

Thermodynamique

Chapitre TH1 Systèmes thermodynamiques ouverts en régime stationnaire

La plupart des machines thermiques fonctionnent avec un fluide en écoulement qui effectue les différents échanges d'énergie dans différents organes.

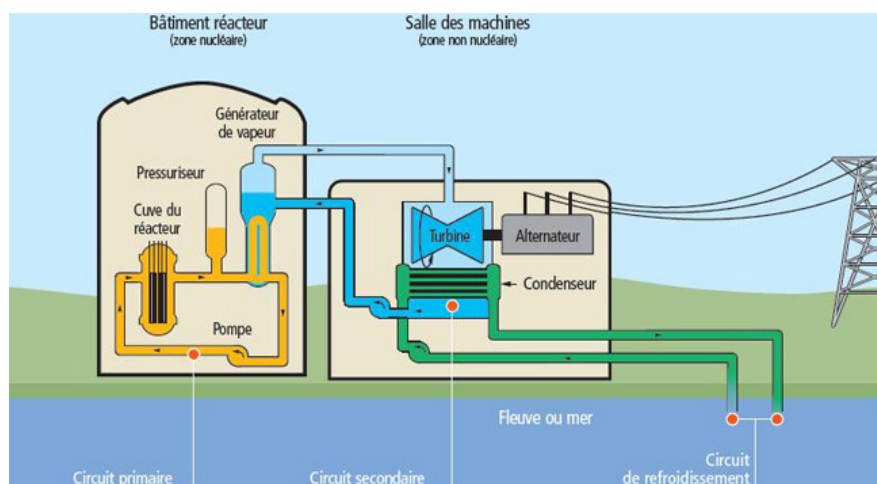


FIGURE 1 – Schéma global d'une centrale nucléaire à eau pressurisée

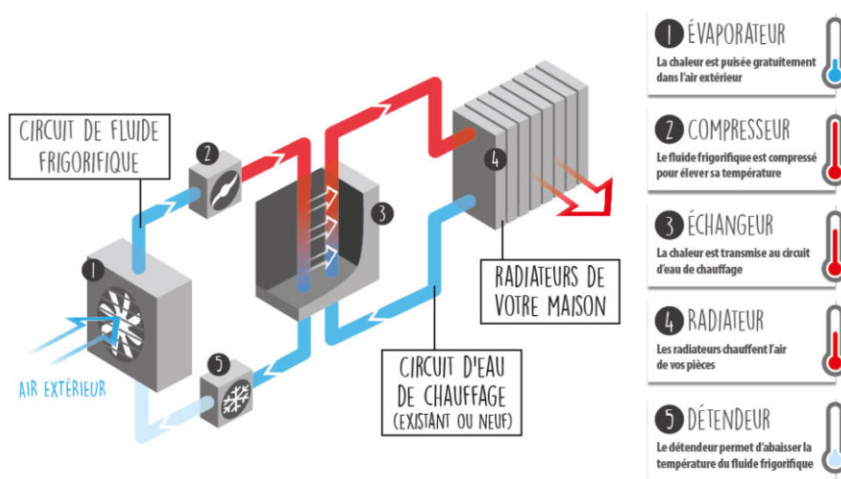


FIGURE 2 – Schéma d'une pompe à chaleur air-eau (<https://greensystemenergies.fr/>)

Introduction

Ce chapitre est la suite du chapitre sur les machines thermiques vu en PCSI. Dans ce chapitre vous avez décrit et étudié le fonctionnement des machines thermiques fonctionnant en système fermé, sans écoulement. Or dans les pompes à chaleur, les réfrigérateurs, les centrales thermiques ... les échanges d'énergie sont effectués par un fluide qui s'écoule dans différents organes.

Ce chapitre a pour objectif d'introduire les notions nécessaires pour l'étude de telles machines thermiques. L'étude de machines réelles nécessitent en général l'emploi de diagrammes thermodynamiques.

Pré-requis

- PCSI : Toute la thermodynamique, spécifiquement les machines thermiques.

Objectifs du chapitre

- Établir et énoncer les deux principes de la thermodynamique appliqués à un fluide en écoulement stationnaire et unidimensionnel, à une entrée et une sortie.
- Décrire les diagrammes thermodynamiques nécessaires à l'étude de machines réelles.

Programme officiel

Notions et contenus	Capacités exigibles
3.1 Systèmes ouverts en régime stationnaire	
Premier et deuxième principes de la thermodynamique pour un système ouvert en régime stationnaire, dans le seul cas d'un écoulement unidimensionnel au niveau de la section d'entrée et de la section de sortie.	Établir les relations $\Delta h + \Delta e = w_u + q$ et $\Delta s = s_e + s_c$ et les utiliser pour étudier des machines thermiques réelles à l'aide de diagrammes thermodynamiques (P, h) et (T, s) .

Plan du cours

I Principes de la thermodynamique pour un écoulement stationnaire

I.1	Position du problème	3
I.2	Définition d'un système fermé	3
I.3	Bilan de masse	4
I.4	Premier principe	4
I.4.a)	1 ^{er} principe pour un système FERMÉ	4
I.4.b)	1 ^{er} principe en écoulement	5
I.4.c)	Cas particuliers : simplifications	6
I.5	Deuxième principe	6

I.5.a)	2 ^e principe pour un système FERMÉ	6
I.5.b)	2 ^e principe en écoulement	6
I.5.c)	Cas particuliers : simplifications	7
II	Diagrammes thermodynamiques	7
II.1	Rappel : diagramme de Clapeyron	7
II.2	Diagramme (P, h)	8
II.3	Diagramme (T, s)	9
III	Étude d'une machine frigorifique	10
III.1	Description générale	10
III.2	Cycle de la machine frigorifique	11
III.3	Efficacité d'un congélateur	12

Ai-je bien appris mon cours ?

- 1 – 😊 – 😞 – Expliquer comment définir précisément un système fermé au sein d'un fluide en écoulement.
- 2 – 😊 – 😞 – Énoncer les deux principes de la thermodynamique pour un écoulement stationnaire.
- 3 – 😊 – 😞 – Établir les deux principes de la thermodynamique pour un écoulement stationnaire, après avoir pris soin de définir précisément un système fermé.
- 4 – 😊 – 😞 – Décrire l'allure d'un diagramme (P, h) : courbe de saturation, placement des phases, allure des isothermes, des isochores, des isentropes.
- 5 – 😊 – 😞 – Décrire l'allure d'un diagramme (T, s) : courbe de saturation, placement des phases, allure des isobares, des isochores, des isenthalpes.

FlashCards :



I Principes de la thermodynamique pour un écoulement stationnaire

I.1 Position du problème

Dans la plupart des machines thermiques (à part les moteurs thermiques de véhicules...) un **fluide** appelé fluide frigorigène ou caloporteur **s'écoule** dans des tuyaux et passe à travers différents éléments, appelés **organes** au sein desquels le fluide subit une transformation particulière du cycle qu'il décrit : turbine, compresseur, détenteur, évaporateur, condenseur, ... Dans le volume de chaque organe, le **fluide s'écoule**, c'est-à-dire le fluide entre et sort du système. C'est donc un **système ouvert**.

On étudie un **fluide en écoulement stationnaire** par rapport au référentiel terrestre $\mathcal{R}$, considéré galiléen.

♥ À retenir – Écoulement en régime stationnaires

Les écoulements des machines thermiques sont supposés stationnaires : les grandeurs macroscopiques décrivant l'état du fluide en une position donnée de l'écoulement ne dépendent pas du temps.

Le fluide est susceptible d'échanger du travail mécanique (notamment de pression) avec le fluide en amont et en aval, avec un élément mécanique qu'il traverse (pompe, piston...), et du transfert thermique. Son état peut donc évoluer entre l'amont et l'aval : sa vitesse, sa température, sa masse volumique, sa pression, ... peuvent changer. Pour étudier les échanges qui ont lieu, nous avons besoin des principes de la thermodynamique.

📖 Définition – Rappel : systèmes ouvert et fermé

- Un **système fermé** n'échange pas de matière avec le reste de l'univers. Il contient un ensemble de particules fluides immuable au cours du temps. Sa masse reste constante au cours du temps.
- Un **système ouvert** échange de la matière avec le reste de l'univers. Les particules fluides qui le constituent à deux instants distincts ne sont pas toutes les mêmes.

Un fluide en écoulement est un système ouvert. Or les principes de la thermodynamique sont définis pour des systèmes fermés, donc il est nécessaire de définir très proprement un système fermé pour pouvoir appliquer ces principes.

I.2 Définition d'un système fermé

On se limite au cas des dispositifs ayant une seule entrée et une seule sortie.

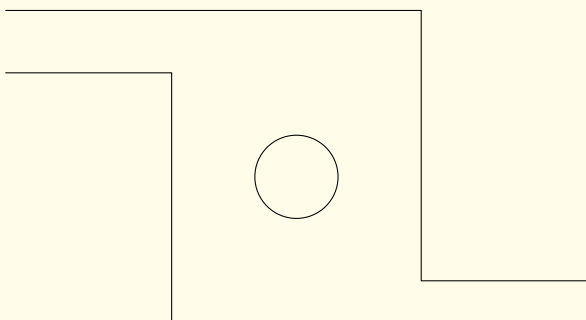
💡 Méthode – Comment définir un système fermé à partir d'un système ouvert ?

On souhaite effectuer un bilan entre les instant t et $t + dt$ sur l'écoulement suivant.

On définit Σ_O le **système ouvert et fixe dans le référentiel $\mathcal{R}$ d'étude**, délimité par la surface de contrôle $\mathcal{S}$. Ce système devra être choisi judicieusement pour qu'il « enferme » les positions où on ne connaît pas les grandeurs d'état du fluide.

On définit le **système fermé Σ^* mobile**, à partir de Σ_O par :

- À l'instant t , $\Sigma^*(t)$ est constitué :
 - de $\Sigma_O(t)$ (fluide contenu dans $\mathcal{S}$),
 - et du fluide $\delta\Sigma_e$, de masse δm_e , qui entre dans la surface de contrôle entre t et $t + dt$
- À l'instant $t + dt$, $\Sigma^*(t + dt)$ est constitué :
 - de $\Sigma_O(t + dt)$ (fluide contenu dans $\mathcal{S}$),
 - et du fluide $\delta\Sigma_s$, de masse δm_s , qui sort de la surface de contrôle entre t et $t + dt$.



Les fluides étudiés sont en **écoulement stationnaire** (= toutes les caractéristiques du fluide contenu à l'intérieur de la surface de contrôle sont indépendantes du temps) et **unidimensionnel** (= la vitesse du fluide et toutes les grandeurs intensives qui le caractérisent sont uniformes sur la section d'entrée S_e , ainsi que sur la section de sortie S_s : on les indice avec 'e' (resp. 's') pour la section d'entrée (resp. de sortie).).

Notations :

- pression : P_e, P_s
- température : T_e, T_s
- volume massique : v_e, v_s
- masse volumique : ρ_e, ρ_s
- vitesse du fluide : c_e, c_s
- énergie interne massique : u_e, u_s
- enthalpie massique : h_e, h_s

♥ À retenir –

À toute grandeur d'état extensive G est associée les

grandeurs intensives **molaire** $G_m = \frac{G}{n}$ et **massique** $g = \frac{G}{m}$

I.3 Bilan de masse

🌿 Démonstration à maîtriser n°1 – Bilan de masse en régime stationnaire

On étudie un fluide en écoulement stationnaire entre une entrée de section S_e et une sortie de section S_s .

Q1. Définir proprement le système fermé.

Q2. Exprimer la masse $m^*(t)$ contenue dans le système fermé à l'instant t . Faire de même à $t + dt$. Comment sont ces deux masses ?

Q3. En exploitant le fait que l'écoulement est permanent, en déduire une relation entre δm_e et δm_s .

📅 Définition – Débit massique

Soit δm la masse traversant une section droite de l'écoulement durant dt . On appelle débit massique D_m la quantité $D_m = \frac{\delta m}{dt}$, en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

♥ À retenir – Conservation du débit massique

Pour un écoulement en régime stationnaire, le **débit massique se conserve** entre l'entrée et la sortie de l'organe : $D_{m,e} = D_{m,s} \stackrel{\text{not}}{=} D_m$.

I.4 Premier principe

I.4.a) Premier principe pour un système FERMÉ pour une transformation infinitésimale

♥ À retenir – 1^{er} principe pour un système FERMÉ pour une transformation infinitésimale

$$d\mathcal{E} = \delta W + \delta Q$$

$$d\mathcal{E}_m + dU = \delta W + \delta Q$$

$$d\mathcal{E}_c + d\mathcal{E}_{pp} + dU = \delta W + \delta Q$$

- $d\mathcal{E}, d\mathcal{E}_m, dU$: variations infinitésimales de l'énergie totale $\mathcal{E}$, l'énergie mécanique macroscopique $\mathcal{E}_m$ et l'énergie interne U entre t et $t + dt$;
- δW : travail élémentaire des forces extérieures non conservatives reçu par le système entre t et $t + dt$
- δQ : transfert thermique élémentaire reçu par le système entre t et $t + dt$.

⚠ Attention – Notations d et δ en physique

- La notation $\delta \clubsuit$ est réservée à la « quantité infinitésimale de la grandeur $\clubsuit$ ».
- La notation $d \spadesuit$ est réservée à la « variation infinitésimale de la grandeur d'état $\spadesuit$ ».

I.4.b) Premier principe pour un écoulement stationnaire

♥ À retenir – Premier principe pour un fluide en écoulement

Hypothèses : écoulement **unidimensionnel stationnaire**, avec une seule entrée et une seule sortie ; axe (Oz) vertical ascendant ; poids : seule force extérieure conservative.

$$\Delta_{e \rightarrow s} h + \Delta_{e \rightarrow s} e = w_u + q$$

avec :

- w_u le **travail utile massique** (en J/kg) reçu par le fluide de la part de **parties mobiles** présentes dans l'élément traversé ;
- q le **transfert thermique massique** (en J/kg), reçu par le fluide à travers la surface de contrôle, par le fluide de la part du milieu extérieur ;
- h l'**enthalpie massique du fluide** (en J/kg),
- $e = e_c + e_p = \frac{1}{2}c^2 + gz$ est l'**énergie mécanique massique macroscopique** du fluide, avec c la vitesse de l'écoulement.

🌿 Démonstration à maîtriser n°2 – Établir le 1^{er} principe pour un fluide en écoulement stationnaire

Cette démonstration doit savoir être faite sans question intermédiaire.

- Q1. Écrire le premier principe de la thermodynamique au système fermé Σ^* au cours de la transformation infinitésimale entre t et $t + dt$.
- Q2. Exprimer la variation de l'énergie mécanique macroscopique $\mathcal{E}_m$ de Σ^* entre t et $t + dt$.
- Q3. Comment s'expriment l'énergie cinétique massique et l'énergie potentielle de pesanteur massiques ?
- Q4. Exprimer la variation de l'énergie interne U de Σ^* entre t et $t + dt$.
- Q5. Exprimer le travail des forces de pression en amont et en aval en fonction de δm , P_e , P_s , v_e , v_s .
Pourquoi ne calcule-t-on pas celui des forces de pression exercées au niveau des parois de l'organe ?
- Q6. Exprimer le travail utile δW_u dû aux parties mobiles en fonction du travail utile massique w_u et de δm .
- Q7. Exprimer le transfert thermique δQ en fonction du transfert thermique massique q et de δm .
- Q8. Après écriture du premier principe, réarranger l'expression pour faire apparaître l'enthalpie massique.
- Q9. En déduire le premier principe pour un fluide en écoulement.

⚠ Attention –

Il faut distinguer :

- « Δ » dans $\Delta U = W + Q$ (ou $\Delta H = Q$ pour une transformation monobare) qui correspond à la différence d'énergie interne (ou d'enthalpie) entre deux instants différents (instant initial et instant final). Dans le **premier principe pour un système fermé** intervient une **variation temporelle** de U (ou de H).
- « Δ » dans $\Delta h = w_u + q$ qui correspond à une variation d'enthalpie massique entre deux positions différentes (entrée et sortie de l'élément). Dans le **premier principe pour un fluide en écoulement** intervient une **variation spatiale** de h .

Remarques –

On parle aussi de « 1^{er} principe pour un système ouvert » et de « 1^{er} principe industriel ».

Remarques – Autre écriture du 1^{er} principe industriel

Le **premier principe pour un fluide en écoulement** peut également s'écrire :

$$D_m \times (\Delta_{e \rightarrow s} h + \Delta_{e \rightarrow s} e) = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{th}$$

avec

- D_m (en kg/s) : le débit massique (constant) du fluide dans l'élément,
- $\mathcal{P}_u$ (en Watt) : la puissance utile reçue, dans le volume de contrôle, par le fluide de la part de **parties mobiles** présentes dans l'élément traversé ($\mathcal{P}_u = w_u \times D_m$),
- $\mathcal{P}_{th}$ (en Watt) : la puissance thermique reçue par le fluide à travers la surface de contrôle, par le fluide de la part du milieu extérieur ($\mathcal{P}_{th} = q \times D_m$).

I.4.c) Cas particuliers : simplifications

- Si l'entrée et la sortie de la machine sont sensiblement à la **même altitude**, on peut négliger la variation d'énergie potentielle massique de pesanteur (par rapport aux autres variations d'énergie) : $\Delta(gz) \approx 0$.
- Si les vitesses d'entrée et de sortie de la machine sont comparables, on peut négliger la variation d'énergie cinétique massique (par rapport aux autres variations d'énergie) : $\Delta(e_c) \approx 0$.
- En l'absence de **parties mobiles** : $w_u = 0$.
- Si on peut **négliger les transferts thermiques** (parois calorifugées, passage rapide) : $q = 0$.
- Pour une évolution isenthalpique du fluide : $\Delta h = 0$.
- Si le fluide est un gaz modélisé par un **gaz parfait** : $\Delta h = c_P \cdot \Delta T = \frac{R\gamma}{M(\gamma - 1)} \cdot (T_s - T_e)$.
- Si le fluide est un liquide modélisé une **phase condensée idéale** : $\Delta h = c \cdot \Delta T = c \cdot (T_s - T_e)$.
- Si on considère un fluide réel, on s'appuie sur un diagramme thermodynamique pour évaluer Δh .

I.5 Deuxième principe

I.5.a) Deuxième principe pour un système FERMÉ pour une transformation infinitésimale

♥ À retenir – 2^e principe pour un système FERMÉ pour une transformation infinitésimale

$$dS = \delta S_{ech} + \delta S_{créée}$$

- dS : variation infinitésimale de l'entropie S entre l'EI à t et l'EF à $t + dt$ de la transformation ;
- $\delta S_{ech} = \frac{\delta Q}{T_{ext}}$: l'entropie échangée élémentaire, avec δQ le transfert thermique élémentaire reçu par le système de la part du thermostat de température T_{ext} ,
- $\delta S_{créée} \geq 0$ est l'entropie créée élémentaire.

I.5.b) Deuxième principe pour un fluide en écoulement stationnaire

🌿 Démonstration à maîtriser n°3 – Établir le 2^e principe pour un fluide en écoulement stationnaire
En reprenant le même raisonnement que pour le premier principe, établir le deuxième principe pour un fluide en écoulement.

♥ À retenir – Deuxième principe pour un fluide en écoulement

Hypothèses : écoulement **stationnaire**, **unidimensionnel**, avec une seule entrée et une seule sortie.

$$\Delta_{e \rightarrow s} s = s_s - s_e = s_{\text{éch}} + s_{\text{créée}} = \frac{q}{T_{\text{ext}}} + s_{\text{créée}}$$

Avec :

- s l'**entropie massique du fluide** (USI : $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$),
- $s_{\text{éch}} = \frac{\delta S_{\text{éch}}}{\delta m} = \frac{q}{T_{\text{ext}}}$ l'**entropie échangée massique** avec q le transfert thermique massique reçu, à travers la surface de contrôle, par le fluide de la part du milieu extérieur (USI : $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$).
- $s_{\text{créée}} = \frac{\delta S_{\text{créée}}}{\delta m}$ l'**entropie créée massique** rendant compte des irréversibilités (USI : $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$).
- $\delta m = D_m dt$ la masse entrante ou sortante (identiques en régime stationnaire) dans la surface de contrôle pendant la durée dt .

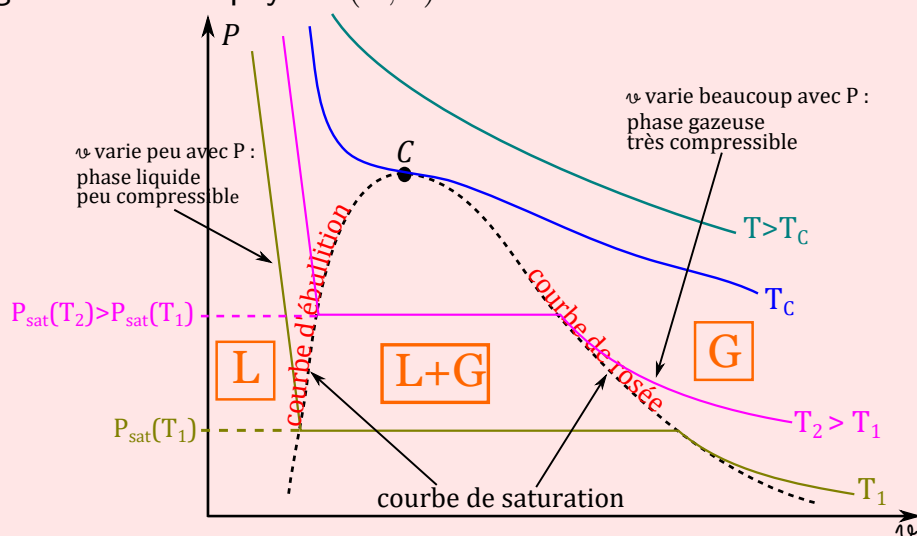
I.5.c) Cas particuliers : simplifications

- Si on peut négliger les transferts thermiques au niveau de la surface de contrôle (parois calorifugées, passage rapide) : $s_{\text{éch}} \approx 0$.
- Si les phénomènes sources d'irréversibilité sont négligeables : $s_{\text{créée}} \approx 0$.
- Si le fluide est un gaz modélisé par un gaz parfait : on exploite une des expression de l'entropie d'un GP (fournie).
- Si le fluide est un liquide modélisé une phase condensée idéale (fournie).
- Si on considère un fluide réel, on s'appuie sur un diagramme thermodynamique pour évaluer Δs .

II Diagrammes thermodynamiques

II.1 Rappel : diagramme de Clapeyron

♥ À retenir – Diagramme de Clapeyron (P, v)



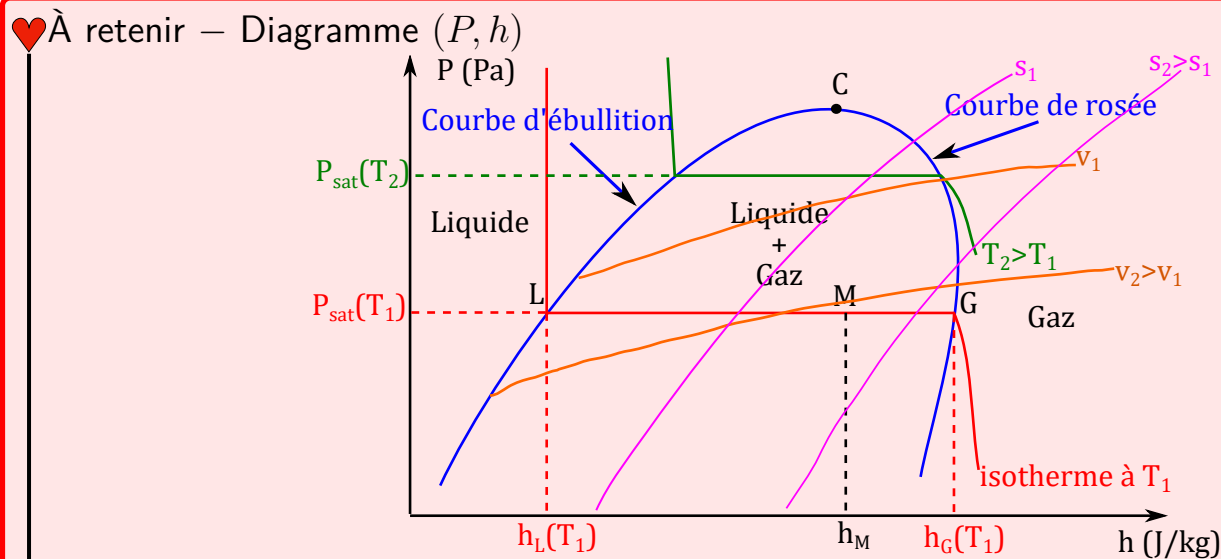
Le titre massique en vapeur, pour un système en un point M d'une isotherme est donné par :

$$x_G = \frac{LM}{LG} = \frac{v - v_L}{v_G - v_L} \quad x_L = \frac{MG}{LG} = \frac{v_G - v}{v_G - v_L}$$

où L et G appartiennent à la même isotherme et se trouvent respectivement sur la courbe d'ébullition et sur la courbe de rosée.

II.2 Diagramme (P, h)

<https://learncheme.com/simulations/thermodynamics/thermo-1/ph-diagram-for-water/>



Théorème des moments en M : $x_G(M) = \frac{\overline{LM}}{\overline{LG}} = \frac{h_M - h_L(T)}{h_G(T) - h_L(T)}$

♥ À retenir – Enthalpie massique de vaporisation

L'enthalpie massique de vaporisation à la température T est l'énergie nécessaire pour faire passer 1 kg de corps pur de l'état liquide à l'état gazeux à T et $P = P_{sat}(T)$.

Graphiquement c'est la largeur du palier d'équilibre diphasé à la température T dans le diagramme (P, h) : $\Delta_{vap} h(T) = h_G(T) - h_L(T)$.

L'enthalpie massique de liquéfaction est égale à l'opposé.

Activité n°4 – Utilisation d'un diagramme (P, h)

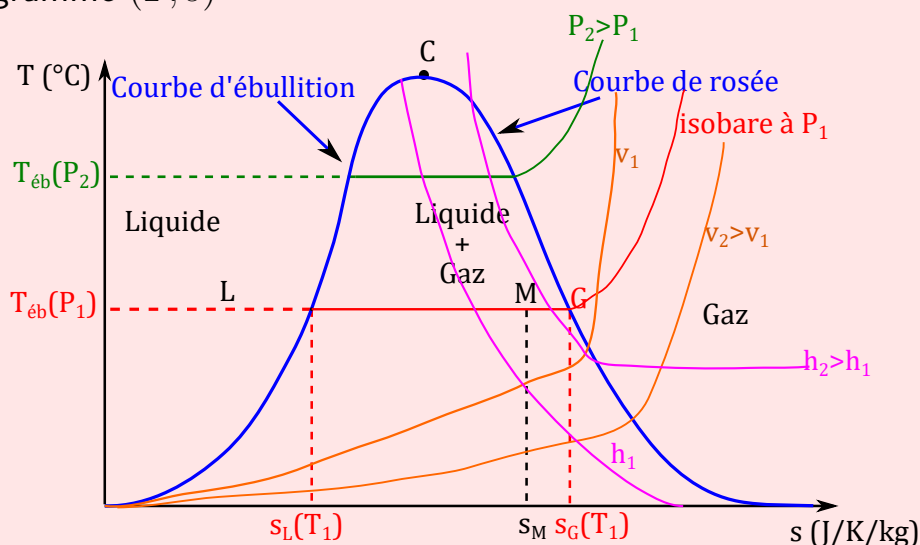
En s'appuyant sur le diagramme de l'eau (Figure 3 page 13).

- Q1. Placer les phases et repérer les différentes courbes : courbe d'ébullition, courbe de rosée, isotitre, isochore, isotherme, isentropes.
- Q2. L'eau gazeuse (à l'état vapeur, pas celle qui contient des bulles de CO_2 !) peut-elle être modélisée par un gaz parfait ? Si oui dans quel intervalle de température et de pression ?
- Q3. Déterminer la capacité thermique à pression constante de l'eau liquide et de l'eau vapeur. Dépendent-elles de la pression ?
- Q4. Lire les enthalpie et entropie de vaporisation de l'eau à 100°C . Quel lien les relie ?
- Q5. On place 100 mg d'eau dans un volume de 1 L à 180°C . Déterminer l'état du système.

II.3 Diagramme (T, s)

<https://learncheme.com/simulations/thermodynamics/thermo-1/ts-diagram-for-water/>

♥ À retenir – Diagramme (T, s)



Théorème des moments en M : $x_G(M) = \frac{\overline{LM}}{\overline{LG}} = \frac{s_M - s_L(T)}{s_G(T) - s_L(T)}$

♥ À retenir – Entropie massique de vaporisation

Graphiquement c'est la largeur du palier d'équilibre diphasé à la température T dans le diagramme (T, s) : $\Delta_{\text{vap}}s(T) = s_G(T) - s_L(T)$.

Elle est liée à l'enthalpie massique de vaporisation par : $\Delta_{\text{vap}}s(T) = \frac{\Delta_{\text{vap}}h(T)}{T}$, où T est la température du changement d'état (en kelvin).

🍃 Activité n°5 – Utilisation d'un diagramme (T, s)

En s'appuyant sur le diagramme de l'eau (Figure 4 page 14).

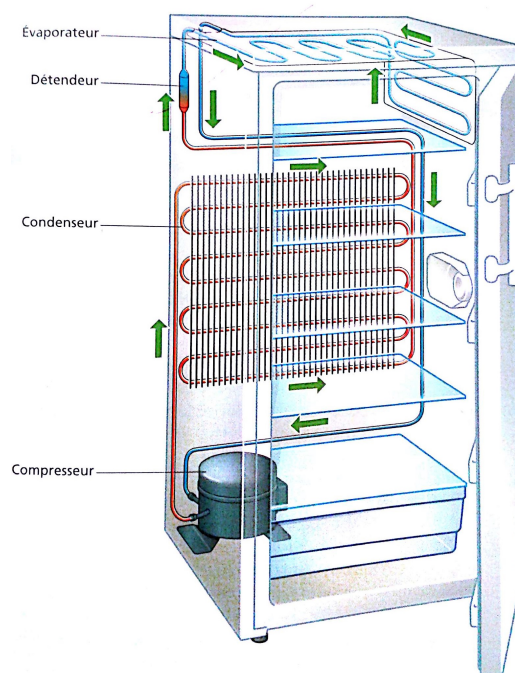
- Q1. Placer les phases et repérer les différentes courbes : courbe d'ébullition, courbe de rosée, isotitre, isochore, isobare, isenthalpique.
- Q2. Lire les enthalpie et entropie de vaporisation de l'eau à 100 °C. Quel lien les relie ?
- Q3. On place 100 mg d'eau dans un volume de 1 L à 180 °C. Déterminer l'état du système.

III Étude d'une machine frigorifique

III.1 Description générale

Dans une machine frigorifique, un **système fluide**, appelé agent thermique ou fluide frigorigène, suit un **cycle récepteur** au cours duquel il **prélève de la chaleur à la source froide** (l'intérieur du réfrigérateur) et en **cède à la source chaude** (l'extérieur du réfrigérateur).

Dans un moteur à explosion, le système reste au même endroit pendant tout le cycle : la chambre de combustion. Un réfrigérateur est un exemple de machine thermique dans laquelle le système **fluide est en circulation (écoulement)** et reçoit en divers endroits des transferts thermiques et du travail mécanique.



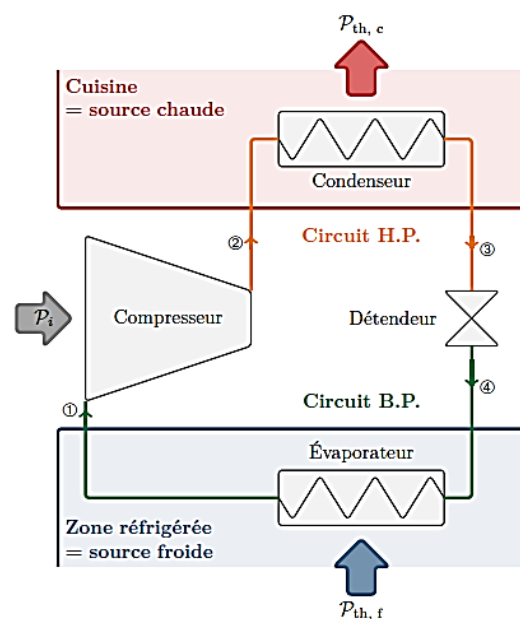
face avant



face arrière



compartiment congélateur



Dans une machine frigorifique (de même que dans une pompe à chaleur) un fluide frigorigène suit un cycle comportant :

- un **compresseur ②** dans lequel il reçoit du travail utile (autre que celui des forces de pression) et ne reçoit pas de transfert thermique, la température du fluide augmente ;
- un **condenseur ③** dans lequel il est en contact avec la source chaude (de température T_C) à laquelle il cède du transfert thermique ($Q_c < 0$) ;
- un **détendeur ④** dans lequel il ne reçoit ni travail utile, ni transfert thermique ;
- un **évaporateur ①** dans lequel il est en contact avec la source froide (de température T_F) de laquelle il reçoit du transfert thermique.

Quand le fluide décrit le cycle, il subit des changements d'état : liquéfaction et vaporisation. Ces changements d'état permettent de profiter des avantages propres aux liquides et aux gaz :

- Les liquides ont une grande capacité thermique massique : ils stockent davantage d'énergie thermique pour une même élévation de température que les gaz. Cependant ils sont très faiblement compressibles et sont peu adaptés aux échanges de travail mécanique.

À l'inverse les gaz ont des capacités thermiques massiques faibles, mais ont l'avantage d'être très compressibles. Ainsi la plupart des machines (hormis le moteur à essence) exploite le changement d'état d'un fluide pour bénéficier des avantages de chaque phase. De plus ces changements d'état mettent en jeu des quantités importantes de transferts thermiques.

III.2 Cycle de la machine frigorifique

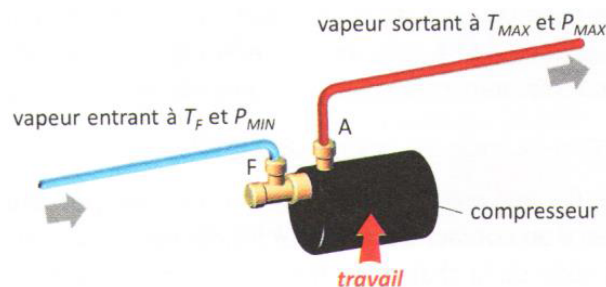
Partons du fluide qui vient de sortir de l'évaporateur, le fluide est entièrement à l'état gazeux, il est à la température T_F de la source froide et à la pression P_{MIN} .

■ Compresseur FA

Le compresseur utilise un piston pour réaliser une compression et élever la pression du fluide frigorigène à P_{MAX} .

On suppose la compression rapide devant la durée caractéristique des transferts thermiques : **compression adiabatique**. On la suppose de plus **réversible**.

La température s'élève et atteint une température supérieure à la température de la source chaude T_C .



Le compresseur permet au fluide à l'état de vapeur d'atteindre une température supérieure à celle de la source chaude. La compression FA est adiabatique réversible.

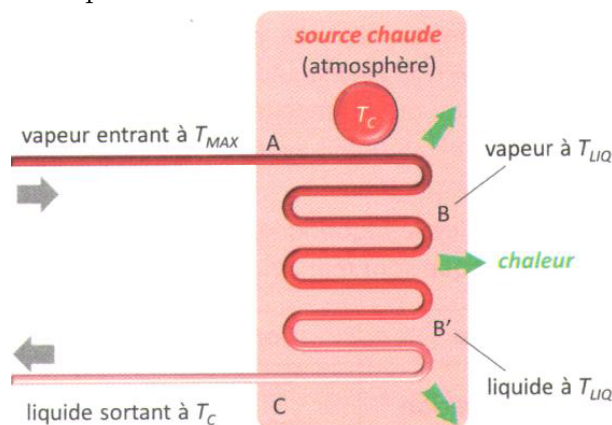
■ Condenseur ABB'C

Le fluide à T_{MAX} entre dans le condenseur placé au contact de l'atmosphère à T_C . Le condenseur est un tube de section constante dans lequel le fluide ne rencontre aucun obstacle.

On peut supposer qu'il circule à pression constante égale à P_{MAX} .

On modélise la transformation au sein du condenseur en trois étapes :

- AB : Le fluide frigorigène, à l'état gazeux, cède du transfert thermique à l'atmosphère et se refroidit. Il atteint la température de condensation à la pression P_{MAX} , $T_{\text{liq}}(P_{\text{MAX}})$.
- BB' : Le fluide se liquéfie alors totalement à la température T_{liq} (supérieure à celle de la source chaude : le fluide continue à céder du transfert thermique à la source chaude).
- B'C (sous-refroidissement) : Une fois le fluide à l'état liquide, le liquide se refroidit en cédant du transfert thermique à l'atmosphère jusqu'à atteindre la température de la source chaude T_C .



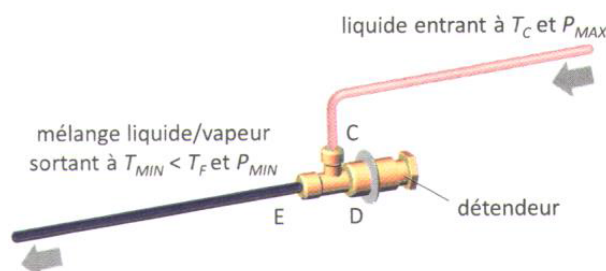
L'échangeur thermique situé derrière le réfrigérateur lui permet d'évacuer de la chaleur dans l'atmosphère. Le fluide subit un refroidissement AB à l'état gazeux, une liquéfaction totale BB' puis un refroidissement B'C à l'état liquide. Les trois étapes sont isobares.

■ Détendeur CDE

Le détendeur permet d'abaisser la pression du fluide en sortie du condenseur P_{MAX} à la pression P_{MIN} en entrée de l'évaporateur. On peut décomposer la transformation au sein du détendeur en deux étapes :

- CD : détente à l'état liquide ;
- DE : vaporisation partielle du fluide.

La transformation est rapide dans le détendeur, elle est modélisée comme étant **adiabatique**. De plus, il n'y a pas de parois mobiles.



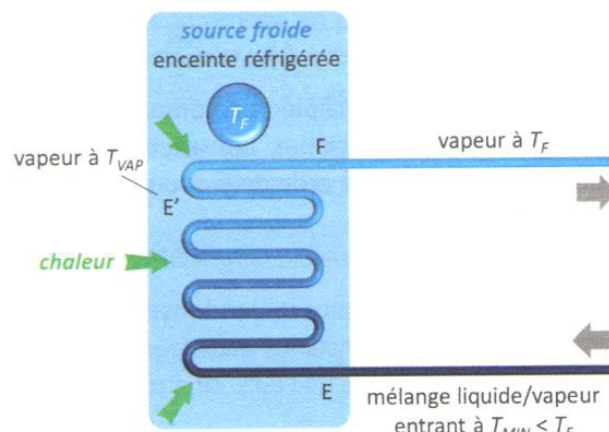
Le détendeur permet, en abaissant la pression du fluide, de le liquéfier partiellement tout en abaissant sa température au-dessous de celle de la source froide.

■ Évaporateur EE'F

L'évaporateur est en contact avec la source froide (l'intérieur du réfrigérateur) avec une température $T_{\min}$ inférieure à T_F . Lors de cette dernière transformation la source froide cède du transfert thermique au fluide frigorigène. On peut modéliser cette transformation au sein de l'évaporateur en deux étapes :

- EE' : vaporisation totale de manière isobare à la température T_{vap} ;
- E'F (surchauffe) : le gaz reçoit toujours du transfert thermique de la part de la source froide et s'échauffe alors jusqu'à la température de la source froide T_F .

De même que dans le condenseur, la transformation est ici isobare.



L'échangeur thermique situé dans l'enceinte du réfrigérateur permet à l'agent thermique de prélever de la chaleur à la source froide. Le fluide subit une vaporisation isobare EE' suivie d'un réchauffement E'F à l'issue duquel il atteint la température de la source froide.

Le fluide utilisé doit effectuer ses changements d'état liquide/gaz dans les intervalles de pression et de température imposés par le fonctionnement de la machine thermique. Pour la production de froid domestique le fluide utilisé est le R-134a (1,1,1,2-tétrafluoroéthane). Selon la température recherchée et le dimensionnement de l'installation, différents autres fluides peuvent être utilisés : difluorométhane, 1,1,1-trifluoroéthane, pentafluoroéthane, ammoniac, dioxyde de carbone.

III.3 Efficacité d'un congélateur

🌿 Activité n°6 – Efficacité d'un congélateur

On étudie un congélateur dont le fluide suit le cycle décrit précédemment.

On donne les caractéristiques ci-contre.

Fluide caloporteur	R134a
Température de la source froide	$T_{fr} = -18\text{ °C}$
Température de la source chaude	$T_{ch} = 20\text{ °C}$
Température de vaporisation	$T_{\text{vap}} = -30\text{ °C}$
Température de condensation	$T_{\text{cond}} = 40\text{ °C}$

- Q1. Faire un schéma de principe d'une machine frigorifique et indiquer les signes des différents transferts.
- Q2. Par un calcul d'ordre de grandeur, justifier que l'on peut négliger la variation d'énergie potentielle massique de pesanteur devant la variation d'enthalpie massique.

La vitesse d'écoulement dans un réfrigérateur évolue peu au cours de la traversée des différents organes, on pourra également négliger les variations d'énergie cinétique massique.

- Q3. Identifier les sources froide et chaude de la machine frigorifique.
- Q4. Avec quelle source (froide ou chaude), le fluide frigorigène est-il mis en contact quand il traverse le condenseur ? l'évaporateur ?
- Q5. Que peut-on dire de la transformation CE ?
- Q6. Dessiner le cycle thermodynamique parcouru par le fluide frigorifique dans le diagramme (P, h) .
- Q7. Déterminer à l'aide de ce tracé : les pressions au sein de l'évaporateur et du condenseur ; le titre en vapeur à l'entrée de l'évaporateur ; la température en sortie du compresseur.
- Q8. Déterminer les transferts thermiques massiques reçus de la part de la source froide q_{fr} et de la source chaude q_{ch} , ainsi que le travail utile massique reçu au cours du cycle.
- Q9. Définir l'efficacité d'une machine frigorifique, puis exprimer celle du cycle décrit. Faire l'AN.
- Q10. La comparer à l'efficacité de Carnot d'un cycle réversible fonctionnant entre les deux mêmes sources.
- Q11. Placer les différents points sur le diagramme (T, s) fourni.
- Q12. Déterminer l'efficacité du congélateur en exploitant le diagramme (T, s) .

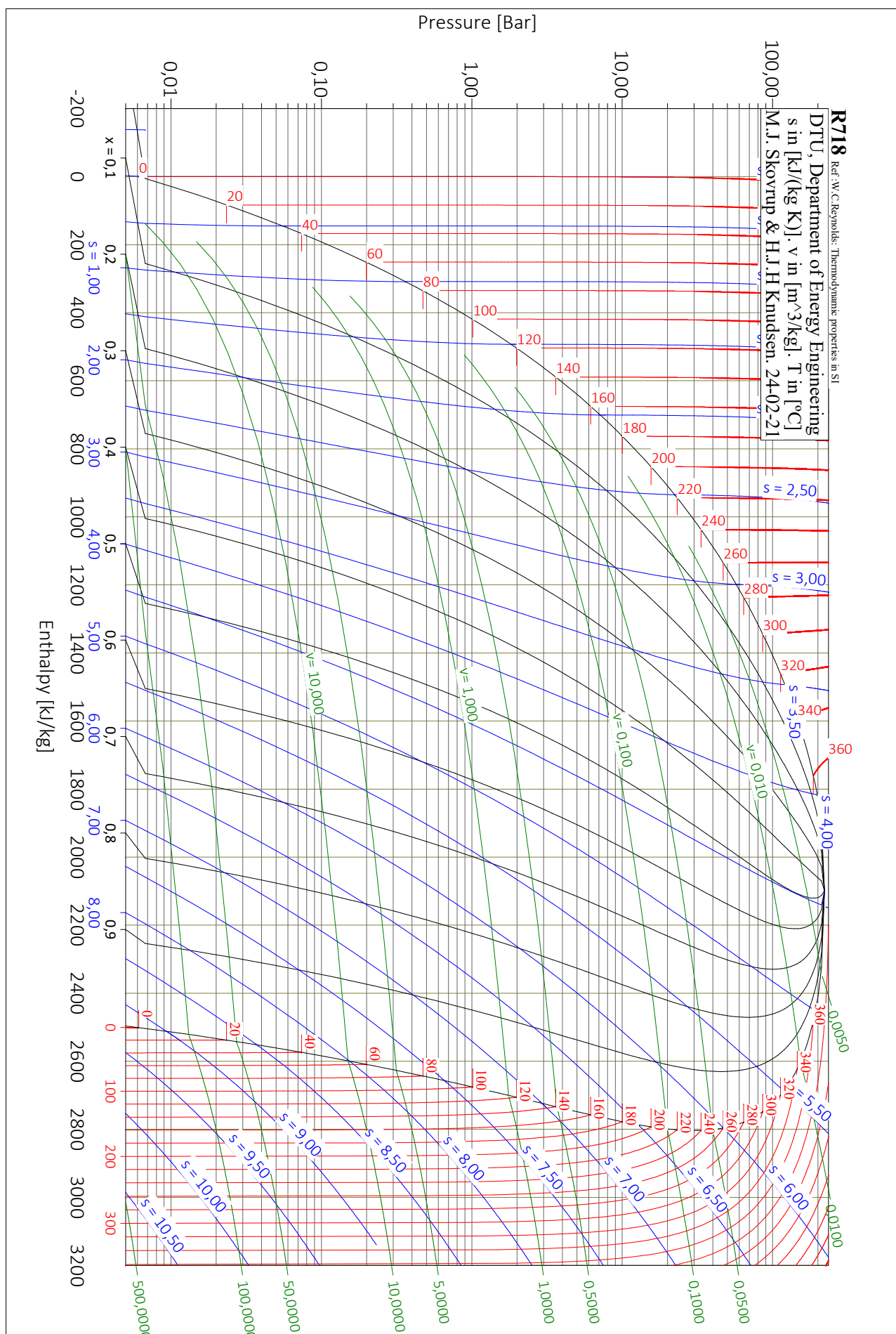


FIGURE 3 – Digramme (P, h) de l'eau

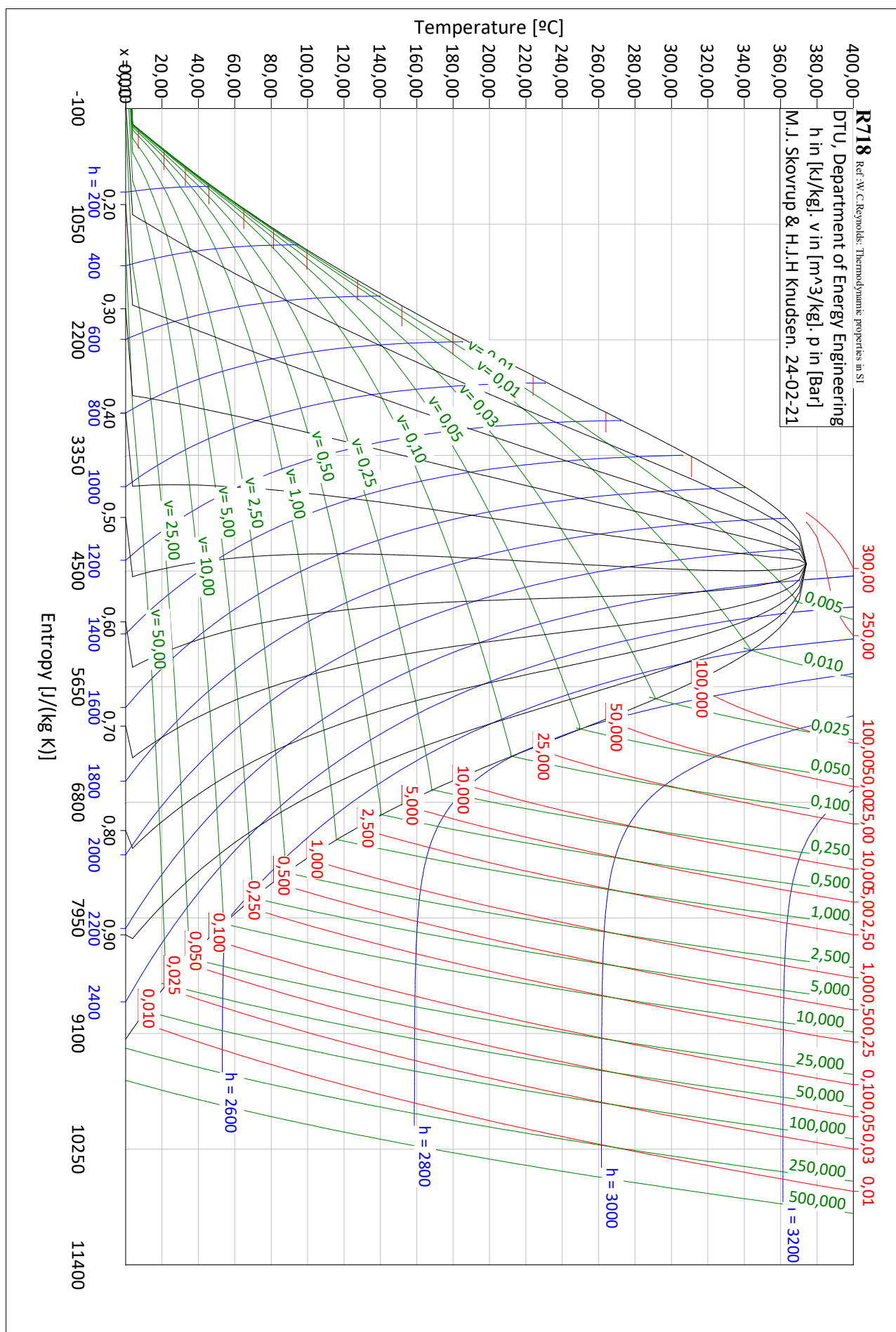


FIGURE 4 – Digramme (T, s) de l'eau

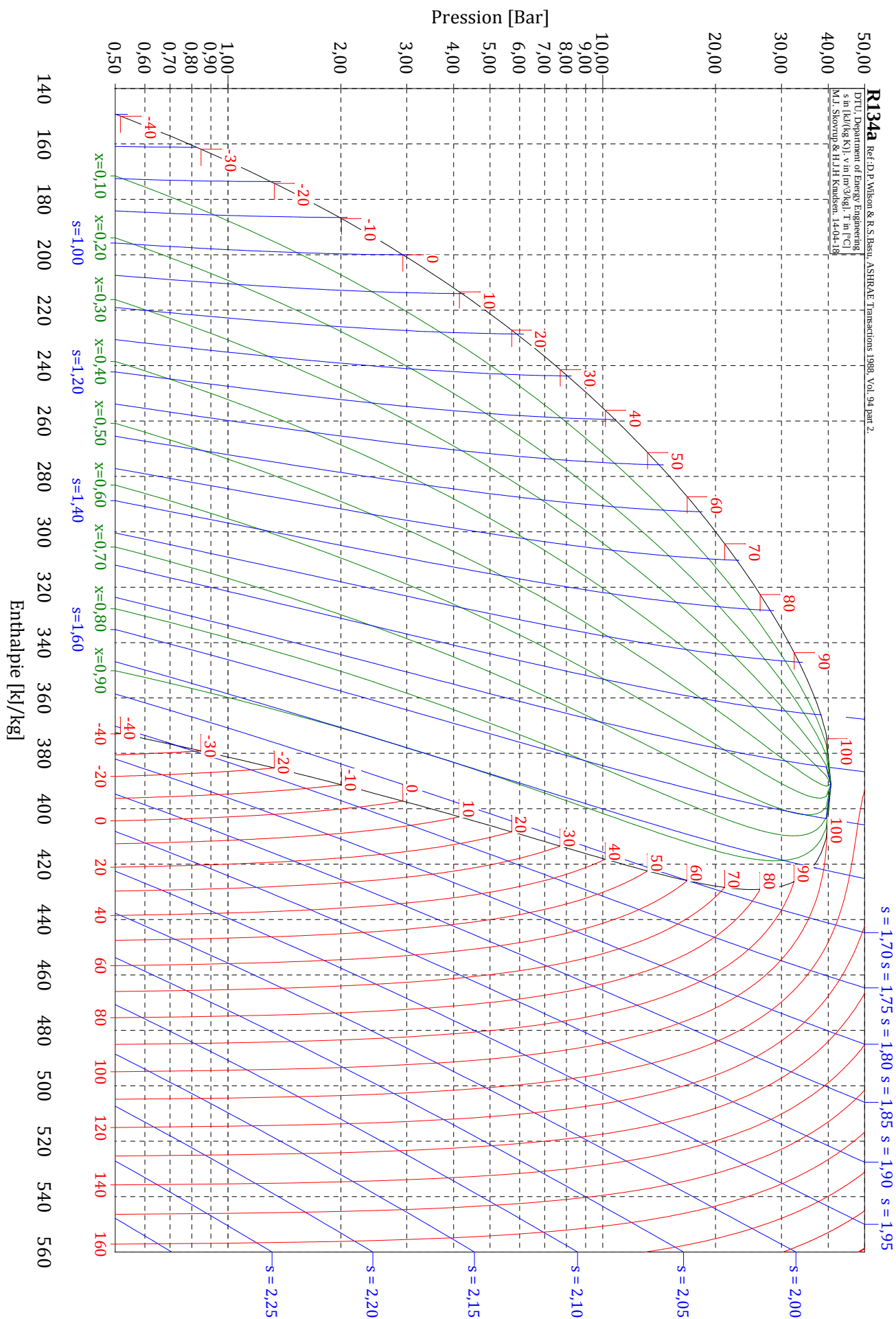


FIGURE 5 – Digramme (P, h) du R134a

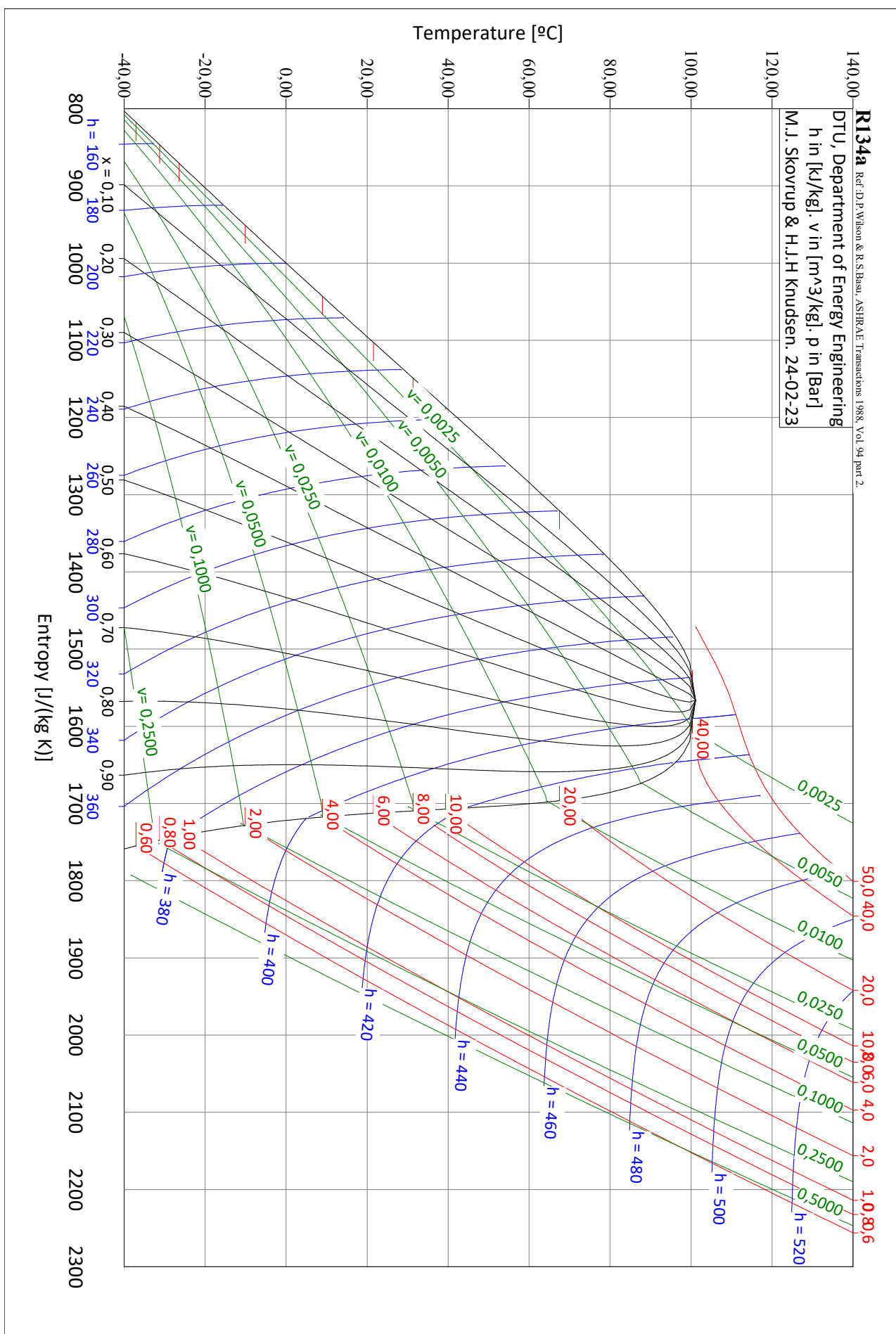


FIGURE 6 – Digramme (T, s) du R134a