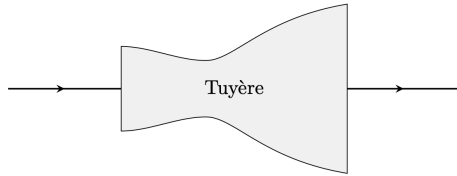


TD bilans

Principes « industriels »

1 — Tuyère

Un tuyère est un conduit de section variable permettant d'augmenter l'énergie cinétique d'un fluide.



Le passage du fluide étant rapide, on suppose son évolution adiabatique.

1. L'énergie cinétique du fluide étant négligeable en entrée, exprimer la vitesse de sortie v_s du fluide en fonction de son enthalpie massique h_e et h_s en entrée et en sortie.

Le moteur Vulcain a pour rôle de propulser l'étage principal de la fusée Ariane 5. La réaction fortement exothermique entre H_2 et O_2 produit de la vapeur d'eau à la pression $P_e = 115$ bar et à la température $T_e = 3300$ °C. Cette vapeur est expulsée au travers une tuyère avec le débit massique $D_m = 250$ kg · s⁻¹ où elle est accélérée, ce qui génère en réaction une force de poussée sur la fusée.



On modélise la vapeur d'eau comme un gaz parfait avec $c_p = 2,0 \times 10^3$ J/K⁻¹ · kg⁻¹ et $\gamma = 1,3$ indépendamment de la température.

2. Estimer la température T_s en sortie de la tuyère.
3. En déduire la vitesse v_s à laquelle les gaz sont éjectés lorsque la fusée est dans l'atmosphère.

2 — Pompe à chaleur air-eau

On s'intéresse à une pompe à chaleur utilisant le fluide R32. Elle sert à chauffer une maison possédant un chauffage basse température à 35 °C (plancher chauffant), sachant que la température extérieure est de 5 °C. Ce type de pompe à chaleur est appelé « PAC air-eau » : la source froide est l'air extérieur et la source chaude l'eau du circuit de chauffage.

Elle est constituée de quatre éléments : un évaporateur, un compresseur, un condenseur et un détendeur. On donne le cycle suivi dans le diagramme des frigorigènes.

1. Identifier les différentes étapes sur le cycle : compression, détente, échanges thermiques.
2. La pompe à chaleur pourrait-elle fonctionner avec le même cycle par grand froid (température extérieure $T_f = -10$ °C)?
3. Déterminer le transfert thermique échangé avec la source chaude (par unité de masse de fluide traversant).
4. Déterminer le travail massique reçu par le fluide dans le compresseur.
5. En déduire le coefficient de performance (COP).
6. Comparer avec le COP du cycle de Carnot.

3 — Pompe à chaleur

On considère une pompe à chaleur réelle où le fluide en écoulement permanent lent est le R410. On donne dans le diagramme des frigorigènes (p en ordonnée en échelle logarithmique, h en abscisse) le diagramme pour cette pompe à chaleur destinée au chauffage d'un local.

On donne $h_3 = 423$ kJ · kg⁻¹; $h_4 = 477$ kJ · kg⁻¹ et $h_6 = 243$ kJ · kg⁻¹

1. Quelle est l'étape du cycle qui correspond à une détente de Joule-Kelvin (dite aussi opération de laminage réalisée dans un détendeur calorifugé)?
2. Dans quelle étape le fluide caloporteur cède-t-il un transfert thermique à la source chaude?

Déterminer le transfert thermique reçu par le local pendant cette étape quand un kilogramme de fluide circule.

3. Dans l'étape 3 → 4, le fluide est comprimé dans un compresseur adiabatique. Déterminer l'efficacité de cette pompe à chaleur.
4. Sur le diagramme, les entropies sont données en kJ · kg⁻¹ · K⁻¹. Déterminer si la compression est réversible ou pas. Quelles sont, dans les étapes 4 → 6, 6 → 1 et 1 → 3, les étapes manifestement irréversibles et pourquoi?

4 — Navire brise-glace

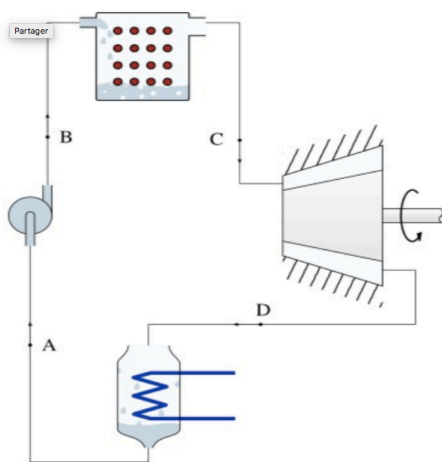
Dans un navire brise-glace, une installation permet de faire tourner les hélices en fabriquant de la vapeur dans

une chaudière puisant de l'énergie sur le circuit secondaire d'un réacteur nucléaire.

Le cycle de l'eau est basé sur un cycle de Rankine surchauffé, entre les pressions de 0,5 bar et 30 bar. Les différents organes du système sont schématisés ci après :

- A à B : pompe
- B à C : chaudière (formant de la vapeur surchauffée)
- C à D : turbine
- D à A : condenseur total

Hypothèses : l'eau en sortie du condenseur (D à A) est un liquide saturant, celle en sortie de la chaudière est surchauffée à 300 °C. On considère que la turbine est parfaitement isolée et isentropique, et que la pompe est isenthalpique.



1. Représenter le cycle de Rankine sur le diagramme des frigoristes de l'eau fourni.
2. Relever les valeurs de la pression p , de la température T , du titre en vapeur x et de l'enthalpie massique h pour chaque point.
3. Définir l'efficacité thermodynamique de l'installation. Déterminer sa valeur numérique.
4. On définit la consommation spécifique de vapeur comme la masse de vapeur ayant traversé la turbine lorsque l'installation a généré 1 kWh d'énergie mécanique indiquée. La déterminer.

5 — Machine frigorifique

On considère une machine frigorifique dans laquelle un fluide frigorigène, le R134a, parcourt le cycle suivant :

- 1 → 2 : initialement à la température de -20 °C sous la pression de vapeur saturante correspondant à une température -30 °C, le fluide subit une compression adiabatique supposée réversible dans le compresseur jusqu'à la pression $P_{hp} = 10$ bar ;
- 2 → 3 : le fluide traverse alors le condenseur dans lequel il subit une transformation isobare l'amenant à la température de 30 °C ;

- 3 → 4 : le fluide subit ensuite une détente adiabatique dans le détendeur jusqu'à la pression P_{bp} ;
- 4 → 1 : le fluide traverse alors l'évaporateur dans lequel il subit une transformation isobare le ramenant à l'état 1.

On considérera le fluide en écoulement stationnaire et on négligera les variations d'énergies cinétique et potentielle.

1. Placer les points 1, 2, 3 et 4 sur le diagramme fourni et en déduire les pressions, températures et enthalpies massique à chacun de ces points. On donnera aussi le titre en vapeur lorsque le fluide se trouve dans un état diphasé.

2. Quel est l'intérêt d'amener le fluide au-delà de sa courbe de saturation au point 1 ? Même question pour le point 3.

Comment est modifié le cycle si la transformation dans le compresseur n'est pas réversible ?

3. Définir puis calculer l'efficacité de cette machine.

6 — Réfrigérateur à ammoniac

On considère un réfrigérateur à ammoniac (R717), constitué d'un compresseur, d'un condenseur, d'un détendeur et d'un évaporateur.

État 1 : le fluide est sous forme de vapeur juste saturante, à la pression $P_1 = 2,9$ bar et à la température

$$T_1 = -10\text{ °C}.$$

- 1 → 2 : le fluide passe dans le compresseur calorifugé lors d'une transformation réversible jusqu'à $P_2 = 10$ bar.
- 2 → 3 : le fluide passe dans le condenseur, subissant un refroidissement isobare jusqu'à l'état de liquide saturant.
- 3 → 4 : le fluide passe dans le détendeur calorifugé, d'où il ressort à la pression P_4 .
- 4 → 1 : le fluide subit une transformation isobare dans l'évaporateur, à l'issue de laquelle il se retrouve dans l'état 1.

Le diagramme enthalpique de l'ammoniac est donné en annexe.

1. Représenter le cycle sur le diagramme. En déduire la température

- T_2 en sortie du compresseur ;
- T_3 pendant le changement d'état dans le condenseur.

Déterminer la fraction massique x en vapeur à la sortie du détendeur.

2. Définir et calculer l'efficacité du réfrigérateur.

Calculer le rendement de ce réfrigérateur. Le cycle de Carnot correspondant sera pris avec les températures T_1 et T_3 .

3. Comment est modifié le cycle si la compression est irréversible? En déduire l'effet sur l'efficacité.
4. Ce dispositif est une machine thermique cyclique ditherme. Quel est le système étudié lorsque l'on applique les principes de la thermodynamique? Préciser les termes « cycliques » et « ditherme ». Que peut-on dire des valeurs des températures des thermostats pour ce réfrigérateur?

7 — Turbine à gaz

De la vapeur d'eau assimilée à un gaz parfait évolue dans une turbine horizontale de section constante $\Sigma = 1 \text{ m}^2$, munie d'une hélice. À l'extérieur, la température est constante, égale à $T_0 = 35^\circ\text{C}$. La vapeur est admise dans la turbine à la température $T_1 = 400^\circ\text{C}$ sous la pression $P_1 = 6,0 \text{ bar}$, et ressort à la température $T_2 = 100^\circ\text{C}$ sous la pression $P_2 = 1,0 \text{ bar}$. Le débit à travers la turbine vaut $D = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

On donne l'expression de l'entropie molaire d'un gaz parfait :

$$S_m(T, P) = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \ln \frac{T}{T_1} - R \ln \frac{P}{P_1} + S_m(T_1, P_1).$$

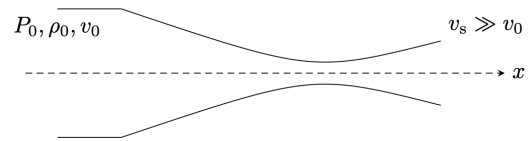
La masse molaire de l'eau est $M = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ et son coefficient isentropique $\gamma = C_{p,m}/C_{v,m} = 1,3$.

1. Rappeler l'expression des deux principes pour un fluide en écoulement stationnaire.
2. On néglige les variations d'énergie cinétique. Que dire des échanges de chaleur entre le gaz et l'extérieur? Montrer que la puissance cédée à la turbine est maximale dans l'hypothèse d'un écoulement adiabatique.
3. Calculer la variation d'entropie entre l'entrée et la sortie. Est-ce en contradiction avec l'hypothèse d'un écoulement adiabatique?

4. Calculer la puissance cédée à la turbine en la supposant réversible.
5. Calculer la vitesse du fluide à l'entrée et à la sortie de la turbine. Peut-on vraiment négliger la variation de l'énergie cinétique?

8 — Tuyère calorifugée

Une tuyère est une simple conduite de section variable, dans laquelle un gaz se détend tout en étant accéléré. On étudie l'écoulement d'un gaz parfait dans une tuyère calorifugée. On suppose négligeable la vitesse d'entrée du fluide par rapport à sa vitesse de sortie. Les grandeurs d'entrée de la tuyère sont indicées 0.



1. Montrer que $h(s) + \frac{1}{2} v(x)^2 = \text{cte}$ où h est l'enthalpie massique du gaz et v sa vitesse d'écoulement dans la tuyère.
2. En déduire que

$$v(x) = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{P_0}{\rho_0} - \frac{P(x)}{\rho(x)} \right)}$$

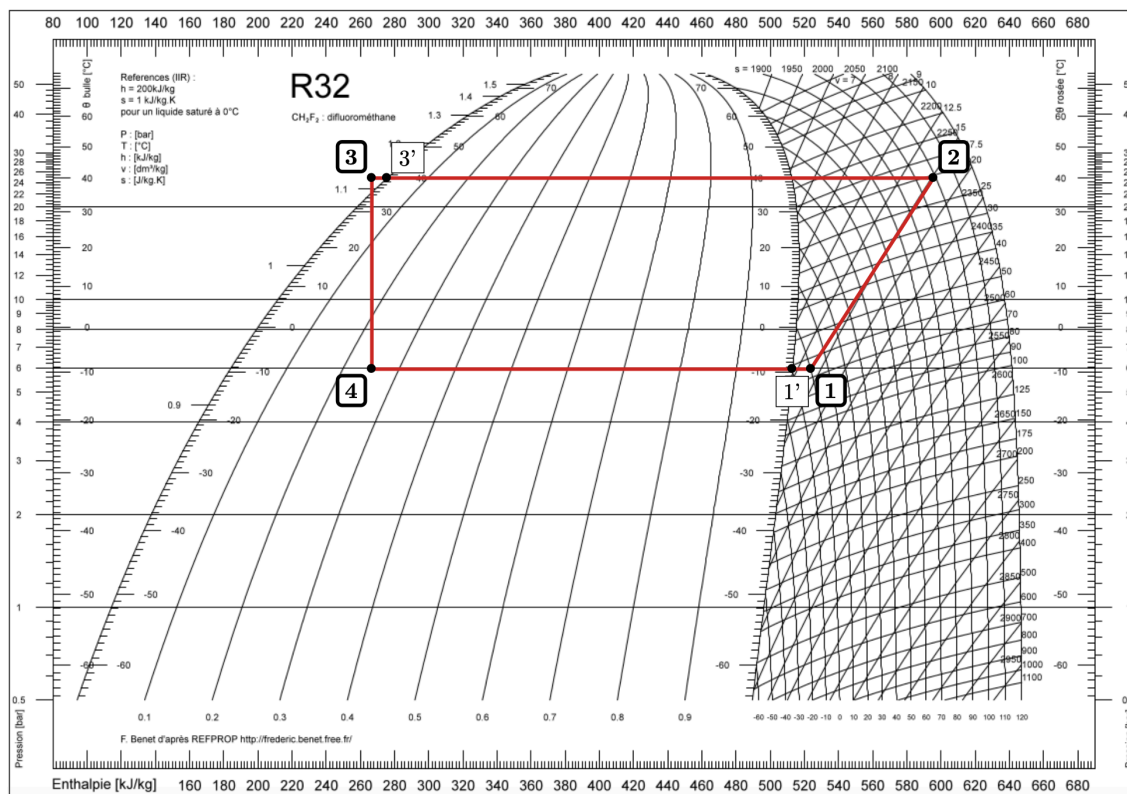
où γ est le coefficient isentropique du gaz.

3. Dans l'hypothèse d'un écoulement réversible, établir alors la loi de Barré de Saint Venant :

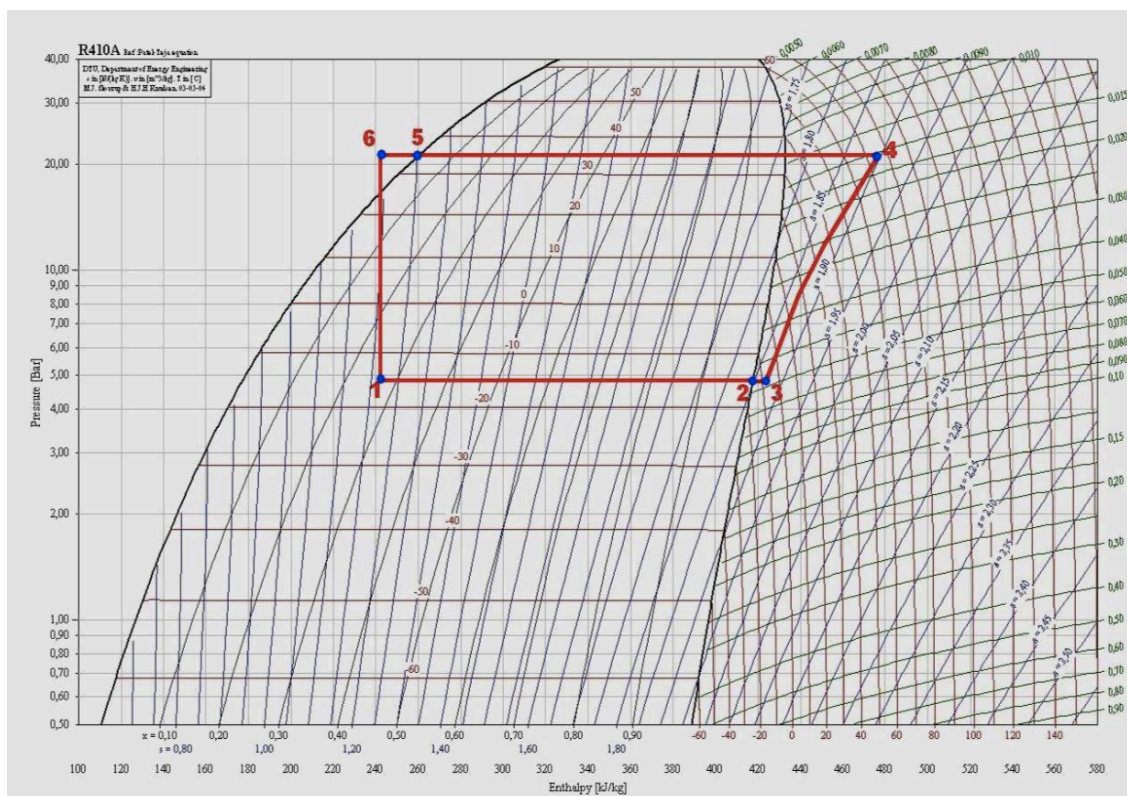
$$v(x) = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{P_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{P(x)}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}.$$

Figures

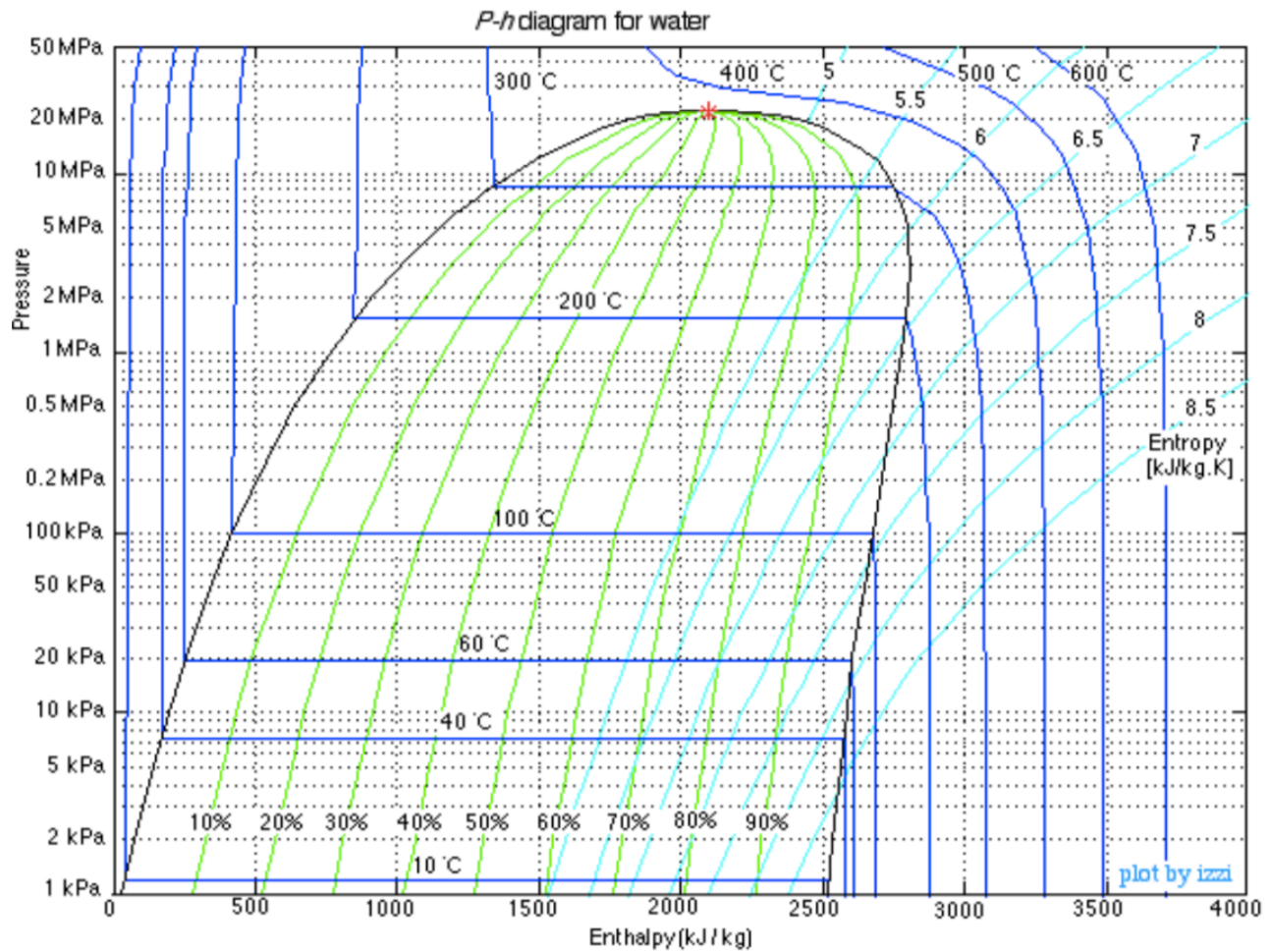
2 — Pompe à chaleur air-eau



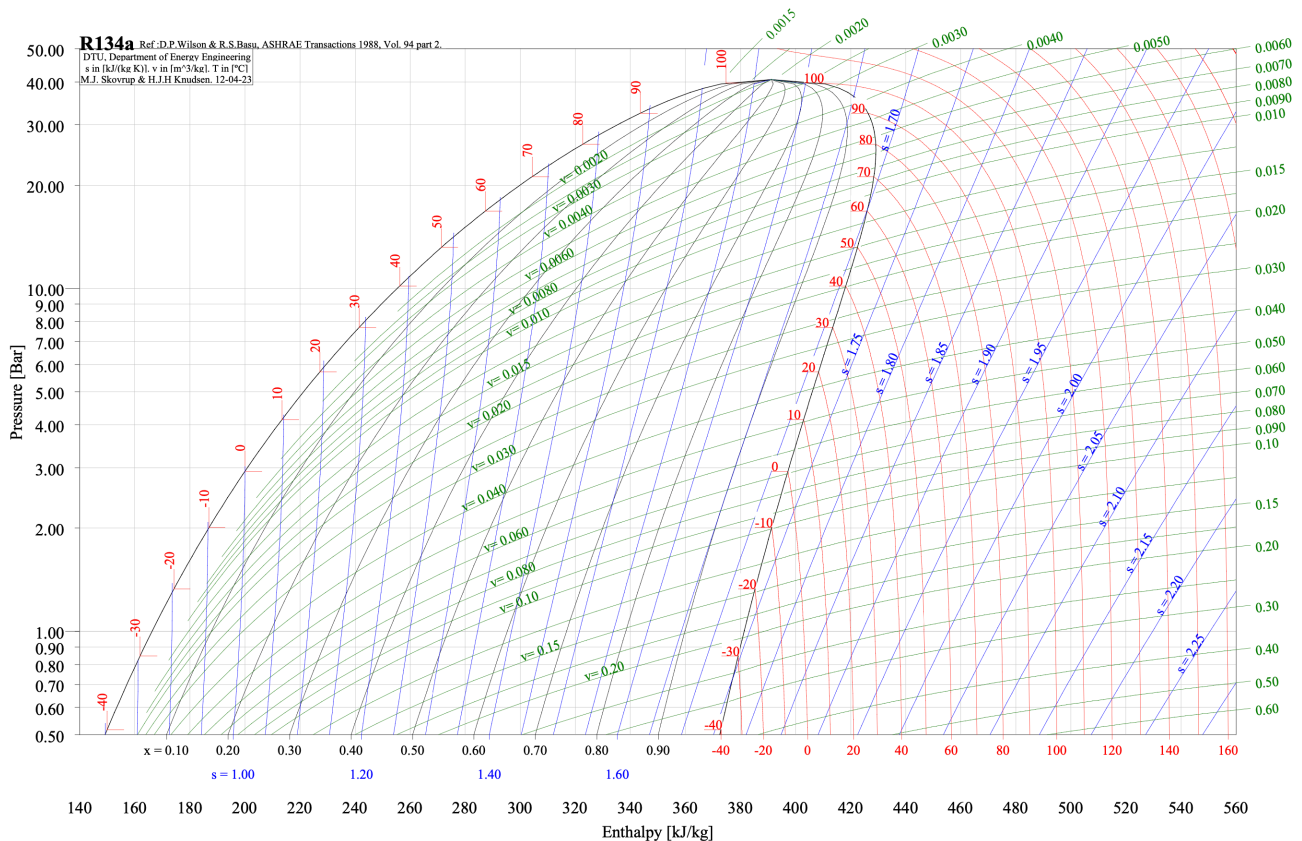
3 — Pompe à chaleur



4 — Navire brise-glace



5 — Machine frigorifique



6 — Réfrigérateur à ammoniac

