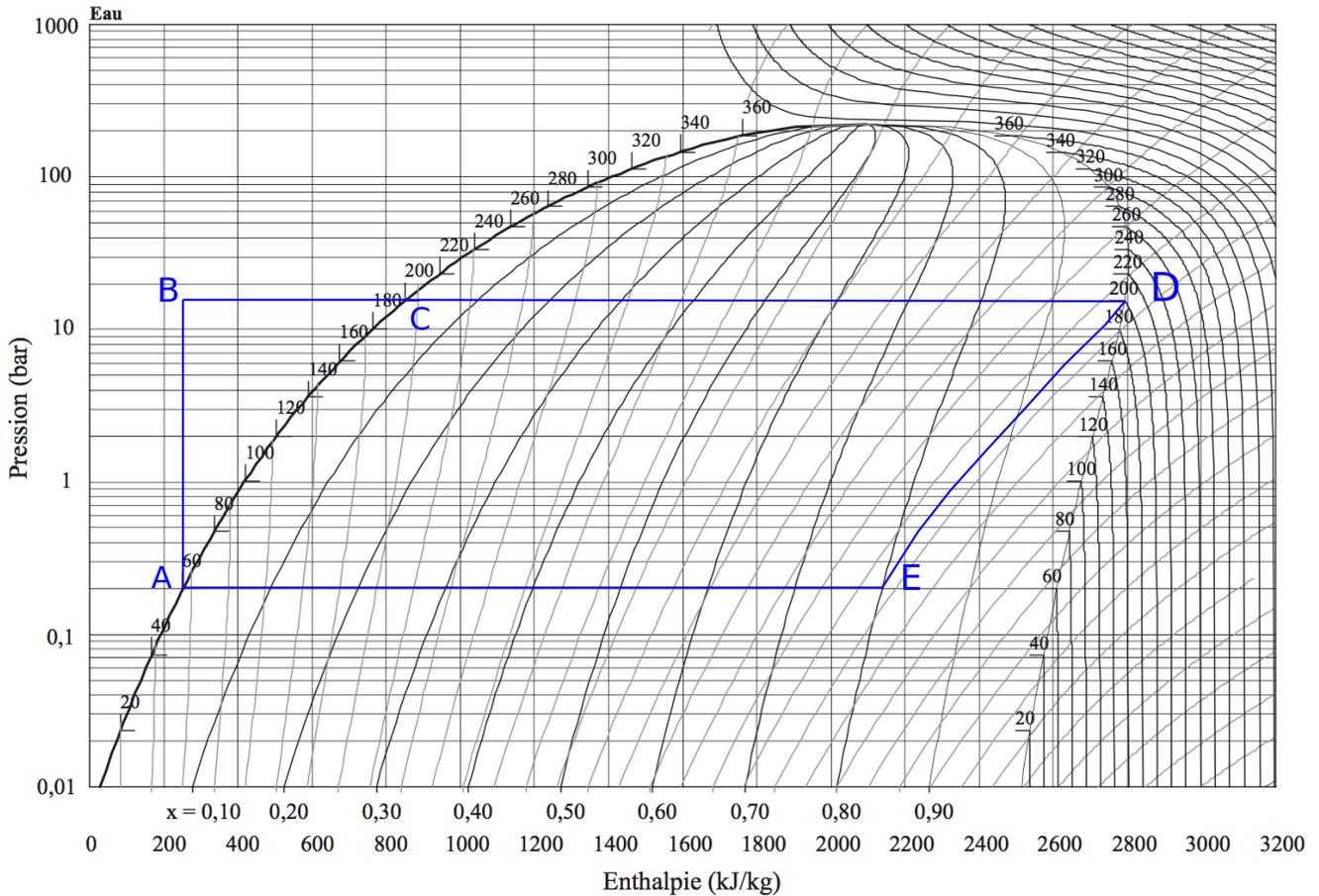


Fig. 6 : Diagramme enthalpique de l'eau et cycle de Rankine

On raisonne en grandeurs massiques, on note  $q$  la chaleur massique reçue par le fluide au cours d'une transformation. Au cours de toute transformation on pourra écrire

$$\Delta h = w + q \tag{3.1}$$

Avec  $w$  le travail autre que celui des forces de pression.

- $A \rightarrow B$  La compression est adiabatique donc  $q_{AB} = 0$ . On peut noter qu'elle est sans travail car isenthalpique.
- $B \rightarrow C$  Il n'y a pas de travail donc

$$h_C - h_B = q_{BC} \implies q_{BC} = 830 - 230 = 600 \text{ kJ kg}^{-1}. \tag{3.2}$$

- $C \rightarrow D$  Il n'y a pas de travail donc

$$h_D - h_C = q_{CD} \implies q_{CD} = 2800 - 830 = 1970 \text{ kJ kg}^{-1}. \tag{3.3}$$

- $D \rightarrow E$  La détente est adiabatique donc

$$h_E - h_D = w_{DE} \implies w_{DE} = 2150 - 2800 = -650 \text{ kJ kg}^{-1}. \tag{3.4}$$

On remarque que  $w_{DE} < 0$  c'est cette transformation qui fournit le travail moteur.

- $E \rightarrow A$  Il n'y a pas de travail utile

$$h_A - h_E = q_{EA} \implies q_{EA} = 230 - 2150 = -1920 \text{ kJ kg}^{-1}. \tag{3.5}$$

On peut alors calculer le rendement de ce cycle moteur comme pour une machine motrice

$$\eta = \frac{-w_u}{q_C}. \quad (3.6)$$

On a identifié  $w_u = w_{DE}$  et on a  $q_C = q_{BC} + q_{CD} = 2570 \text{ kJ kg}^{-1}$  donc

$$\eta = 0.26. \quad (3.7)$$

On peut comparer ce rendement au rendement de Carnot :

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_f}{T_c} = 1 - \frac{333}{573} = 0.42 \quad (3.8)$$

Le rendement est bien inférieur, ce moteur respecte le second principe. Cela est dû à l'irréversibilité dans le cycle. Les transformations  $A \rightarrow B$  et  $B \rightarrow E$  sont réversibles et les changements de phase se font à température constante donc de manière réversible. Seule la transformation  $B \rightarrow C$  est irréversible, elle traduit un réchauffement du liquide à pression constante au contact d'une source chaude qui n'est pas à l'équilibre thermique avec le liquide à chauffer.

## Conclusion

On a vu dans cette leçon l'utilité des diagrammes enthalpiques, qui permettent de traiter les cycles employant des gaz réels et faisant notamment intervenir des changements d'état. On les emploie car la variation d'enthalpie du fluide donne accès aux grandeurs d'intérêt (travail et chaleur). Ils sont très utiles aussi bien pour les machines frigorifiques ou pompes à chaleur que pour les moteurs. On a précisé dans cette leçon que ces diagrammes étaient utiles pour l'étude des fluides réels.

Ici on a utilisé uniquement des cycles modèles, simplifiés, qui peuvent s'écarter des cycles réellement en jeu dans par exemple une machine frigorifique ou une machine à vapeur. On pourra alors raffiner la description des machines thermiques en mesurant le cycle effectivement décrit par le gaz par exemple.

## 4 Questions et commentaires

### 4.1 Questions

- 

### 4.2 Commentaires

-