

THERMODYNAMIQUE - MACHINES THERMIQUES

Revoir les 2 feuilles d'exercices distribuées pendant l'année : les exos tombent à l'oral !!

Questions de cours :

- * Modèle du gaz parfait. Hypothèses du modèle, équation d'état, propriétés énergétiques.
- * Détentes de Joule - Gay Lussac et de Joule - Thomson.
- * Energie interne. Premier principe.
- * Second principe. Conséquences sur le fonctionnement des machines thermiques.
- * Machines thermiques dithermes. Cycle de Carnot. Rendement.
- * Propriétés de l'équilibre du corps pur diphasé. Diagrammes (P,T) , (P,V) , $(\ln P,h)$.
- * Application des principes de la thermodynamique à un fluide en écoulement à travers une machine (compresseur, échangeur...).

Th 1 : Détente d'un gaz. (CCINP)

On considère un gaz placé dans un cylindre fermé par un piston mobile sans frottements, le cylindre et le piston étant calorifugés. La pression extérieure est notée P_{ext} . Initialement, le piston est bloqué et le gaz est comprimé, son volume et sa pression étant respectivement notés V_0 et P_0 .

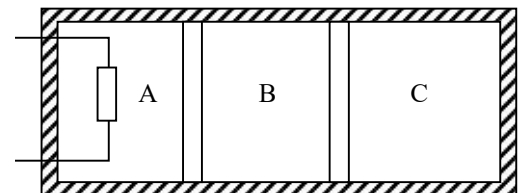
- 1- On relâche le piston très lentement : déterminer le volume final V_1 du gaz en fonction de V_0 , P_0 et P_{ext} .
- 2- A partir du même état initial, on relâche maintenant le piston brusquement : après avoir démontré la relation qui existe entre les capacités thermiques C_v et C_p et la constante des gaz parfaits R , déterminer le volume final V_2 du gaz en fonction de V_0 , P_0 et P_{ext} .
- 2- A l'aide d'un bilan d'entropie déterminer si V_2 est inférieur ou supérieur à V_1 . Puis placer les différents états d'équilibre sur un diagramme de Clapeyron. Calculer numériquement $\frac{V_1}{V_0}$ et $\frac{V_2}{V_0}$ si $P_0 = 6,6 \text{ bar}$ et $P_{\text{ext}} = 1 \text{ bar}$.

Le gaz parfait possède un coefficient isentropique γ égal à 1,4.

- 4- Discuter qualitativement la valeur de la température finale et du travail récupéré lors de cette opération.

Th 2 : Chauffage d'un système à 3 compartiments. (CCINP)

Un cylindre aux parois calorifugées est divisé en trois compartiments notés A, B et C, par l'intermédiaire de 2 pistons susceptibles de coulisser sans frottements (schéma ci-contre).



On suppose qu'initialement les trois compartiments sont tous à la température T_0 , à la pression P_0 et au volume V_0 . On place alors au sein du compartiment A une résistance chauffante qui fournit un transfert thermique Q au gaz de ce compartiment. Les transformations se font suffisamment lentement pour être mécaniquement réversibles.

Déterminer la température, la pression et le volume de chacun des compartiments à l'état final, en fonction des paramètres initiaux, de $\gamma = C_p/C_v$ et de $\theta = Q/C_v T_0$. On distinguera les deux cas suivants :

1. Les pistons sont adiabatiques.
2. Les pistons sont diathermes.

Th 3 : Etude d'un gaz réel. (Centrale 2)

Dans les deux premières parties de cet exercice, on s'intéresse à une quantité fixe n de gaz, soumis uniquement à des forces pressantes et subissant des transformations mécaniquement réversibles. Le gaz n'est pas considéré parfait a priori.

A- Propriétés générales.

- 1- Exprimer le travail et le transfert thermique élémentaires, δQ et δW , reçus par le gaz au cours d'une transformation infinitésimale, en fonction des variations de ses variables d'état.
- 2- Exprimer de même la variation d'entropie au cours d'une transformation infinitésimale.
- 3- Enoncer les lois de Joule.
- 4- Montrer que si le gaz est un gaz parfait il suit les lois de Laplace.

B- Modèle de Joule d'un gaz réel.

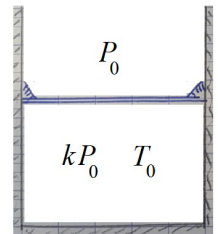
On s'intéresse à un gaz réel que l'on décrit par le modèle de Joule suivant, où K , b et γ sont des constantes positives, γ étant >1 :

$$\text{Equation d'état : } V = n \left(K \frac{T}{P} + b \right) \quad - \quad \text{Expression de l'énergie interne : } U = \frac{nKT}{\gamma - 1}$$

- 1- Ce gaz vérifie-t-il les lois de Joule ?
- 2- Montrer que $K = R$: constante des gaz parfaits.
- 3- Exprimer la variation d'entropie au cours d'une transformation infinitésimale, puis finie.
- 4- Les lois de Laplace sont-elles toujours valides ? Sinon, quelles lois les remplacent ?

C- Compression du gaz réel.

Un gaz réel décrit par le modèle de Joule est comprimé dans un cylindre calorifugé, la pression extérieure étant uniforme notée P_0 et le facteur de compression k (schéma ci-contre). La température du gaz est notée T_0 . A $t = 0$, on libère un piston susceptible de coulisser sans frottements dans le cylindre, le milieu extérieur jouant le rôle de pressostat à P_0 .



- 1- Déterminer la température T_1 du gaz une fois l'équilibre mécanique atteint.
- 2- En réalité les parois ne sont pas parfaitement calorifugées et, en attendant longtemps, on observe l'établissement d'un équilibre thermique avec le milieu extérieur de température T_0 . Dans quel sens le piston se déplace-t-il lors de cette phase de mise à l'équilibre thermique ?
- 3- Déterminer l'entropie créée par les fuites thermiques.

Th 4 : Gaz dans un cylindre comprimé par un piston. (X)

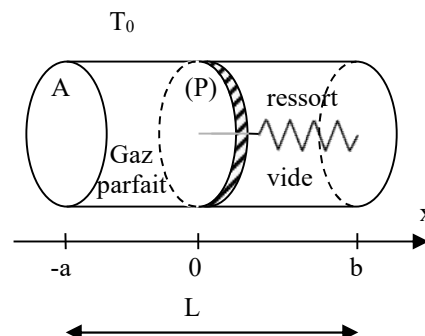
On considère une enceinte cylindrique dont la surface de base a pour aire S et est posée sur un support horizontal. Initialement, cette enceinte contient un gaz parfait à la pression P_0 et à la température T_0 , et elle est fermée par un piston calorifugé et de masse m . On enfonce légèrement le piston, sa cote z par rapport au support passant de L à $L - d$ avec $d \ll L$, puis on le relâche.

- 1- Déterminer la période des oscillations du piston selon que l'évolution peut être considérée isotherme ou adiabatique, en négligeant les frottements.
- 2- On prend en compte les frottements. Déterminer qualitativement si la position finale du piston sera au-dessus, en dessous, ou au niveau de la position initiale d'équilibre.

Th 5 : Etude d'un système oscillant. (Centrale)

Un cylindre de section A et de longueur L est séparé en 2 compartiments par une paroi mobile (P) d'épaisseur négligeable et de masse m : le compartiment de gauche, de longueur initiale a , contient un gaz parfait et le compartiment de droite, de longueur initiale b , est vide. La paroi mobile est reliée à la paroi fixe de droite par un ressort idéal de raideur k , initialement au repos.

Le milieu extérieur se comporte comme un thermostat de température T_0 et, à l'état initial, les variables d'état du gaz prennent les valeurs (P_0, T_0) .



Données concernant le gaz : $\gamma = 1,40$; $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$; $P_0 = 1 \text{ bar}$; $T_0 = 300 \text{ K}$.

Autres données : $A = 10^{-2} \text{ m}^2$; $a = 10 \text{ cm}$; $b = 20 \text{ cm}$; $m = 10 \text{ kg}$; $k = 10^4 \text{ N.m}^{-1}$.

Constante des gaz parfaits : $R = 8,214 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.

A l'origine des temps, on abandonne la paroi en $x = 0$ sans vitesse initiale, le ressort étant au repos. On étudie les oscillations de la paroi.

- 1- A quelle condition peut-on supposer que l'évolution est isotherme ?
- 2- Sous cette hypothèse, déterminer la force exercée par le gaz sur le piston au cours de l'évolution, le déplacement maximum de la paroi, la position d'équilibre finale du système, la chaleur échangée avec le milieu extérieur.
- 3- Effectuer un bilan d'entropie.
- 4- Déterminer la période des petites oscillations autour de la position d'équilibre.
- 5- Quelles sont les différences et similitudes de traitement si l'évolution est adiabatique ?

Th 6 : Détente isentropique avec changement d'état. (Centrale, Mines)

Dans une enceinte calorifugée, on fait subir une détente réversible à 1 g de vapeur d'eau juste saturante prise à 30°C . Les données sont en fin d'énoncé.

Décrire le phénomène observé et calculer la masse m_1 de vapeur qui s'est condensée lorsqu'apparaît le 1^{er} cristal de glace dans l'enceinte.

Calculer de même la masse de glace formée quand il n'y a plus de liquide dans l'enceinte.

- Capacité thermique de l'eau liquide, supposée indépendante de T : $c = 4,18 \text{ J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$.
- Chaleur latente de vaporisation de l'eau : $L_v = 2500 - 2,34 \times t$ en J.g^{-1} avec t en $^\circ\text{C}$.
- Chaleur latente de fusion de la glace, supposée indépendante de T : $L_f = 335 \text{ J.g}^{-1}$.
- Température du point triple de l'eau : $T_t = 273,16 \text{ K}$.

Th 7 : Surfusion. (Mines)

On considère un verre contenant de l'eau liquide qui a été refroidie très lentement à la température de -2°C et à pression atmosphérique. On touche la surface de l'eau avec un trombone. Vers quel équilibre évolue l'eau dans le verre ? Décrire qualitativement et quantitativement.

Th 8 : Calorimétrie. (Mines)

On considère un calorimètre partiellement rempli d'eau et percé d'un trou. On plonge dans l'eau une résistance $R=2\ \Omega$ alimentée par un générateur idéal de tension, de fém $U_1=5\text{V}$. Après avoir laissé fonctionner le générateur un bon moment, on tare la balance et on introduit une masse $m=2\text{g}$ d'eau à 293K dans le calorimètre. On constate alors qu'après une durée $\tau_1=457\text{s}$, la balance indique de nouveau 0. En réitérant l'expérience avec $U_2=8\text{V}$, on obtient cette fois $\tau_2=165\text{s}$ à la place de τ_1 .

Evaluer une grandeur relative à l'eau et discuter la méthode de mesure.

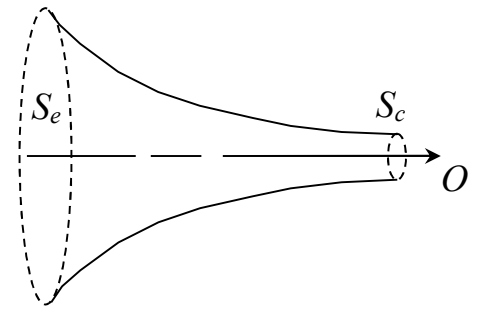
Th 9 : Etude d'une pompe. (CCINP)

On pompe de l'eau d'un bassin, à la température $T_b=363\text{K}$, avec un débit volumique de $q_v=180\text{l.min}^{-1}$, vers un réservoir placé à une cote $z=20\text{m}$ plus haut. Avant de pénétrer dans le réservoir, l'eau est refroidie dans un échangeur en cédant 45MJ.min^{-1} . Le régime est stationnaire et la puissance mécanique fournie par la pompe est $P_m=2\text{kW}$. En dehors de l'échangeur, toutes les canalisations sont calorifugées. La capacité thermique massique de l'eau est $c_m=4,2\text{kJ.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$ et son énergie cinétique macroscopique est négligeable.

Trouver la température T_r de l'eau qui entre dans le réservoir.

Th 10 : Ecoulement dans une tuyère. (Mines)

Un gaz, de coefficient isentropique γ et de masse molaire M , subit une détente réversible dans une turbine 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 $x = \frac{P_s}{P_e}$.

- 2- En déduire une équation permettant d'obtenir x en fonction des données.

Th 11 : Ecoulement dans un détendeur. (Mines)

De l'air sous pression, considéré comme un gaz parfait, circule en régime stationnaire dans une canalisation calorifugée de section S constante, dans laquelle on a placé un détendeur constitué d'un milieu poreux. On note (P_1, T_1, μ_1) les variables d'état du gaz en amont du détendeur et (P_2, T_2, μ_2) ces mêmes variables en aval (μ est la masse volumique). Les vitesses d'écoulement en amont et en aval sont notées v_1 et v_2 . On suppose que P_1 , T_1 et v_1 sont connues et on mesure P_2 .

- 1- Expliquer pourquoi la pression diminue par passage dans le détendeur.

- 2- Exprimer T_2 en fonction de $x = \frac{P_1}{P_2}$ et de $y = \frac{v_1^2}{c_p T_1}$ où c_p est la capacité thermique massique à pression constante du gaz.

- 3- Que vaut T_2 à la limite où $y \ll 1$. Comment s'appelle une telle détente ?

- 4- Déterminer la force exercée par le gaz sur le détendeur.

Th 12 : Chauffage d'une pièce. (CCINP)

Une pompe à chaleur, qu'on considère comme réversible, fonctionne selon un cycle de Carnot entre deux sources, l'une constituée par l'air d'une pièce que l'on cherche à chauffer, l'autre par l'air extérieur de température $T_0 = 10^\circ\text{C}$ supposée constante. On note T la température de la pièce à l'instant t et $C = 10^6 \text{ J.K}^{-1}$ sa capacité thermique. On appelle P la puissance consommée par la pompe et on donne $P = 200 \text{ W}$.

- 1- Etablir, en utilisant les deux principes de la thermodynamique, la loi d'évolution $T(t)$, la température initiale de la pièce étant égale à T_0 .
Calculer le temps nécessaire pour que la température de la pièce atteigne 20°C , ainsi que la consommation énergétique de la pompe.
Comparer ces valeurs à celles qu'on obtiendrait en utilisant une simple résistance chauffante de même puissance P et commenter.
- 2- On suppose dans toute la suite que la pièce n'est plus isolée de l'extérieur et que la puissance thermique des fuites s'exprime sous la forme : $aC|T - T_0|$.
La température T de la pièce étant de 20°C , on arrête la pompe à chaleur et on constate que T tombe à 17°C en 3 heures. En déduire a .
- 3- Lorsque T atteint 17°C , la pompe est remise en marche. Etablir, à partir de cet instant, l'équation différentielle vérifiée par T . Quelle valeur maximale T peut-elle atteindre ?

Th 13 : Etude d'un climatiseur. (CCINP)

Un local de capacité thermique $C = 4,103.10^3 \text{ kJ.K}^{-1}$ est initialement à la température de l'air extérieur $T_0 = 32^\circ\text{C}$. Un climatiseur fonctionnant de façon cyclique réversible entre deux sources, l'une constituée par le local, l'autre par l'air extérieur, ramène la température à $T_1 = 20^\circ\text{C}$ en 1 heure.

Calculer la puissance P consommée par le climatiseur.

Th 14 : Etude d'un moteur. (Centrale)

Un solide de capacité thermique C , isolé thermiquement de l'air extérieur dont la température est $T_a = 20^\circ\text{C}$, est initialement à la température $T_0 = 100^\circ\text{C}$. On utilise un moteur ditherme entre le solide et l'atmosphère pour augmenter l'altitude du solide de manière quasi statique.

Pourquoi le moteur finit-il par s'arrêter ? Calculer l'altitude maximale atteinte par le solide. Effectuer l'application numérique si le solide est essentiellement constitué d'eau.

Th 15 : Trois corps (ENS, Mines & tous concours en version détaillée)

On considère trois corps identiques, de même capacité C , aux températures initiales respectives : 100K , 300K et 300K . A quelle température maximale peut-on porter l'un de ces corps en n'apportant aucune énergie extérieure ?

Th 16 : Machine tritherme. (Nombreux concours)

Un réfrigérateur à absorption fonctionne à partir d'un fluide effectuant des cycles au cours desquels il est en contact avec trois sources de chaleur de températures différentes : une source « chaude » à la température T_1 , une source « tiède » à la température T_2 et une source « froide » à la température T_3 . Le fluide ne reçoit en revanche aucun travail mécanique. On note Q_i ($i = 1, 2$ ou 3) le transfert thermique reçu par le fluide de la part de la source de température T_i au cours d'un cycle.

1- Donner une condition sur le signe de Q_3 pour que l'appareil fonctionne comme machine réfrigérante.

2- Donner les signes de Q_1 et Q_2 et comparez leurs valeurs absolues.

3- Montrer que l'efficacité de la machine est inférieure à la valeur limite : $e = \frac{(T_1 - T_2) T_3}{(T_2 - T_3) T_1}$

4- A T_2 et T_3 fixés, comment choisir T_1 pour avoir un rendement le plus élevé possible ?

5- Montrer que cette machine peut être réalisée à partir de deux machines dithermes judicieusement assemblées. Retrouver l'expression de l'efficacité maximale.

Th 17 : Etude d'un moteur thermique. (Mines)

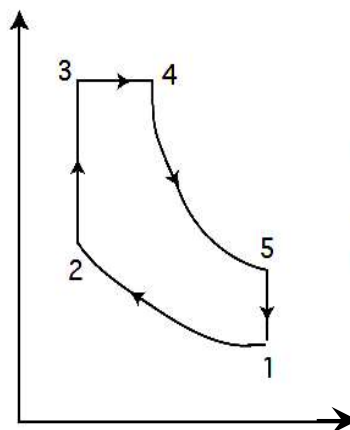
On considère que le cycle représenté sur le diagramme de Clapeyron ci-contre, subi par un gaz supposé parfait de coefficient $\gamma = 1,4$, modélise un moteur de voiture. Les valeurs numériques utiles sont :

$$P_1 = 1 \text{ bar} \quad P_2 = 5 \text{ bar} \quad P_3 = 8 \text{ bar} \quad P_5 = 2 \text{ bar} \\ T_1 = 300 \text{ K} \quad T_3 = 700 \text{ K} \quad T_4 = 900 \text{ K} \quad V_1 = 5 \text{ L}$$

Les étapes 1 – 2 et 4 – 5 de ce cycle modèle sont supposées adiabatiques et réversibles ; les étapes 2 – 3 et 3 – 4 correspondent à une combustion interne du gaz.

1- Enoncer et démontrer la loi de Laplace pour une évolution adiabatique et réversible.

2- Déterminer le travail fourni par le moteur sur un cycle, puis la puissance fournie sachant que le moteur effectue 2400 tours par minutes et qu'un cycle correspond à 2 tours.

**Th 18 : Cycle de Beau de Rochas. (Mines, Centrale)**

Le fonctionnement d'un moteur d'automobile est schématisé sur le diagramme de Watt ci-dessous où V est le volume de la chambre du cylindre et P la pression du gaz contenu dans cette chambre. Les étapes successives du cycle sont :

I→A : Admission du mélange air-essence à la température ambiante (300 K) et sous la pression atmosphérique (1 bar).

A→B : Compression du mélange, adiabatique et réversible.

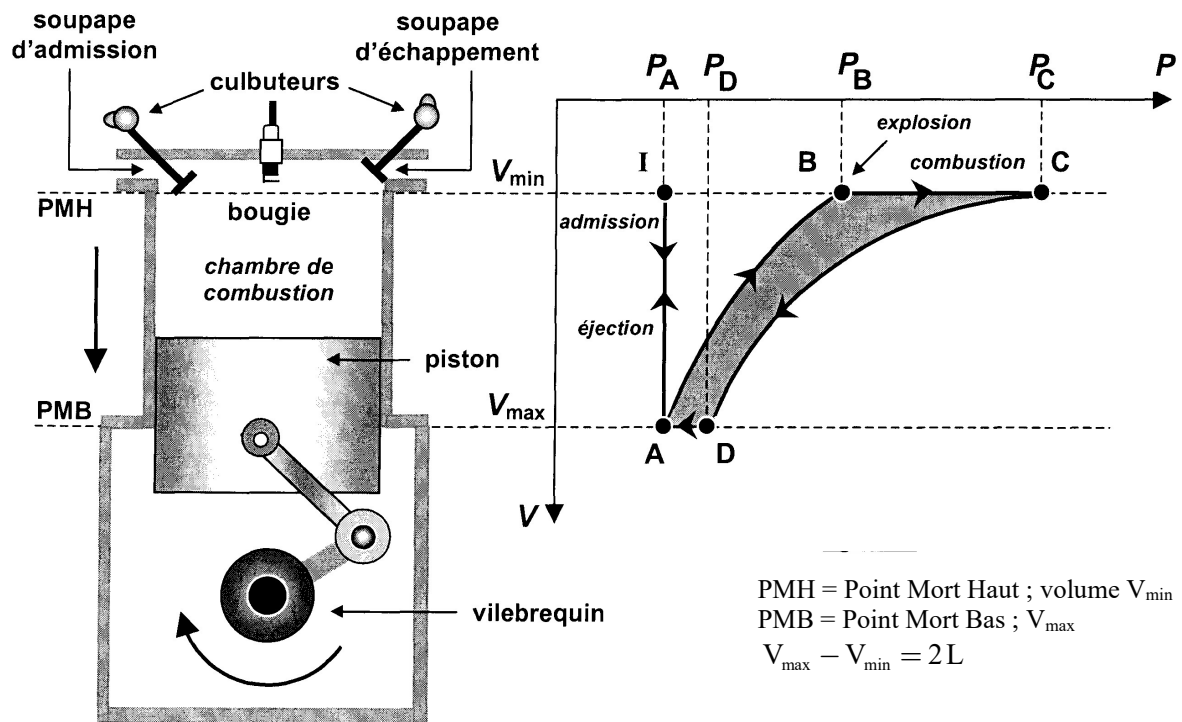
B→C : En B une étincelle provoque l'explosion suivie d'une compression isochore.

C→D : En C fin de combustion suivie d'une détente adiabatique et réversible du gaz brûlé.

D→A : L'ouverture de la soupape ramène le gaz brûlé à pression atmosphérique.

A→I : Ejection des gaz brûlés.

L'essence est de l'octane : masse volumique $\rho = 720 \text{ kg.m}^{-3}$, masse molaire $M = 38 \text{ g.mol}^{-1}$. Le mélange initial et le gaz brûlé sont assimilés à un même gaz parfait de coefficient isentropique γ égal à 1,35 et le nombre de moles présent dans la chambre est supposé inchangé par la combustion interne. On rappelle que le pourcentage molaire de dioxygène dans l'air est de 20,9% et que la constante des gaz parfaits vaut : $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.



- 1- Justifier les différents éléments de modélisation : adiabaticité ou caractère isochore de certaines étapes, hypothèses de réversibilité, approximation du gaz parfait et choix de la valeur 1,35 pour γ sans changement lors de la combustion. Expliquer également pourquoi il est possible d'étudier le moteur en raisonnant sur un fonctionnement selon des cycles fermés malgré les phases d'admission et d'éjection. A combien d'aller-retour du piston un cycle du moteur correspond-il ?
- 2- Définir puis exprimer le rendement thermique r du moteur en fonction du rapport volumétrique $a = V_{\max} / V_{\min}$. Commenter, calculer r pour $a = 9$, puis calculer le rendement global du moteur sachant que le rendement mécanique est de 75%.
- 3- Sachant que le mélange air-essence s'enflamme spontanément si sa température atteint 430°C , ce qui nuit au bon fonctionnement du moteur, montrer qu'il faut limiter a à une valeur $a_{\max}$ que l'on déterminera.
- 4- Le gaz aspiré lors de l'étape d'admission est un mélange air-octane (C_8H_{18}) dans les proportions stœchiométriques de la réaction de combustion qui a lieu lors de la phase $B \rightarrow C$. Ecrire cette réaction de combustion et en déduire la masse d'octane injectée à chaque admission. Pourquoi choisit-on les proportions stœchiométriques ?
- 5- Sachant que la quantité d'énergie libérée par la combustion de l'octane est de 44700 kJ par kg, calculer la température et la pression atteintes en fin de combustion. Comment expliquer les valeurs anormalement élevées obtenues ?
- 6- L'automobile se déplace sur une autoroute et le tableau de bord indique 110 km/h et 3500 tours par minutes. En utilisant le modèle précédent, calculer la consommation de carburant aux 100 km et la puissance développée, que l'on donnera en chevaux (un cheval-vapeur = 736 W). Commenter.

Th 19 : Etude d'une turbine à vapeur d'eau. (Exo original type Centrale-Mines)

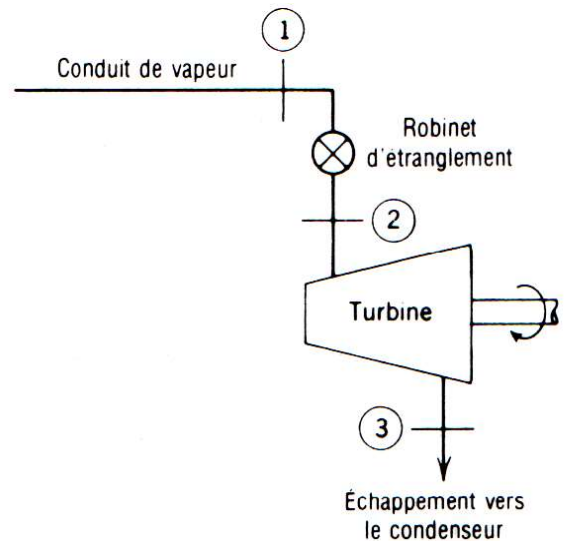
On envisage une turbine fonctionnant avec de la vapeur d'eau en écoulement stationnaire (masse molaire de l'eau : 18 g/mol). Dans toute l'étude les variations d'énergie cinétique et potentielle massiques seront négligées. L'eau pénètre sous forme vapeur à la pression $p_e = 2,0 \text{ MPa}$ et à la température $\theta_e = 400 \text{ °C}$ (état 1) ; elle ressort à la pression $p_s = 10 \text{ kPa}$ (état 3). Son évolution dans la turbine est supposée adiabatique et réversible.

- 1- En utilisant certaines des données thermodynamiques fournies et en explicitant clairement les raisonnements et les notations utilisés, déterminer :
 - L'état de sortie de l'eau (température, état monophasé ou diphasé et, le cas échéant, les titres massiques en liquide et vapeur) ;
 - Le travail utile massique fourni par la turbine.

Une des techniques employées pour faire fonctionner la turbine à charge réduite consiste à détendre la vapeur d'eau par un étranglement avant qu'elle ne pénètre dans la turbine (voir le schéma ci-contre où l'on a précisé les états 1 et 3 précédents).

L'écoulement de la vapeur d'eau dans l'étranglement se fait sans transfert thermique et sans travail utile. On souhaite que la puissance fournie par la turbine soit égale à 80 % de ce qu'elle fournit en pleine charge.

- 2- Montrer que l'état de l'eau en sortie de la turbine est différent par rapport au fonctionnement précédent et caractériser complètement cet état.
- 3- En traitant la vapeur comme un gaz parfait, déterminer la pression de l'eau en sortie de l'étranglement (état 2).

**Données thermodynamiques :**

- Constante de gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
- Vapeur d'eau surchauffée à 2,0 MPa et 400°C :

Volume massique ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$)	Energie interne massique ($\text{kJ}.\text{kg}^{-1}$)	Enthalpie massique ($\text{kJ}.\text{kg}^{-1}$)	Entropie massique ($\text{kJ}.\text{K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$)
0,151	2945	3248	7,13

- Vapeur d'eau saturée à 10 kPa :

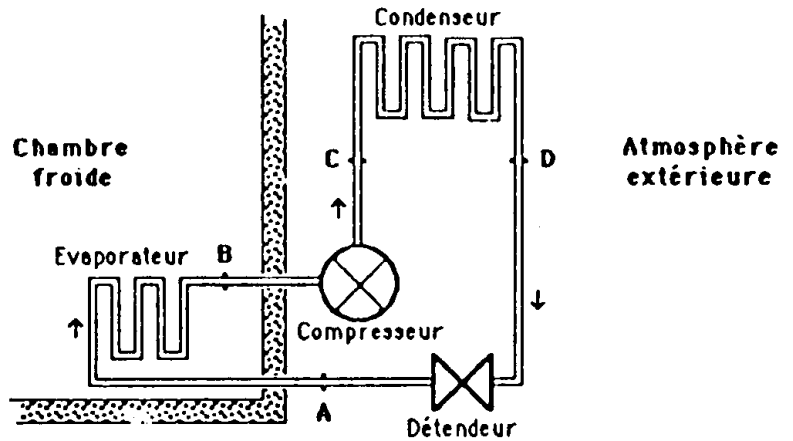
Température	Enthalpie massique de la vapeur ($\text{kJ}.\text{kg}^{-1}$)	Enthalpie massique du liquide ($\text{kJ}.\text{kg}^{-1}$)	Entropie massique de la vapeur ($\text{kJ}.\text{K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$)	Entropie massique du liquide ($\text{kJ}.\text{K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$)
45,6 °C	2585	192	8,15	0,65

Th 20 : Etude d'une machine frigorifique. (Mines)

L'installation frigorifique ci-contre permet de prélever de la chaleur à l'intérieur d'une chambre froide et de céder de la chaleur à l'atmosphère extérieure.

Pour simplifier l'étude, on admet que le fluide utilisé dans la machine décrit le cycle quasi-statique suivant :

- Le fluide pénètre dans l'évaporateur (radiateur échangeur) où il achève sa vaporisation à la température T_2 et sous la pression P_2 , pression d'équilibre du changement d'état liquide vapeur à T_2 .
- Il quitte l'évaporateur, entièrement gazeux à la température T_2 et sous la pression P_2 (point B)
- Il subit ensuite une transformation, adiabatique dans le compresseur. Le fluide y reçoit de l'énergie grâce à des pâles en rotation entraînées par un moteur électrique. S sort, gazeux, à la température T'_1 et sous la pression P_1 (point C)
- Il pénètre alors dans le condenseur (radiateur échangeur) où il est maintenu à la pression P_1 constante. Il s'y refroidit, puis s'y liquéfie entièrement (point D) à la température T_1 .
- Dans le détendeur (qui ne contient pas de pièces mobiles), il subit une détente isenthalpique et passe de l'état (T_1, P_1) à l'état (T_2, P_2) (point A) où il est partiellement vaporisé.



Hypothèses de travail :

- Le fluide gazeux de masse molaire M sera supposé parfait avec γ constante.
- La chaleur latente massique de vaporisation du fluide est notée $L_v(T)$
- c_l est la capacité calorifique massique du liquide supposée constante
- Le groupe fonctionne en régime permanent ; l'énergie cinétique du fluide et l'action de la pesanteur sont négligées.

Données :

$T_1 = 350 \text{ K}$	$P_1 = 12,65 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
$T_2 = 273 \text{ K}$	$P_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
$L_v(T_1) = 175 \text{ kJ.kg}^{-1}$	$M = 86,5 \text{ g.mol}^{-1}$
$L_v(T_2) = 205 \text{ kJ.kg}^{-1}$	$c_l = 1,38 \text{ kJ.K}^{-1}\text{kg}^{-1}$
$\gamma = 1,20$	$R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}\text{mol}^{-1}$

- 1- Représenter l'allure du cycle dans un diagramme de Clapeyron puis dans un diagramme des frigoristes. On fera figurer sur ces diagrammes les courbes de saturation du fluide.
- 2- Quel est, actuellement, le type de fluide utilisé dans les installations frigorifiques ?
- 3- Déterminer la température du fluide au point C et la composition du fluide au point A.
- 4- Calculer les différents transferts thermiques mis en jeu au cours du cycle puis l'efficacité de l'installation.
- 5- Quelle efficacité maximale pouvait-on attendre ? Pourquoi cette efficacité maximale n'est-elle pas atteinte ? La baisse d'efficacité doit-elle être imputée à une étape du cycle en particulier ?