TDT1 : Machines thermiques avec écoulement stationnaire

Savoirs

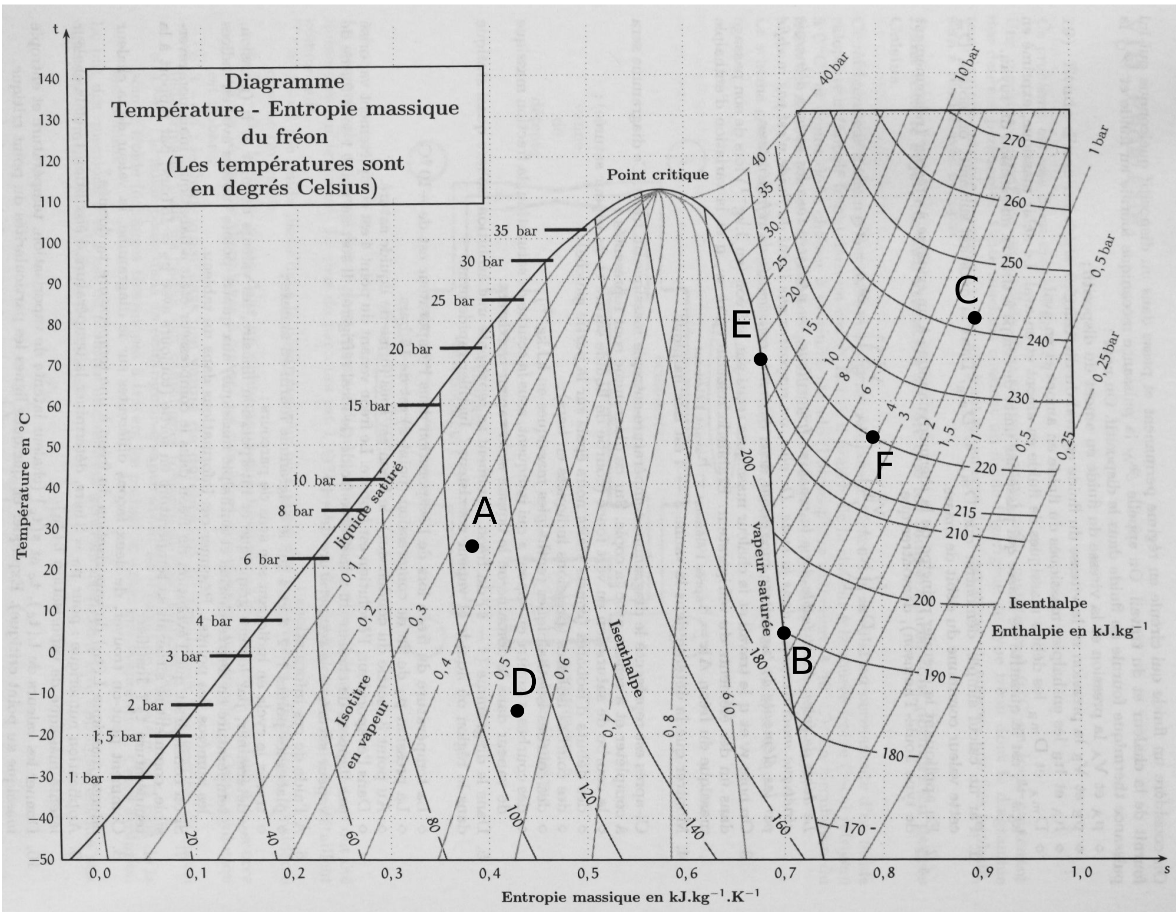
• Élément d'une machine thermique, écoulement stationnaire, débit massique. Principes de la thermodynamique pour un système ouvert en régime stationnaire (version énergie et version puissance).
• Utilisation de diagrammes (p, v), (p, h), (T, s) pour l'étude de machines thermiques avec écoulement stationnaire.

Savoir-faire

• Lecture et utilisation des diagrammes. Repérer zones liquide/mélange/gaz, interpréter la position relative de deux courbes iso- de même nature.
• Application et démonstration des principes de la thermo à un système ouvert en écoulement stationnaire.
• Exploiter les principes de la thermo sous forme différentielle. *Cf exo 2.*

Interro de cours

1. Donner les unités de l'énergie interne massique u, de l'entropie massique s et du débit massique D_m.
2. Donner les signes de w_u, q_c et q_F pour un moteur, un réfrigérateur et une pompe à chaleur. Définir un rendement pour le moteur et une efficacité pour les deux autres.
3. Exploitation de diagramme :



(a) Par lecture graphique directe, compléter le tableau suivant :

point	température T (°C)	entropie massique s (kJ.kg^{-1}.K^{-1})	pression p (bar)	enthalpie massique h (kJ.kg^{-1})	fraction massique en gaz x_g
A					
B					
C					

(b) C'est le diagramme du fréon. Extraire une valeur numérique du graphe permettant de justifier que ce n'est pas de l'eau.

(c) Déterminer la chaleur latente de vaporisation du fréon à 0°C.

(d) Sans utiliser de courbes isotitres, déterminer la fraction massique en gaz du point D :

1 Des éléments de machine avec écoulement

1.1 Compresseur

Un compresseur calorifugé horizontal amène de l'air initialement à 300 K, 1 bar jusqu'à une pression de 6 bar sans variation notable de vitesse. Il est entrainé par un moteur de puissance $1,5$ kW. Le débit massique est de $6,5$ g.s^{-1}. L'air est assimilé à un gaz parfait diatomique de masse molaire $M = 29$ g.mol^{-1}. Calculer la température de l'air à la sortie du compresseur.

Données : capacité thermique massique à pression constante d'un gaz parfait : $c_p = \dfrac{\gamma R}{M(\gamma-1)}$ avec $\gamma = \dfrac{c_p}{c_v} = 1,4$.

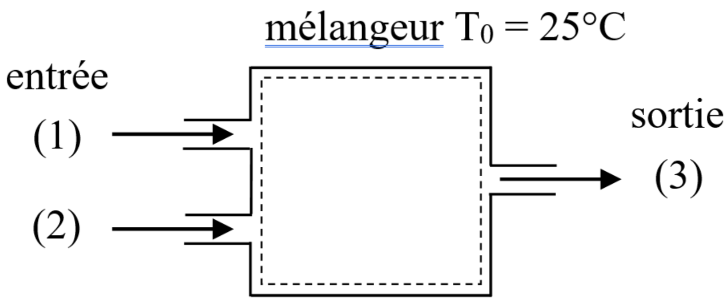
1.2 Tuyère

Un gaz parfait subit une détente dans une tuyère de section d'entrée S_1 et de section de sortie S_2. Le gaz entre à la vitesse v_1. La tuyère est considérée comme parfaite : le gaz y subit une transformation adiabatique réversible.

1. Que vaut la vitesse de sortie v_2 en fonction de v_1, S_1 et S_2.
2. Rappeler l'expression générale du premier principe de la thermodynamique dans le cas d'un système ouvert traversé par un fluide en régime d'écoulement permanent, en explicitant les différents termes.
3. Donner l'expression de la variation de température entre l'entrée et la sortie de la tuyère dans le cas d'un gaz parfait en écoulement permanent en fonction de v_1, S_1, S_2 et c_p (capacité thermique massique à pression constante).

1.3 Mélangeur

Un écoulement d'eau à la température $T_1 = 10$°C pénètre par l'entrée (1) d'un mélangeur calorifugé et isobare dans lequel règne une pression de 1 bar. Il s'y mélange avec un écoulement de vapeur d'eau à la température $T_2 = 150$°C entrant par l'entrée (2). L'écoulement résultant du mélange isobare des deux fluides émerge de la chambre à la température $T_3 = 50$°C. On note $T_0 = 25$°C la température du milieu extérieur autour du mélangeur, dans son environnement immédiat (elle est supposée uniforme et constante). On se place en régime permanent. Les variations d'énergies cinétique et potentielle du fluide sont négligées.



état	h (kJ/kg^{-1})	s (kJ.kg^{-1}.K^{-1})
1	42	0,151
2	2746	6,838
3	209,6	0,703

On donne les débits massiques des écoulements entrants : $D_{m1} = 0,938$ kg.s^{-1} ; $D_{m2} = 0,062$ kg.s^{-1}, ainsi que les valeurs thermodynamiques regroupées dans le tableau.

1. Calculer le débit en sortie.
2. Le mélangeur comporte plusieurs entrées ou sorties de différent débit. Comment réécrire le premier principe appliqué au mélangeur prenant en compte ces débits ? En déduire la puissance thermique cédée par le fluide à l'extérieur. Commenter.

3. De même, le deuxième principe se réécrit en prenant en compte les différents débits. Établir l'expression littérale et la valeur numérique du taux de création d'entropie $\dot{S}_{\text{cr}} = D_m s_{\text{cr}}$ dans le mélangeur. Commenter.

1.4 Compresseur adiabatique

Un écoulement d'air de débit massique $D_m = 9,0$ g.s^{-1} entre à l'état A ($p_A = 1$ bar; $T_A = 293$ K) dans un compresseur adiabatique et en sort à l'état B ($p_B = 5$ bar; T_B). La puissance délivrée par le compresseur en fonctionnement est $\mathscr{P} = 2,0$ kW. L'air est assimilé à un gaz parfait diatomique caractérisé par un coefficient $\gamma = 1,4$ et de masse molaire $M = 29$ g.mol^{-1}.

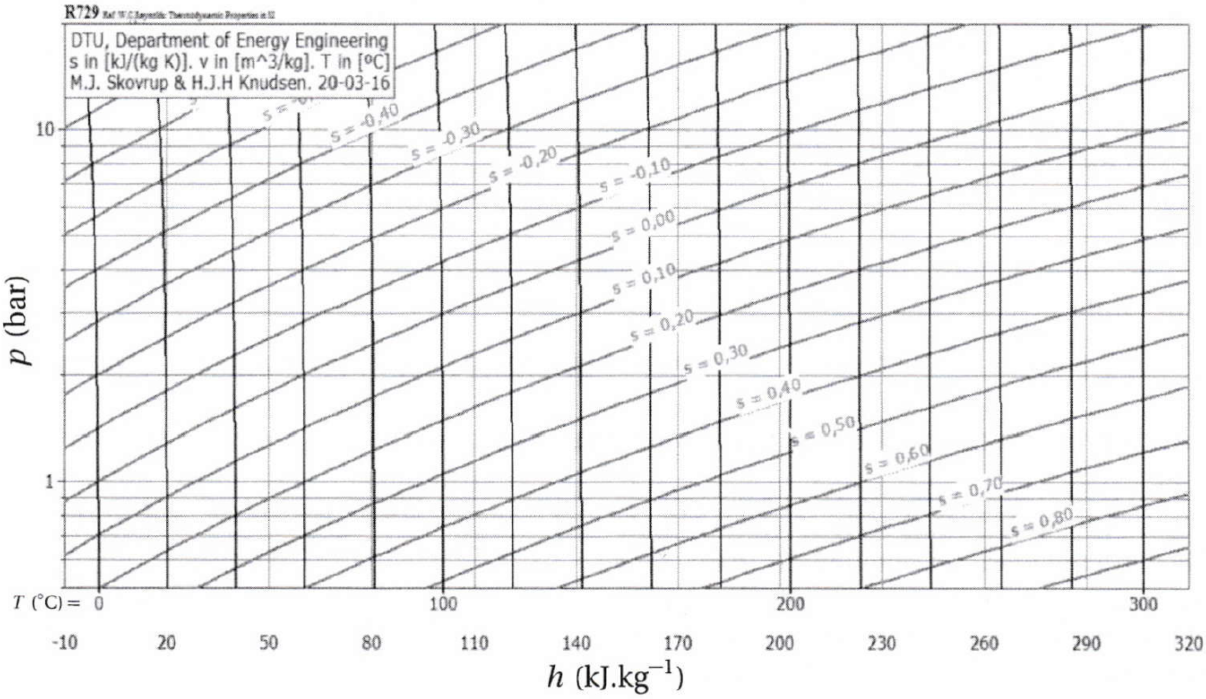


Figure 4.24. Diagramme (p, h) de l'air fourni par le logiciel CoolPack.

1. Calculer la température de sortie du compresseur T_B.
2. En utilisant le diagramme (p, h) de l'air donné en figure 4.24, déterminer l'entropie massique créée dans le compresseur.
3. Quelle devrait être la valeur du débit massique pour que le passage dans le compresseur soit réversible ?

2 Température d'un conducteur ohmique

Un fil cylindrique de cuivre de longueur L et rayon $a = 0,5$ mm est parcouru par un courant électrique continu d'intensité I. Ce fil est plongé dans l'air à température $T_0 = 273$ K auquel il cède le flux thermique $\delta Q/dt = hA(T - T_0)$ avec la température T du fil, la surface latérale A et la constante $h = 14$ W.K^{-1}.m^{-2}. On donne :

— la résistance du fil $R = \dfrac{\rho L}{\pi a^2}$ avec la résistivité $\rho(T) = \rho_0(1+\alpha(T-T_0))$, $\rho_0 = 1,8.10^{-8}$ Ω.m et $\alpha = 4,0.10^{-3}$ K^{-1},
— masse volumique du fil $\mu = 8,89.10^3$ kg.m^{-3},
— capacité thermique massique du fil $c = 420$ J.K^{-1}.kg^{-1}.

1. Exprimer la puissance dissipée par effet Joule dans le fil en fonction notamment de T.
2. On suppose que la fil a une température T_p constante. En appliquant le premier principe, déterminer l'expression de T_p en fonction des données. Application numérique pour $I = 10$ A.
3. Le fil est maintenant initialement à la température $T(t = 0) = T_0$ au moment où on commence à faire passer le courant I. Établir une équation différentielle sur $T(t)$.
4. Montrer que suivant les valeurs de I, il existe théoriquement trois types possibles d'évolution de $T(t)$.

3 Pompe à chaleur (diag (p, V))

Une pompe à chaleur effectue le cycle de Joule inversé suivant. L'air pris dans l'état A de température T_0 et de pression P_0 est comprimé suivant une adiabatique réversible jusqu'au point B où il atteint la pression P_1. Le gaz se refroidit à pression constante et atteint la température finale de la source chaude T_1, correspondant à l'état C. Puis l'air est ensuite refroidi dans une turbine suivant une détente adiabatique réversible pour atteindre l'état D de pression P_0. Pour finir le gaz se réchauffe à pression constante au contact de la source froide et retrouve son état initial A.

On considère l'air comme étant un gaz parfait de coefficient isentropique $\gamma = 1{,}4$. On posera $\beta = 1 - \gamma^{-1}$ et $a = P_1/P_0$. On prendra : $T_0 = 283$ K ; $T_1 = 298$ K ; $a = 5$.

1. Représenter le cycle parcouru par le fluide dans un diagramme de Clapeyron (P,V).
2. Exprimer les températures T_B et T_D en fonction de T_0, T_1, a et β. Calculer leurs valeurs numériques.
3. Définir l'efficacité e de la pompe à chaleur à partir des quantités d'énergie échangées au cours du cycle. Montrer qu'elle s'exprime seulement en fonction de a et β, puis calculer sa valeur numérique.
4. Quelles doivent être les transformations du fluide si on envisage de faire fonctionner la pompe à chaleur suivant un cycle de Carnot réversible entre les températures T_0 et T_1? Calculer sa valeur numérique.
5. Comparer les valeurs obtenues pour e et e_{carnot}, puis interpréter la différence observée.

4 Climatisation d'une voiture (diag (p, h))

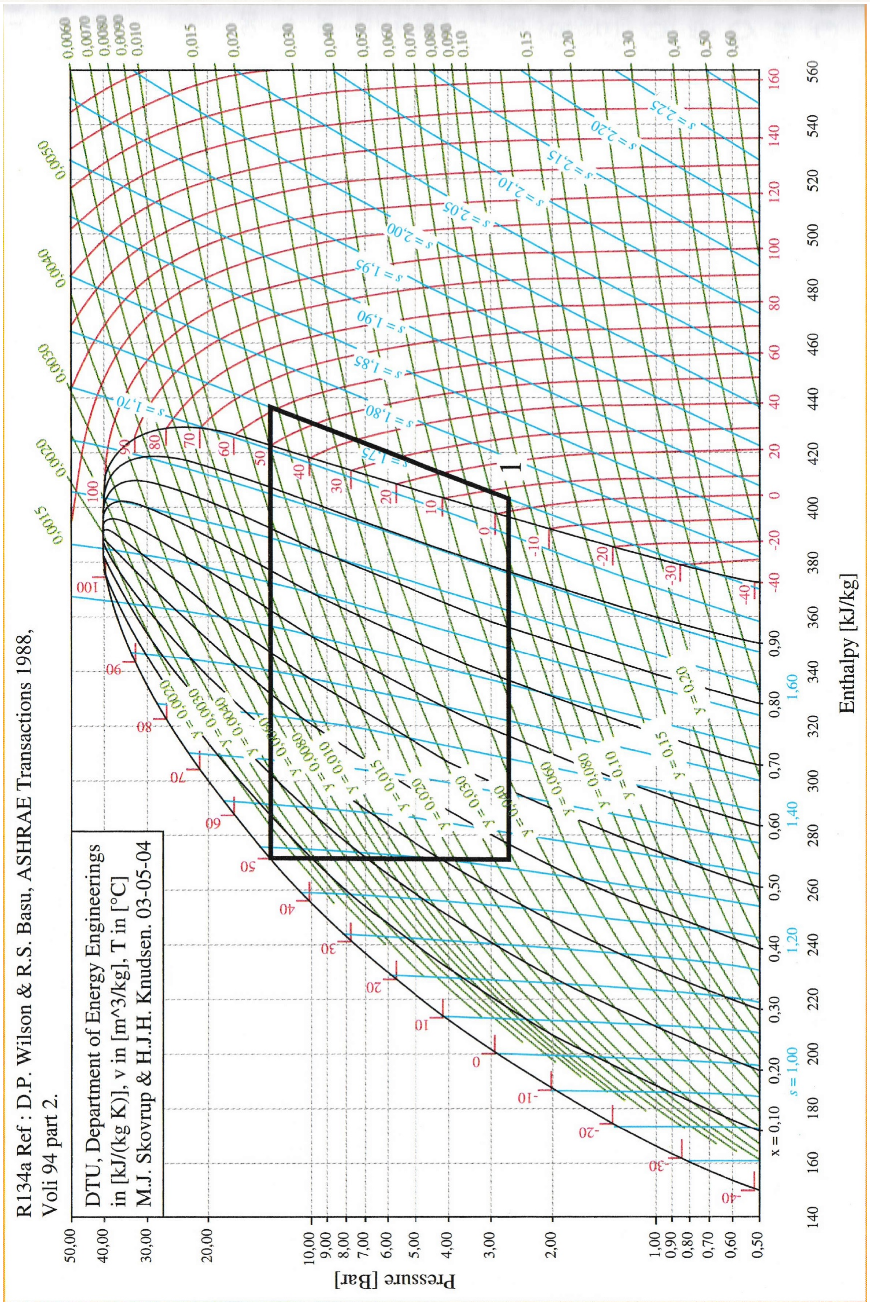
La climatisation est désormais présente sur plus de 9 véhicules neufs sur 10. Elle est composée d'un circuit d'air pulsé par ventilateur et d'un circuit frigorifique constitué d'un compresseur, d'un condenseur, d'un détendeur et d'un évaporateur, dans lesquels circule un fluide frigorigène. Le fluide utilisé par la majorité des véhicules en circulation est le ***R134a***.

Après l'étude du principe de fonctionnement d'une climatisation, le problème aborde certains aspects de sa conception ainsi que la surconsommation entraînée par son fonctionnement. Pour indication, à 2400 tr.min^{-1}, le moteur de la voiture développe une puissance motrice de 30 kW.

Dans tout le problème, la climatisation étudiée assure le maintien d'une température de l'habitacle de la voiture égale à 20 °C pour une température de l'air extérieur égale à 35 °C, grâce à un débit massique constant $D_m = 0{,}15$ kg.s^{-1}.

On suppose que les conduites reliant les différents appareils sont parfaitement calorifugées et que la pression qui y règne est constante. On néglige toutes les variations de vitesse du fluide et l'on raisonne sur 1 kg de fluide.

1. Dans quel sens est parcouru le cycle ? Justifier. A partir de l'état 1 du fluide, porter le numéro de chaque état du fluide sur le diagramme (P,h). Donner pour chaque transformation, la nature de la transformation et le nom de l'organe traversé par le fluide (compresseur, détendeur, évaporateur et condenseur).
2. Quelle est la valeur du travail massique échangé dans le compresseur ? Quel est son signe ?
3. Quelle est la valeur du transfert thermique massique avec l'air de l'habitacle ? Quel est son signe ?
4. Définir l'efficacité de l'installation. Calculer sa valeur numérique.
5. Quelle surconsommation relative entraîne le fonctionnement de la climatisation lorsque le moteur tourne à 2400 tr.min^{-1} ?



5 Moteur à air comprimé (diag (T, s))

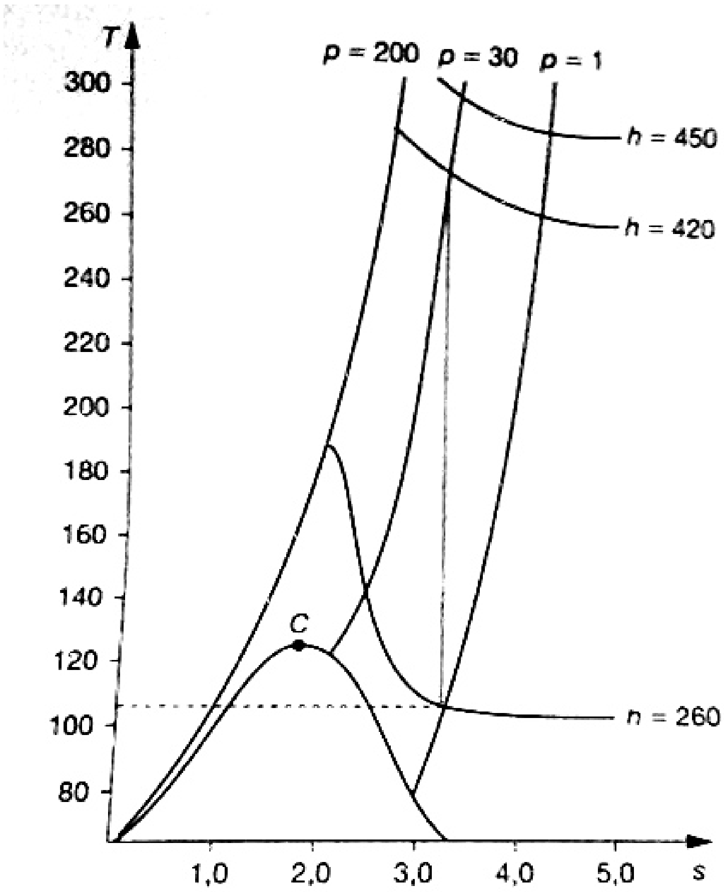
Le moteur à air comprimé pourrait être une alternative aux moteurs thermiques sans émission de gaz d'échappement. Dans un tel moteur de l'air se détend dans un détendeur, constitué d'un simple étranglement dans une canalisation calorifugée, dans lequel l'air évolue de l'état $E_1(p_1 = 200 \text{ bar}, T_1 = 290 \text{ K})$ à l'état $E_2(p_2 = 30 \text{ bar}, T_2)$.

Puis l'air se détend de manière adiabatique réversible dans un moteur de l'état E_2 jusqu'à l'état $E_3(p_3 = 1 \text{ bar}, T_3)$ à la pression atmosphérique.

L'air finit ensuite son évolution dans l'atmosphère de manière isobare jusqu'à l'état $E_4(p_4 = 1 \text{ bar}, T_4 = T_1 = 290 \text{ K})$.

Le détendeur et le moteur sont assimilés à un système ouvert en régime stationnaire pour lequel les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle sont négligeables.

On assimile l'air à du diazote, dont on lit les propriétés thermodynamiques utiles sur le diagramme (T, s) ci-dessous où l'on a tracé la courbe de saturation, trois isobares graduées en bar et trois isenthalpiques graduées en kJ.kg^{-1} ; l'axe des températures est gradué en kelvin et l'axe des entropies en kJ.kg^{-1}.K^{-1}.



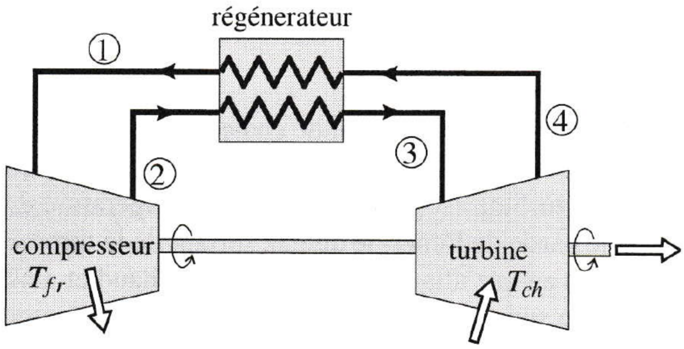
1. En appliquant le premier principe pour un système bien défini, montrer que l'évolution du gaz entre la sortie et l'entrée du détendeur se fait à enthalpie massique constante, c'est-à-dire que $h_1 = h_2$.
2. En appliquant le second principe pour un système bien défini, montrer que l'évolution du gaz entre la sortie et l'entrée du moteur se fait à entropie massique constante, c'est-à-dire que $s_3 = s_2$.
3. Placer sur le diagramme de votre sujet (que vous montrerez à l'examinateur) les points représentatifs des états E_1, E_2, E_3 et E_4.
4. Calculer le travail utile récupéré par le moteur.
5. Écrire les principes de la thermodynamiques pour l'évolution globale de l'état E_1 à l'état E_4 supposée monotherme à la température $T_a = 290$ K de l'atmosphère. En déduire que le travail massique maximum récupérable vaut $|w|_{max} = g_1^* - g_4^*$ avec $g^* = h - T_a s$. Calculer le rendement $\eta = \frac{|w|}{|w|_{max}}$.

6 Cycle d'Ericsson (**)

ERRATUM :

⋆ 1. Lire q_{12} et q_{34} (et non pas « q_{12} et q_{23} »).

⋆ 2. Lire $w_{u,12}$ et $w_{u,34}$ (et non pas « $w_{u,12}$ et $q_{u,23}$ »).



Un gaz parfait circule en régime stationnaire dans une machine et subit le cycle de transformations suivant :

- transformation $1-2$: compression réversible et isotherme, à la température T_{fr} de la pression P_1 à la pression $P_2 > P_1$,
- transformation $2-3$: échauffement isobare de T_{fr} à $T_{ch} > T_{fr}$;
- transformation $3-4$: détente réversible et isotherme, à la température T_{ch}, de P_2 à P_1,
- transformation $4-1$: refroidissement isobare de T_{ch} à T_{fr}.

Les transformations $2-3$ et $4-1$ ont lieu à l'intérieur d'un régénérateur : échangeur thermique où le fluide échange du transfert thermique avec lui même. Le régénérateur est supposé isolé thermiquement de l'extérieur. On néglige les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle.

La turbine entraîne le compresseur, ainsi qu'un alternateur produisant de l'énergie électrique.

On rappelle l'expression de l'entropie massique d'un gaz parfait en fonction de la température T et de la pression P :

$$s(T,P) = c_P \ln\left(\frac{T}{T_{\text{réf}}}\right) - \frac{R}{M}\ln\left(\frac{P}{P_{\text{réf}}}\right) + s(T_{\text{réf}}, P_{\text{réf}}),$$

où $T_{\text{réf}}$ et $P_{\text{réf}}$ sont des grandeurs constantes, c_P la capacité thermique massique et M la masse molaire du gaz.

1. Exprimer les transferts thermiques massiques q_{12} et q_{23} reçus par le gaz respectivement dans le compresseur et la turbine.

2. Exprimer les travaux massiques utiles $w_{u,12}$ et $q_{u,23}$ reçus par le gaz respectivement dans le compresseur et la turbine.

3. En déduire le rendement de la machine. Commenter le résultat.