THERMODYNAMIQUE

8 – Systèmes ouverts
Échanges d'énergie par convection

Plan du chapitre

Programme officiel – Deuxième semestre – **Thème E – énergie : conversion et transfert**

Notions	Capacités exigibles
E.3. Formulation et application des principes de la thermodynamique à l'étude des machines thermiques. Premier principe de la thermodynamique pour l'écoulement d'un fluide en régime stationnaire dans un système muni d'une seule entrée et d'une seule sortie.	Démontrer et utiliser le premier principe de la thermodynamique pour l'écoulement d'un fluide en régime stationnaire, en termes de grandeurs massiques ou en termes de puissance, notamment pour l'étude d'un détendeur, d'un compresseur, d'une turbine, d'un échangeur thermique.
Diagramme (P, h) de fluides réels.	Exploiter un diagramme donnant la pression P (ou $\log P$) en fonction de l'enthalpie massique h d'un fluide réel pour l'étude de machines thermodynamiques réelles.

Remerciements

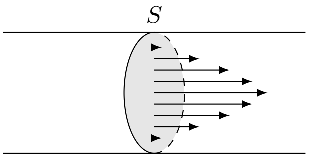
Je remercie Monsieur Pascal Archambault, professeur au lycée Saint-Louis à Paris, pour les exemples d'application des diagrammes $(h, \log P)$ utilisés dans ce cours.

1 Premier principe pour un fluide en écoulement

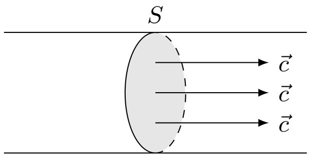
1.1 Débits

On étudie l'écoulement d'un fluide dans une portion de tuyau rectiligne selon $\vec{u}_x$ et de section S. On suppose :

- l'écoulement unidirectionnel = le vecteur vitesse est selon $\vec{u}_x$ en tout point d'une section droite ;
- l'écoulement unidimensionnel = la vitesse a la même valeur en tout point d'une section droite.



Unidirectionnel non unidimensionnel



Unidirectionnel et unidimensionnel

Débit de masse

Le débit de masse à travers la section S est la petite masse δm qui traverse cette section pendant l'intervalle de temps dt :

$$\boxed{D_m = \frac{\delta m}{\mathrm{d}t}} \qquad \text{en kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Lien entre le débit de masse et la vitesse

Si c est la vitesse du fluide de masse volumique ρ à travers la section droite S, alors :

$$D_m = \rho \times c \times S$$

Démonstration (à connaitre)

Débit de volume

Le débit de volume à travers la section S est le petit volume δV qui traverse cette section pendant l'intervalle de temps dt :

$$D_v = \frac{\delta V}{\mathrm{d}t} \qquad \text{en m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

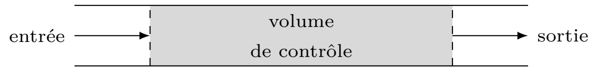
Lien entre le débit de masse et le débit de volume

Application 1 : débit d'un fleuve

Le débit moyen de l'Ienisseï, qui coule en Sibérie est d'environ $6000\,\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pendant les mois d'hiver et culmine à $77\,400\,\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en juin.
Calculer la masse d'eau douce que l'Ienisseï rejette dans l'Océan Arctique en décembre et en juin.
Comment expliquer une telle différence entre les mois d'hiver et d'été ?

1.2 Débits en régime stationnaire

On étudie le fluide inclus dans un **volume de contrôle** correspondant à une portion de tuyau, et comportant une entrée de fluide et une sortie de fluide.



Bilan de masse

La variation de la masse contenue dans le volume de contrôle pendant l'intervalle de temps $\mathrm{d}t$ est :

$$\mathrm{d}m = (D_{m\,\mathrm{e}} - D_{m\,\mathrm{s}})\ \mathrm{d}t$$

avec $D_{m\,\mathrm{e}}$ le débit de masse à l'entrée et $D_{m\,\mathrm{s}}$ le débit de masse à la sortie du volume de contrôle.

Démonstration (à connaitre)

Conservation du débit de masse en régime stationnaire

En régime stationnaire, le débit de masse est uniforme :

$$\boxed{D_{m\,\mathrm{e}} = D_{m\,\mathrm{s}}}$$

Démonstration (à connaitre)

Conséquence

En régime stationnaire :

$$\boxed{\rho_\mathrm{e} \times c_\mathrm{e} \times S_\mathrm{e} = \rho_\mathrm{s} \times c_\mathrm{s} \times S_\mathrm{s}}$$

Écoulement incompressible

On parle d'écoulement incompressible lorsque la masse volumique du fluide est la même en tout point de l'écoulement :

- écoulements liquides,
- écoulements gazeux tant que la vitesse reste faible (inférieure à la vitesse du son).

Conservation du débit de volume en écoulement stationnaire incompressible

En régime stationnaire, si l'écoulement est incompressible, la conservation du débit de masse implique que le débit de volume est uniforme :

$$D_{v\,\mathrm{e}} = D_{v\,\mathrm{s}}$$

Lien entre vitesse d'entrée et de sortie d'un écoulement stationnaire incompressible

Pour un écoulement stationnaire incompressible, avec c la vitesse et S la section :

$$\boxed{c_\mathrm{e} \times S_\mathrm{e} = c_\mathrm{s} \times S_\mathrm{s}}$$

Application 2 : lien entre les vitesses d'entrée et de sortie

Quel est le lien entre vitesse d'entrée c_e et vitesse de sortie c_s d'un fluide dans une portion de tuyau dans le cas d'un écoulement stationnaire incompressible ? Comparer c_e et c_s si la section d'entrée est 10 fois plus petite que la section de sortie. Même question si les sections d'entrée et de sortie sont égales.

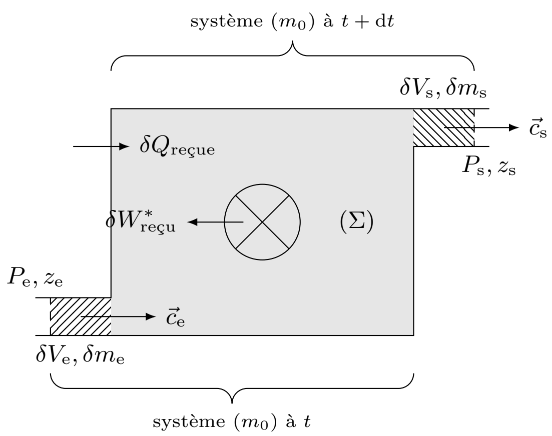
1.3 Premier principe appliqué à un écoulement stationnaire (dit « industriel »)

On considère un élément d'une machine au niveau duquel le fluide échange de l'énergie avec le monde extérieur selon :
- un transfert thermique,
- un transfert de travail utile dû à la présence d'une pièce mobile (hélice, piston).

Le fluide à l'intérieur de cet élément est de volume constant et constitue le système (Σ). Pendant un intervalle de temps $\mathrm{d}t$:
- il entre une masse $\mathrm{d}m_\mathrm{e}$ à la vitesse $\vec{c}_\mathrm{e}$ à l'altitude z_e et sous la pression P_e,
- il sort une masse $\mathrm{d}m_\mathrm{s}$ à la vitesse $\vec{c}_\mathrm{s}$ à l'altitude z_s et sous la pression P_s.

Système d'étude

Pour étudier un système ouvert, on considère une masse m_0 de fluide.
- À la date t, le système constitué de la masse m_0 est contenu dans l'union de (Σ) et du volume $\mathrm{d}V_\mathrm{e}$ qui va entrer dans (Σ) pendant $\mathrm{d}t$.
- À la date $t + \mathrm{d}t$, le système est contenu dans l'union de (Σ) et du volume $\mathrm{d}V_\mathrm{s}$ qui est sorti de (Σ) pendant $\mathrm{d}t$.



Premier principe appliqué à un écoulement stationnaire (« industriel »)

Pour un système ouvert (Σ) traversé par **écoulement stationnaire** unidimensionnel comportant une seule entrée et une seule sortie, le premier principe s'écrit :

$$\boxed{\left(h_\mathrm{s} + \frac{c_\mathrm{s}^2}{2} + gz_\mathrm{s}\right) - \left(h_\mathrm{e} + \frac{c_\mathrm{e}^2}{2} + gz_\mathrm{e}\right) = \left[h + \frac{c^2}{2} + gz\right]_\mathrm{e}^\mathrm{s} = w^*_\text{reçu} + q_\text{reçue}}$$

- h l'enthalpie massique,
- c la vitesse d'écoulement,
- z l'altitude,
- $w^*_\text{reçu}$ le travail massique reçu,
- $q_\text{reçue}$ le transfert thermique massique reçu.

Premier principe en puissance appliqué à un écoulement stationnaire

Pour un système ouvert (Σ) traversé par **écoulement stationnaire** unidimensionnel comportant une seule entrée et une seule sortie, le premier principe s'écrit :

$$\boxed{D_m \left(h_\mathrm{s} + \frac{c_\mathrm{s}^2}{2} + gz_\mathrm{s}\right) - D_m \left(h_\mathrm{e} + \frac{c_\mathrm{e}^2}{2} + gz_\mathrm{e}\right) = D_m \left[h + \frac{c^2}{2} + gz\right]_\mathrm{e}^\mathrm{s} = \mathcal{P}^*_{W\,\text{reçu}} + \mathcal{P}_{Q\,\text{reçue}}}$$

- D_m le débit de masse
- $\mathcal{P}_{Q\,\text{reçue}}$ la puissance thermique reçue.
- $\mathcal{P}^*_{W\,\text{reçu}}$ la puissance associée au travail utile reçu,

Démonstration (à connaitre)

1.4 Application à des dispositifs usuels en régime stationnaire

Dans tous les cas, on étudie un fluide en écoulement le long d'une conduite ou à travers un élément d'une machine.

Termes négligeables

Cas fréquents :
- Éléments de faible dimension : $\Delta e_p = [gz]_\mathrm{e}^\mathrm{s} \approx 0$.
- Écoulements lents : $\Delta e_c = \left[c^2/2\right]_\mathrm{e}^\mathrm{s} \approx 0$.
- Absence de pièces mobiles (hélice, arbre mobile, ...) : $w^*_\text{reçu} = 0$.
- Parois athermanes : $q = 0$.

Rappel sur la variation d'enthalpie

L'enthalpie peut varier :
- sous l'effet d'une variation de température : $\Delta h = c_p \Delta T$ (gaz) ou $\Delta h = c\Delta T$ (liquide),
- sous l'effet d'un changement d'état : $\pm\Delta h_\text{vap}$.

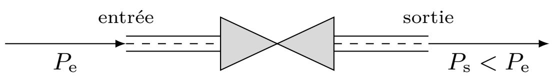
Application 3 : termes négligeables

On considère un élément d'une machine à travers lequel s'écoule un fluide de capacité thermique massique $c_p = 1\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$. Entre l'entrée et la sortie, la température varie de $100\,\mathrm{K}$, la vitesse du fluide varie de $10\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ à $1\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ et l'altitude varie de $1\,\mathrm{m}$. Évaluer les ordres de grandeur des variations d'enthalpie, d'énergie cinétique et d'énergie potentielle. Conclure.

1.4.1 Éléments sans pièce mobile

Détendeur

Un détendeur est un dispositif dont les parois sont fixes et qui ne contient aucune pièce mobile mais qui présente un obstacle à travers lequel un fluide s'écoule : vanne, paroi poreuse. La pression du fluide à la sortie de l'obstacle est inférieure à celle à l'entrée.



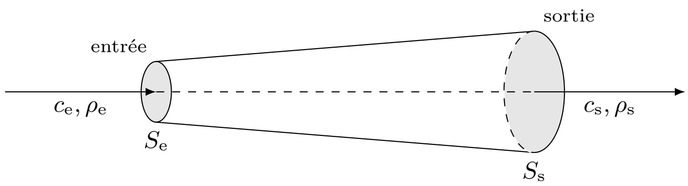
Exemple du détendeur isenthalpique

Un gaz circule avec un débit de masse $D_m = 3{,}0\,\mathrm{kg\cdot s^{-1}}$ à travers un détendeur isenthalpique horizontal, dont les sections d'entrée et de sortie sont identiques. L'écoulement est supposé unidimensionnel et incompressible.

Que dire de la température du fluide lors de la traversée du détendeur ?
Quelle est la puissance thermique reçue par le gaz lors de la traversée du détendeur ?

Conduite de section variable

Une conduite de section variable est telle que la section d'entrée est différente de la section de sortie. Elle ne contient aucune pièce mobile.



Exemple d'une conduite calorifugée horizontale

Un gaz parfait ($c_p = 1{,}0\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$) s'écoule dans une conduite horizontale de section variable : la section d'entrée est $S_\mathrm{e} = 20\,\mathrm{cm}^2$ et la section de sortie est $S_\mathrm{s} = 50\,\mathrm{cm}^2$. Au niveau de cette conduite, il n'y a aucune pièce mobile, les parois sont rigides et athermanes. Le débit de masse à l'entrée est $D_m = 2{,}0\,\mathrm{kg\cdot s^{-1}}$. La masse volumique du gaz est $\rho_e = 25\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$ à l'entrée. On suppose l'écoulement unidimensionnel, stationnaire et quasiment incompressible.

Quel est le débit de masse à la sortie ?
Calculer les vitesses à l'entrée et à la sortie.
Calculer la variation de température du gaz entre la section d'entrée et la section de sortie.

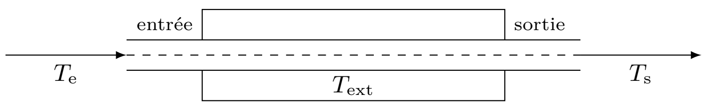
Application 4 : conduite d'altitude variable

On considère un écoulement d'eau, supposée incompressible, dans une conduite de section constante dont les parois sont fixes et calorifugée. L'entrée de la conduite se trouve 120 m plus haut que la sortie. Estimer la variation de température de l'eau. Conclure.

Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c = 4{,}18\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$
Accélération de la pesanteur : $g = 9{,}8\,\mathrm{m\cdot s^{-2}}$

Échangeur thermique

On appelle échangeur thermique un dispositif d'échange d'énergie thermique entre un fluide en écoulement et le monde extérieur. L'échangeur ne contient pas de pièce mobile et le transfert thermique se fait par diffusion passive à travers les parois.



Chauffage d'un liquide

Un tuyau horizontal de section constante est parcouru par de l'eau avec un débit de volume $D_v = 100\,\mathrm{mL\cdot min^{-1}}$. Le tuyau passe dans un bain dont la température est fixe et vaut 80 °C. La température de l'eau à l'entrée du bain est 20 °C et elle est égale à la température du bain à la sortie.

Calculer la puissance thermique reçue par l'eau en écoulement au contact du bain en régime stationnaire.

Exemple d'un évaporateur

On considère un évaporateur de faible dimension. De l'ammoniac liquide à sa température de vaporisation T_{vap} (sous la pression de fonctionnement) arrive à l'entrée de l'évaporateur ; à la sortie, la totalité de l'ammoniac est sous forme vapeur à la même température. On néglige les variations d'énergie potentielle et cinétique. Calculer l'énergie massique reçue par l'ammoniac dans l'évaporateur.

Enthalpie massique du liquide saturant à T_{vap} : $h_{\mathrm{liq}} = 67\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}}$
Enthalpie massique de la vapeur saturante à T_{vap} : $h_{\mathrm{vap}} = 1425\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}}$

Application 5 : condenseur

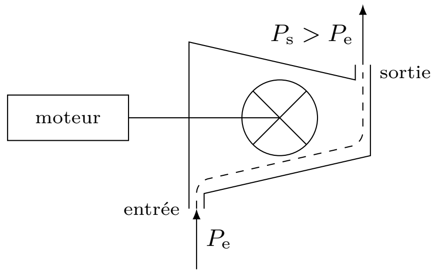
Un condenseur a pour rôle de faire passer de la vapeur d'eau, sous la pression de 2,0 bar et initialement à 120 °C (température d'ébullition de l'eau sous 2 bar), sous forme liquide sous la même pression et à la température de 100 °C. Calculer la puissance thermique que le condenseur doit pouvoir extraire pour atteindre cet objectif si le débit de l'eau est $D_m = 100\,\mathrm{kg\cdot min^{-1}}$. Calculer la puissance minimale que le condenseur doit pouvoir extraire si on veut liquéfier toute l'eau pour un même débit.

état physique	température	enthalpie massique
vapeur	120 °C	$2707\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}}$
liquide	120 °C	$508\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}}$
liquide	100 °C	$420\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}}$

1.4.2 Élément avec pièce mobile

Compresseur

Un compresseur est un dispositif dans lequel des pièces mobiles permettent d'augmenter la pression d'un fluide en écoulement. Le compresseur transfère du travail au fluide : $w^*_{\text{reçu}} > 0$.

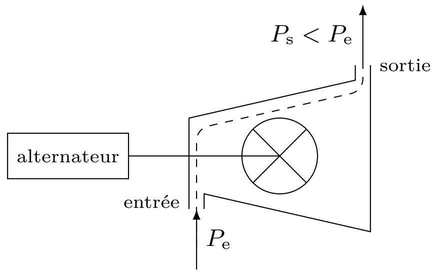


Exemple d'un compresseur adiabatique

De l'air, assimilable à un gaz parfait pour lequel $c_p = 1 \cdot 10^3\,\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$, est admis dans un compresseur à la pression P_1 et sous la température $T_1 = 20\,°\mathrm{C}$, et est expulsé sous une pression $P_2 = a \times P_1$. Le compresseur est suffisamment petit pour pouvoir négliger les variations d'altitude et de vitesse. Les parois sont athermanes, l'écoulement est supposé unidimensionnel et stationnaire.
Exprimer le travail massique fourni par le compresseur en fonction de T_1 et du taux de compression a, en admettant que le gaz vérifie la loi de Laplace : $T^\gamma \times P^{1-\gamma} = \text{cte}$, où $\gamma = 1,4$ est une caractéristique du gaz. Faire l'application numérique pour $a = 4$.

Turbine

Une turbine est un dispositif dans lequel des pièces mobiles sont mises en mouvement par un fluide en écoulement, pour faire tourner un arbre (par exemple d'un alternateur). Le fluide cède du travail à la turbine : $w^*_{\text{reçu}} < 0$.



Exemple d'une turbine adiabatique

Une turbine est alimentée avec de l'air ($c_p = 1 \cdot 10^3\,\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$) s'écoulant avec un débit de masse $D_m = 100\,\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$ constant. L'écoulement est unidimensionnel et stationnaire. Les pressions d'entrée et de sortie valent respectivement 200 bar et 20 bar. La température d'entrée est de 350 °C ; elle chute de 27 °C lors du passage de la turbine. La turbine est parfaitement calorifugée, et on suppose que les variations d'énergie potentielle et cinétique sont négligeables. Calculer la puissance fournie par l'arbre de la turbine à l'alternateur auquel il est relié.

2 Utilisation des diagrammes $\log P$ en fonction de h

2.1 Présentation des diagrammes $\log P$ en fonction de h

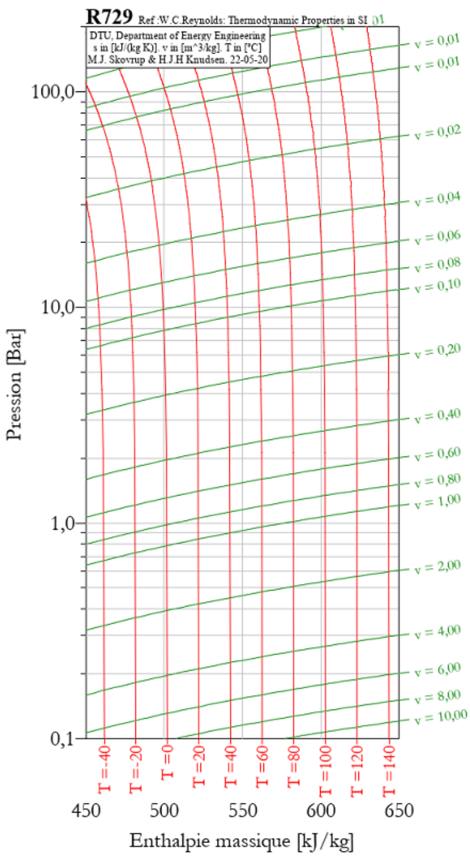
Diagrammes pression en fonction de l'enthalpie massique

Pour les fluides utilisés dans les machines thermiques, il existe des diagrammes donnant $\log P$ (ou P) avec P la pression, en fonction de l'enthalpie massique h. Sur ces diagrammes sont tracées :
- les isobares horizontales (même pression),
- les isenthalpes verticales (même enthalpie massique),
- les isothermes (même température),
- les isochores (même volume massique).
- les isotitres (même fraction massique de vapeur et de liquide) dans le domaine biphasique liquide - vapeur.

2.2 Utilisation des diagrammes $(h, \log P)$ pour l'étude des fluides

2.2.1 Cas d'un gaz

Diagramme $(h, \log P)$ de l'air entre $-20\,°C$ et $140\,°C$.



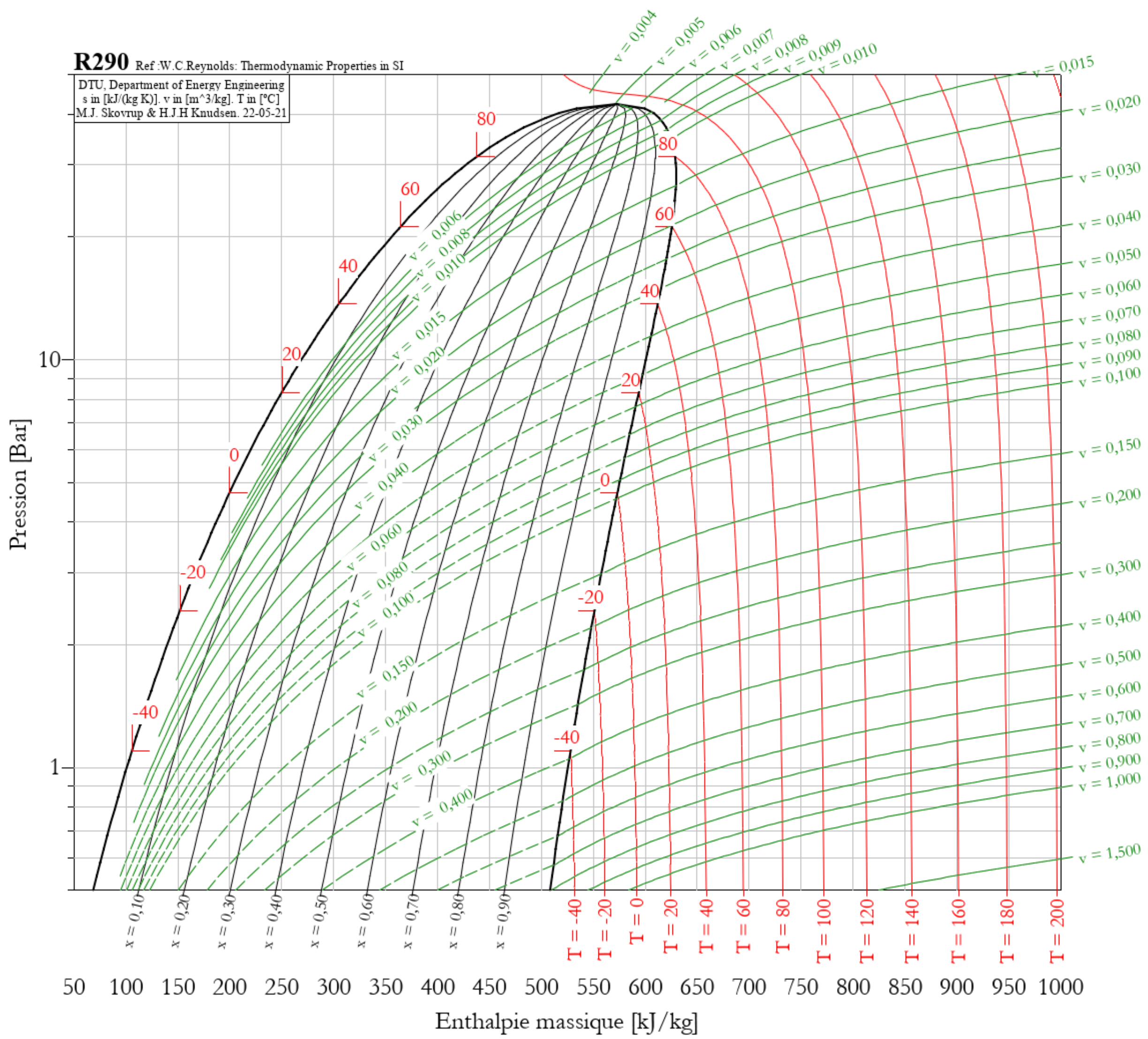
- Placer le point correspondant aux conditions ambiantes $20\,°C$ et $1\,\text{bar}$.
- L'air vérifie-t-il l'équation des gaz parfaits dans les conditions ambiantes ?
- L'air vérifie-t-il la deuxième loi de Joule dans les conditions ambiantes ?
- Estimer la capacité thermique molaire à pression constante autour des conditions ambiantes. Comparer à la valeur théorique pour un gaz parfait diatomique : $C_{pm} = 7R/2$.
- Estimer le domaine dans lequel l'air peut être assimilé à un gaz parfait.

2.2.2 Cas d'un mélange biphasique

On étudie le GPL, mélange de propane et de butane, qu'on assimile à du propane pur. Le propane est stocké dans le réservoir à 20 °C sous forme d'un mélange biphasique de titre en vapeur $x = 0,2$.

- Quelle est la pression dans le réservoir ?
- Quelle est la masse de propane stockée dans un réservoir de 50 L ?
- Le réservoir est conçu pour résister à une pression de 30 bar. Quelle est la température au-dessus de laquelle il y a risque d'explosion ? (Les réservoirs doivent être munis d'une soupape qui laisse échapper le GPL dès que la pression dépasse 25 bar).
- Entre la sortie du réservoir et les injecteurs, le GPL passe dans un détendeur qui l'amène à la pression ambiante, en suivant une isenthalpe. Quelle est la température à l'entrée de l'injecteur et quelle est le titre en vapeur ?

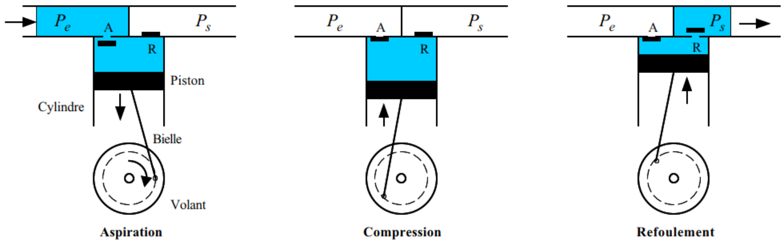
Diagramme $(h, \log P)$ du propane entre -60 °C et 200 °C.



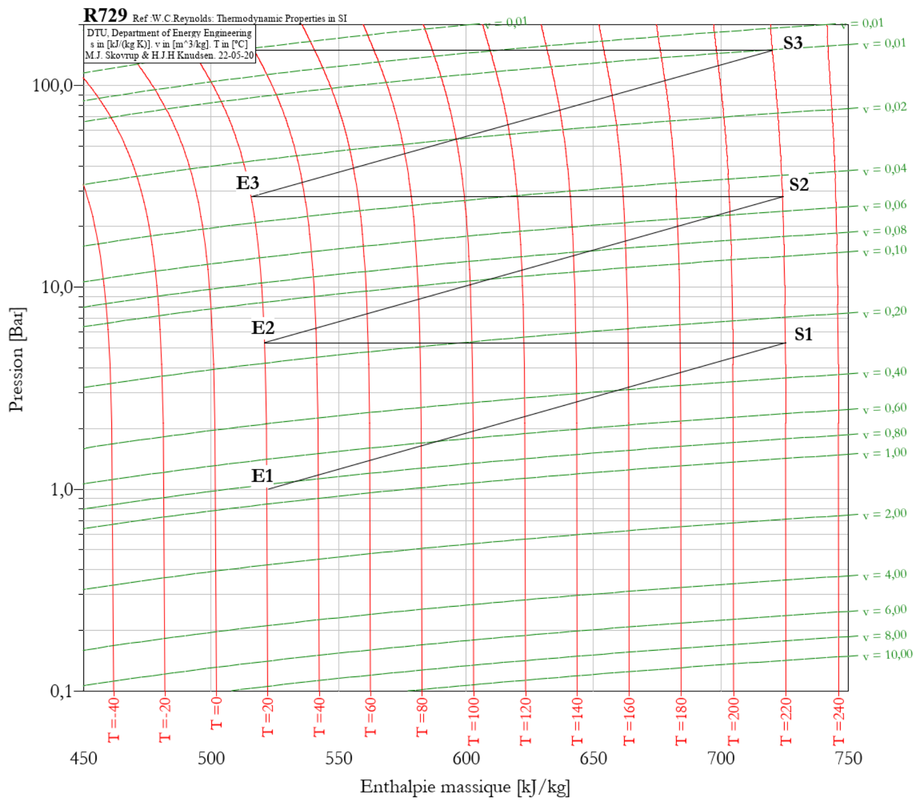
2.3 Utilisation des diagrammes $(h, \log P)$ pour l'étude d'un élément de machine

On étudie un compresseur à piston, qui marche en trois étapes :
- aspiration par la soupape d'admission,
- compression avec soupapes fermées,
- refoulement par la soupape d'échappement.

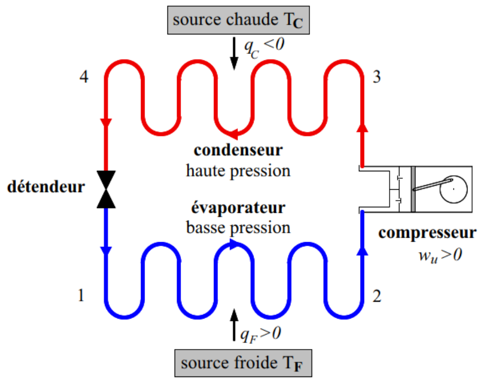
La compression s'effectue par passage dans trois compresseurs successifs (les trois étages), chacun d'eux ayant des parois parfaitement athermanes.



- Déterminer le taux de compression de chaque étage.
- Déterminer le travail que le compresseur fournit au gaz à chaque étage.
- Pourquoi ne fait-on pas un compresseur à un seul étage pour réaliser la compression représentée sur le diagramme ?

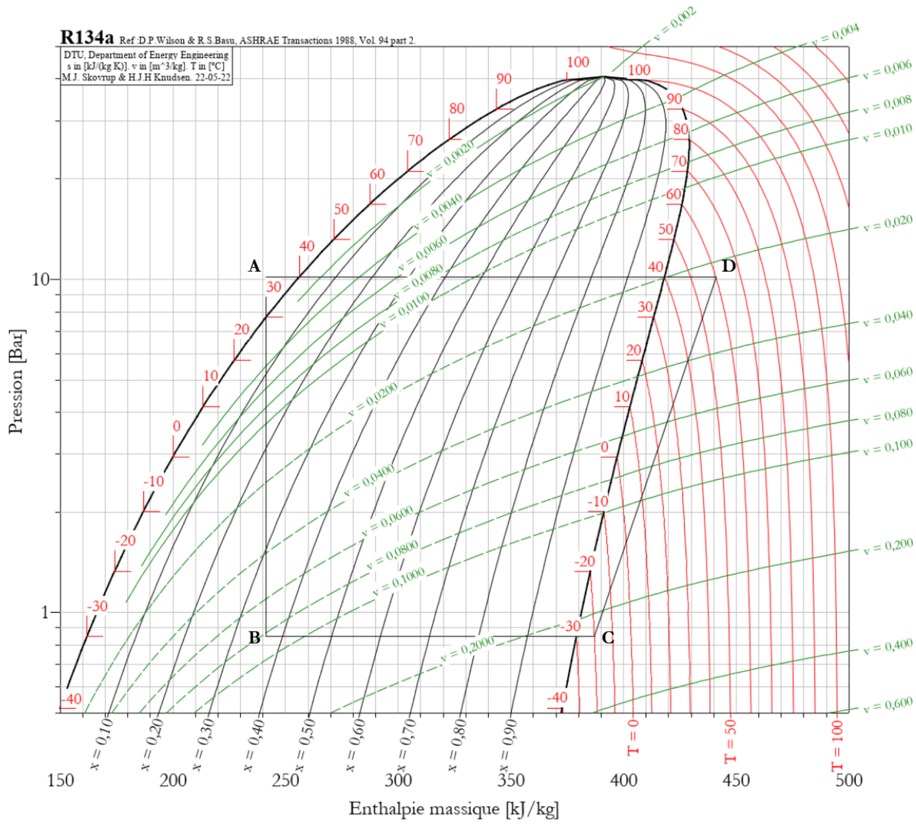


2.4 Utilisation des diagrammes $(h, \log P)$ pour l'étude du cycle d'une machine



On considère une machine frigorifique avec les caractéristiques suivantes :

- fluide frigorigène : 1,1,1,2-tétrafluoroéthane, soit le R134a dans la nomenclature usuelle ;
- température de la source froide : $T_F = -18\,°C$;
- température de la source chaude $T_C = 20\,°C$;
- cycle de fonctionnement en 4 étapes.



- Faire correspondre chaque étape du cycle avec le passage dans les différents éléments de la machine.
- Quelles sont les pressions dans l'évaporateur et le condenseur ? Calculer le rapport de compression.
- Quelle est la température du fluide au contact de la source froide ? Justifier cette valeur.
- Identifier la « surchauffe » du fluide à la sortie de l'évaporateur et son utilité.
- Quelle est la température à la sortie du compresseur ?
- Quel est l'état physique du fluide à l'entrée du détendeur ? Quelle est la température ? Identifier le « sous-refroidissement » du liquide.
- Quel est l'état physique à la sortie du détendeur ?
- Calculer les transferts thermiques avec la source froide et avec la source chaude.
- Calculer le travail utile du compresseur.
- Évaluer l'efficacité réelle de la machine frigorifique. Comparer avec l'efficacité de Carnot.
- Y a-t-il du travail perdu ?

Exercices

Application directe du cours

Exercice 1 : débits d'un écoulement d'eau

Un tuyau de diamètre constant $d = 2{,}5\,\mathrm{cm}$ conduit de l'eau liquide en régime stationnaire. La vitesse à l'entrée est $v = 2\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.

1. Calculer le débit de masse et le débit de volume à l'entrée.
2. Que vaut le déit de masse en sortie ? Que vaut le débit de volume en sortie ? Quelle est la vitesse en sortie ?
3. Exprimer l'énergie cinétique qui passe à travers une section S du tuyau pendant $\mathrm{d}t$.
4. Définir et exprimer le débit d'énergie cinétique dans le tuyau. Préciser son unité.
5. Comment peut-on récupérer une partie de la puissance correspondant à ce débit d'énergie cinétique ? Comment s'appelle un tel dispositif ?

Exercice 2 : chauffage d'eau par un échangeur thermique

On considère un tuyau horizontal transportant de l'eau liquide avec un débit de volume D_v. L'écoulement est unidimensionnel et en régime stationnaire. Le tuyau passe dans un échangeur thermique au contact duquel l'eau reçoit une puissance $\mathcal{P}_Q$. La température d'entrée de l'eau est $T_\mathrm{e} = 20\,°\mathrm{C}$.

1. Quel est le débit de masse dans le tuyau ? Justifier.
2. Calculer la puissance fournie par l'échangeur pour obtenir une température de sortie de $80\,°\mathrm{C}$.
3. Quelle température de sortie obtient-on si l'échangeur fournit une puissance de $400\,\mathrm{kW}$?
4. Comment doit-on régler le débit si on veut obtenir une température de sortie de $80\,°\mathrm{C}$ avec une puissance de $400\,\mathrm{kW}$ fournie par l'échangeur ?

Exercice 3 : vitesse d'éjection d'une tuyère

Un tuyère est un conduit dont la section de sortie est plus faible que la section d'entrée. La tuyère étudiée est horizontale et parfaitement calorifugée. De l'air entre à une vitesse négligeable, à la température de $1500\,\mathrm{K}$ et sa pression est de $53\,\mathrm{bar}$. L'air ressort à la température de $520\,\mathrm{K}$ et sa pression est de $1\,\mathrm{bar}$.

Exprimer la vitesse d'éjection du gaz, et faire l'application numérique.

Capacité thermique molaire à pression constante de l'air : $C_{pm} = 29{,}1\,\mathrm{J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}}$
Masse molaire moyenne de l'air : $29\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$

Exercice 4 : étude d'un compresseur suivi d'un échangeur

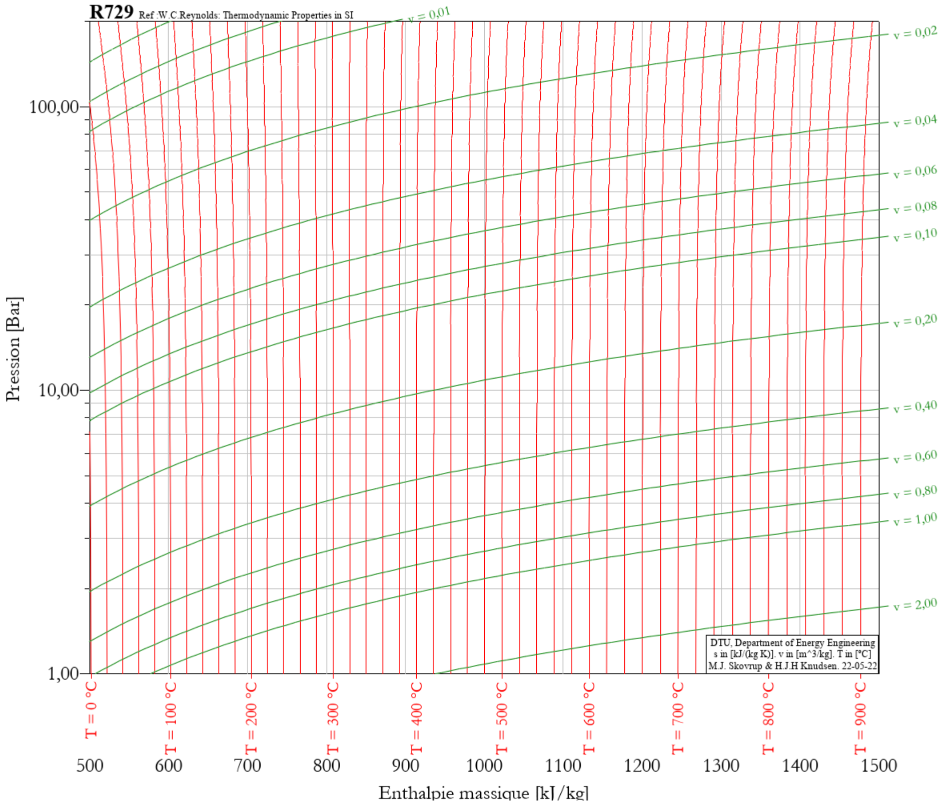
De l'air entre dans un compresseur sous une pression $P_\mathrm{e} = 15\,\mathrm{bar}$ et à la température $T_\mathrm{e} = 550\,\mathrm{K}$ avec un débit de masse $D_m = 6{,}0\,\mathrm{kg\cdot min^{-1}}$. À la sortie du compresseur, sa température est T' et sa pression P'. Il entre ensuite dans un échangeur thermique dont il sort sous la pression $P_\mathrm{s} = 150\,\mathrm{bar}$ et à la température $T_\mathrm{s} = 450\,\mathrm{K}$.

Le compression est parfaitement calorifugé, et on admet que la température et la pression y varie suivant la loi de Laplace : $T^\gamma \times P^{1-\gamma}$ reste constante. D'autre part, le passage dans l'échangeur est isobare.

1. Déterminer les valeurs de P' et T'.
2. Calculer la puissance mécanique que doit fournir le compresseur.
3. Calculer la puissance thermique échangée dans l'échangeur, et préciser son sens.

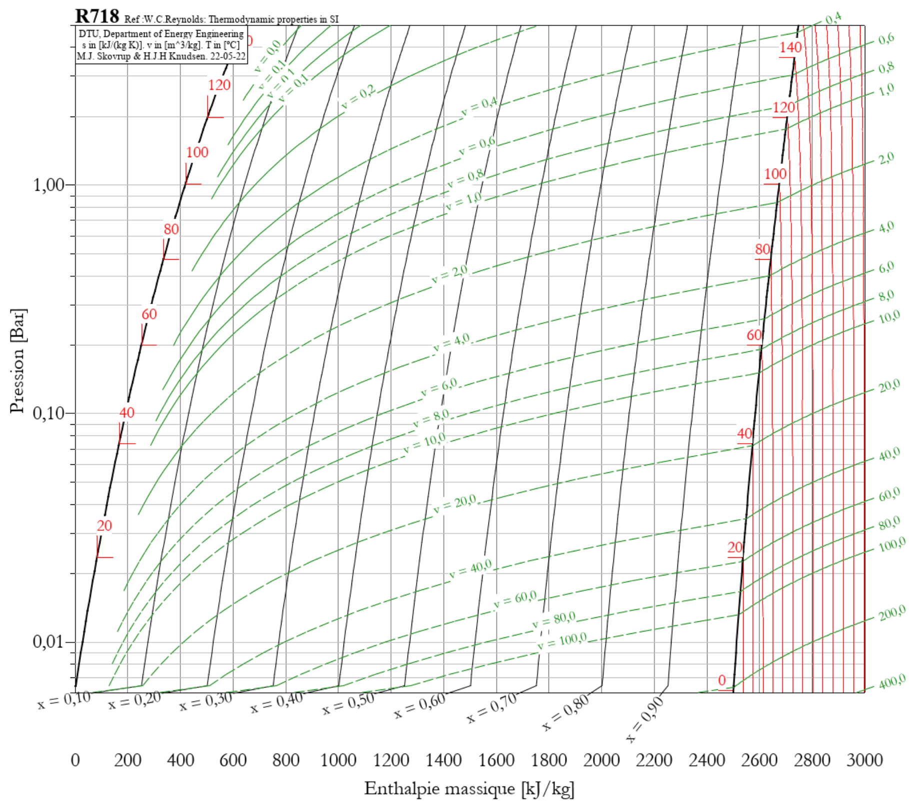
Capacité thermique molaire à pression constante de l'air : $C_{pm} = 29{,}1\,\mathrm{J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}}$
Masse molaire moyenne de l'air : $29\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$

4. Retrouver les valeurs des puissances en utilisant le diagramme $(h, \log P)$ de l'air donné ci-dessous.



Exercice 5 : utilisation des diagramme $(h, \log P)$ pour l'étude des changements d'état

On donne ci-dessous le diagramme $(h, \log P)$ de l'eau.



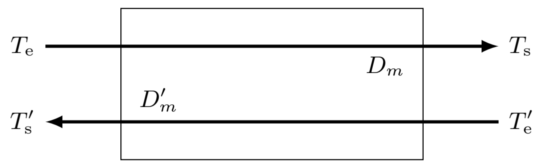
1. Identifier le domaine de la vapeur, le domaine du liquide et le domaine biphasique.

2. Quelle est la pression de vapeur saturante de l'eau à 100 °C ? à 20 °C ?
3. On considère un récipient entièrement rempli d'eau liquide. À quelle pression faut-il descendre pour observer une ébullition de l'eau si la température est de 20 °C ?
4. Quelle est l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau (chaleur latente massique de vaporisation de l'eau) à 80 °C ? En déduire l'enthalpie molaire de vaporisation (chaleur latente molaire de vaporisation).
5. On introduit 1 g d'eau liquide dans un récipient de 4 L et on porte le contenu à 60 °C. Quelle est la pression ? Quelle est la fraction de chacune des phases ?
6. Montrer sur un exemple (choisir une pression) que le théorème des moments s'applique avec l'enthalpie massique en abscisses [1].

Entrainement

Exercice 6 : échangeur à contre-courant (d'après banque PT)

Un échangeur à contre-courant consiste à mettre en contact thermique deux fluides circulant dans deux conduites séparées en sens opposés. Le premier fluide entre dans l'échangeur avec un débit de masse D_m et une température T_e ; il ressort avec une température T_s. Le second fluide entre dans l'échangeur avec un débit de masse D'_m et une température T'_e ; il ressort avec une température T'_s. Les parois extérieures de l'échangeur sont parfaitement calorifugées, et on néglige les variations d'énergie potentielle et d'énergie cinétique. Les deux fluides sont un liquide de même nature, dont la capacité thermique massique est c.



1. Choisir un système adapté au problème.
2. À l'aide du premier principe pour un système en écoulement, déterminer la température de sortie T'_s en fonction des paramètres du problème.
3. Faire l'application numérique pour $T_\mathrm{e} = 200\,°\mathrm{C}$, $T_\mathrm{s} = 65\,°\mathrm{C}$, $T'_\mathrm{e} = 60\,°\mathrm{C}$, $c = 4{,}18\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$ et $D'_m = 2D_m$.

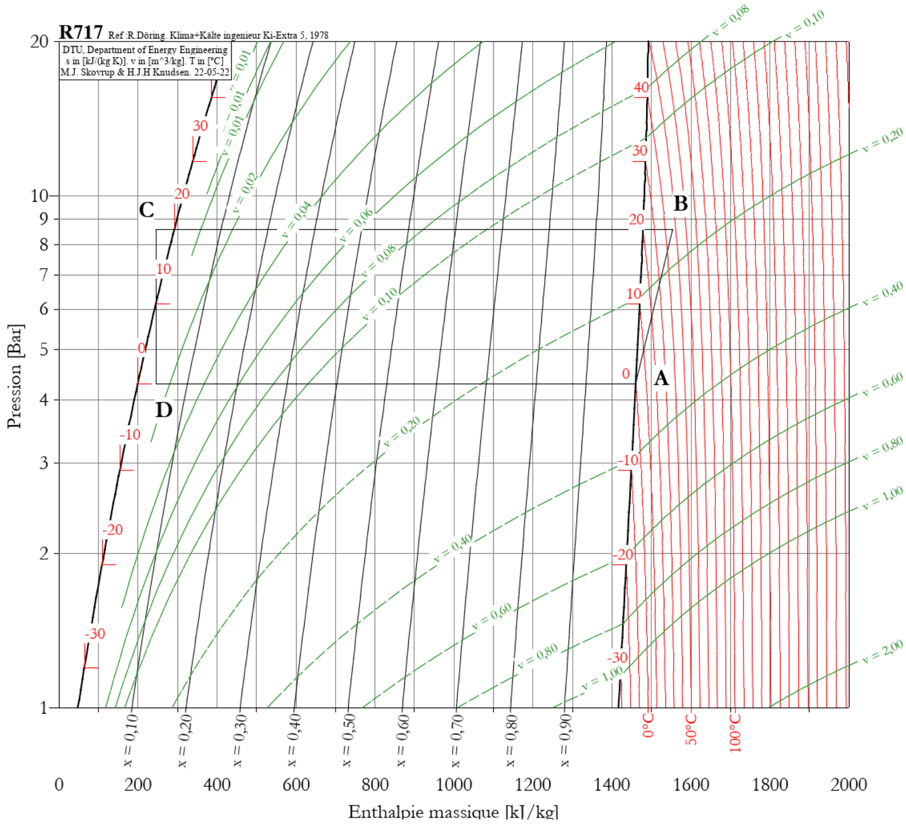
Exercice 7 : étude d'un climatiseur

Un climatiseur utilise de l'ammoniac comme fluide caloporteur. L'écoulement est supposé incompressible et en régime stationnaire ; on néglige les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle. Le cycle décrit par le fluide caloporteur est représenté sur le diagramme $(h, \log P)$ ci-dessous. Au cours du cycle, le fluide passe par :

- un compresseur où il est admis à la pression 4,2 bar et à la température de 0 °C,
- un échangeur isobare,
- un détendeur,
- un échangeur isenthalpique.

1. Associer chacun des éléments du circuit à une étape du cycle. Préciser son sens de parcours.
2. Évaluer les énergies thermiques massiques échangées et préciser le sens de l'échange.
3. Évaluer les travaux utiles massiques échangés, et préciser le sens de l'échange.
4. Calculer l'efficacité de la machine. Comparer à l'efficacité maximale, en admettant que le fluide sorte des échangeurs à une température égale à celle des sources.

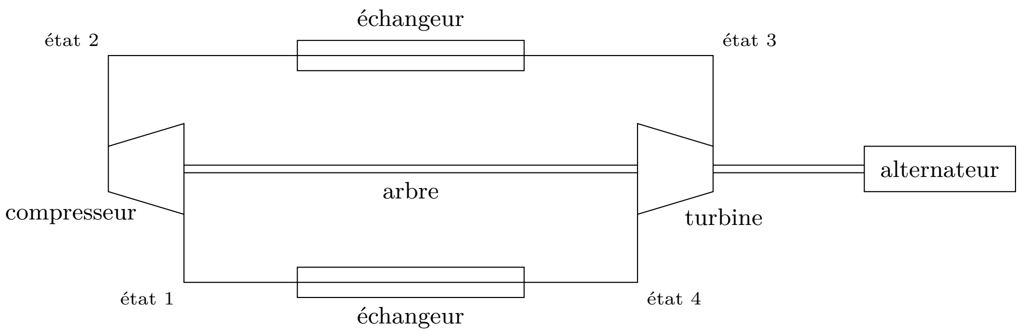
1. En réalité, le théorème des moments s'applique dans le domaine biphasique dans n'importe quel diagramme ayant une grandeur extensive massique ou molaire en abscisses.



Exercice 8 : rendement d'une turbine à gaz

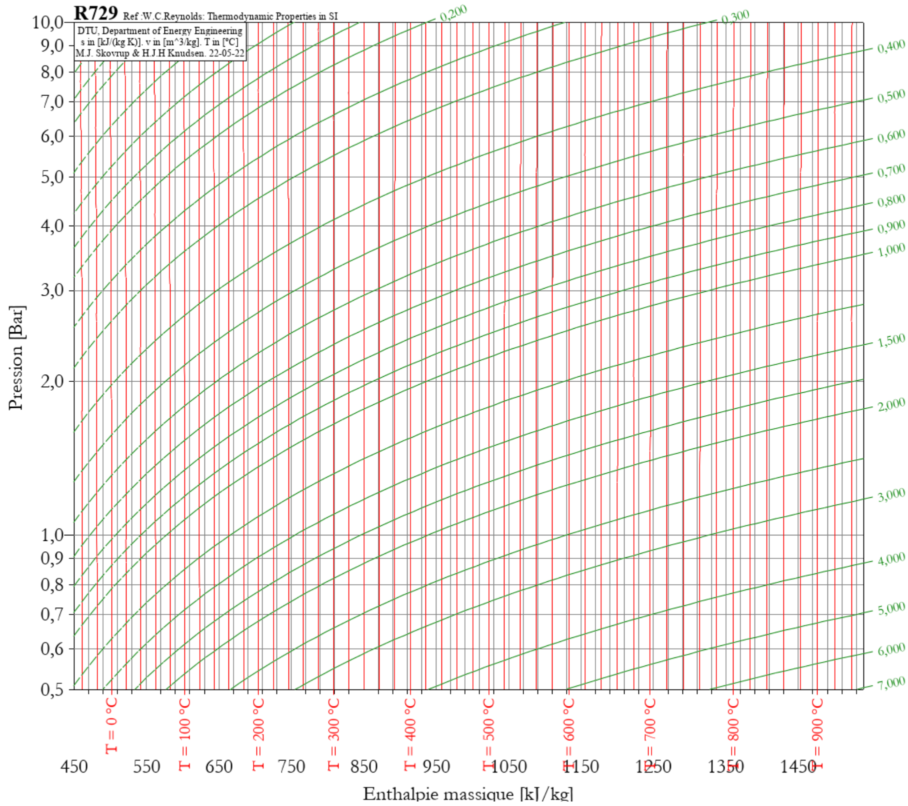
Les turbines à gaz sont des machines thermiques dont le rôle est de produire de l'électricité en utilisant l'énergie dégagée par la combustion de gaz naturel. Le fluide caloporteur est de l'air qui circule avec un débit de masse constant dans un circuit fermé, au cours duquel il passe dans les éléments suivants :

- un compresseur supposé parfaitement calorifugé,
- un échangeur isobare où sa température augmente,
- une turbine qui fait tourner un arbre relié à l'alternateur et au compresseur,
- un échangeur isobare.



On donne ci-dessous les températures et pression du gaz dans les états 1 à 4, et le diagramme $(h, \log P)$ de l'air.

état	1	2	3	4
T	293 K	530 K	1220 K	696 K
P	1 bar	8 bar	8 bar	1 bar



1. Quels termes peut-on négliger dans l'écriture du premier principe en système ouvert pour une telle machine ?
2. Placer les états 1 à 4 sur le diagramme $(h, \log P)$ de l'air. Préciser le sens de parcours du cycle.
3. Identifier la source chaude et la source froide. À quel endroit effectue-t-on la combustion du gaz naturel ?
4. Calculer les transferts thermiques massiques au niveau de chacune des deux sources.
5. Calculer le travail nécessaire au fonctionnement du compresseur par unité de masse du fluide caloporteur.
6. Calculer le travail reçu par l'alternateur par unité de masse du fluide caloporteur.
7. Calculer le rendement de cette turbine à gaz, et comparer avec le rendement maximal possible.

Exercice 9 : cycle de Rankine d'une centrale nucléaire

Les plus anciennes centrales nucléaires françaises fonctionnent le plus souvent selon la technologie dite « à eau pressurisée » (centrale REP pour réacteur à eau pressurisée). La puissance électrique produite au niveau de l'alternateur couplé à la turbine est $\mathcal{P}_e = 900\,\mathrm{MW}$, et on suppose que l'intégralité de la puissance fournie à la turbine est convertie en puissance électrique. Le réacteur fournit à l'eau du circuit secondaire une puissance thermique $\mathcal{P}_c = 2785\,\mathrm{MW}$ au niveau du générateur de vapeur.

1. Calculer le rendement réel de l'installation.

L'eau du circuit secondaire subit les transformations suivantes, reportées sur le diagramme $(h, \log P)$ ci-dessous et connu sous le nom de cycle de Rankine.

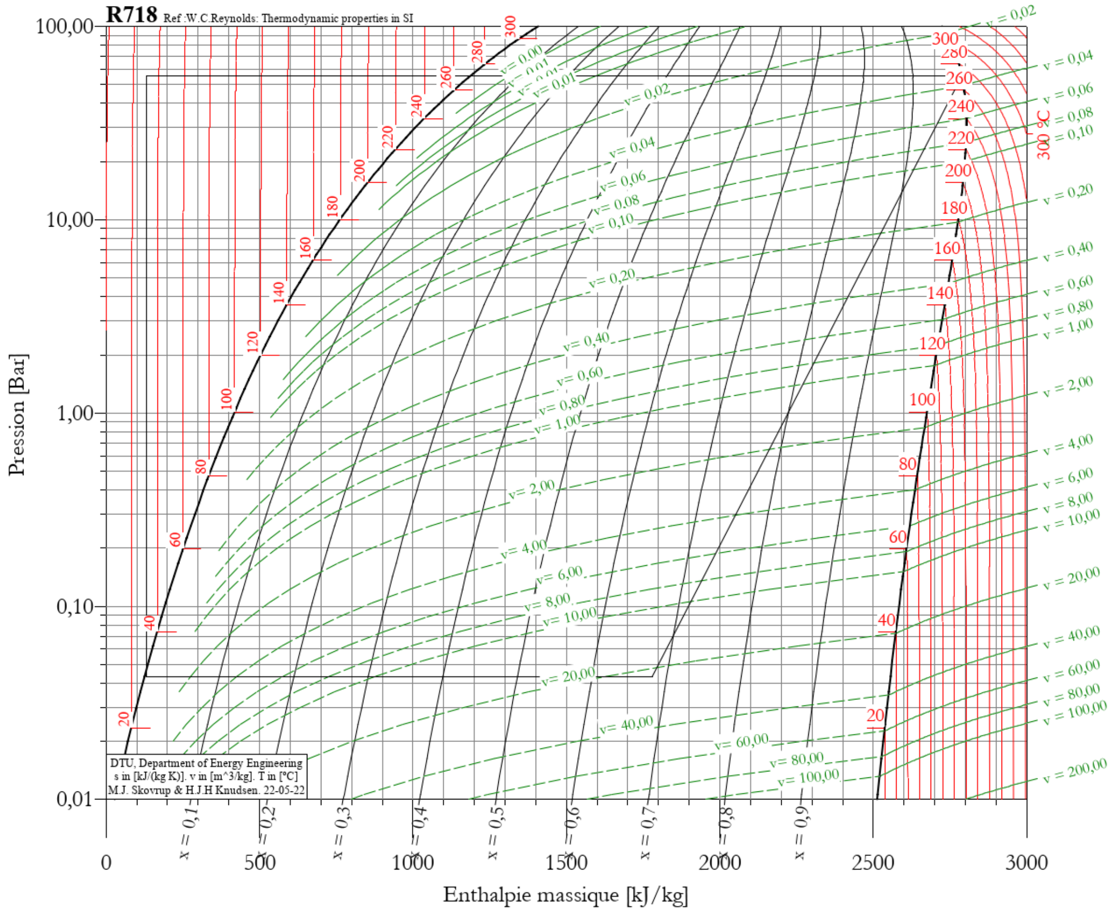
- échauffement isobare à 55 bar dans le générateur de vapeur jusqu'à un état de vapeur saturante,
- détente adiabatique dans la turbine jusqu'à une pression de 43 mbar menant à un mélange biphasique,
- liquéfaction isobare dans le condenseur,
- compression adiabatique au niveau de la pompe, dont le travail est négligeable par rapport aux autres échanges de travail.

L'eau du circuit secondaire subit des variations d'énergies cinétique et potentielle négligeable, et on se place en régime stationnaire.

2. Identifier chaque étape sur le cycle, et préciser le sens de parcours.
3. Quelle est la composition du mélange à la sortie de la turbine ? Quel est l'état de l'eau à l'entrée de la pompe ?

4. Déterminer le transfert thermique massique reçu dans le générateur de vapeur. Comparer cette valeur à celle qu'on aurait trouvé en faisant le calcul à partir de la capacité thermique massique de l'eau liquide et de l'enthalpie massique de vaporisation à 270 °C.
5. Déterminer le travail massique reçu par la turbine.
6. Calculer le rendement du cycle de Rankine. Conclure.

Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c = 4{,}18\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$
Enthalpie massique de vaporisation à 270 °C : $\ell_{\mathrm{vap}} = 1598\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}}$



Travaux dirigés

Exercice 1 : température d'un torrent

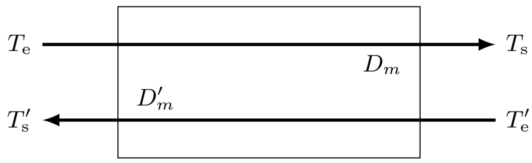
Un torrent prenant sa source en altitude descend avec un dénivelé de 1000 m et selon une forte pente. Au niveau de la source, la température de l'eau est égale à celle de l'air environnant. On admet que, du fait des frottements, la vitesse de l'eau reste quasiment constante, et on fait l'hypothèse que la descente de l'eau est quasiment adiabatique.

1. Comment peut-on justifier l'hypothèse d'adiabaticité ?
2. Déterminer la variation de température de l'eau entre la source et le bas de la pente.
3. Comparer la température de l'eau en bas de la pente à la température de l'air, sachant que la variation de température avec l'altitude dans l'air est d'environ $-6\,\mathrm{K\cdot km^{-1}}$. Conclure.

Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_{\mathrm{eau}} = 4{,}18\,\mathrm{J\cdot g^{-1}\cdot K^{-1}}$

Exercice 2 : échangeur à contre-courant

Dans un échangeur thermique à contre-courant, deux fluides circulent en sens opposés dans deux tuyaux au contact thermique l'un de l'autre. Le premier fluide, de capacité thermique massique à pression constante c_p, entre dans l'échangeur avec un débit de masse D_m à la température T_e. Le second fluide, de capacité thermique massique à pression constante c'_p, entre dans l'échangeur avec un débit de masse D'_m à la température T'_e.



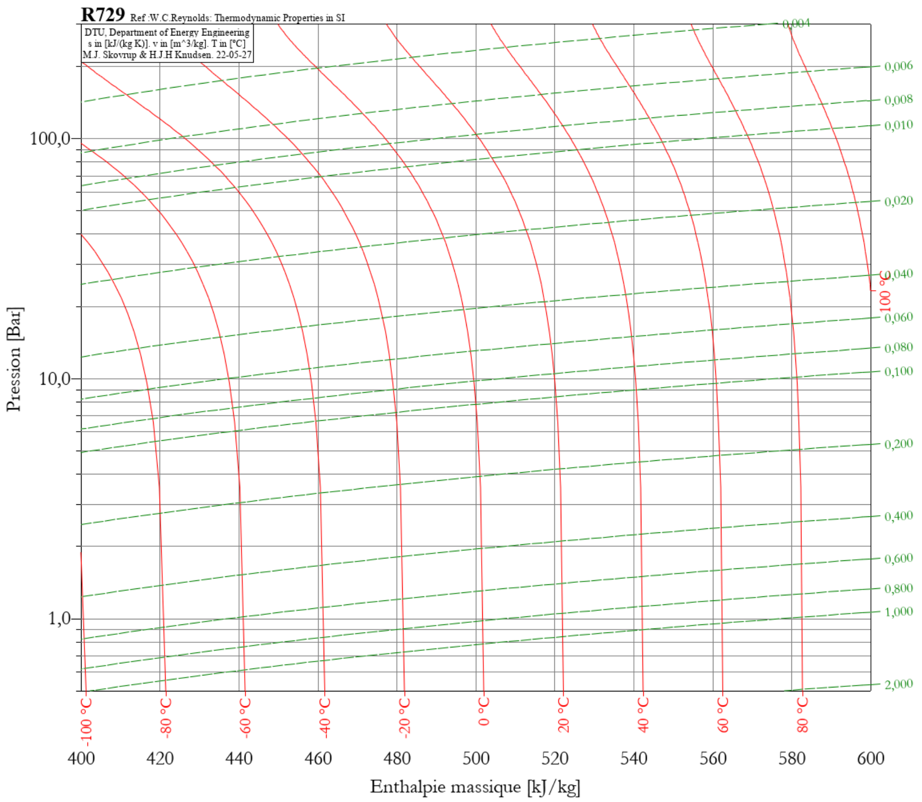
1. Déterminer une relation entre les températures des deux fluides T_s et T'_s à la sortie de l'échangeur, dans le cas où celui-ci est parfaitement calorifugé. Comment cette relation est-elle modifiée si l'échangeur présente des fuites thermiques de puissance $\mathcal{P}_{\mathrm{perte}}$?
2. En cas d'absence de perte, calculer T'_s si $T_\mathrm{s} = 40\,°\mathrm{C}$, pour des fluides identiques dans les deux tuyaux.
3. Sur quel paramètre peut-on jouer pour augmenter T'_s ?

$T_\mathrm{e} = 80\,°\mathrm{C}$	$T'_\mathrm{e} = 20\,°\mathrm{C}$
$D_m = 2\,\mathrm{kg\cdot s^{-1}}$	$D'_m = 8\,\mathrm{kg\cdot s^{-1}}$

Exercice 3 : détendeur d'une bouteille de plongée

En plongée sous-marine, les bouteilles contiennent de l'air stocké sous une pression de 200 bar environ. Pour une respiration sans danger, il est indispensable de faire passer l'air dans un détendeur à la sortie de la bouteille, pour le ramener à 1 bar. On suppose que l'air contenu dans la bouteille est initialement à la température de 20 °C.

1. En supposant que le passage à travers le détendeur se fait sans dissipation thermique, déterminer la température de l'air lorsqu'il est ramené à 1 bar. Conclure sur l'utilisabilité de ce dispositif.
2. Pourquoi est-il indispensable de ne remplir les bouteilles qu'avec de l'air dont on a éliminé toutes les traces d'eau ?
3. Déterminer le rapport entre les masses volumiques de l'air à la sortie et à l'entrée.



En réalité, le dispositif de détente comporte deux étages. Un détendeur primaire fait passer la pression de 200 bar à une pression intermédiaire de 10 bar. L'air circule dans un tuyau qui permet de ramener l'air à la température ambiante. Un détendeur secondaire, situé au niveau de la bouche du plongeur, fait descendre la pression à 1 bar.

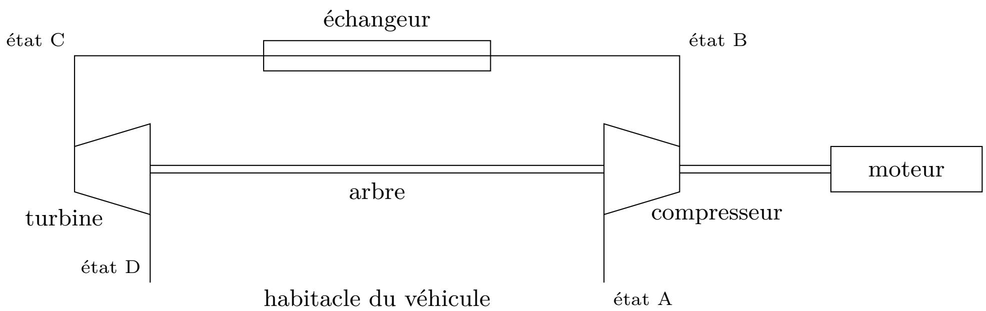
4. Le problème identifié à la première question est-il résolu ?

Exercice 4 : cycle d'un climatiseur de voiture

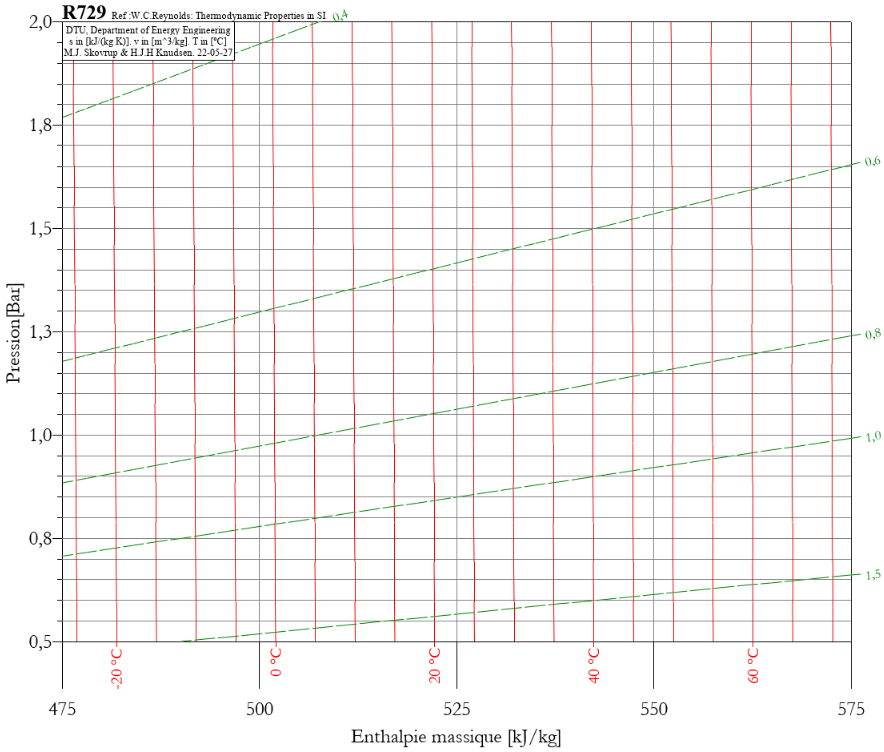
La climatisation d'une voiture fonctionne en régime stationnaire de sorte à maintenir la température de l'habitacle à 20 °C. De l'air est prélevé dans l'habitacle à une température de $T_A = 20\,°C$ et sous la pression de $P_A = 1\,\text{bar}$, et subit le cycle suivant.

- L'air passe dans un compresseur calorifugé dont il ressort sous $P_B = 1{,}4\,\text{bar}$ à la température $T_B = 52\,°C$.
- L'air passe ensuite à travers un échangeur isobare où il est au contact thermique de l'air extérieur dont la température est $T_{ext} = 35\,°C$.
- L'air est ensuite ramené à pression de 1 bar et à la température $T_D = 5\,°C$ par passage à travers une turbine dont les parois sont athermanes et rejeté dans l'habitacle.

Le compresseur est alimenté simultanément par la turbine du circuit de climatisation et par le moteur du véhicule.



1. Quelle est la température minimale que peut avoir l'air en C ?
2. Tracer sur le diagramme (h, P) le cycle décrit par l'air, en supposant qu'on atteint la température minimale au point C.



3. En assimilant l'air à un gaz parfait, exprimer la variation d'enthalpie massique entre D et A. Faire l'application numérique. Cette valeur est-elle cohérente avec le diagramme ?
4. La puissance thermique traversant la carosserie et les vitrages est de 120 W. En déduire le débit de masse que doit avoir le système pour maintenir la température de l'habitacle à sa valeur de consigne.
5. Calculer les puissances mécaniques échangées au niveau du compresseur et de la turbine, et préciser le sens des échanges.
6. En déduire la puissance que le moteur doit fournir au système de climatisation pour assurer son fonctionnement.
7. Définir et calculer l'efficacité du climatiseur.
8. Comparer la valeur obtenue à la valeur réelle, qui est autour de 3. Proposer une explication.

Capacité thermique massique à pression constante de l'air : $c_p = 1{,}0\,\mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$