

Révisions de thermodynamique

Machines thermiques.

Exercice 1 : Moteur thermique avec récupérateur de chaleur.

1- *A l'exception des schémas, cette question sera corrigée oralement.*

Dans un moteur thermique où un fluide s'écoule en cycle fermé à travers différentes parties actives, dont un compresseur et une turbine, il faut nécessairement deux échangeurs.

- a- Justifier cette affirmation, expliquer le rôle de chaque échangeur et préciser leurs positions par rapport au compresseur et à la turbine. Effectuer un schéma de la machine représentant les différentes parties actives, les conduites qui les relient, l'arbre de transmission ; préciser le sens d'écoulement.

Afin d'améliorer le rendement, on peut utiliser un « récupérateur de chaleur » (ou « régénérateur ») : il s'agit d'un échangeur supplémentaire mettant en contact thermique le fluide sortant de la turbine et le fluide sortant du compresseur. Ces deux fluides circulent à contresens dans le récupérateur.

- b- Justifier l'amélioration du rendement et effectuer un nouveau schéma de la machine.
Réponse en fin d'énoncé si nécessaire, mais ne regardez pas trop vite !

2- On s'intéresse à un moteur thermique à air fonctionnant en régime permanent selon le schéma précédent, dans des conditions où les variations d'énergie potentielle et d'énergie cinétique de l'air sont négligeables. On assimile l'air à un gaz parfait de masse molaire $M = 29$ g/mol et de coefficient isentropique $\gamma = 1,40$; on donne $R = 8,314$ J.K⁻¹.mol⁻¹.

Les hypothèses de fonctionnement sont les suivantes :

- Toutes les transformations subies par le gaz sont mécaniquement réversibles et sans pertes thermiques. Le débit massique du gaz est de 10 kg/s.
- Les écoulements à travers le compresseur (étape 1-2 du cycle) et la turbine sont approximativement adiabatiques. Le compresseur fait passer la pression de $P_1 = 1$ bar à $P_2 = 4$ bar.
- Les transferts thermiques à travers les échangeurs sont approximativement isobares. Ils peuvent être assimilés à des transferts thermiques avec des thermostats de températures respectives $t_C = 1200^\circ\text{C}$ et $t_F = 0^\circ\text{C}$ et conduisent à des températures de sortie respectivement égales à 875°C et 15°C .
- Les transferts thermiques à travers le récupérateur de chaleur sont approximativement isobares et la longueur du récupérateur a été choisie pour optimiser la récupération.

1- Déterminer la température (en Kelvin) et la pression du gaz à la sortie de chaque partie active. Comment ces valeurs seraient-elles modifiées si les fluides circulaient dans le même sens dans le récupérateur ? *Réponses en fin d'énoncé si nécessaire.*

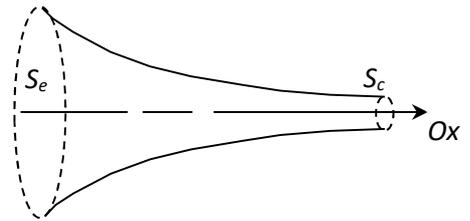
2- Pour chaque transformation du cycle, donner la variation de l'entropie massique s du gaz ; représenter le cycle dans un diagramme de Clapeyron (P, v) puis dans un diagramme entropique (T, s). Quel intérêt présente chacun de ces diagrammes ?

3- Définir et déterminer le coefficient de performance (ou rendement) de ce moteur. Que devient ce coefficient si on supprime le récupérateur de chaleur, toutes choses égales par ailleurs ? Commenter.

4- Calculer, avec puis sans récupérateur, l'entropie créée par unité de temps. Commenter.

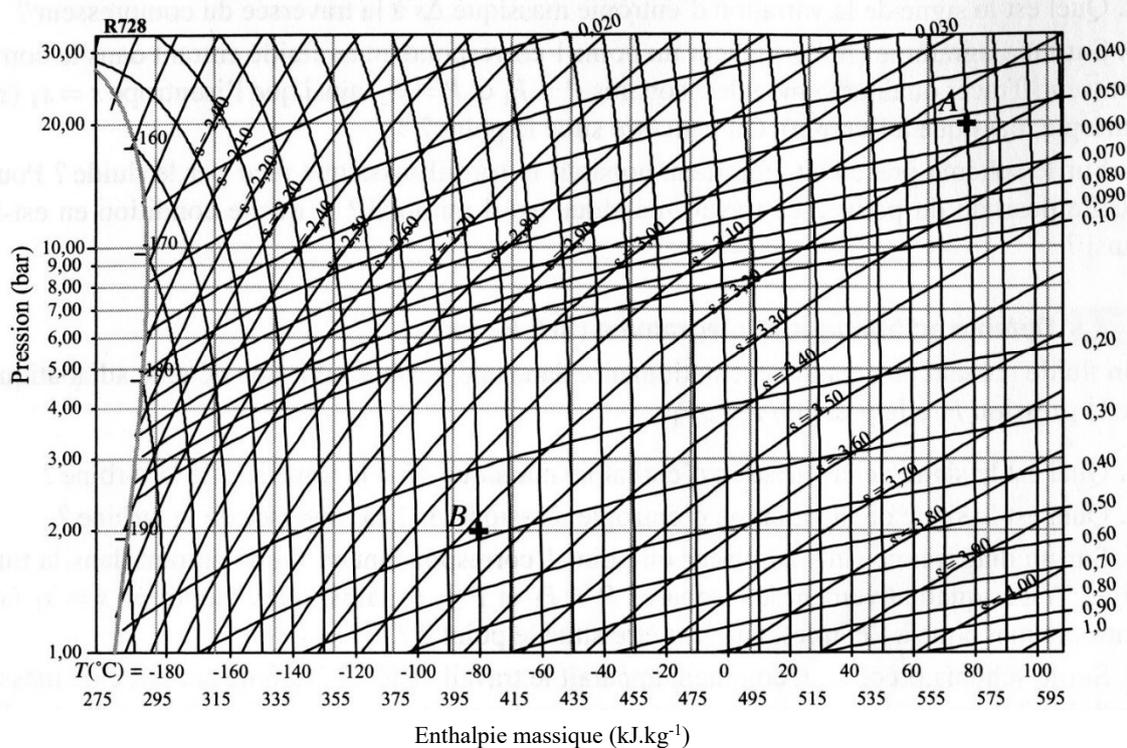
Exercice 2 : Ecoulement dans une tuyère.

Un gaz, de coefficient isentropique γ et de masse molaire M , subit une détente réversible dans une tuyère convergente, rigide et calorifugée, dont les sections d'entrée et de sortie sont notées S_e et S_c (schéma ci-contre). Les paramètres pression P_e , température T_e et vitesse v_e du gaz en entrée sont connus.



- 1- Déterminer la vitesse de sortie v_s du gaz, supposée très supérieure à la vitesse d'entrée, en fonction des données et de $x = P_s / P_e$.
- 2- En déduire une équation permettant d'obtenir x en fonction des données.

Exercice 3 : Etude d'un fluide.



On peut voir sur la figure une partie du diagramme (ln P, h) du fluide R728, dans le domaine où ce fluide est gazeux. Les températures sont °C, les volumes massiques en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, les entropies massiques en $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.

- 1- Le gaz se comporte-t-il comme un gaz parfait ? Dans quelle partie du diagramme s'en rapproche-t-il le plus ?
- 2- Evaluer la capacité thermique massique à pression constante du fluide pour $P = 1$ bar en la supposant constante sur tout le domaine de température représenté. Sachant qu'il s'agit d'un gaz diatomique, déterminer sa masse molaire et en déduire la nature du fluide R728.

Le fluide passe de l'état correspondant au point A à l'état correspondant au point B en s'écoulant à travers une machine.

- 3- Quelles sont, parmi les grandeurs suivantes, celles que l'on peut calculer à partir de valeurs lues sur le diagramme (les notations non explicitées sont celles du cours) : Δh , Δu

(différences des énergies internes massiques), q , w_u , w_{pression} (travail massique des forces de pression), Δs , $s_{\text{éch}}$, $s_{\text{créée}}$.

- 4- Cette transformation se fait dans une tuyère horizontale, adiabatique et ne comportant aucune pièce mobile. Evaluer :
la vitesse du gaz à la sortie de la tuyère sachant que la vitesse à l'entrée est quasiment nulle, l'entropie créée par unité de masse de gaz dans la tuyère.

Exercice 4 : régime transitoire d'un réfrigérateur

L'intérieur d'un réfrigérateur est assimilé à un système de capacité thermique C de température T_2 lentement variable. Son isolation thermique étant imparfaite, il échange avec l'extérieur de température T_1 une puissance thermique proportionnelle à l'écart de température : $P_1 = G.(T_1 - T_2)$. Le moteur, qui fait fonctionner la machine frigorifique (cyclique) fournit une puissance mécanique P_m . On suppose que l'efficacité frigorifique de la machine est égale à celle d'une machine réversible fonctionnant entre T_1 et T_2 , affecté d'un coefficient multiplicateur η .

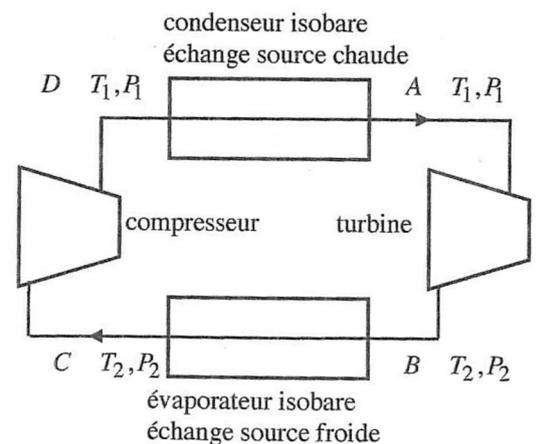
- 1- Etablir l'équation différentielle vérifiée par $T_2(t)$.
- 2- Déterminer la valeur de T_2 au bout d'un temps suffisamment long.
- 3- Exprimer sous la forme d'une intégrale le temps mis pour atteindre la température T_2 .

Exercice 5 : étude d'une machine thermique avec écoulement ; réfrigérateur à ammoniac

Pour optimiser l'efficacité d'une machine frigorifique, il faut s'approcher du cycle de Carnot théorique constitué de deux isothermes à T_1 et T_2 avec $T_1 > T_2$ et de deux adiabatiques (une détente du point A au point B du cycle de P_1 à P_2 et une compression du point C au point D du cycle de P_2 à P_1).

De plus pour des échanges de chaleur importants, sans utiliser de trop grandes quantités de fluide, on utilise des changements d'état. On suppose donc que l'ammoniac décrit l'intégralité du palier de changement d'état à T_1 ; le fonctionnement se fait en circuit fermé et en régime permanent avec une circulation continue d'ammoniac pur au débit massique D_m .

On considère l'installation ci-contre. Dans le condenseur et l'évaporateur isobares, le fluide est diphasé, donc la température reste aussi constante. De façon classique, le travail récupéré à la turbine est fourni au compresseur, ce qui limite la dépense pour alimenter ce dernier

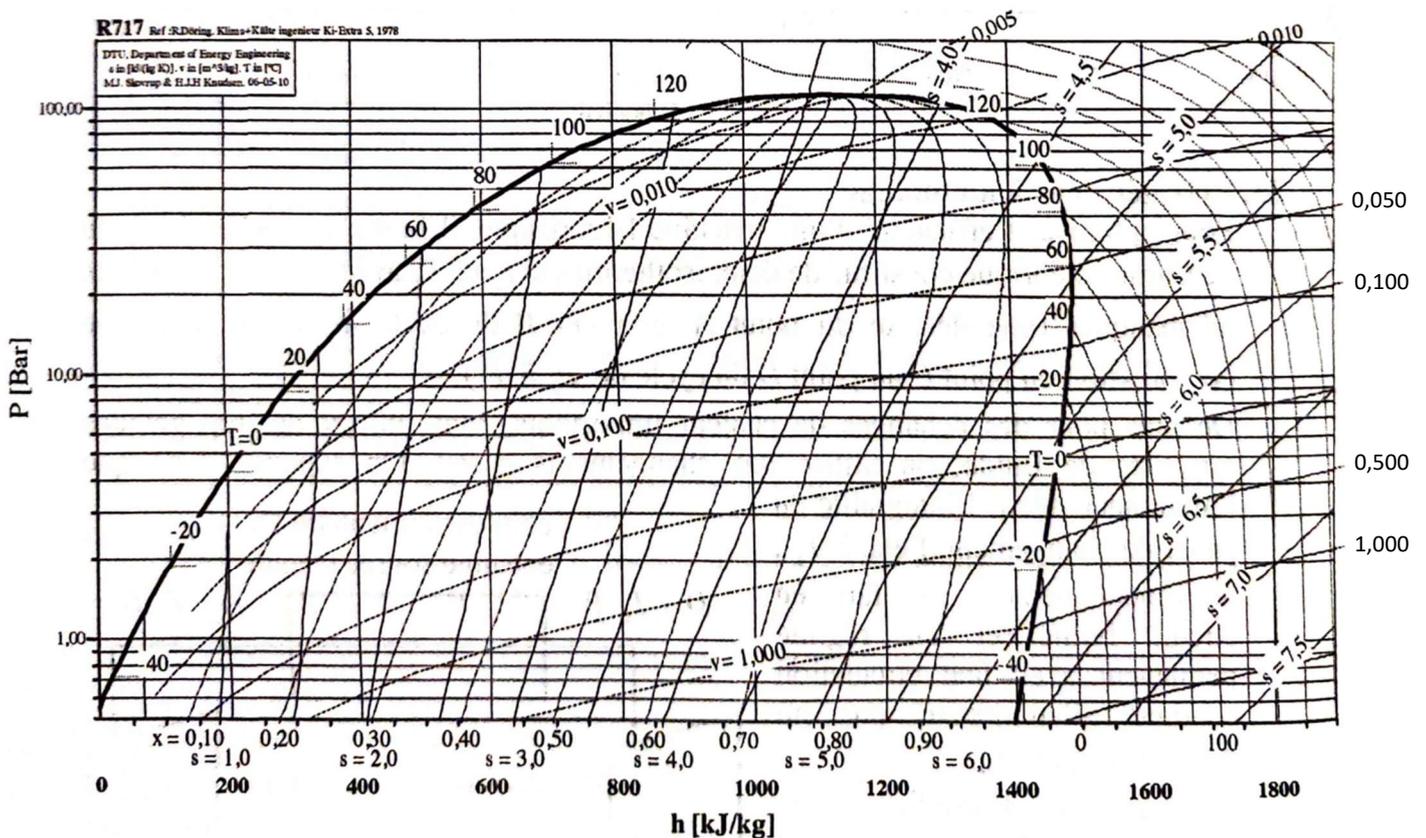


- 1- Placer dans un diagramme (T, s) , la courbe de saturation et tracer le cycle de Carnot théorique ABCD que décrirait le fluide.
- 2- On fixe d'abord les températures à $T_1 = 40^\circ\text{C}$ et $T_2 = -20^\circ\text{C}$. Justifier ces valeurs si la source chaude (air extérieur) est à 30°C et l'intérieur du « réfrigérateur » à -5°C . Cela modifie-t-il l'étude théorique ?
- 3- On donne ci-dessous le diagramme $(\ln P, h)$, encore appelé diagramme de Mollier des frigoristes, pour l'ammoniac. Les isentropiques (notées s , valeur en $\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$) y sont tracées en trait plein, les isochores (notées v , valeurs en $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$) en pointillé et les isothermes apparaissent en pointillée dans la partie droite (vapeur) où elles sont différenciées, elles ne

sont pas tracées dans le courbe de saturation, les valeurs de températures sont en °C et rappelées sur la courbe de saturation. Attention l'échelle des pressions est logarithmique. Les courbes suivies par le fluide dans ses transformations seront assimilées à des portions de droite et les valeurs numériques entre deux courbes données seront interpolées linéairement. Mesurer les pressions P_1 et P_2 , puis tracer le cycle de Carnot ABCD. Calculer l'efficacité de Carnot η_C en fonction de T_1 et T_2 et commenter le résultat.

- 4- Dans la pratique, on n'utilise pas de turbine de détente adiabatique : elles ont un mauvais rendement en mélange liquide-vapeur, et sont complexes et chères. Bien plus simple est l'utilisation d'un détendeur calorifugé simple, sans pièce mobile (souvent un simple rétrécissement). Montrer que ce détendeur est isenthalpique et tracer la nouvelle portion AB' sur le diagramme (cf annexe).
- 5- On ne comprime pas non plus le mélange diphasé du point C au point D, ceci risquerait d'endommager le compresseur. On préfère décrire l'intégralité du palier d'évaporation à T_2 jusqu'au point C' avant de comprimer la vapeur sèche de façon adiabatique réversible jusqu'à P_1 . Tracer le nouveau cycle AB'C'D'A décrit par l'ammoniac. Quelle est la température maximale atteinte, et quel problème cela peut-il poser ?
- 6- Sachant qu'on veut extraire 1,0 kW thermique de la source froide, calculer le débit massique du fluide, la puissance électrique à fournir au compresseur dont le moteur électrique a un rendement $r = 0,9$, le débit volumique qu'il aspire, ainsi que la puissance thermique que doit absorber la source chaude. Calculer l'efficacité de ce cycle réfrigérateur, peut-on la comparer à celle du cycle de Carnot ?

Annexe : diagramme (P,h)



Exercice 6 : Coefficient d'efficacité d'une machine.

Dans cet exercice, on note « COP » le coefficient de performance (ou d'efficacité) de la machine étudiée.

1- Sur un diagramme (ln P, h), tracer des courbes d'ébullition et de rosée puis représenter un cycle (1 – 2 – 3 – 4) ayant les caractéristiques suivantes :

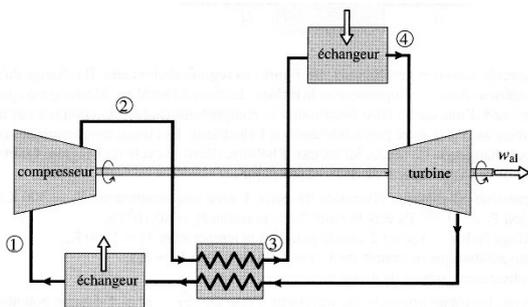
- dans l'état 1, le fluide est à l'état de vapeur saturante à la pression P_1 ,
- la transformation 1 – 2 est une compression adiabatique réversible jusqu'à la pression P_2 ,
- la transformation 2 – 3 est isobare sans travail utile,
- dans l'état 3 le fluide est à l'état de liquide saturant à la pression P_2 ,
- la transformation 3 – 4 est une détente sans transfert thermique ni travail utile jusqu'à la pression P_1 ,
- la transformation 4 – 1 est isobare sans travail utile

Comment voit-on sur ce schéma le COP de la machine dans le cas d'une machine frigorifique ? Même question dans le cas d'une pompe à chaleur.

2- La transformation 1 – 2 est en fait irréversible : le point 2 devient le point 2'. Préciser la position de 2' sur le schéma en justifiant votre réponse. *En utilisant le schéma*, montrer que le coefficient d'efficacité de la machine est réduit aussi bien dans le cas d'une pompe à chaleur que dans le cas d'une machine frigorifique.

3- La transformation 1 – 2 est de nouveau réversible. On modifie le cycle en augmentant la pression P_1 : les points 1, 2 et 4 deviennent les points 1'', 2'' et 4''. Déduire du graphique l'influence sur le COP de cette modification dans le cas d'une machine frigorifique et dans le cas d'une pompe à chaleur.

Réponses exercice 1:



$$P_1 = 1 \text{ bar} ; P_2 = P_3 = P_4 = 4 \text{ bar} ; P_5 = P_6 = P_1 = 1 \text{ bar}$$

$$T_1 = 15^\circ\text{C} = 288 \text{ K} ; T_2 = 428 \text{ K (loi de Laplace)} ;$$

$$T_4 = 875^\circ\text{C} = 1148 \text{ K} ; T_5 = 773 \text{ K (loi de Laplace)} ;$$

$$T_3 = T_5 \text{ \& } T_6 = T_2 \text{ pour un récupérateur optimisé avec circulation des fluides à contresens.}$$

Si les fluides circulent dans le même sens dans le récupérateur, on a $T_6 = T_3$ qu'il faut déterminer par un bilan d'énergie du récupérateur. On obtient $T_6 = T_3 = (T_2 + T_5)/2 = 600 \text{ K}$. C'est moins bien.