

Thermodynamique TD TH1 Systèmes thermodynamiques ouverts en régime stationnaire

Exercice n°	§	1	2	3	4	5
Capacités						
Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme.	PCSI					
Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme.	PCSI					
Définir un rendement ou une efficacité et la relier aux énergies échangées au cours d'un cycle.	PCSI					
Appliquer le premier principe et le deuxième principe aux machines thermiques cycliques.	PCSI					
Justifier et utiliser le théorème de Carnot.	PCSI					
Établir les relations $\Delta h + \Delta e = w_u + q$ et $\Delta s = s_e + s_c$.	I					
Utiliser les relations $\Delta h + \Delta e = w_u + q$ et $\Delta s = s_e + s_c$ pour étudier des machines thermiques réelles à l'aide de diagrammes thermodynamiques (P, h) et (T, s).	III II					

Parcours possibles

- ♪ Si vous avez des difficultés sur ce chapitre : 1, 2.
- ♪ ♪ Si vous vous sentez moyennement à l'aise, mais pas en difficulté : 1, 2, 3, 5
- ♪ ♪ ♪ Si vous êtes à l'aise : 2, 3, 4, 5.

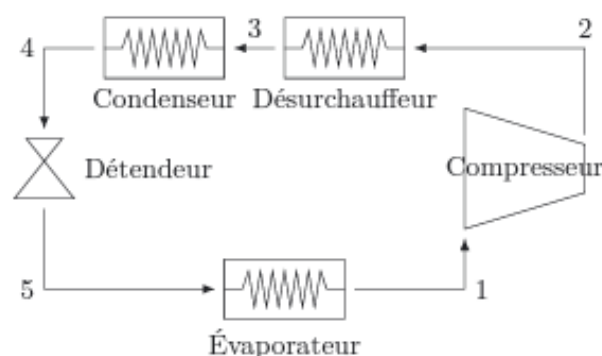
Données —

- Entropie massique du gaz parfait : $s(T, P) = c_p \ln \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right) - \frac{R}{M} \ln \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}} \right) + S_{m, \text{ref}}$, où c_p est la capacité thermique massique à pression constante, et M la masse molaire
- Entropie massique d'une phase condensée : $s(T) = c \ln \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right) + s_{\text{ref}}$
- Capacité massique de l'eau liquide : $c_\ell = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

I Exercices d'application

Exercice n°1 Pompe à chaleur ♪

Les pompes à chaleur actuelles reposent toutes sur un principe unique : un fluide frigorigène, comme l'ammoniac par exemple, parcourt des cycles récepteurs au cours desquels il va, en se condensant ou en se vaporisant, soutirer une quantité importante d'énergie thermique à une source froide (la partie à refroidir) et en céder au milieu extérieur (la partie à réchauffer).



Dans l'état (1), le fluide est à la pression $P_1 = 5,0 \text{ bar}$ dans l'état de vapeur saturante. Il traverse le compresseur

où il subit une compression adiabatique et réversible (isentropique) l'amenant dans l'état (2) à la pression P_2 . Le passage dans le désurchauffeur l'amène de façon isobare à l'état de vapeur saturante (état (3)) à la température $T_3 = 39\text{ °C}$, puis le passage dans le condenseur l'amène de façon isobare à l'état de liquide saturant (état (4)). Il passe ensuite dans un détendeur dans lequel il subit une détente isenthalpique l'amenant dans l'état (5) à la pression $P_5 = P_1 = 5,0\text{ bar}$. Il s'évapore ensuite de façon isobare dans l'évaporateur.

- Q1. Placer les points (1), (2), (3), (4), (5) sur le diagramme (P, h) de l'ammoniac figure 1 (dernière page).
- Q2. Caractériser entièrement ces cinq états, en indiquant pour chacun leurs pression, enthalpie et entropie massique, titre en vapeur si nécessaire et, si possible, leur température. On pourra présenter les résultats sous forme de tableau.
- Q3. La machine étant une pompe à chaleur, au niveau de quel(s) organe(s) le fluide est-il en contact avec la source froide ? la source chaude ? Ces organes présentent-ils des pièces mobiles ?
- Q4. Déterminer le transfert thermique q_c reçu par le fluide de la part de la source chaude, le transfert thermique q_f reçu par le fluide de la part de la source froide, ainsi que le travail utile reçu par le fluide lors de la traversée du compresseur.
- Q5. Lors du passage à travers le détendeur, le fluide reçoit-il un travail utile ? un transfert thermique ?
- Q6. Définir le coefficient de performance COP (ou efficacité) de cette pompe à chaleur et le calculer numériquement.
- Q7. Sachant que la température de la source froide est $T_f = 7,0\text{ °C}$ et que celle de la source chaude est $T_c = 20\text{ °C}$, quel serait le coefficient de performance de Carnot COP_c correspondant ? Commenter.

Exercice n°2 Cycle de Rankine 🎵

La plupart des centrales électriques fonctionnent avec un circuit dans lequel de l'eau subit des transformations entre l'état liquide et l'état gazeux permettant de transformer un transfert thermique, provenant de la combustion du charbon ou du réacteur nucléaire, en travail mécanique. Ce travail mécanique est transformé par un alternateur en énergie électrique.

- Q1. Donner le schéma de principe d'un moteur ditherme en précisant les signes des différents échanges d'énergie. Définir le rendement d'un moteur.
- Q2. Établir le rendement de Carnot d'un moteur. Le calculer si la source chaude est à $T_{ch} = 270\text{ °C}$ et la source froide est à $T_{fr} = 30\text{ °C}$.

Le fluide circule en régime stationnaire dans la machine et passe par quatre états successifs :

- état 1 : le fluide sort du condenseur à l'état liquide saturant à la température T_1 et la pression $P_1 = P_{sat}(T_1) = 0,05\text{ bar}$, pression de vapeur saturante à la température T_1 ;
- transformation $1 \rightarrow 2$: dans la pompe le liquide subit une compression adiabatique et réversible ;
- état 2 : le fluide est à l'état liquide à la pression $P_2 = 60\text{ bar}$ et à une température $T_2 \simeq T_1$;
- transformation $2 \rightarrow 3$: dans la chaudière le fluide reçoit du transfert thermique à pression constante, il monte en température jusqu'à l'état (2') de liquide saturant, puis est totalement transformé en vapeur ;
- état 3 : le fluide est à l'état de vapeur saturante ;
- transformation $3 \rightarrow 4$: dans la turbine le liquide subit une détente adiabatique et réversible ;
- état 4 : le fluide est à l'état de mélange liquide-vapeur de titre massique en vapeur x_4 ;
- transformation $4 \rightarrow 1$: dans le condenseur la vapeur se condense totalement de manière isobare et isotherme.

- Q3. De quelle unique grandeur d'état dépendent l'entropie massique et l'enthalpie massique d'une phase condensée incompressible et indilatable ? Que peut-on dire sur la transformation $1 \rightarrow 2$?
- Q4. Représenter le cycle dans les diagrammes (P, h) (Figure 2) et (T, s) fournis (Figure 3).
- Q5. Déterminer le titre massique en vapeur à l'état 4 (sans utiliser les isotitres !).
- Q6. Exprimer et calculer les transferts thermiques massiques et les travaux massiques algébriquement reçus par l'eau lors de la traversée de chaque organe.
- Q7. Exprimer le rendement en fonction des grandeurs précédentes. Faire l'application numérique. Comparer au rendement de Carnot calculé précédemment.

II Exercices d'approfondissement

Exercice n°3 Étude d'un robinet mélangeur 🎵 🎵

Un robinet mélangeur admet de l'eau froide à la température $T_1 = 10^\circ\text{C}$ par l'entrée (1) avec un débit massique $D_{m1} = 0,040 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ et de l'eau chaude à la température $T_2 = 70^\circ\text{C}$ par l'entrée (2) avec un débit massique $D_{m2} = 0,020 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Le mélangeur est calorifugé et le mélange s'y effectue de manière isobare à la pression de 1 bar. On note la température T_3 de l'eau en sortie (3) du mélangeur. On néglige les variations d'énergie cinétique et potentielle.

Q1. En appliquant le premier principe de la thermodynamique à un système fermé bien choisi, montrer que $(D_{m1} + D_{m2})h_3 - (D_{m1}h_1 + D_{m2}h_2) = 0$ où h_i est l'enthalpie massique de la zone i ($i = 1, 2, 3$).

Q2. Déterminer la température T_3 de l'eau en sortie du mélangeur.

On donne les entropies massiques dans les trois états (1), (2) et (3) :

État	(1)	(2)	(3)
$s \text{ (kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$	0,150	0,960	0,445

Q3. Exprimer et calculer l'entropie massique puis le taux de création d'entropie $\dot{S}_c$ (entropie créée par unité de temps) dans le mélangeur. Commenter.

Exercice n°4 Détente d'un gaz dans une tuyère 🎵 🎵 🎵

Une tuyère est une conduite rigide horizontale d'axe de révolution (Ox) et de section variable $S(x)$. On considère un écoulement d'air en régime stationnaire dans une tuyère dont les parois sont calorifugées. On suppose que l'air se comporte comme un gaz parfait diatomique et que la vitesse de l'air en un point d'abscisse x de l'écoulement s'écrit $\vec{c} = c(x)\vec{u}_x$.

Données —

- Air : $M = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $\gamma = 1,4$
- En entrée : $c_1 = 100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $T_1 = 1500 \text{ K}$; $P_1 = 50 \text{ bar}$; $v_1 = 8,71 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
- En sortie : $T_2 = 500 \text{ K}$; $P_2 = 1 \text{ bar}$; $v_2 = 1,44 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
- Le débit massique est relié à la masse volumique ρ , à la vitesse c d'écoulement et à la section S par $D_m = \rho c S$ (on le verra plus tard en mécanique des fluides).

Q1. Montrer que $h_1 + \frac{1}{2}c_1^2 = h_2 + \frac{1}{2}c_2^2$.

Q2. Rappeler l'expression de la capacité thermique massique à pression constante d'un gaz parfait de coefficient isentropique γ .

Q3. Déterminer la vitesse c_2 de sortie. Commenter.

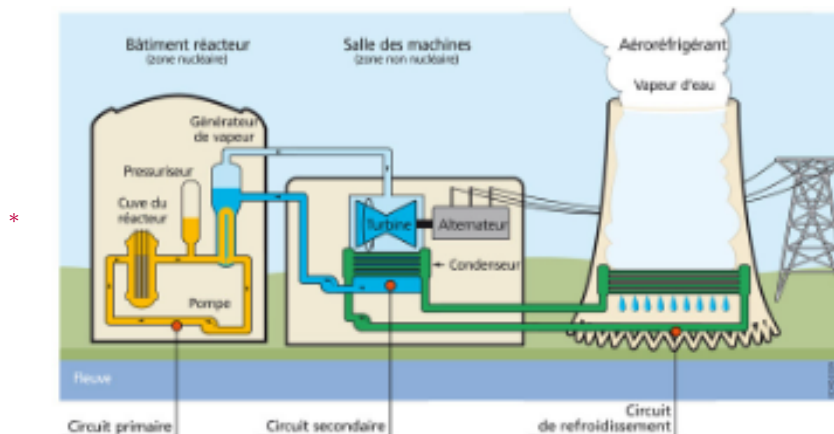
Q4. Exprimer la variation d'entropie massique du gaz entre l'entrée et la sortie de la tuyère.

Q5. Exprimer puis calculer l'entropie massique créée lors du passage du gaz dans la tuyère. La détente est-elle réversible ?

Q6. Exprimer puis calculer le rapport des sections de sortie et d'entrée $\frac{S_2}{S_1}$ permettant le bon fonctionnement de la tuyère.

III Résolution de problème

Exercice n°5 Échauffement en aval d'une centrale nucléaire ♪ ♪ ♪



Les centrales nucléaires sont placées à proximité de fleuves de débit important. La centrale prélève de l'eau au fleuve qui circule dans le circuit de refroidissement, puis est restituée au fleuve. Ce qui conduit à un échauffement de quelques degrés du fleuve en aval de la centrale.

Les fortes chaleurs et les sécheresses entraînent une augmentation de la température des cours d'eau et une diminution de leur débit. Ces conditions rendent ainsi plus difficile la dilution, dans le cours d'eau, de l'eau échauffée par les circuits de la centrale nucléaire pour les besoins de refroidissement des réacteurs. Les rejets sont encadrés par l'ASN : échauffement maximal de l'eau entre l'amont et l'aval, et température maximale de l'eau en aval. Lorsque ces limites sont susceptibles de ne pas être respectées, la puissance des réacteurs est abaissée, et peut aller jusqu'à l'arrêt complet.

La centrale du Tricastin[†] présente quatre réacteurs, chacun de 900 MW (puissance électrique fournie au réseau).

Quel doit être le débit minimal du canal du Rhône sur lequel elle est placée pour que l'échauffement n'excède pas 4 °C ? À quelle condition la température en aval ne dépasse pas les 28 °C ?[‡]

Données —

- Température du réacteur : 315 °C
- Rendement effectif de la centrale : 60% du rendement de Carnot.

*. <https://www.ici.fr/infos/economie-social/tous-les-reacteurs-fonctionnent-a-nouveau-a-la-centrale-nucleaire>

†. entre la Drôme et le Vaucluse

‡. Limites issus de <https://reglementation-controle.asnr.fr/information/archives-des-actualites/1-asn-fait-le-point-sur-les-rejets-thermiques-des-centrales-nucleaires-pendant-les-periodes-de-canicule>.

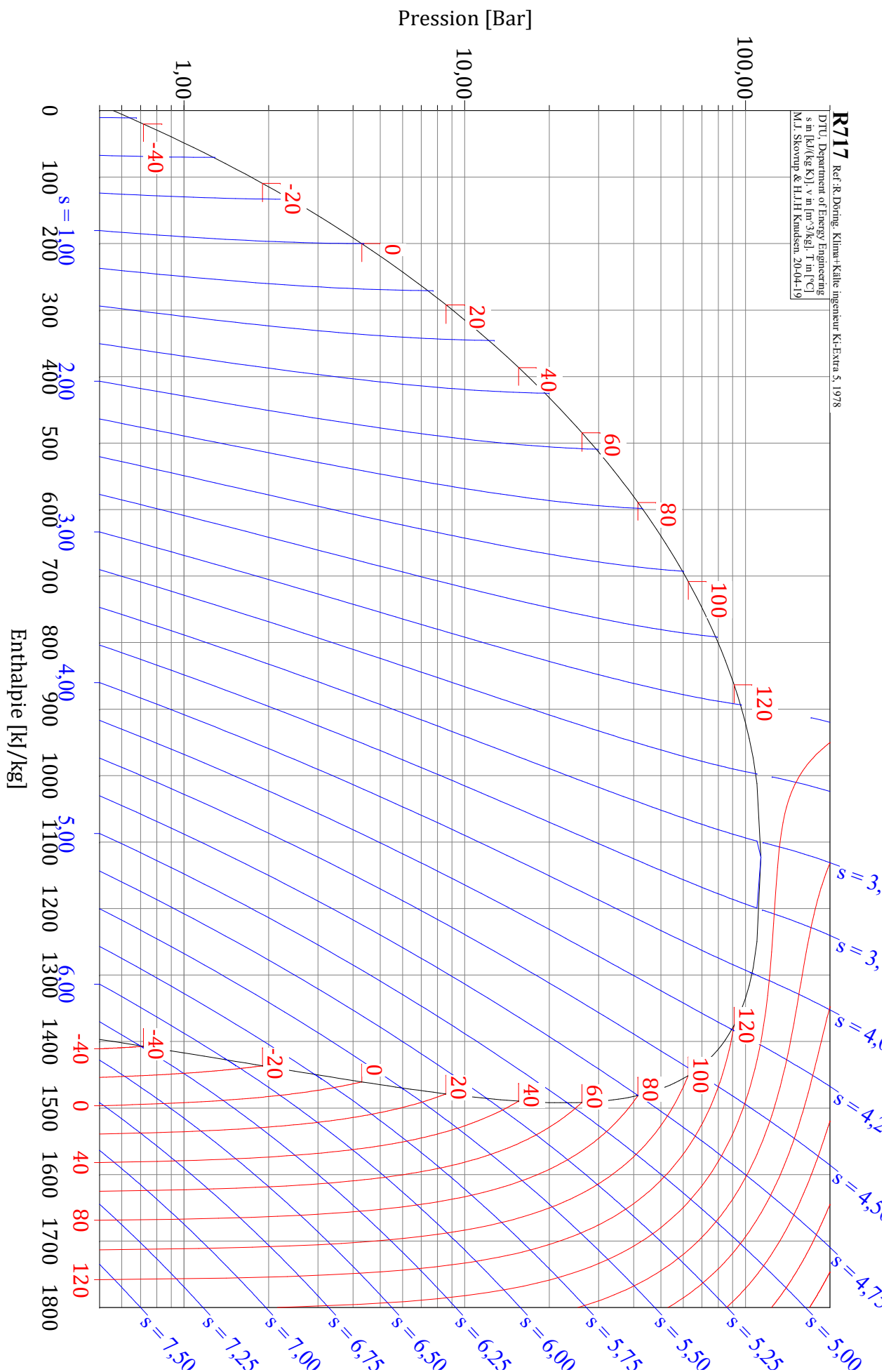


FIGURE 1 – Diagramme (P, h) de l'ammoniac

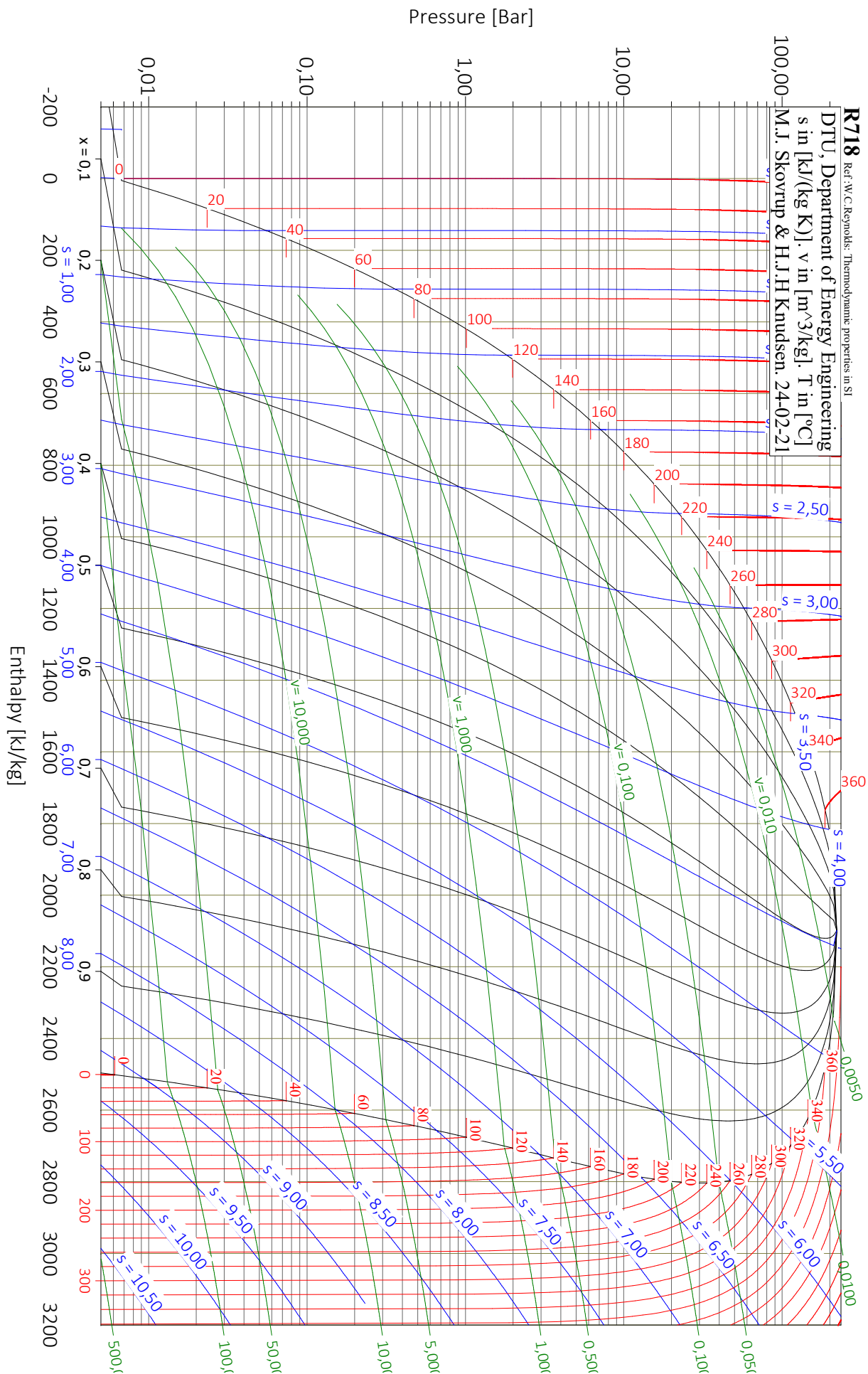


FIGURE 2 – Diagramme (P, h) de l'eau

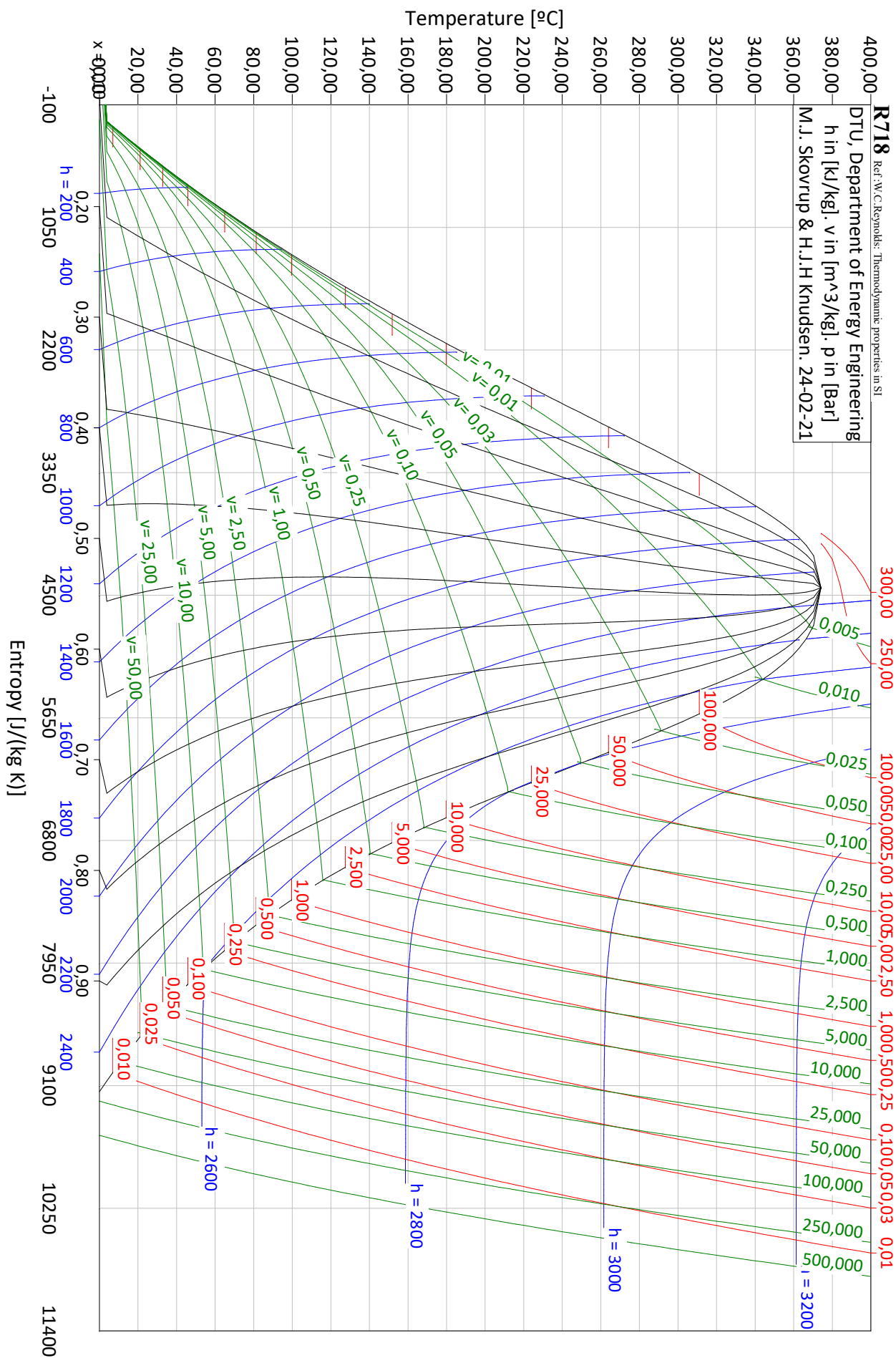


FIGURE 3 – Diagramme (T, s) de l'eau