Thermodynamique des systèmes fermés

Exercice 1 : Cycle moteur de Carnot

Un système de n moles de gaz parfait décrit le cycle ABCD, dit cycle ditherme de Carnot, composé par la suite de transformations réversibles. Le cycle est supposé moteur et au contact de deux thermostats.

1) Tracer l'allure du cycle dans un diagramme de Clapeyron.
2) Appliquer le 1e et le 2nd principe et en déduire le rendement de ce moteur. On appellera T_f et T_c la température des deux thermostats.

Exercice 2 : Réfrigérateur de Carnot

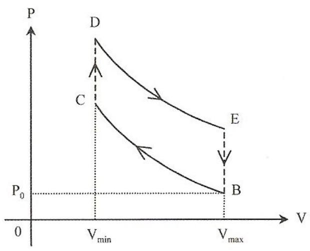
Soit un réfrigérateur cyclique, réversible et ditherme. Exprimer son efficacité en fonction de la température de la source chaude T_C et de la source froide T_f (températures supposées constantes).

Exercice 3 : PAC de Carnot

Soit une pompe à chaleur cyclique, réversible et ditherme. Exprimer son efficacité (en mode chauffage) en fonction de la température de la source chaude T_C et de la source froide T_f (température supposées constantes).

Exercice 4 : Moteur essence non réversible

L'agent thermique est un mélange air-essence subissant le cycle ci-dessous



Les grandeurs physiques seront affectées d'un indice correspondant à leur valeur au point du cycle considéré (B, C, D ou E). On considère la transformation de n moles de gaz parfait dont la capacité calorifique à volume constant est notée C_V . Les compressions et détentes sont supposées adiabatiques et mécaniquement réversibles.

1) Donner l'expression du rendement r de ce moteur en fonction des températures T_B, T_C, T_D et T_E.
2) Montrer ensuite que ce rendement est indépendant de la température mais juste fonction de $a = \frac{V_{max}}{V_{min}}$. Faire un calcul de rendement en prenant $\gamma = \frac{3}{2}$ et $a = 9$

Exercice 5 : Chaudière + pompe à chaleur

On souhaite maintenir la température d'une serre à la valeur constante $T_1 = 293K$. L'air extérieur est à la température $T_2 = 283K$. Dans ce but, on utilise une chaudière à la température $T_3 = 600K$ capable de fournir un transfert thermique Q_3.

A) Etude de la chaudière :

1) La chaudière utilise du méthane dont la combustion avec l'oxygène conduit à du dioxyde de carbone et de l'eau (l'ensemble étant en phase vapeur). Ecrire la réaction en affectant un coefficient stœchiométrique unitaire au méthane CH_4
2) En utilisant les données ci-dessous, calculer l'enthalpie standard de cette réaction à 293 K.

	$CH_{4(g)}$	$O_{2(g)}$	$CO_{2(g)}$	$H_2O_{(g)}$
$\Delta_f H^0 (kJ.mol^{-1})$	-75	-	-400	-250

3) Cette réaction est exothermique ou endothermique ?

On décide de ne pas utiliser directement la chaudière pour chauffer la serre mais d'adopter le dispositif suivant : la chaudière fournit le transfert thermique Q_3 à l'agent thermique d'un moteur cyclique réversible fonctionnant entre la chaudière à la température T_3 et l'air extérieur à T_2. Le travail $-W$ récupéré du moteur est utilisé pour actionner une pompe à chaleur réversible fonctionnant entre l'extérieur à T_2 et l'intérieur de la serre à T_1. On note Q_2 le transfert thermique algébrique de l'extérieur vers à l'agent thermique de la pompe. On note Q_1 le transfert thermique algébrique de l'intérieur de la serre vers l'agent thermique de la pompe.

B) Etude du dispositif :

1) Reporter sur un schéma de principe les différents échanges énergétiques algébriques mis en jeu lors du chauffage
2) Exprimer le transfert thermique Q_3 mise en jeu par le moteur en fonction de W, T_2 et T_3.
3) Exprimer le transfert thermique algébrique Q_1 de l'intérieur de la serre vers l'agent thermique de la pompe en fonction de W, T_1 et T_2
4) Définir puis exprimer l'efficacité e de l'ensemble du dispositif en fonction T_1, T_2 et T_3

Exercice 6 : Problème de chimie (*)

Calculer l'enthalpie standard de formation de l'eau vapeur à 473K.
Données : $C_{p,m}(O_{2(g)}) = C_{p,m}(H_{2(g)}) \approx C_{p,m}(H_2O_{(g)}) \approx 30JK^{-1}mol^{-1}$, $C_{p,m}(H_2O_{(l)}) = 75JK^{-1}mol^{-1}$, $\Delta_f H^0(H_2O_{(l)}, 300K) = -286kJ/mol$; $\Delta_{vap}H^0(373K) = 40kJ/mol$

Exercice 7 : Problème de chimie

Estimer le nombre de casseroles contenant 1L d'eau liquide à 0°C que l'on peut porter à ébullition avec une bouteille contenant du propane.

$\Delta_f H^0(propane_{(g)}) = -100kJ.mol^{-1}$, $\Delta_f H^0(H_2O_{(g)}) = -250kJ.mol^{-1}$, $\Delta_f H^0(CO_{2(g)}) = -400kJ.mol^{-1}$ et $c_{eau(l)} \approx 4000J/K/kg$

Thermodynamique des systèmes ouverts

Exercice 8 : Machine frigorigène-Diagramme T(s) et P(h)

Soit une machine cyclique, ditherme qui impose au fluide frigorigène (ici du R134A) le cycle suivant :

- En A, le fluide est un gaz saturé et entre dans le compresseur : $A\{T_A, P_A\}$
- La transformation $A \rightarrow B$ est une compression supposée adiabatique et mécaniquement réversible, le fluide reste alors toujours à l'état gazeux (surchauffé) : $B\{T_B, P_B\}$
- La transformation $B \rightarrow C$ est un refroidissement isobare jusqu'à la première goutte de liquide (il entre alors dans le condenseur) : $C\{T_C, P_B\}$
- La transformation $C \rightarrow D$ est une liquéfaction à la pression P_B aboutissant à un liquide saturé :$D\{T_C, P_B\}$
- Le liquide subit une détente isenthalpique (détente de Joule-Thomson) faisant apparaître un mélange diphasé en $E\{T_E, P_A\}$
- Vaporisation isobare jusqu'à un gaz saturé en $A\{T_E, P_A\}$ dans l'évaporateur.

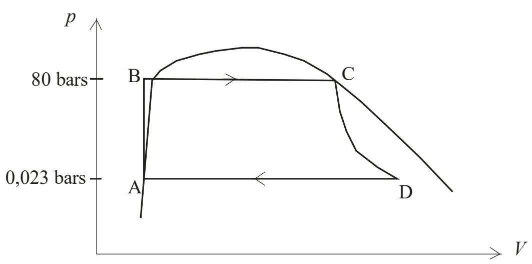
1) Tracer le cycle précédent sur le diagramme $p(h)$ fourni sachant que D et E sont confondus et avec les valeurs suivantes :

$P_A(bar) = 1{,}5 + 1$	$P_B(bar) = 9 + 1$

2) En déduire, par lecture graphique, les valeurs des grandeurs suivantes :
   - Le travail massique w du compresseur
   - Le transfert thermique q_f mis en jeu au niveau de l'évaporateur
   - Le transfert thermique q_c mis en jeu au niveau du condenseur
3) Vérifier que vos mesures conduisent à $q_f + q_c + w \approx 0$. Pourquoi ?
4) Exprimer puis calculer le coefficient de performance de cette machine réfrigérante.
5) Dessiner le cycle précédent dans un diagramme $T(s)$.
6) Montrer qu'il est possible de retrouver les valeurs de q_f et q_c sur ce diagramme $T(s)$
7) Evaluer, à l'aide du diagramme $T(s)$, la fraction massique en liquide au point E. En déduire la chaleur latente de vaporisation du fluide pour cette basse pression.

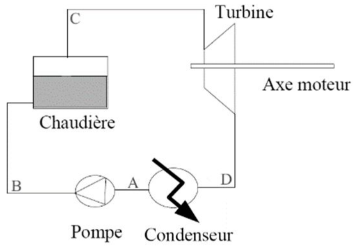
Exercice 9 : Cycle de Rankine- diagramme P(v)

On considère une machine motrice ditherme suivant le cycle de Rankine que l'on va décrire dans un diagramme de Clapeyron.



Cette machine est constituée :

- d'une chaudière (transformation BC)
- d'une turbine entraînant un axe moteur (transformation CD)
- d'un condenseur (transformation DA)
- d'une pompe (transformation AB)



- Etat (A) : L'eau est liquide saturant : $p_1 = 0{,}023 bar$ et $T_1 = 293K$
- Transformation (AB) : l'eau est amenée grâce à une pompe vers la chaudière sous une compression $p_2 = 80bar$. La transformation (AB) est adiabatique et réversible.
- Transformation (BC) : l'eau est chauffée puis vaporisée totalement de manière isobare dans la chaudière à la pression $p_2 = 80bar$.
- Transformation (CD) : La vapeur d'eau saturée se détend de manière adiabatique et réversible dans une turbine jusqu'à la pression $p_1 = 0{,}023bar$. La fraction massique de vapeur en D est alors x.
- Transformation (DA) : La vapeur restante se condense à la pression $p_1 = 0{,}023bar$.

On donne les valeurs suivantes :

Température en K	Pression de vapeur saturante en bar	enthalpie massique en kJ.kg^{-1}		Entropie massique en kJ.K^{-1}.kg^{-1}	
		h_l	h_v	s_l	s_v
293	0,023 (p_1)	85	2540	0,3	8,7
573	80 (p_2)	1290	2890	3,2	6,0

L'écoulement est stationnaire (permanent) et on néglige les variations d'énergie potentielle et cinétique

1) Démontrer que (CD) est une isentropique.
2) Calculer le titre en vapeur x en (D).
3) Calculer le travail indiqué w massique de la turbine.
4) Pourquoi peut-on considérer que $h_B \approx h_A$?
5) Calculer le transfert thermique massique q_{BC}
6) Calculer le rendement r de la machine.
7) Calculer le rendement maximal qu'on aurait pu avoir avec les mêmes températures.

Exercice 10 : cycle de Hirn

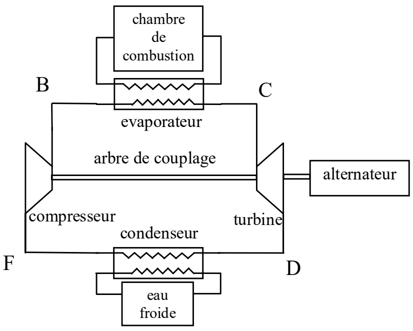
Une centrale thermique permet la production d'électricité à partir de la combustion de fuel ou de charbon. L'eau subit différentes transformations afin de produire une puissance mécanique $P = 250MW$ transformée ensuite en puissance électrique.

Dans la chambre de combustion, l'eau atteint la température $T_c = 500°C$ constante ; grâce au circuit secondaire de refroidissement, la température de l'eau chute à $T_f = 65°C$ constante.

1) Déterminer, en faisant la démonstration, le rendement maximal de la centrale et en déduire la puissance minimale thermique $P_{idéale}$ de la chambre de combustion. Effectuer les applications numériques.

2) Dans le compresseur et dans la turbine, la compression et la détente sont adiabatiques et réversibles. Quelle propriété ont ces transformations. ? En effectuer la démonstration.

3) Pourquoi, pour ce type de machine, vaut-il mieux comprimer un liquide ?



- A l'entrée F du compresseur, l'eau est à l'état liquide saturée à $P_1 = 0{,}2bar$ et $T_f = 65°C$
- FB : Elle subit une compression jusqu'à $P_2 = 100bar$ tout en restant liquide.
- BC : Dans l'évaporateur, la température de l'eau augmente jusqu'à $T_c = 500°C$; en négligeant la viscosité la transformation est isobare $P_2 = 100bar$.
- CD : Dans la turbine, la pression de l'eau chute jusqu'à $P_1 = 0{,}2bar$. Le système est diphasé
- DF : Dans le condenseur, l'eau à $T_f = 65°C$ entre en contact avec un circuit de refroidissement secondaire. En négligeant la viscosité, la liquéfaction est isobare $P_1 = 0{,}2bar$.

Etat	F	C	D
h (kJ/kg)	250	3400	2200

Le diagramme thermodynamique T (°C)-s (kJ.K^{-1}.kg^{-1}) de l'eau est constitué de réseaux de courbes isenthalpiques (en kJ.kg^{-1}) et isobares (en bar). Pour des raisons de lisibilité, les isobares n'ont pas été représentées sous la courbe de saturation. Dans ce type de diagramme, les points F et B sont très proches et on les confondra.

4) Tracer le cycle sur le diagramme.

5) Déterminer les valeurs des transferts thermiques massiques q_{BC} et q_{DF} en justifiant vos calculs.

6) En déduire le rendement de la machine.

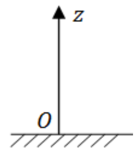
7) Déterminer le débit d'eau D de la machine.

8) Déterminer la faction massique x en vapeur à l'état D.

Mécanique des fluides

Exercice 11 :

On considère l'atmosphère terrestre comme un gaz parfait isotherme (de température T_0 et de masse molaire M). Donner l'expression de la pression $P(z)$ en référentiel terrestre galiléen (le champ de pesanteur g est considéré uniforme et vertical). On utilisera le repérage ci-contre et une pression au niveau du sol donnée par P_0.



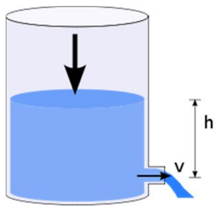
Exercice 12 : Débit volumique

On observe un écoulement axial à symétrie cylindrique dans une conduite cylindrique de rayon R. Calculer le débit volumique et la vitesse moyenne de l'écoulement (appelée aussi vitesse débitante) si :

- $v_z = v_0$ avec vitesse v_0 constante
- $v_z = v_0(1 - \frac{r^2}{R^2})$ avec v_0 vitesse en $r = 0$

Exercice 13 : Vidange

On considère l'écoulement d'un liquide incompressible, parfait dans un réservoir percé. La situation est maintenue stationnaire par une alimentation continue en eau. L'eau évacuée se retrouve à la sortie du dispositif à la pression atmosphérique P_0. On note g l'intensité du champ de pesanteur terrestre.



1) Exprimer la vitesse v d'éjection si la section s en sortie est bien plus petite que la section S du réservoir.

Pour aller plus loin (*)

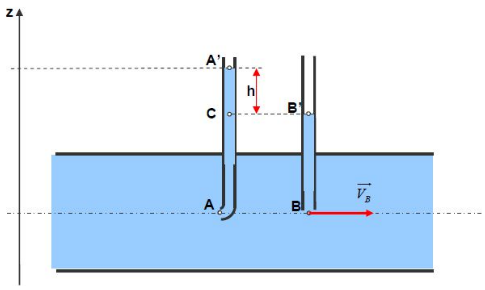
Le réservoir n'est plus alimenté et se vidange au cours du temps. Le liquide est encore considéré comme un fluide parfait et incompressible et $S \gg s$ et la vitesse d'évacuation est alors :

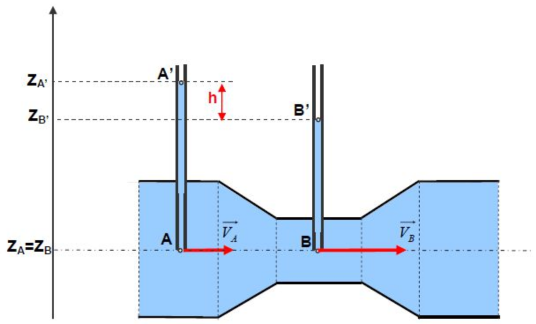
$$v(t) = \sqrt{2gh(t)}$$

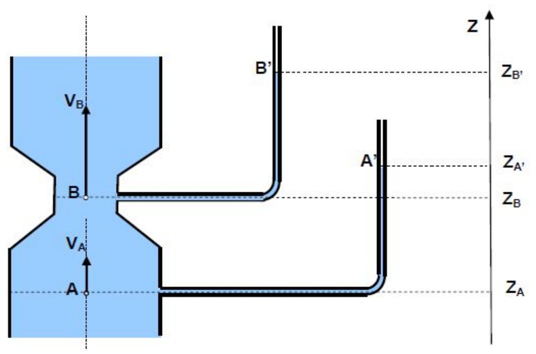
2) Déterminer alors le durée τ de vidange si le réservoir est initialement rempli jusqu'à une hauteur h_0.

Exercice 14 : Débitmètre

Montrer que chaque système peut constituer un débitmètre. Les fluides seront tous supposés parfaits et incompressibles et les écoulement stationnaires et parfaitement axiaux.







Exercice 15 : problème ouvert

Estimer la puissance minimale d'une pompe permettant de puiser de l'eau au repos à 10 mètres sous terre avec un débit de 10L/s.

Conduction thermique

Exercice 16

On considère une pièce à la température $T_i = 20°C$. La température extérieure est $T_e = 5°C$.

- Simple vitrage

On étudie les transferts thermiques avec l'extérieur à travers une vitre en verre de conductivité thermique $\lambda = 1W.m^{-1}.K^{-1}$, de largeur 50cm, de longueur 60cm et d'épaisseur 3mm. On suppose qu'il y a un flux sortant à travers les parois de la pièce et on se place en régime stationnaire. On néglige le flux conducto-convectif et les effets de bords (flux unidirectionnel et unidimensionnel).

1) Définir et calculer la résistance thermique de la vitre. En déduire la puissance thermique perdue.

- Double vitrage

On remplace le simple vitrage par un double vitrage constitué de deux vitres (identiques à la précédente) renfermant une couche d'air de conductivité thermique $\lambda = 0{,}01W.m^{-1}.K^{-1}$, d'épaisseur 30mm.

2) Calculer la puissance thermique perdue. Analyser.

Exercice 17 : Résistance thermique entre deux cylindres coaxiaux

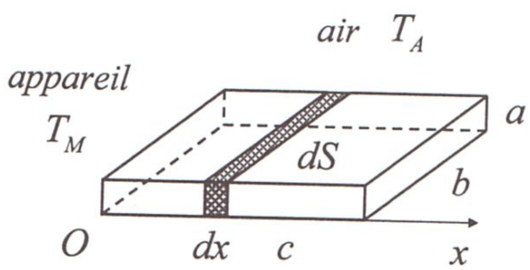
On considère un matériau conducteur compris entre deux cylindres coaxiaux, de rayon R_1 et $R_2 > R_1$, de conductivité λ. Les parois cylindriques de ce matériau sont maintenues constantes à la température T_1 pour $r = R_1$ et à la température T_2 pour $r = R_2$. On se place en régime stationnaire, on néglige les effets de bords et le système présente un profil des températures à symétrie cylindrique.

1) Justifier pourquoi le vecteur densité de flux de conduction thermique est tel que $\vec{j} = j(r)\vec{u_r}$.
2) Donner la résistance thermique R_{th} entre deux cylindres de hauteur H en fonction de λ, R_1, R_2 et H.
3) Donner des exemples concrets où ce modèle de conduction est applicable.
4) Etudier le cas particulier où R_1 et R_2 sont très proches.

Exercice 18 : Ailette de refroidissement

Pour éviter un échauffement trop important des appareils électriques, dû à l'effet Joule, on munit l'arrière de leur boitier d'ailettes de refroidissement métalliques.

Dans note cas, chaque ailette est parallélépipédique, d'épaisseur $a = 1mm$, de largeur $b = 10cm$ et de longueur $c = 10cm$. Dans les calculs on admettra que $a \ll b$.



En fonctionnement stationnaire, le boîtier de l'appareil maintient une température $T_M = 60°C$. L'air extérieur est à température constante et uniforme $T_A = 20°C$, sauf au voisinage immédiat de l'ailette, entourée d'une couche limite d'air vérifiant la loi de Newton dont le coefficient de transfert conducto-convectif est $h = 250W.m^{-2}.K^{-1}$. Dans l'ailette, on admet une conduction thermique est monodimensionnel et unidirectionnel suivant Ox, la loi de Fourier s'applique et la conductivité est $\lambda = 50W.m^{-1}.K^{-1}$.

1) Ecrire le bilan en régime stationnaire des échanges thermiques d'une tranche de l'ailette de largeur dx. En déduire que la température $T(x)$ est la solution de l'équation différentielle : $\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{T}{\delta^2} = -\frac{T_A}{\delta^2}$.
2) Interpréter la quantité δ à l'aide d à l'aide d'une analyse dimensionnelle.
3) Justifier que $T(c) \approx T_A$ après avoir calculé δ.

4) Résoudre l'équation différentielle précédente et donner l'expression simplifiée de $T(x)$ compte tenu de l'inégalité entre δ et c.
5) Exprimer par deux méthodes et calculer numériquement la puissance thermique totale P évacuée par une ailette.
6) Combien faudrait-il fixer d'ailette sur le boîtier pour évacuer une puissance totale $P_{tot} = 200W$?

Exercice 19 : question ouverte (*)

On considère un tube métallique cylindrique d'axe Oz, de longueur L, de rayon intérieur R_1 et de rayon extérieur R_2, de conductivité thermique λ. A l'intérieur de ce tube circule de l'eau suivant l'axe Oz et dont la température est $T(z)$.

Conduite islandaise permettant le cheminement des eaux chaudes des geysers

L'air à l'extérieur de la structure est à température constante à T_0. Les échanges thermiques à l'interface eau/paroi intérieure (respectivement paroi extérieur/air) sont modélisés par la loi de Newton avec le coefficient d'échange h_1 (respectivement h_2). On supposera que les échanges thermiques se font uniquement suivant $\overrightarrow{u_r}$ (vecteur unitaire radial). Tous les transferts thermiques sont supposés stationnaires. On donne : $\lambda = 0{,}1W.m^{-1}K^{-1}, h_1 = 50W.m^{-2}K^{-1}, h_2 = 25W.m^{-2}K^{-1}, R_1 = 30cm, R_2 = 40cm$ et $T_0 = 20°C$,

Déterminer la longueur L du tube limitant un refroidissement de 20% de l'eau. Le débit massique est $D_m = 100kg/s$ et la capacité thermique massique de l'eau est $c = 4000J/K/kg$. On négligera les variations d'énergies potentielle et $T(z = 0) = 90°C$