

Leçon 17 : diagrammes d'état des fluides réels purs

E. Capitaine

TSI 2 - Lycée Charles Coëffin

25 février 2026

Plan

- 1 Introduction
- 2 Diagrammes de Clapeyron (P, v)
 - Allure du diagramme
 - Titre d'un système diphasé
 - Courbes iso
- 3 Enthalpie et entropie de changement d'état
 - Enthalpie de changement d'état
 - Entropie de changement d'état
- 4 Diagrammes des frigorigènes (P, h)
 - Allure du diagramme
 - Exploitation d'un diagramme réel
- 5 Diagrammes entropiques (T, s)
 - Allure du diagramme
 - Courbes iso

Plan

- 1 Introduction
- 2 Diagrammes de Clapeyron (P, v)
 - Allure du diagramme
 - Titre d'un système diphasé
 - Courbes iso
- 3 Enthalpie et entropie de changement d'état
 - Enthalpie de changement d'état
 - Entropie de changement d'état
- 4 Diagrammes des frigoristes (P, h)
 - Allure du diagramme
 - Exploitation d'un diagramme réel
- 5 Diagrammes entropiques (T, s)
 - Allure du diagramme
 - Courbes iso

Introduction

Les fluides réels jouent un rôle central dans de nombreuses applications industrielles : centrales thermiques, systèmes frigorifiques, pompes à chaleur, compresseurs ou encore turbines à vapeur. Dans toutes ces machines, un fluide subit des **transformations thermodynamiques** complexes pouvant inclure des **changements d'état liquide–vapeur**.

Prenons l'exemple d'un cycle frigorifique domestique. Dans un réfrigérateur, un fluide frigorigène circule en permanence dans un circuit fermé. Il s'évapore dans l'évaporateur en prélevant de l'énergie thermique à l'enceinte froide, puis se liquéfie dans le condenseur en cédant cette énergie à l'air ambiant. Au cours de ce cycle, le fluide passe successivement par des états liquide, diphasé puis vapeur, sous des pressions et températures variées.

Pour dimensionner et analyser ces systèmes, il est nécessaire de connaître précisément l'état thermodynamique du fluide à chaque instant. Pour cela on utilise différents **diagrammes d'états de fluides réels purs**.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Diagrammes de Clapeyron (P, v)
 - Allure du diagramme
 - Titre d'un système diphasé
 - Courbes iso
- 3 Enthalpie et entropie de changement d'état
 - Enthalpie de changement d'état
 - Entropie de changement d'état
- 4 Diagrammes des frigorigènes (P, h)
 - Allure du diagramme
 - Exploitation d'un diagramme réel
- 5 Diagrammes entropiques (T, s)
 - Allure du diagramme
 - Courbes iso

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Allure du diagramme

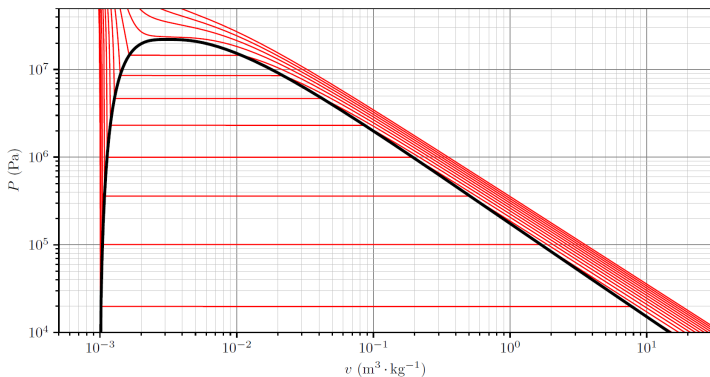
Le diagramme de Clapeyron (P, v) représente la pression P en fonction du volume massique $v = 1/\rho$. ❤️

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Allure du diagramme

Le diagramme de Clapeyron (P, v) représente la pression P en fonction du volume massique $v = 1/\rho$. ❤️

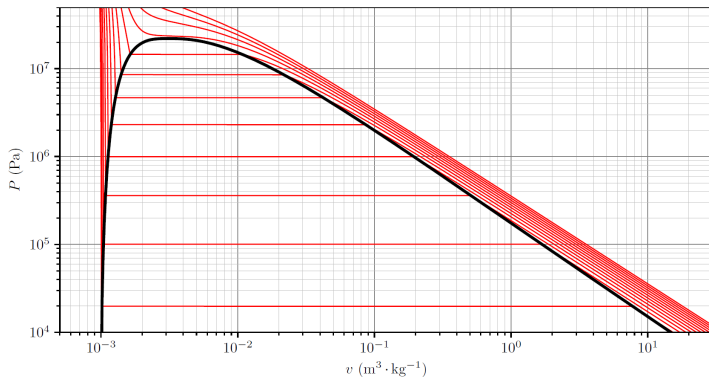
Lorsque des valeurs sont données, les axes sont généralement gradués en échelle logarithmique, comme on peut le voir avec le diagramme du système liquide-vapeur de l'eau ci-dessous.



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Allure du diagramme

Comment attribuer **les domaines au liquide ou à la vapeur ?**

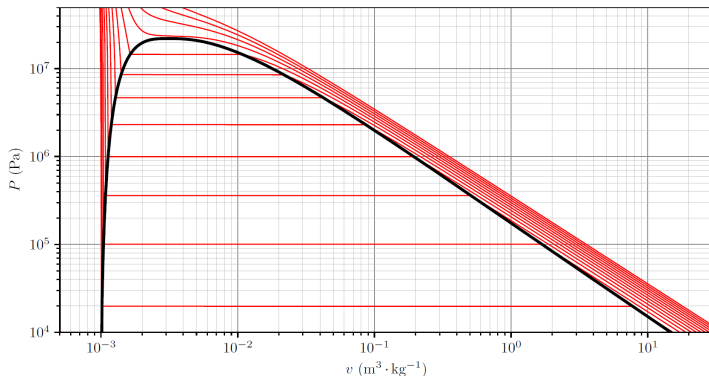


Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Allure du diagramme

Comment attribuer **les domaines au liquide ou à la vapeur ?**

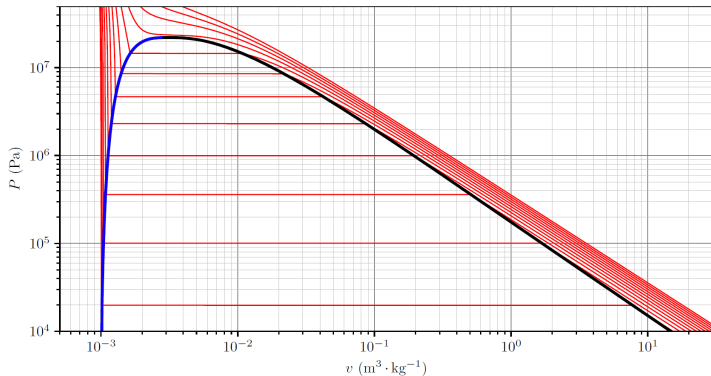
Comme $\rho_L > \rho_V$ alors $v_L < v_V$: le liquide se trouve à gauche et la vapeur à droite. Au milieu se trouve le domaine $L + V$.



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Allure du diagramme

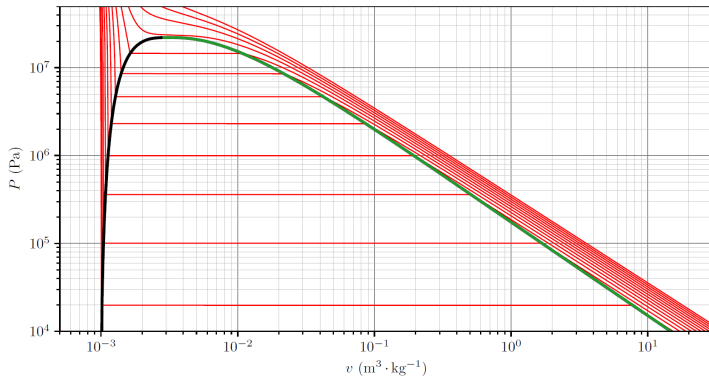
Courbe séparant L et $L + V$: **courbe d'ébullition** (apparition de la première bulle de gaz). ❤️



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Allure du diagramme

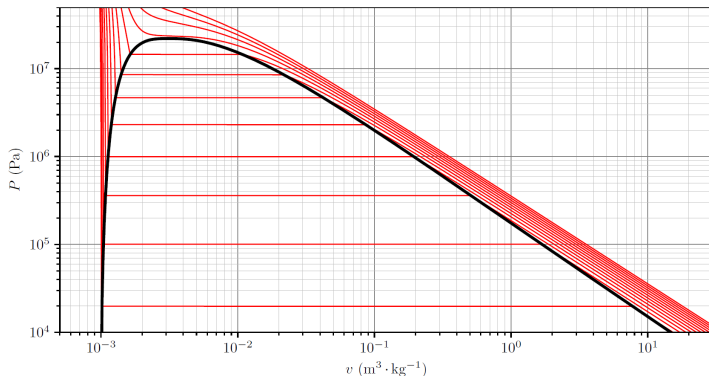
Courbe séparant $L + V$ et V : **courbe de rosée** (apparition de la première goutte de liquide). ❤️



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Allure du diagramme

Les courbe d'ébullition et de rosée constituent la **courbe de saturation** dont le sommet est le **point critique** au delà duquel il n'y a plus de liquide ou de gaz mais un **fluide supercritique**. ❤️



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Allure du diagramme

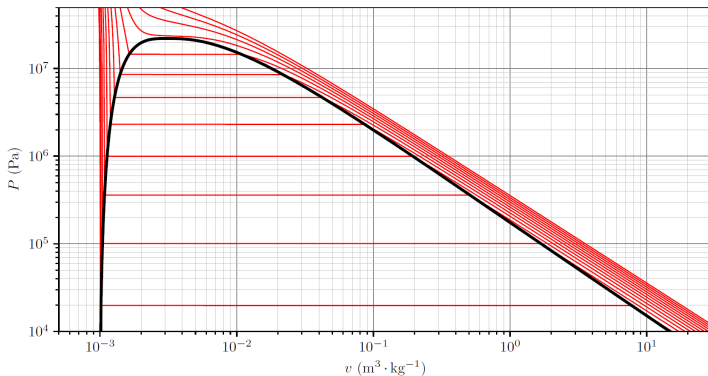
Quelques propriétés du domaine diphasé, ici $L + V$.

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Allure du diagramme

Quelques propriétés du domaine diphasé, ici $L + V$.

La pression P et la température T ne sont pas indépendantes : pour une valeur de pression fixée, une valeur de température est fixée. ❤️



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Allure du diagramme

Quelques propriétés du domaine diphasé, ici $L + V$.

La part de liquide est dite **liquide saturé** et a les propriétés du liquide au niveau de la courbe d'ébullition (v, h, s , etc.)

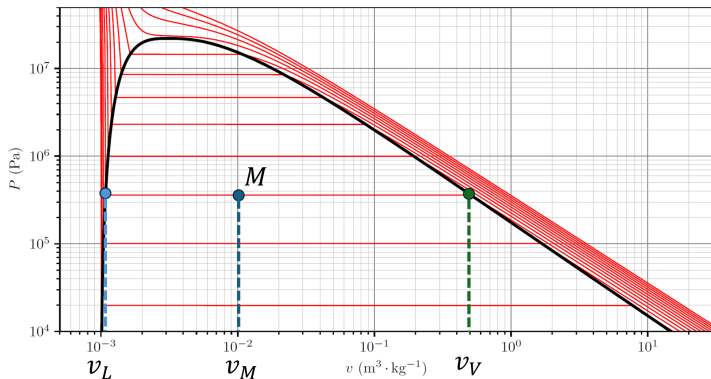
La part de vapeur est dite **vapeur saturée** et a les propriétés de la vapeur au niveau de la courbe de rosée (v, h, s , etc.)

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Allure du diagramme

Quelques propriétés du domaine diphasé, ici $L + V$.

La part de liquide au niveau du mélange en M a le même volume massique que le liquide saturé au niveau de la courbe de rosée, soit $v_{M,L} = v_L$. Il en va de même pour l'enthalpie et l'entropie massiques.

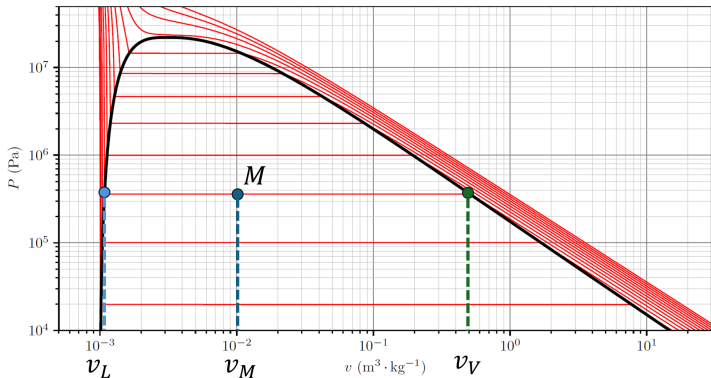


Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Allure du diagramme

Quelques propriétés du domaine diphasé, ici $L + V$.

La part de vapeur au niveau du mélange en M a le même volume massique que la vapeur saturée au niveau de la courbe de rosée, soit $v_{M,V} = v_V$. Il en va de même pour l'enthalpie et l'entropie massique.



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

Comment déterminer la part de liquide et de vapeur dans un mélange diphasée ?

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

Comment déterminer la part de liquide et de vapeur dans un mélange diphasé ?

On appelle **titre** en vapeur (respectivement en liquide), noté x_V (respectivement x_L), la proportion de la phase vapeur (respectivement liquide) dans un système diphasé. ❤️

$$x_V = \frac{m_V}{m_L + m_V} = \frac{n_V}{n_L + n_V} \quad \text{et} \quad x_L = \frac{m_L}{m_L + m_V} = \frac{n_L}{n_L + n_V}$$

$$x_V + x_L = 1 \quad \text{❤️}$$

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

Comment déterminer la part de liquide et de vapeur dans un mélange diphasé ?

Le titre peut se déterminer à partir de n'importe quelle grandeur additive présente sur un diagramme. Par exemple : **le volume massique v , le volume V , l'enthalpie massique h , l'entropie massique s , etc.**

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

Comment déterminer la part de liquide et de vapeur dans un mélange diphasé ?

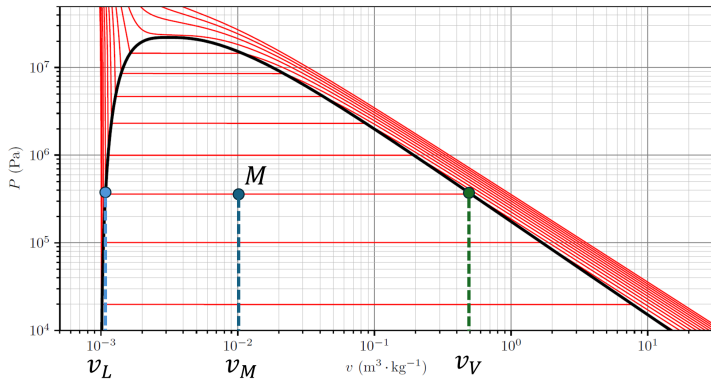
Le titre peut se déterminer à partir de n'importe quelle grandeur additive présente sur un diagramme. Par exemple : **le volume massique v , le volume V , l'enthalpie massique h , l'entropie massique s , etc.**

Prenons le volume massique dans le cas du diagramme de Clapeyron, afin de déterminer le titre en vapeur (respectivement en liquide) du point M .

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

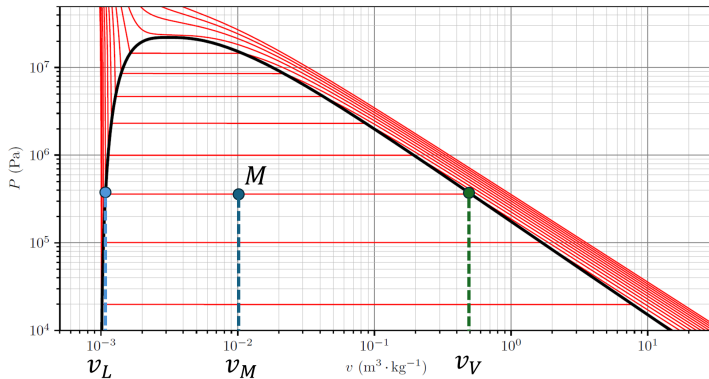
$v_M =$; $v_L =$; $v_V =$.



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

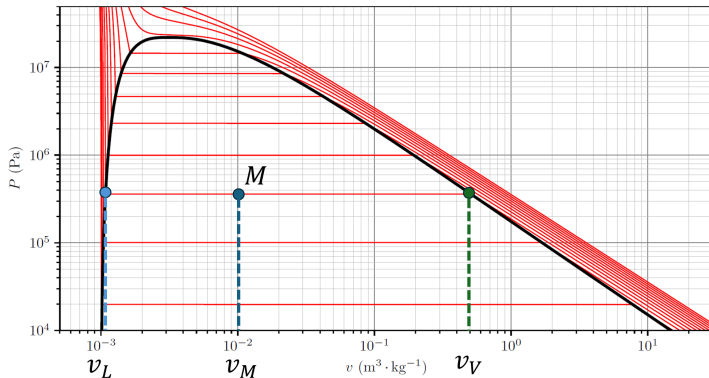
$$v_M = 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}; v_L = \quad ; v_V = \quad .$$



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

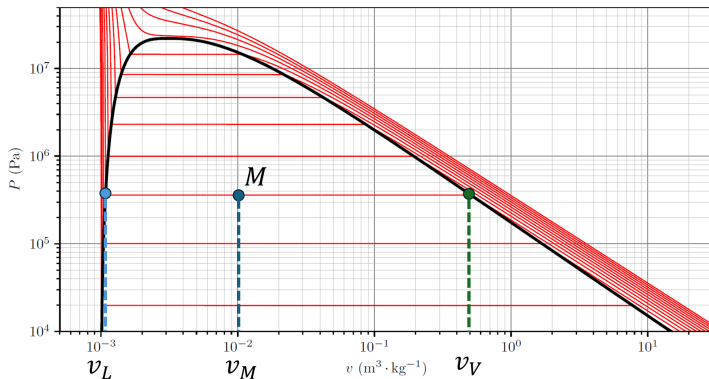
$$v_M = 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}; v_L = 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}; v_V =$$



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

$$v_M = 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}; v_L = 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}; v_V = 5 \times 10^{-1} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}.$$



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

Comme le volume est additif, le volume du mélange $L + V$ est égale au volume de la part liquide plus le volume de la part vapeur, soit

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

Comme le volume est additif, le volume du mélange $L + V$ est égale au volume de la part liquide plus le volume de la part vapeur, soit

$$V_M = V_{M,L} + V_{M,V} \quad \Longleftrightarrow \quad m v_M = m_L v_{M,L} + m_V v_{M,V}.$$

avec m , m_L et m_V les masses du mélange total, de la part liquide et de la part vapeur respectivement.

Or on sait que le volume massique du liquide dans le mélange $v_{M,L}$ correspond au volume massique du liquide saturé v_L (de même pour la part vapeur). Ainsi

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

Comme le volume est additif, le volume du mélange $L + V$ est égale au volume de la part liquide plus le volume de la part vapeur, soit

$$V_M = V_{M,L} + V_{M,V} \quad \Longleftrightarrow \quad m v_M = m_L v_{M,L} + m_V v_{M,V}.$$

avec m , m_L et m_V les masses du mélange total, de la part liquide et de la part vapeur respectivement.

Or on sait que le volume massique du liquide dans le mélange $v_{M,L}$ correspond au volume massique du liquide saturé v_L (de même pour la part vapeur). Ainsi

$$v_M = \frac{m_L}{m} v_L + \frac{m_V}{m} v_V.$$

Or, par définition du titre, $x_V = \frac{m_V}{m}$ et $x_L = \frac{m_L}{m} = 1 - x_V$, ainsi

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

Comme le volume est additif, le volume du mélange $L + V$ est égale au volume de la part liquide plus le volume de la part vapeur, soit

$$V_M = V_{M,L} + V_{M,V} \quad \Longleftrightarrow \quad m v_M = m_L v_{M,L} + m_V v_{M,V}.$$

avec m , m_L et m_V les masses du mélange total, de la part liquide et de la part vapeur respectivement.

Or on sait que le volume massique du liquide dans le mélange $v_{M,L}$ correspond au volume massique du liquide saturé v_L (de même pour la part vapeur). Ainsi

$$v_M = \frac{m_L}{m} v_L + \frac{m_V}{m} v_V.$$

Or, par définition du titre, $x_V = \frac{m_V}{m}$ et $x_L = \frac{m_L}{m} = 1 - x_V$, ainsi

$$v_M = (1 - x_V) v_L + x_V v_V \quad ; \quad v_M - v_L = x_V (v_V - v_L)$$

$$x_V = \frac{v_M - v_L}{v_V - v_L}.$$

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

On vient de démontrer le **théorème des moments** : à partir d'une fonction d'état massique z du liquide saturant et de la vapeur saturante à P fixé on peut déterminer la part de liquide et de vapeur dans un mélange particulier M . ❤️

$$x_V = \frac{z_M - z_L}{z_V - z_L} \quad \text{et} \quad x_L = \frac{z_V - z_M}{z_V - z_L} \quad \text{❤️}$$

avec z pouvant correspondre à v , h ou s .

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

On vérifie ce théorème, en étudiant le **cas où le liquide est saturant** : on se trouve sur la courbe d'ébullition, soit $v_M = v_L$. Comme il n'y a que du liquide, alors $x_L =$ et $x_V =$.

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

On vérifie ce théorème, en étudiant le **cas où le liquide est saturant** : on se trouve sur la courbe d'ébullition, soit $v_M = v_L$. Comme il n'y a que du liquide, alors $x_L = 1$ et $x_V = 0$. Vérifions cela

$$x_L =$$

$$x_V =$$

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

On vérifie ce théorème, en étudiant le **cas où le liquide est saturant** : on se trouve sur la courbe d'ébullition, soit $v_M = v_L$. Comme il n'y a que du liquide, alors $x_L = 1$ et $x_V = 0$. Vérifions cela

$$x_L = \frac{v_V - v_M}{v_V - v_L} = \frac{v_V - v_L}{v_V - v_L} = 1$$

$$x_V =$$

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

On vérifie ce théorème, en étudiant le **cas où le liquide est saturant** : on se trouve sur la courbe d'ébullition, soit $v_M = v_L$. Comme il n'y a que du liquide, alors $x_L = 1$ et $x_V = 0$. Vérifions cela

$$x_L = \frac{v_V - v_M}{v_V - v_L} = \frac{v_V - v_L}{v_V - v_L} = 1$$
$$x_V = \frac{v_M - v_L}{v_V - v_L} = \frac{v_L - v_L}{v_V - v_L} = 0.$$

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

On vérifie de nouveau, en étudiant le **cas où la vapeur est saturante** : on se trouve sur la courbe de rosée, soit $v_M = v_V$. Comme il n'y a que de la vapeur, alors $x_L =$ et $x_V =$.

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

On vérifie de nouveau, en étudiant le **cas où la vapeur est saturante** : on se trouve sur la courbe de rosée, soit $v_M = v_V$. Comme il n'y a que de la vapeur, alors $x_L = 0$ et $x_V = 1$.

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

On vérifie de nouveau, en étudiant le **cas où la vapeur est saturante** : on se trouve sur la courbe de rosée, soit $v_M = v_V$. Comme il n'y a que de la vapeur, alors $x_L = 0$ et $x_V = 1$. Vérifions cela

$$x_L =$$

$$x_V =$$

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

On vérifie de nouveau, en étudiant le **cas où la vapeur est saturante** : on se trouve sur la courbe de rosée, soit $v_M = v_V$. Comme il n'y a que de la vapeur, alors $x_L = 0$ et $x_V = 1$. Vérifions cela

$$x_L = \frac{v_V - v_M}{v_V - v_L} = \frac{v_V - v_V}{v_V - v_L} = 0$$

$$x_V =$$

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

On vérifie de nouveau, en étudiant le **cas où la vapeur est saturante** : on se trouve sur la courbe de rosée, soit $v_M = v_V$. Comme il n'y a que de la vapeur, alors $x_L = 0$ et $x_V = 1$. Vérifions cela

$$x_L = \frac{v_V - v_M}{v_V - v_L} = \frac{v_V - v_V}{v_V - v_L} = 0$$

$$x_V = \frac{v_M - v_L}{v_V - v_L} = \frac{v_V - v_L}{v_V - v_L} = 1.$$

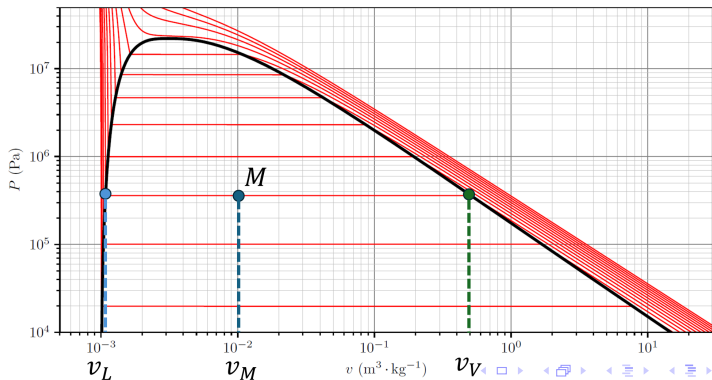
Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

Dans le cas choisi sur le diagramme

$$x_V =$$

$$x_L =$$



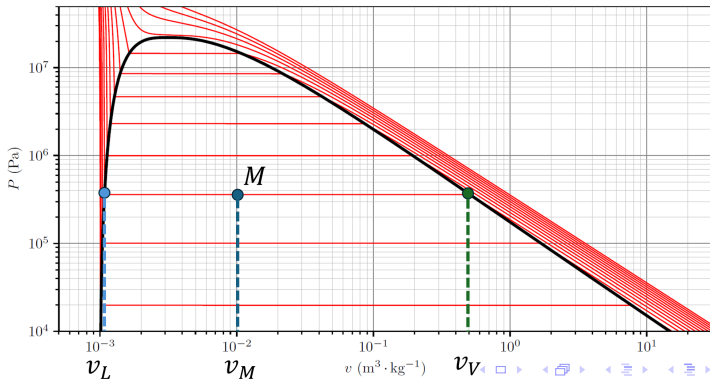
Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

Dans le cas choisi sur le diagramme

$$x_V = \frac{v_V - v_M}{v_V - v_L} = \frac{5 \times 10^{-1} - 10^{-2}}{5 \times 10^{-1} - 10^{-3}} = 0,98$$

$$x_L =$$



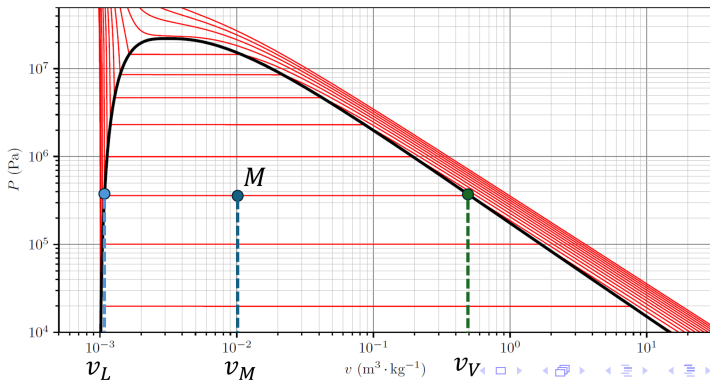
Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Titre d'un système diphasé

Dans le cas choisi sur le diagramme

$$x_V = \frac{v_V - v_M}{v_V - v_L} = \frac{5 \times 10^{-1} - 10^{-2}}{5 \times 10^{-1} - 10^{-3}} = 0,98$$

$$x_L = \frac{v_M - v_L}{v_V - v_L} = \frac{10^{-2} - 10^{-3}}{5 \times 10^{-1} - 10^{-3}} = 0,02.$$



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

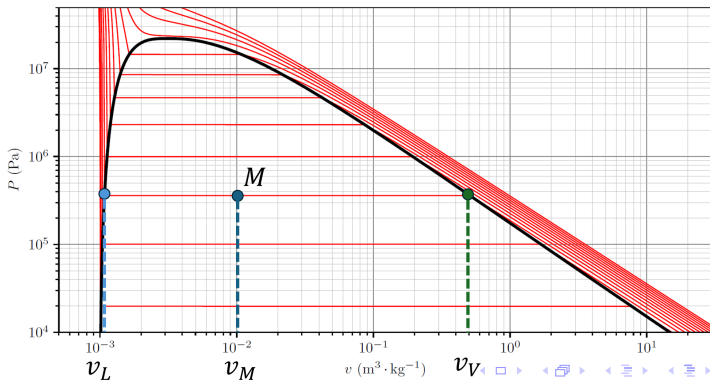
Titre d'un système diphasé

Dans le cas choisi sur le diagramme

$$x_V = \frac{v_V - v_M}{v_V - v_L} = \frac{5 \times 10^{-1} - 10^{-2}}{5 \times 10^{-1} - 10^{-3}} = 0,98$$

$$x_L = \frac{v_M - v_L}{v_V - v_L} = \frac{10^{-2} - 10^{-3}}{5 \times 10^{-1} - 10^{-3}} = 0,02.$$

On retrouve bien $x_V + x_L = 1$.



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Courbes iso

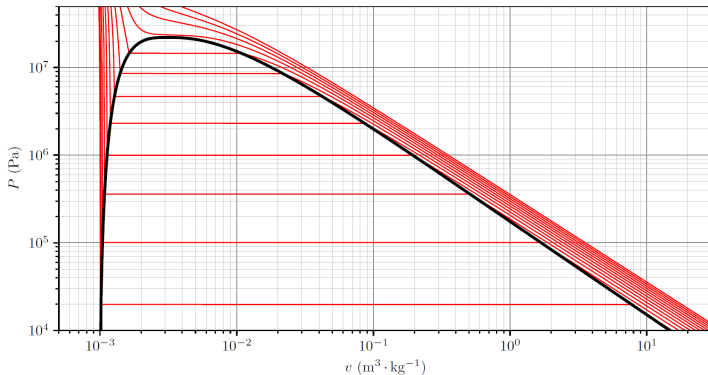
Une fonction d'état Y est constante le long d'une courbe iso- Y d'un diagramme thermodynamique. ❤

Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Courbes iso

Une fonction d'état Y est constante le long d'une courbe iso- Y d'un diagramme thermodynamique. ❤

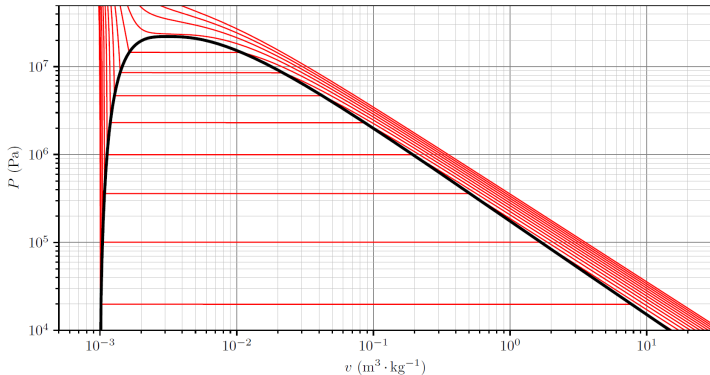
Combien de courbes iso- pouvez-vous observer sur le diagramme de Clapeyron ci-dessous ?



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Courbes iso

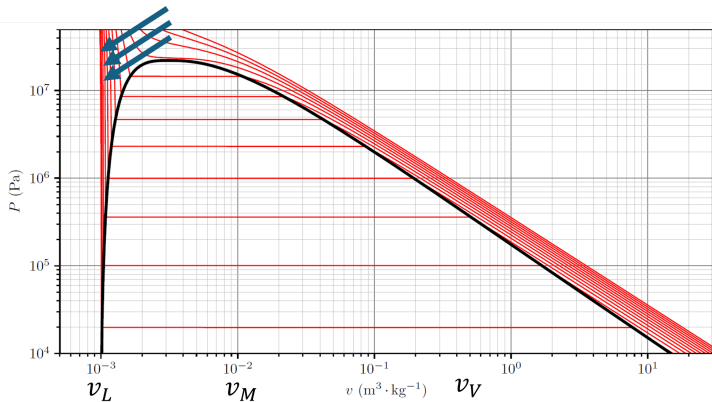
Courbes isothermes : données à partir de mesures en rouge sur le diagramme. On peut interpréter leur allure en utilisant le modèle de la phase condensée indilatable et incompressible (PC2I) pour le domaine liquide, et le gaz parfait (GP) pour le domaine vapeur.



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Courbes iso

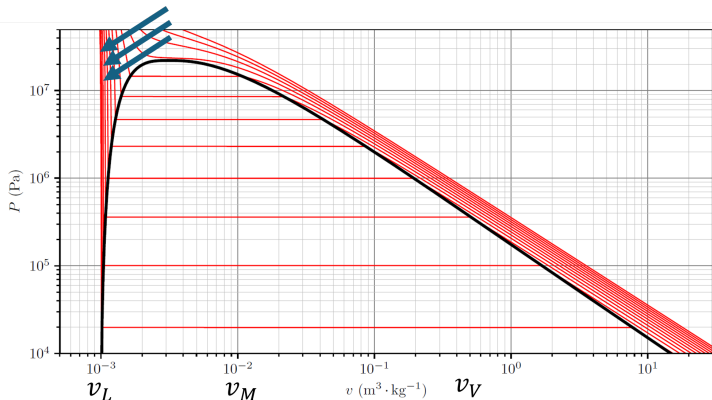
Isothermes dans L : droites verticales donc correspond aussi à des



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Courbes iso

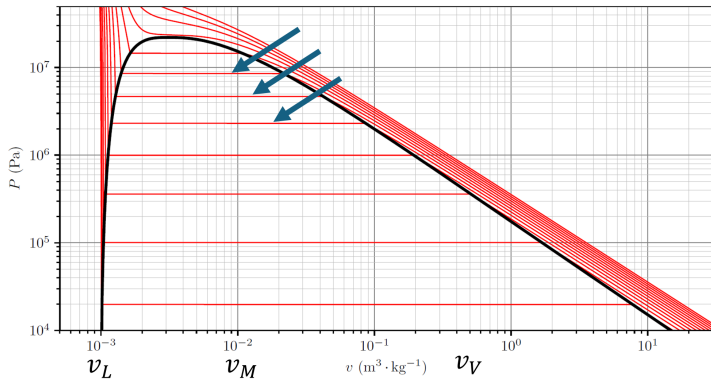
Isothermes dans L : droites verticales donc correspond aussi à des **isochores**, car pour PC2I : $V = \text{cst}$ donc $v = \text{cst}$.



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Courbes iso

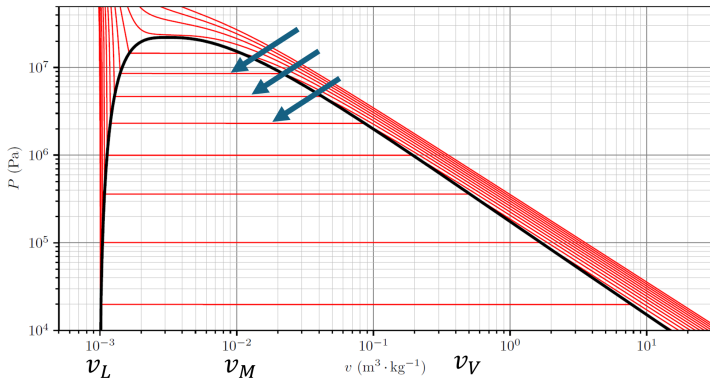
Isothermes dans $L + V$: droites horizontales donc correspond aussi à des



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Courbes iso

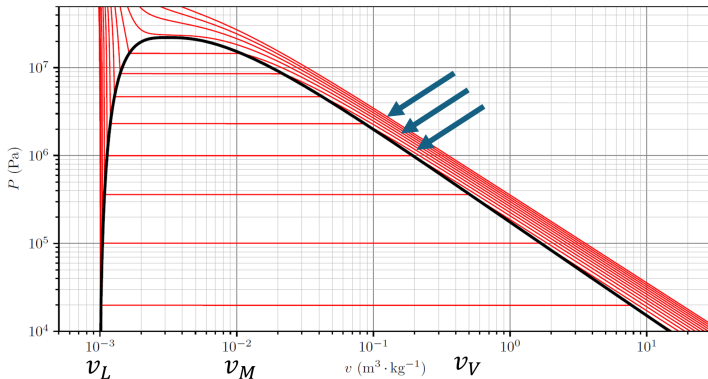
Isothermes dans $L + V$: droites horizontales donc correspond aussi à des **isobares**. Car pour un changement d'état : $P = \text{cst}$.



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Courbes iso

Isothermes dans V : droites affines décroissantes. Car pour un GP :



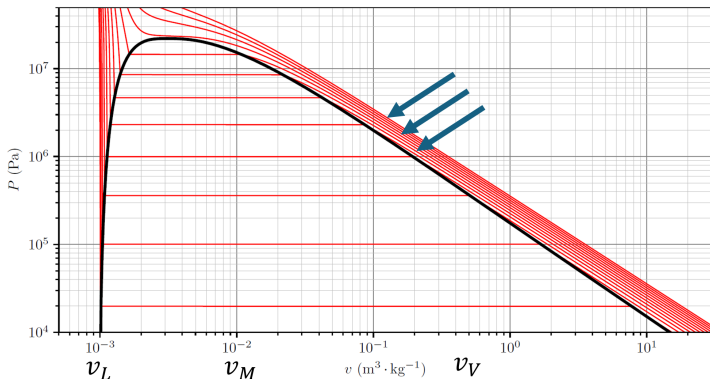
Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Courbes iso

Isothermes dans V : droites affines décroissantes. Car pour un GP :

$$PV = nRT \quad ; \quad P = nRT \frac{1}{V} \quad ; \quad \log P = \text{cst} - \log V$$

La fonction $P(V)$ en représentation logarithmique correspond bien à une fonction affine de pente -1 .



Diagrammes de Clapeyron (P, v)

Courbes iso

N.B. Dans n'importe quel diagramme **les isothermes et les isobares sont confondues** au niveau du domaine diphasé car un changement d'état d'un corps pur se fait toujours à P et T constants.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Diagrammes de Clapeyron (P, v)
 - Allure du diagramme
 - Titre d'un système diphasé
 - Courbes iso
- 3 Enthalpie et entropie de changement d'état
 - Enthalpie de changement d'état
 - Entropie de changement d'état
- 4 Diagrammes des frigoristes (P, h)
 - Allure du diagramme
 - Exploitation d'un diagramme réel
- 5 Diagrammes entropiques (T, s)
 - Allure du diagramme
 - Courbes iso

Enthalpie et entropie de changement d'état

Enthalpie de changement d'état

On se contente d'étudier ici la **vaporisation** : le changement d'état de liquide vers vapeur.

L'**enthalpie (massique) de vaporisation**, notée $\Delta_{\text{vap}}h(P)$, est la différence entre les enthalpies massiques de la vapeur saturante et du liquide saturant, ces valeurs étant prises à la même pression P et à la température de saturation $T_{\text{sat}}(P)$ ❤️

$$\Delta_{\text{vap}}h(P) = h_V(P, T_{\text{sat}}(P)) - h_L(P, T_{\text{sat}}(P)). \quad \text{❤️}$$

On utilise aussi l'expression de **chaleur latente** de vaporisation

$$\ell_{\text{vap}} = \Delta_{\text{vap}}h(P).$$

Enthalpie et entropie de changement d'état

Enthalpie de changement d'état

À partir de la définition précédente, on peut ainsi définir l'**enthalpie de liquéfaction** $\Delta_{\text{liq}}h(P)$

$$\Delta_{\text{liq}}h(P) = h_L(P, T_{\text{sat}}(P)) - h_V(P, T_{\text{sat}}(P)) = -\Delta_{\text{vap}}h(P).$$

Les enthalpies de deux changements d'état réciproques sont opposées. 

Enthalpie et entropie de changement d'état

Enthalpie de changement d'état

Les enthalpies de changement d'état seront toujours **données** via les diagrammes thermodynamiques que nous voyons dans cette leçon.

Si l'enthalpie de vaporisation des fluides en thermodynamique industrielle est de l'ordre de quelques centaines de $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, l'eau est un cas particulier qui présente des enthalpies de changement d'état plus élevées

$$\Delta_{\text{vap}} h_{\text{eau}}(1 \text{ bar}) = 2,3 \times 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}. \quad \text{♥}$$

Enthalpie et entropie de changement d'état

Enthalpie de changement d'état

Considérons un système formé d'une masse m de corps pur qui subit une vaporisation sous **pression constante** (et donc à température constante...). La variation d'enthalpie du système lors de cette transformation s'écrit donc

$$\Delta H =$$

Enthalpie et entropie de changement d'état

Enthalpie de changement d'état

Considérons un système formé d'une masse m de corps pur qui subit une vaporisation sous **pression constante** (et donc à température constante...). La variation d'enthalpie du système lors de cette transformation s'écrit donc

$$\Delta H = H_V - H_L = mh_V - mh_L = m\Delta_{\text{vap}}h(P).$$



Enthalpie et entropie de changement d'état

Entropie de changement d'état

L'**entropie de vaporisation**, notée $\Delta_{\text{vap}}s$, est reliée à l'enthalpie de vaporisation et à la température de saturation par

$$\Delta_{\text{vap}}s = \frac{\Delta_{\text{vap}}h}{T_{\text{sat}}} \quad \text{♥}$$

avec T_{sat} la température de saturation à laquelle se fait le changement d'état.

Au cours d'un changement d'état isotherme d'une masse m , par exemple une vaporisation, la variation d'entropie que subit le système est

$$\Delta S = m\Delta_{\text{vap}}s. \quad \text{♥}$$

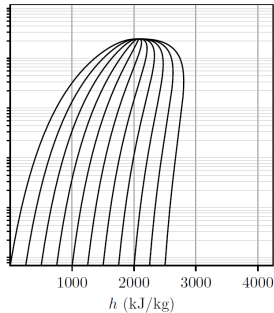
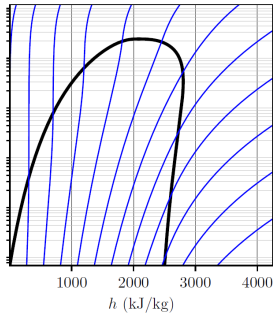
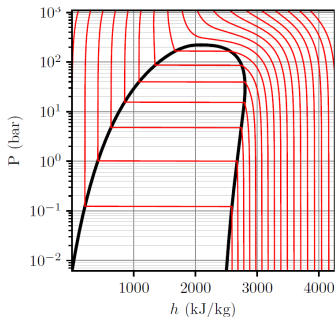
Plan

- 1 Introduction
- 2 Diagrammes de Clapeyron (P, v)
 - Allure du diagramme
 - Titre d'un système diphasé
 - Courbes iso
- 3 Enthalpie et entropie de changement d'état
 - Enthalpie de changement d'état
 - Entropie de changement d'état
- 4 Diagrammes des frigorigènes (P, h)
 - Allure du diagramme
 - Exploitation d'un diagramme réel
- 5 Diagrammes entropiques (T, s)
 - Allure du diagramme
 - Courbes iso

Diagrammes des frigoristes (P, h)

Allure du diagramme

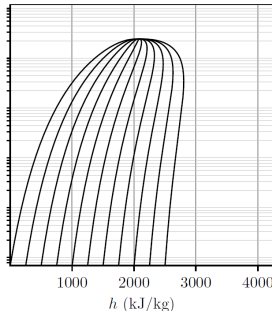
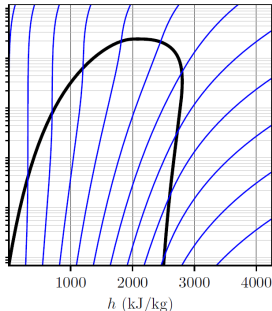
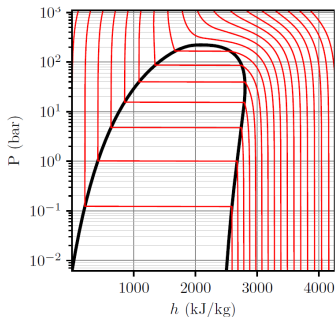
Le **diagramme des frigoristes** ($\log P, h$) représente la pression, en échelle logarithmique, en fonction de l'enthalpie massique, en échelle linéaire. ❤️



Diagrammes des frigoristes (P, h)

Allure du diagramme

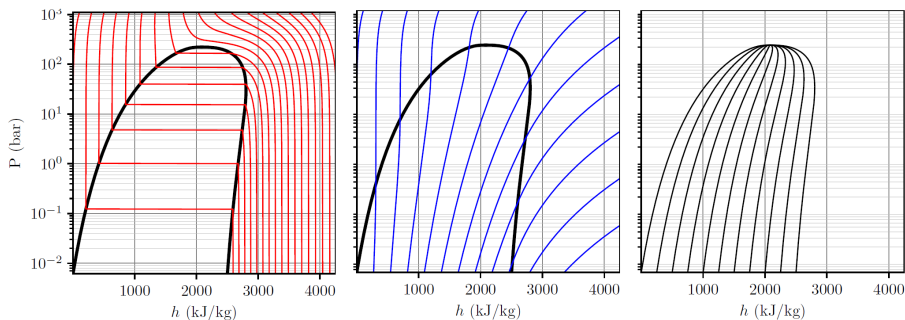
Sur ce diagramme se superposent différentes **courbes iso-** **données** à **partir de mesures** ainsi que **la courbe de saturation** en trait noir épais. Les **domaines liquide et vapeur** sont respectivement à gauche et à droite ($h_V > h_L$). On détaille les courbes iso- sur les schémas ci-dessous.



Diagrammes des frigoristes (P, h)

Allure du diagramme

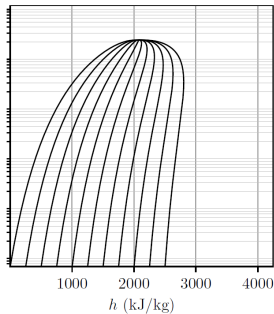
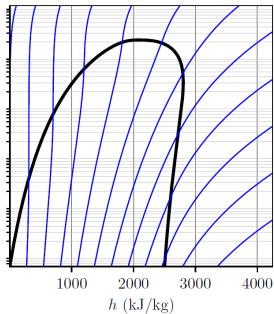
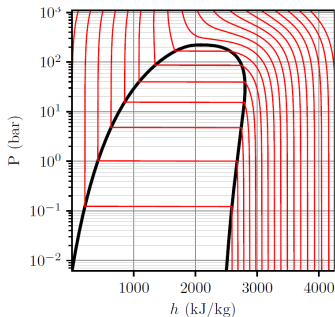
Les **isothermes** sont données en rouge. Expliquons leur allure dans les différents domaines à partir des modèles des PC2I et du GP.



Diagrammes des frigoristes (P, h)

Allure du diagramme

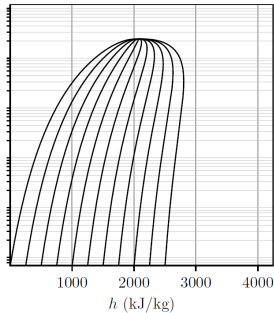
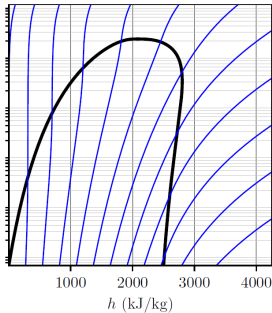
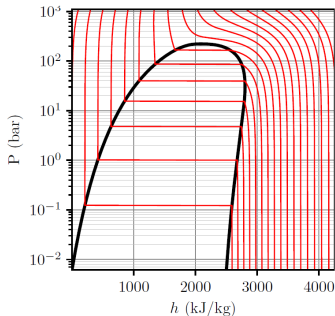
Isothermes dans L : droites verticales donc isenthalpiques car



Diagrammes des frigoristes (P, h)

Allure du diagramme

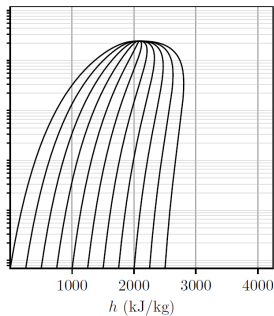
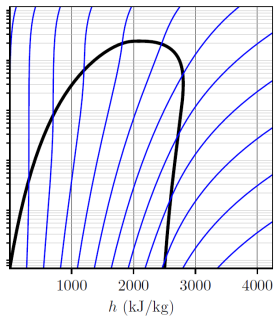
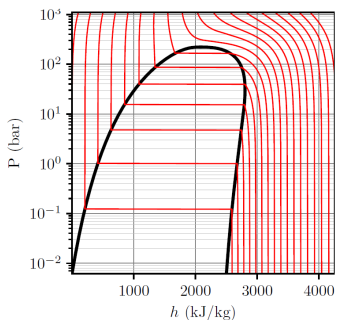
Isothermes dans L : droites verticales donc **isenthalpiques** car pour une PC2I $dh = c dT$ avec c la capacité thermique massique. Si $T = \text{cst}$ alors h également (PC2I : $c_V \simeq c_P \equiv c$).



Diagrammes des frigoris (P, h)

Allure du diagramme

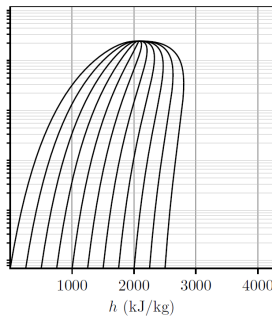
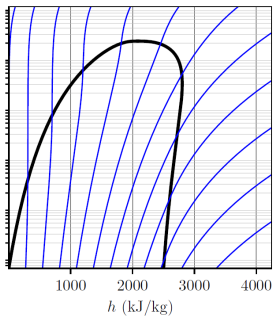
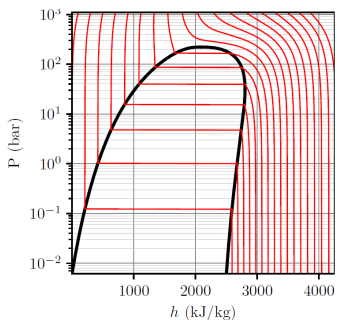
Isothermes dans $L + V$: droites horizontales donc **isobares car**



Diagrammes des frigoris (P, h)

Allure du diagramme

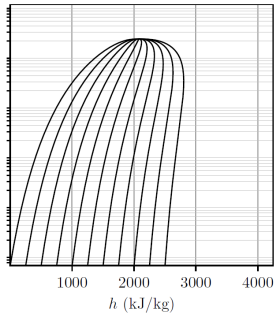
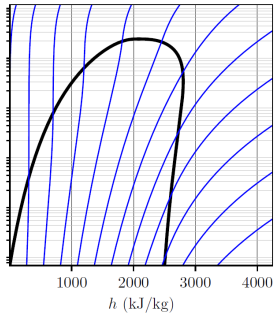
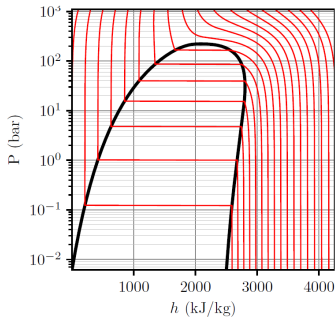
Isothermes dans $L + V$: droites horizontales donc **isobares** car lors d'un changement d'état $P = \text{cst}$.



Diagrammes des frigorigères (P, h)

Allure du diagramme

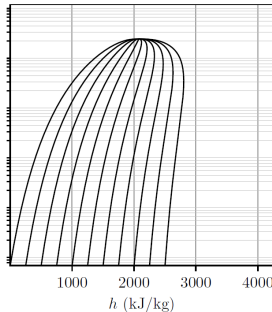
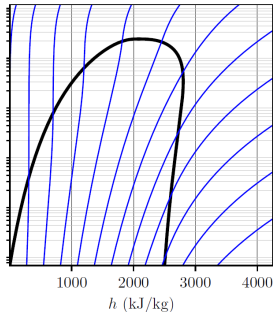
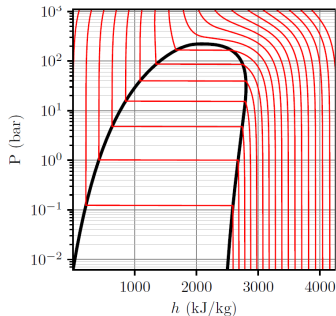
Isothermes dans V : droites verticales donc isenthalpiques car



Diagrammes des frigoristes (P, h)

Allure du diagramme

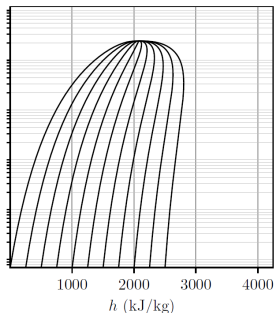
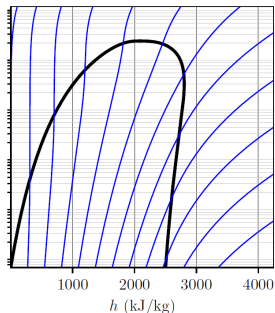
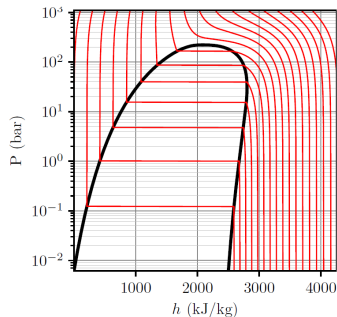
Isothermes dans V : droites verticales donc **isenthalpiques** car pour un GP $dh = c_P dT$ (deuxième loi de Joule) avec c_P la capacité thermique à pression constante massique. Si $T = \text{cst}$ alors h également.



Diagrammes des frigoristes (P, h)

Allure du diagramme

Les **isentropiques** sont données en bleu. Expliquons leur allure à partir de l'**identité thermodynamique**.



Diagrammes des frigoris (P, h)

Allure du diagramme

Les **isentropiques** sont données en bleu. Expliquons leur allure à partir de l'**identité thermodynamique**.

Identité thermodynamique : $du = Tds - Pdv$. D'après la définition de l'enthalpie $u = h - Pv$, soit

$$d(h - Pv) = Tds - Pdv \quad ; \quad dh - Pdv - v dP = Tds - Pdv \\ dh = Tds + v dP.$$

Pour une transformation isentropique $ds = 0$, donc

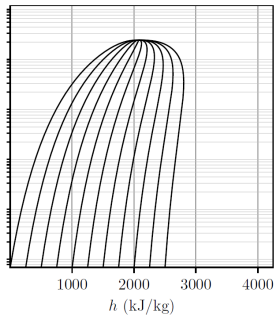
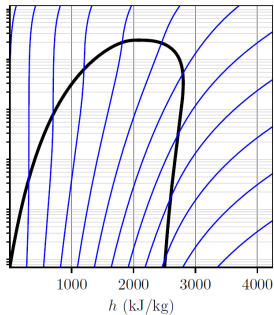
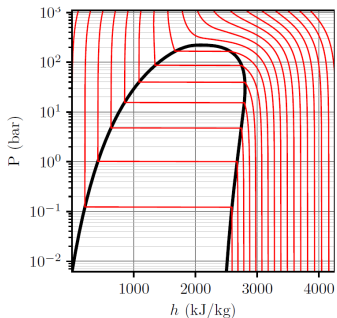
$$dh = v dP \quad ; \quad \frac{dP}{dh} = \frac{1}{v} = \rho.$$

Pour des **transformations isentropiques** les fonctions $P(h)$ sont donc des courbes croissantes dont les “pentes” correspondent à la masse volumique du système.

Diagrammes des frigoristes (P, h)

Allure du diagramme

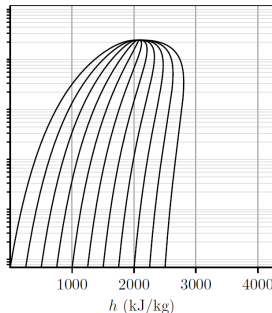
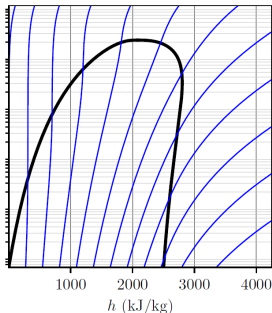
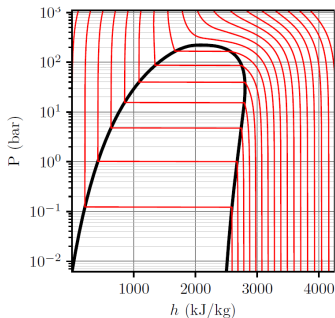
Les **isentropiques** dans le domaine liquide sont plus pentues que les isentropiques dans le domaine vapeur car $\rho_L > \rho_V$.



Diagrammes des frigorigères (P, h)

Allure du diagramme

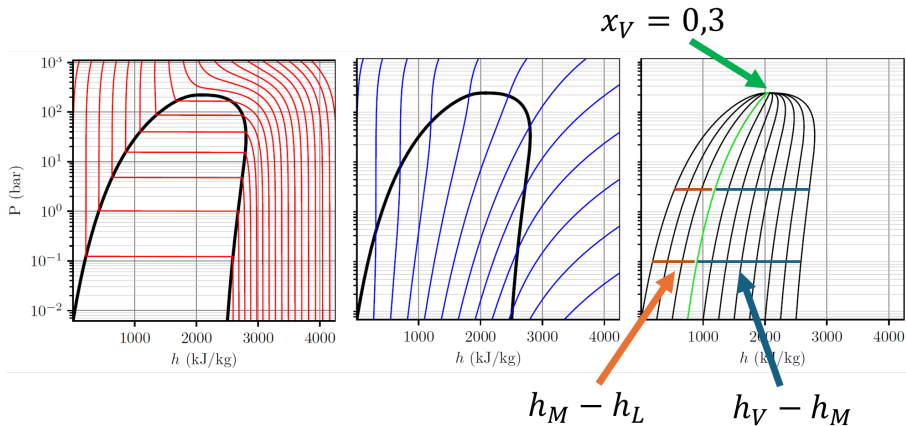
Les **isotitres** en vapeur sont données en noir fin (celle tout à gauche correspond à $x_V = 0$ et celle tout à droite à $x_V = 1$). Expliquons leur allure à l'aide du théorème des moments pour le titre en vapeur x_V d'un point M le long d'une isotitre.



Diagrammes des frigorigères (P, h)

Allure du diagramme

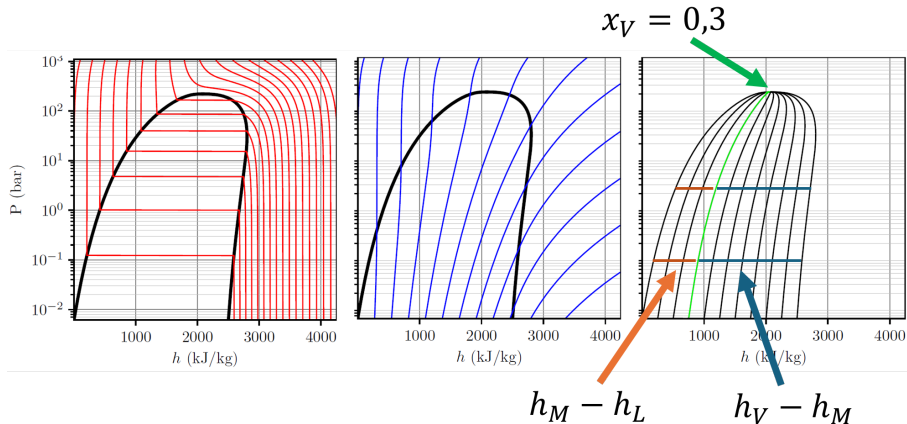
D'après le théorème des moments $x_V =$.



Diagrammes des frigoristes (P, h)

Allure du diagramme

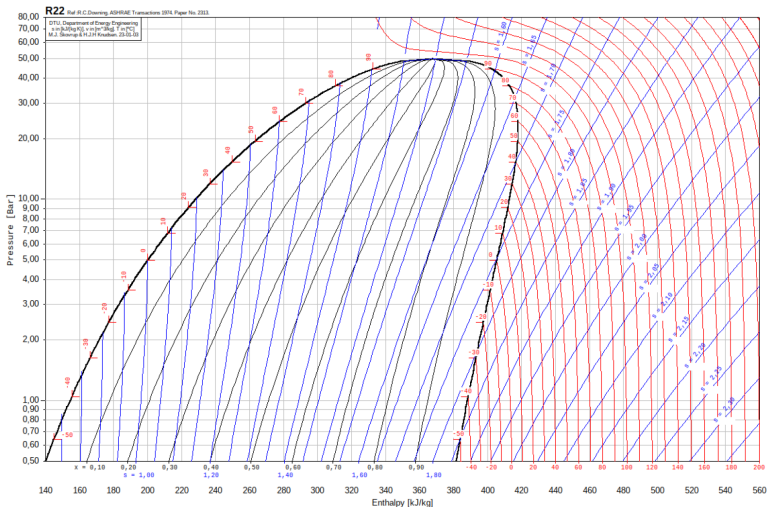
D'après le théorème des moments $x_V = \frac{h_M - h_L}{h_V - h_L}$. Cela correspond au rapport des segments sur le palier de changement d'état.



Diagrammes des frigoristes (P, h)

Exploitation d'un diagramme réel

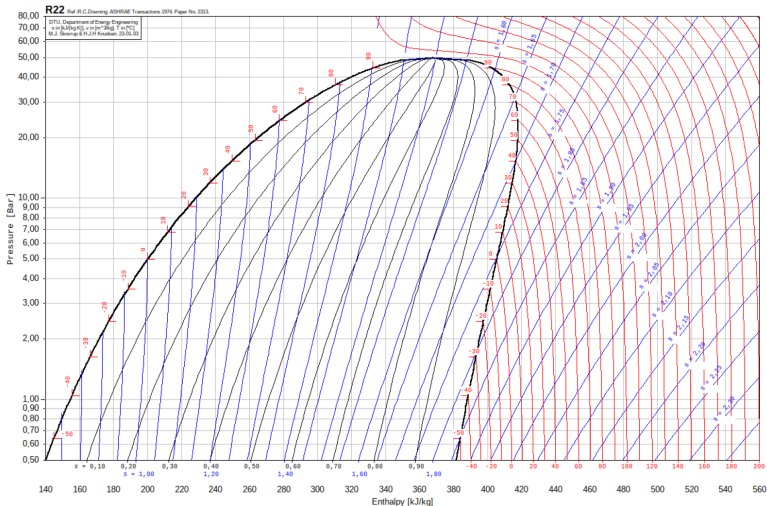
Diagramme des frigoristes du chlorodifluorométhane CHClF_2 ou R22 utilisé dans les applications de climatisation.



Diagrammes des frigoristes (P, h)

Exploitation d'un diagramme réel

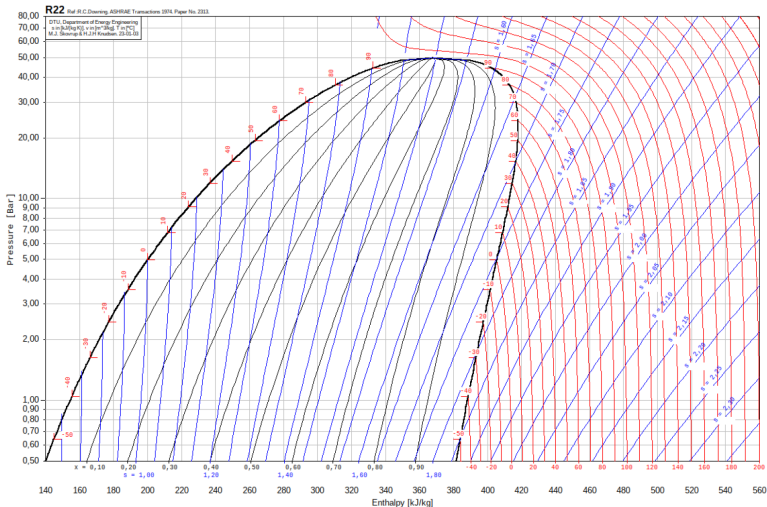
Attention, les isothermes et les isentropiques ne sont pas forcément tracées dans le domaine liquide : on sait qu'elles sont quasiment verticales (isenthalpiques) selon modèle de la PC21.



Diagrammes des frigorigères (P, h)

Exploitation d'un diagramme réel

1. Déterminer l'enthalpie de vaporisation sous 20 bar.

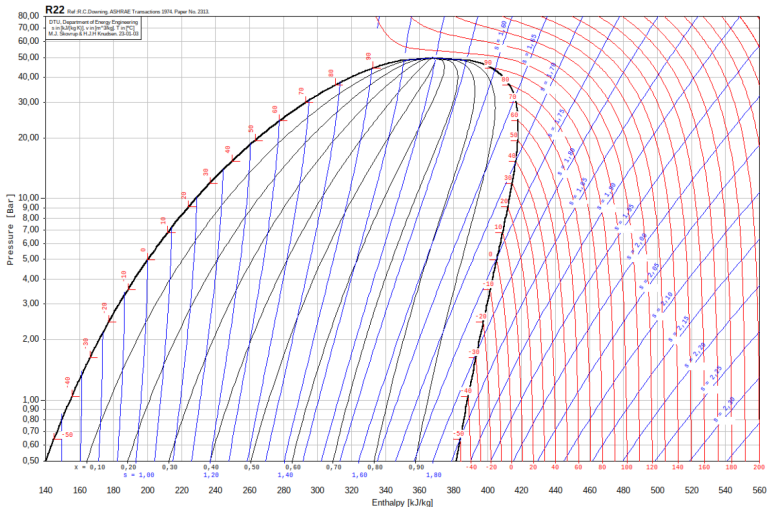


Diagrammes des frigorigères (P, h)

Exploitation d'un diagramme réel

1. Déterminer l'enthalpie de vaporisation sous 20 bar.

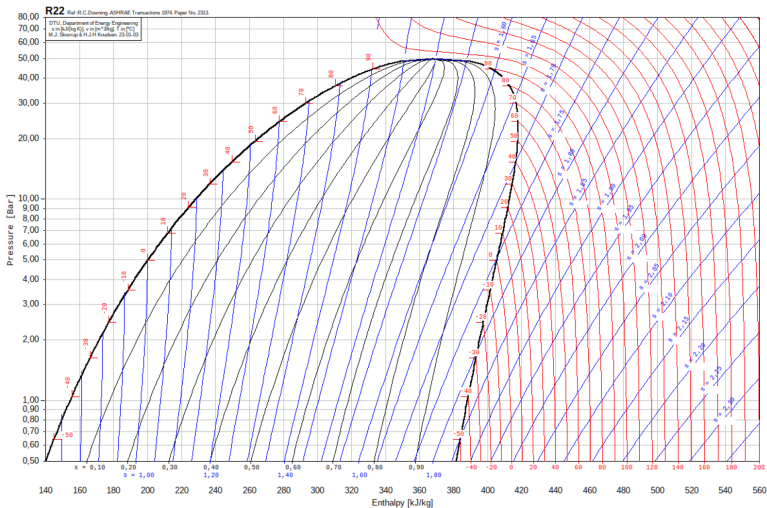
$$\Delta_{vap}h = h_V - h_L \simeq 420 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} - 260 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 160 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}.$$



Diagrammes des frigorigères (P, h)

Exploitation d'un diagramme réel

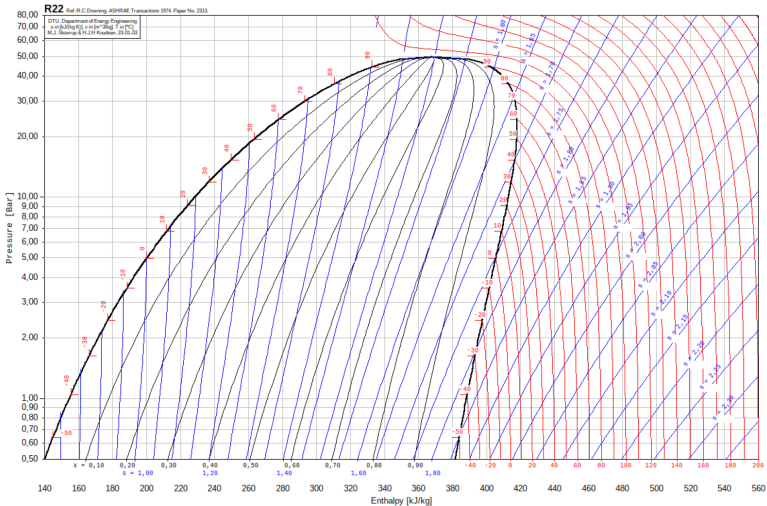
2. La pression de vapeur saturante à 20 °C.



Diagrammes des frigoristes (P, h)

Exploitation d'un diagramme réel

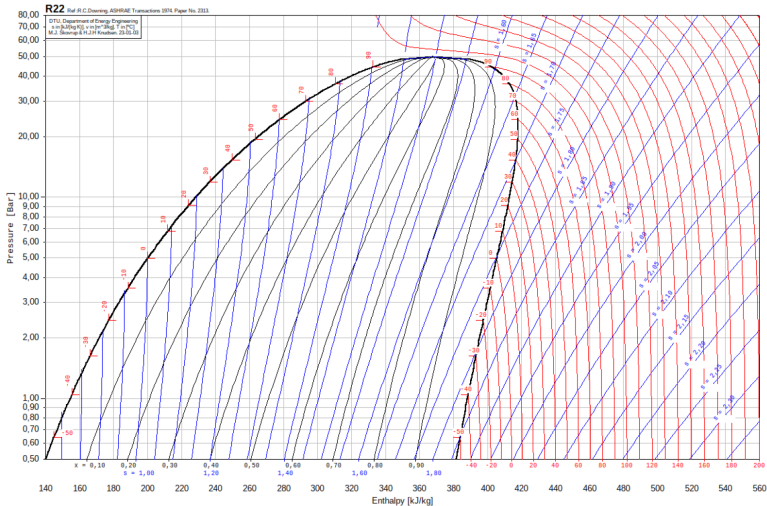
2. La pression de vapeur saturante à 20 °C. $P = 9 \text{ bar}$.



Diagrammes des frigoristes (P, h)

Exploitation d'un diagramme réel

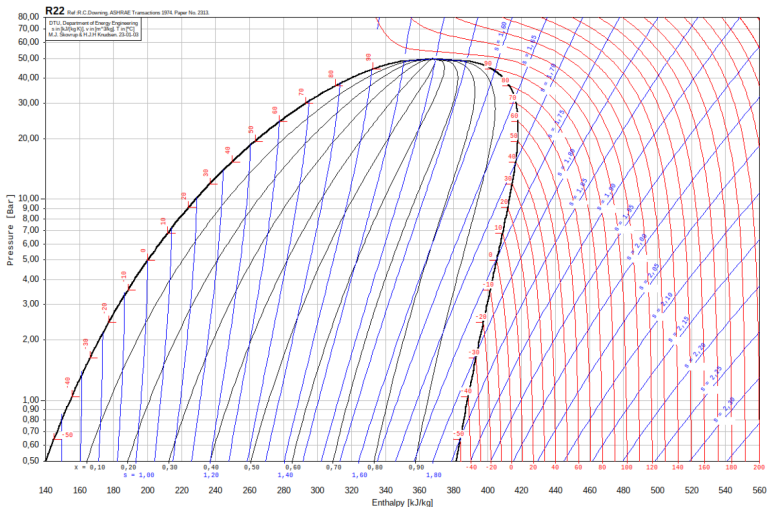
3. L'entropie de vaporisation à 0°C.



Diagrammes des frigoristes (P, h)

Exploitation d'un diagramme réel

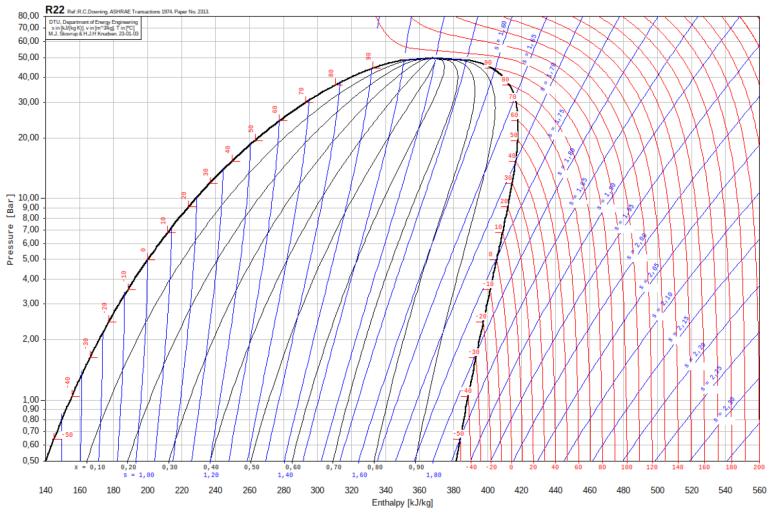
3. L'entropie de vaporisation à 0°C . $\Delta s_{\text{vap}} = s_V - s_L = 1,75 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} - 1 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} = 0,75 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.



Diagrammes des frigoristes (P, h)

Exploitation d'un diagramme réel

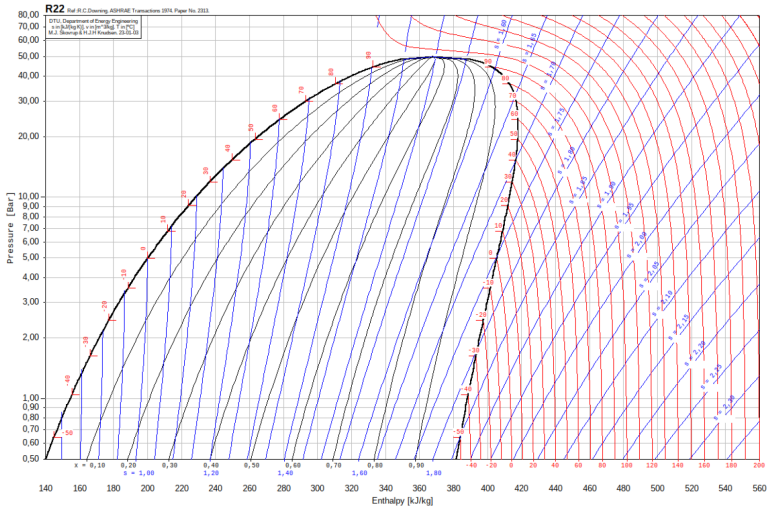
3. L'entropie de vaporisation à 0 °C.



Diagrammes des frigorigères (P, h)

Exploitation d'un diagramme réel

4. L'état physique et l'enthalpie massique du fluide sous 3 bar et à 50 °C.

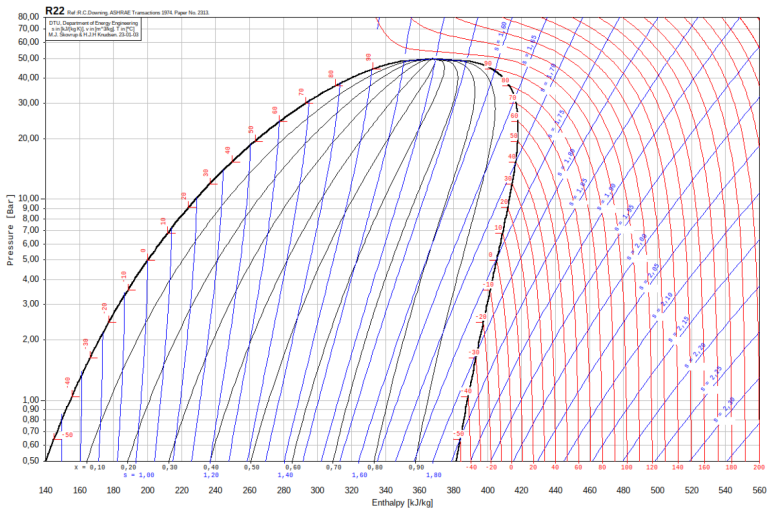


Diagrammes des frigoristes (P, h)

Exploitation d'un diagramme réel

4. L'état physique et l'enthalpie massique du fluide sous 3 bar et à 50 °C.

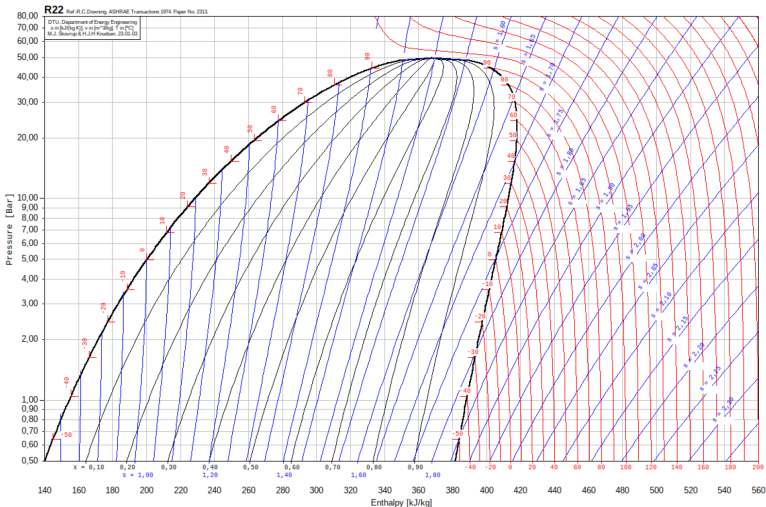
Dans le domaine vapeur avec $h \simeq 445 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.



Diagrammes des frigoris (P, h)

Exploitation d'un diagramme réel

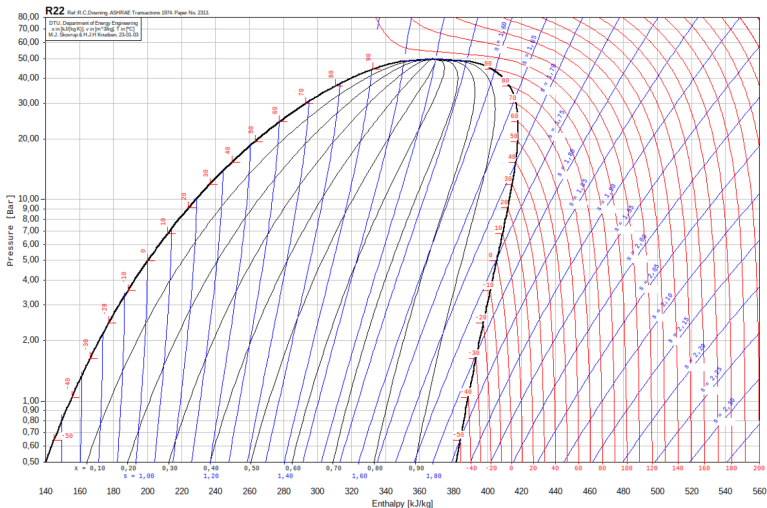
5. Le domaine de pression et de température pour lequel le R22 se comporte comme un GP.



Diagrammes des frigoristes (P, h)

Exploitation d'un diagramme réel

5. Le domaine de pression et de température pour lequel le R22 se comporte comme un GP. Pour un GP les isothermes sont verticales donc en bas à droite.



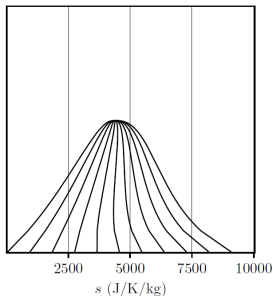
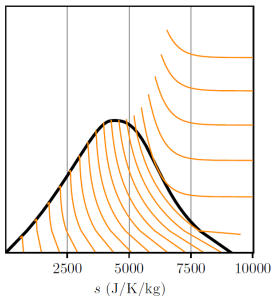
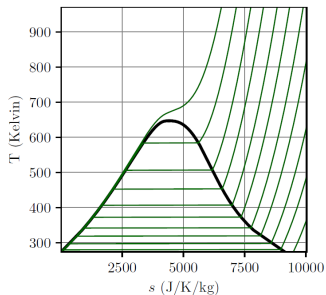
Plan

- 1 Introduction
- 2 Diagrammes de Clapeyron (P, v)
 - Allure du diagramme
 - Titre d'un système diphasé
 - Courbes iso
- 3 Enthalpie et entropie de changement d'état
 - Enthalpie de changement d'état
 - Entropie de changement d'état
- 4 Diagrammes des frigoristes (P, h)
 - Allure du diagramme
 - Exploitation d'un diagramme réel
- 5 Diagrammes entropiques (T, s)
 - Allure du diagramme
 - Courbes iso

Diagrammes entropiques (T, s)

Allure du diagramme

Le **diagramme entropique** (T, s) représente la température en fonction de l'entropie massique s . ❤️

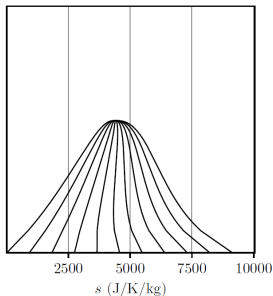
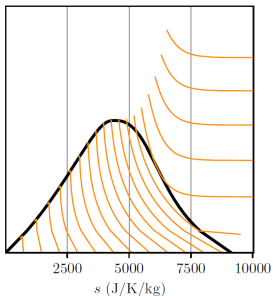
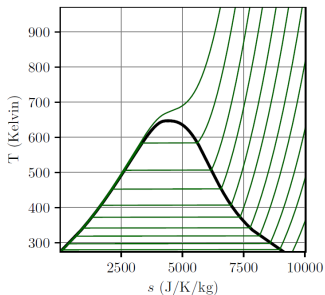


Diagrammes entropiques (T, s)

Allure du diagramme

Le **diagramme entropique** (T, s) représente la température en fonction de l'entropie massique s . ❤️

Sur ce diagramme se superposent différentes **courbes iso-** **données à partir de mesures** ainsi que **la courbe de saturation** en trait noir épais. Les **domaines liquide et vapeur** sont respectivement à gauche et à droite ($s_V > s_L$). On détaille plus loin les courbes iso- sur les schémas ci-dessous.

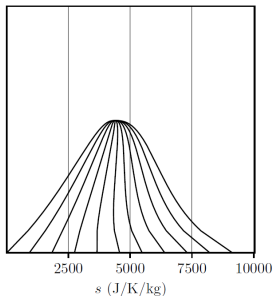
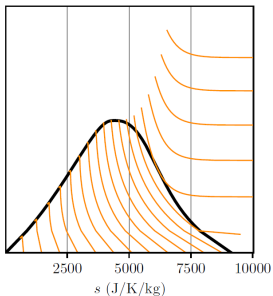
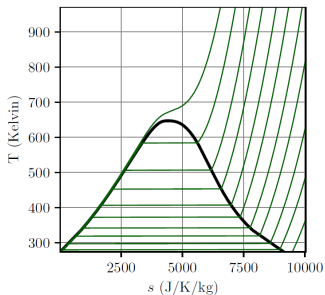


Diagrammes entropiques (T, s)

Allure du diagramme

Le **diagramme entropique** (T, s) représente la température en fonction de l'entropie massique s . ❤️

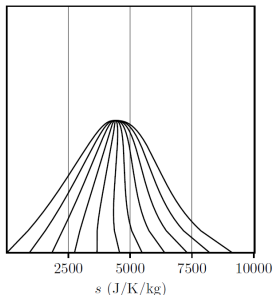
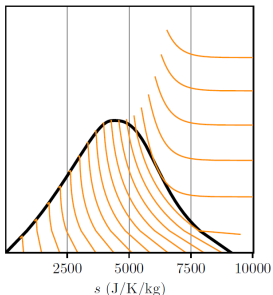
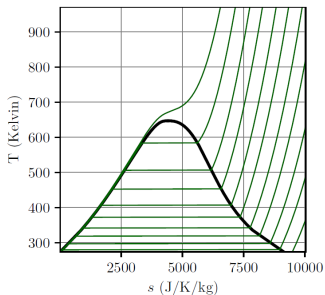
Il existe une zone vide en haut à gauche du diagramme : **certaines valeurs de température et d'entropie massique sont incompatibles**, au sens où le fluide ne peut avoir ces deux valeurs simultanément (ou bien ces valeurs sont strictement incompatibles, ou bien le système est solide).



Diagrammes entropiques (T, s)

Courbes iso

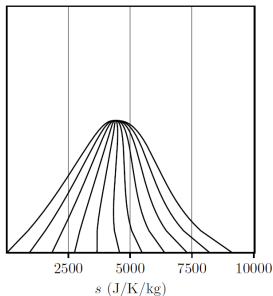
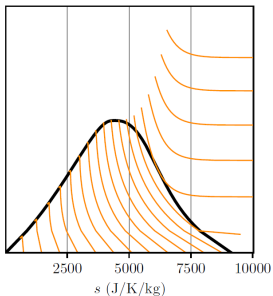
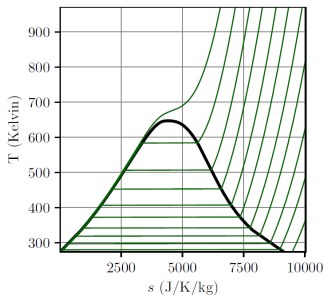
Les **isobares** sont données en vert. Expliquons leur allure dans les différents domaines à partir des modèles des PC2I et du GP.



Diagrammes entropiques (T, s)

Courbes iso

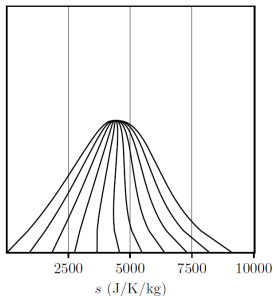
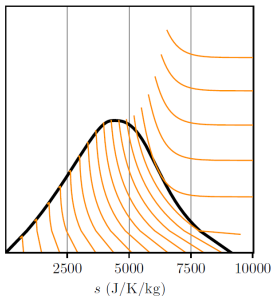
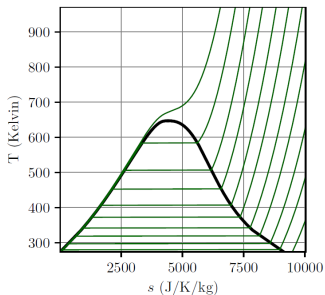
Isobares dans L : courbes resserrées au voisinage de la courbe d'ébullition car P n'influence pas PC2I.



Diagrammes entropiques (T, s)

Courbes iso

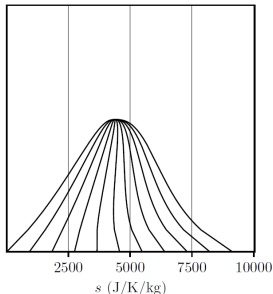
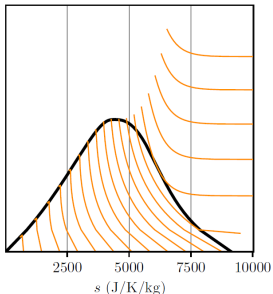
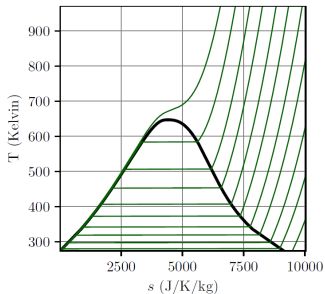
Isobares dans $L + V$: droites horizontales donc **isothermes car**



Diagrammes entropiques (T, s)

Courbes iso

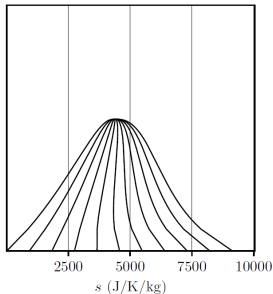
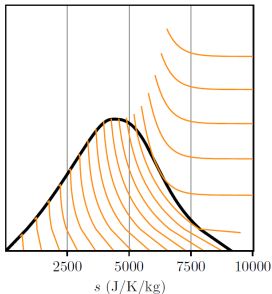
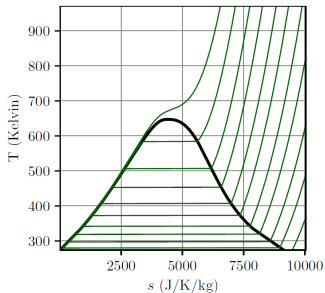
Isobares dans $L + V$: droites horizontales donc **isothermes** car lors d'un changement d'état $T = \text{cst.}$



Diagrammes entropiques (T, s)

Courbes iso

Isobares dans V : Expliquons leur allure à partir de l'**identité thermodynamique précédente** et des propriétés du GP.



Diagrammes entropiques (T, s)

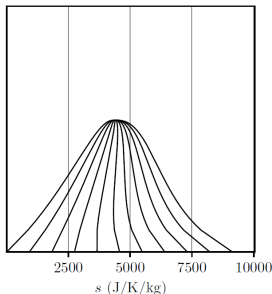
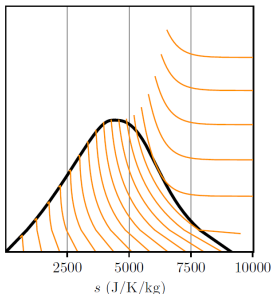
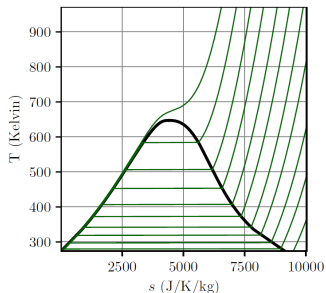
Courbes iso

Isobares dans V : Expliquons leur allure à partir de l'**identité thermodynamique précédente** et des propriétés du GP.

Identité thermodynamique : $dh = Tds + vdP$, soit pour isobares :
 $dh = Tds$. Or pour un GP $dh = c_P dT$ donc

$$c_P dT = T ds \quad ; \quad \frac{dT}{T} = \frac{1}{c_P} ds \quad ; \quad T = A e^{\frac{s}{c_P}}.$$

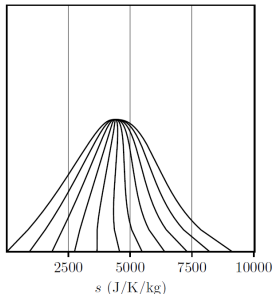
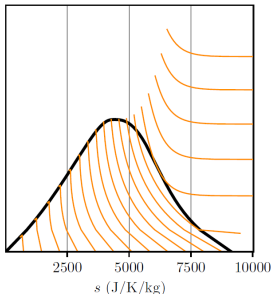
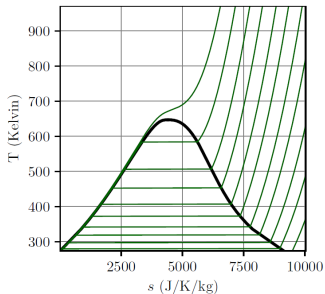
Les **isobares dans le domaine vapeur** correspondent à des exponentielles croissantes.



Diagrammes entropiques (T, s)

Courbes iso

On peut reprendre cette étude pour le domaine liquide pour une PC2I et montrer que $T = Ae^{\frac{s}{c}}$: les isobares au voisinage de la courbe d'ébullition sont aussi des exponentielles.

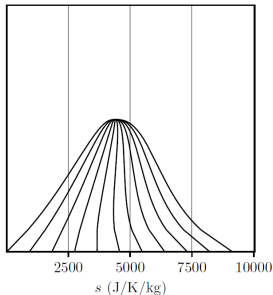
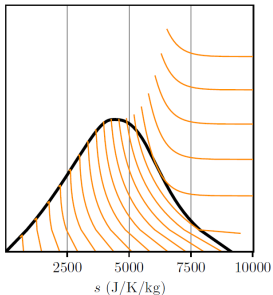
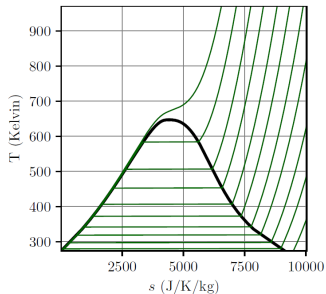


Diagrammes entropiques (T, s)

Courbes iso

Pourquoi n'y-a-t'il pas de courbes en haut à gauche ? Examinons d'abord le cas de transformations isentropiques pour un liquide modélisée par une PC2I. Dans ce cas l'identité thermodynamique donne $du = Tds - Pdv$. Pour une PC2I $dv \simeq 0$ donc $du \simeq Tds$.

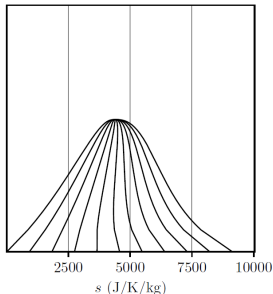
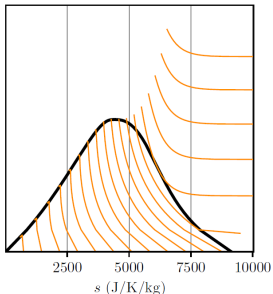
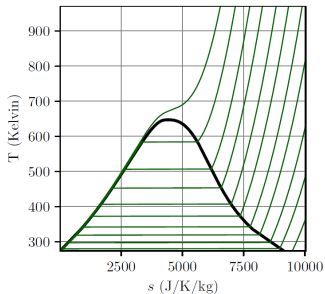
De plus, pour une PC2I $du = dh = cdT$, soit $Tds \simeq cdT$



Diagrammes entropiques (T, s)

Courbes iso

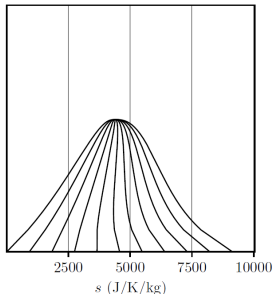
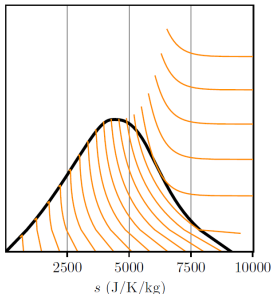
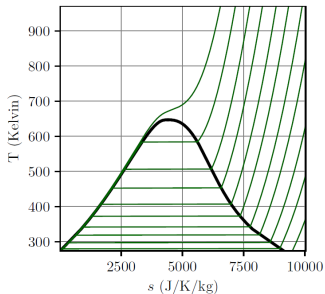
Ainsi **pour une PC2I** si une transformation est **isentropique**
 $ds = 0 = cdT = dh$ alors elle forcément **isotherme** $dT = 0$ et
isenthalpique $dh = 0$.



Diagrammes entropiques (T, s)

Courbes iso

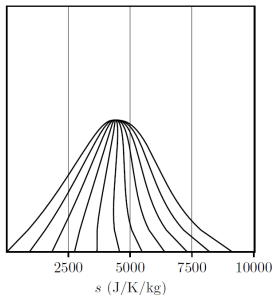
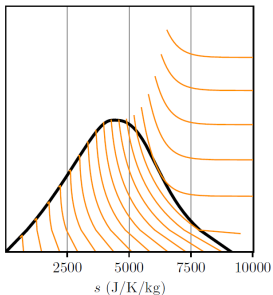
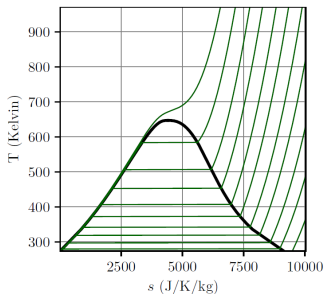
Le liquide doit donc présenter des isothermes et des isentropiques ce qui est impossible à représenter sur le diagramme (T, s), c'est pourquoi le **domaine liquide** se limite à une zone restreinte sur la **courbe d'ébullition**.



Diagrammes entropiques (T, s)

Courbes iso

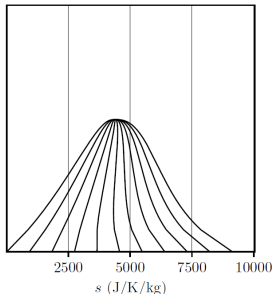
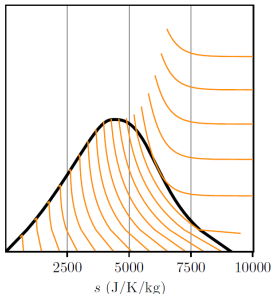
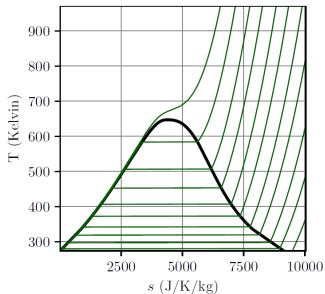
Il en va de même pour les **isenthalpiques** représentés en **jaune**. Dans le **domaine liquide** : elles ne correspondent qu'à des points au niveaux de la courbe d'ébullition.



Diagrammes entropiques (T, s)

Courbes iso

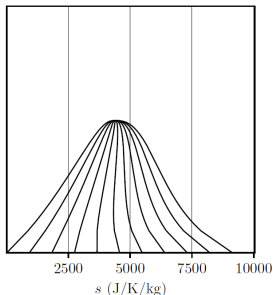
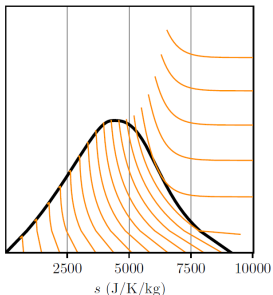
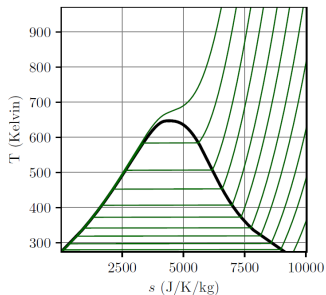
Isenthalpiques dans V : dans la limite du GP $dh = c_p dT$, donc les isenthalpiques correspondent à des **isothermes** soit des droites horizontales sur ce diagramme.



Diagrammes entropiques (T, s)

Courbes iso

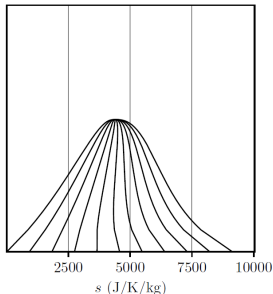
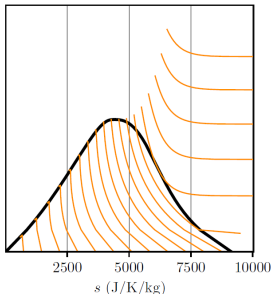
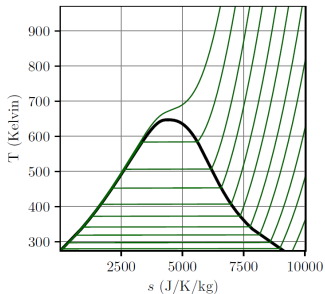
Les **isotitres** sont données en noir. Comme pour le diagramme des frigoristes, d'après le théorème des moments $x_V =$.



Diagrammes entropiques (T, s)

Courbes iso

Les **isotitres** sont données en noir. Comme pour le diagramme des frigoristes, d'après le théorème des moments $x_V =$. Cela correspond au rapport des segments sur le palier de changement d'état.



Diagrammes entropiques (T, s)

Courbes iso

