

- Machines thermiques -

✱ **Exercice 01 : Invention d'une machine ditherme**

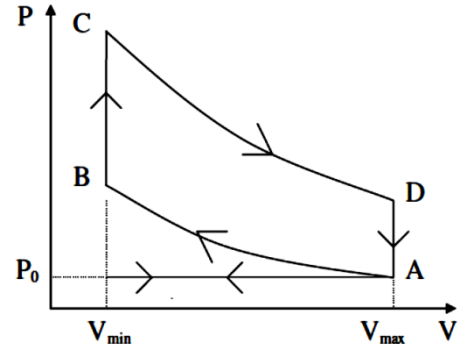
Un inventeur affirme qu'il a conçu un moteur qui réalise des échanges thermiques avec des thermostats à 27 °C et 267 °C. Ce moteur pourrait fournir 0,45 J de travail pour 1,0 J d'énergie thermique extrait de la source chaude.

- 1- Faire un schéma conventionnel de ce moteur avec les notations W (travail algébriquement reçu par le fluide), Q_C et Q_F (transferts thermiques algébriquement reçus par le fluide de la part de la source chaude et de la source froide).
- 2- Déterminer les valeurs de W, Q_C et Q_F . En déduire si le moteur décrit par cet inventeur peut exister.
- 3- Le moteur décrit par cet inventeur peut-il exister ?

✱ **Exercice 02 : Rendement d'un moteur thermique**

Le fonctionnement d'un moteur thermique peut être décrit par le cycle réversible de Beau de Rochas décrit ci-après pour un seul cylindre du moteur :

- Après l'admission de n moles de gaz, mélange air/essence, il y a fermeture de la soupape d'admission des gaz au point A ($P_A = 1,0$ bar).
- De A à B, le gaz est très rapidement comprimé, passant du volume $V_A = 2,4$ L au volume $V_B = 0,30$ L.
- De B à C, la combustion des gaz s'accompagne d'une forte élévation de température et de la pression qui passe de $P_B = 18$ bar à $P_C = 40$ bar.
- De C à D, une détente très rapide amène la pression du gaz à $P_D = 2,2$ bar.
- De D à A, la pression des gaz redevient égale à $P_A = 1,0$ bar.
- En A, il y a ouverture de la soupape d'échappement des gaz.



On suppose les gaz parfaits (constante des gaz parfaits : $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1} . \text{mol}^{-1}$).

- 1- On suppose que la quantité de matière du système est constante : commenter cette hypothèse.
- 2- En analysant l'allure du cycle fourni, donner la nature de chaque transformation.
- 3- Exprimer le travail et l'énergie thermique algébriquement reçus par le système pour chaque transformation en fonction des différents volumes et pressions ainsi que de la capacité thermique molaire à volume constant C_{V_m} du mélange air/essence.
- 4- Définir et exprimer le rendement de ce moteur en fonction des différents volumes et pressions puis faire l'application numérique et commenter le résultat obtenu.

✱ **Exercice 03 : Cycle de Stirling**

Le **moteur Stirling** est un moteur à combustion externe inventé par Robert Stirling en 1816. Pour améliorer son efficacité, le moteur est muni d'un régénérateur, qui assure une fonction de stockage thermique et d'échangeur interne.

A/ Fonctionnement SANS régénérateur

On fait subir à n moles d'un gaz parfait un cycle de transformations réversibles : compression isotherme à la température T_F de l'état A (volume V_1 , pression P_A) à l'état B (volume $V_2 < V_1$, pression P_B), compression isochore infiniment lente de l'état B à l'état C (pression P_C), détente isotherme à la température T_C de l'état C à l'état D (volume V_1 , pression P_D), diminution de pression isochore infiniment lente de l'état D à l'état A.

- 1- Représenter le cycle dans le diagramme de Watt $P = f(V)$.
- 2- La capacité thermique molaire à volume constant du gaz étudiée vaut $C_{V_m} = 5 R / 2$. En déduire les expressions des transferts thermiques Q_i et des travaux W_i des forces de pression algébriquement reçus par le fluide au cours de chaque transformation en fonction de n, R, T_F , T_C , V_1 et V_2 .
- 3- Indiquer le signe de chaque transfert thermique Q_i et de chaque travail W_i exprimés précédemment.

4- Définir le rendement de ce moteur et montrer que son expression est :
$$\eta = \frac{(T_C - T_F) \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}}{\frac{5}{2}(T_C - T_F) + T_C \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}}$$

- 5- Calculer le rendement pour $T_F = 300 \text{ K}$; $T_C = 700 \text{ K}$, $V_1 = 5,0 \text{ L}$ et $V_2 = 1,0 \text{ L}$.

B/ Fonctionnement AVEC régénérateur

On veut augmenter ce rendement en restituant au gaz sur la branche BC une proportion $\alpha (< 1)$ de la perte thermique Q_{DA} . L'énergie thermique qu'il est nécessaire de fournir au fluide sur la branche BC ne vaut alors plus Q_{BC} mais Q'_{BC} .

- 6- Exprimer Q'_{BC} en fonction de n, R, α , T_C et T_F .
- 7- Établir l'expression du nouveau rendement η' en fonction de T_C , T_F , V_1 , V_2 et α .
- 8- Que devient cette expression dans le cas limite où $\alpha = 1$? Commenter. Montrer que ce cas limite ne peut pas être atteint.

✳ Exercice 04 : Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur permet, grâce à un apport d'énergie sous forme de travail W , d'extraire une énergie sous forme de transfert thermique Q_F à une source froide de température T_F et de restituer une énergie sous forme de transfert thermique Q_C à la source chaude de température T_C , par exemple une salle que l'on veut chauffer.

Lors de son fonctionnement, la pompe à chaleur fait subir à un fluide caloporteur deux transformations isobares aux cours desquelles les échanges thermiques avec les sources froide et chaude se produisent. On néglige les variations d'énergie cinétique et potentielle de pesanteur du fluide au cours du cycle, les transformations subies seront supposées réversibles et on considèrera que le régime stationnaire est établi.

Le fluide frigorigène utilisé est du 1,1,1,2-tétrafluoroéthane, nommé R134a (diagramme enthalpie-pression donné page suivante). On utilise $m = 200$ g de 1,1,1,2-tétrafluoroéthane et on lui fait subir le cycle de transformations suivantes :

▪ Passage du fluide dans le compresseur

Le point (1) sur le diagramme caractérise le fluide à l'entrée du compresseur : il y est à la pression $P_1 = 3,00$ bars et à une température $\theta_1 = 5$ °C. Le fluide est comprimé dans le compresseur, la transformation est adiabatique réversible (isentropique). La pression passe de 3,00 bars à 10,0 bars. Le point (2) caractérise le fluide à la sortie du compresseur.

▪ Passage du fluide dans le condenseur

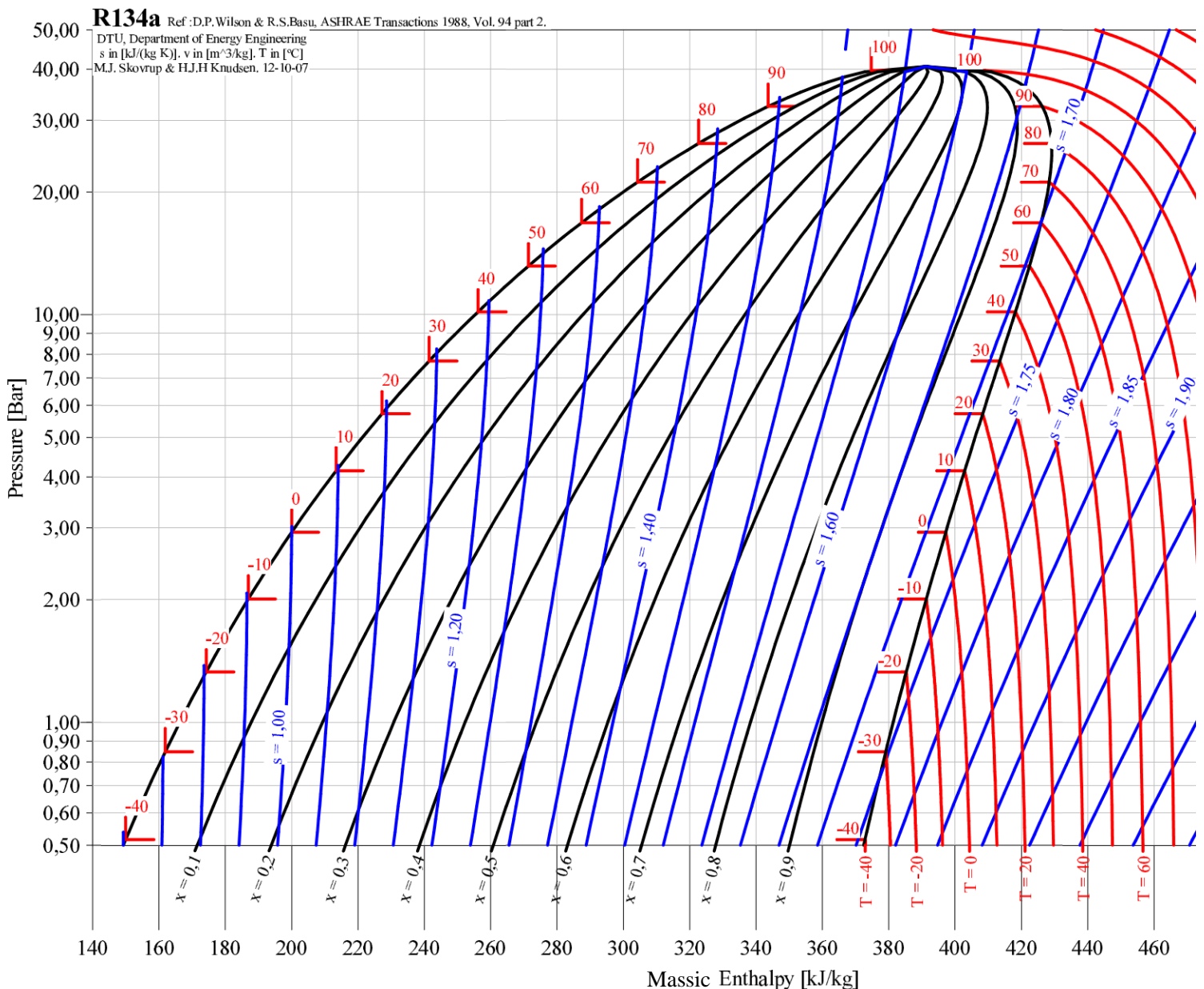
Dans le condenseur, la transformation est isobare et sa pression est de 10,0 bars. La température du fluide à la sortie du condenseur est $\theta_3 = 15$ °C. Le point (3) caractérise l'état du fluide à la sortie du condenseur. On appellera (2a) le point de la transformation sur la courbe de rosée et (3a) le point de la transformation sur la courbe d'ébullition.

▪ Passage dans le détendeur

Le détendeur permet la détente du fluide et la transformation est isenthalpique. À la sortie du condenseur, le fluide est détendu à basse pression et engendre un début de vaporisation avec production de froid. Le point (4) caractérise le fluide à sa sortie du détendeur.

▪ Passage dans l'évaporateur

Au cours du passage dans l'évaporateur, le fluide frigorigène passe de l'état diphasique liquide-gaz (4) à l'état gazeux (1) : ce phénomène d'évaporation produit du froid. Le fluide va se réchauffer tout au long du passage dans l'évaporateur, captant la chaleur du milieu dans lequel il se trouve, la source froide étant de l'eau ou l'air.



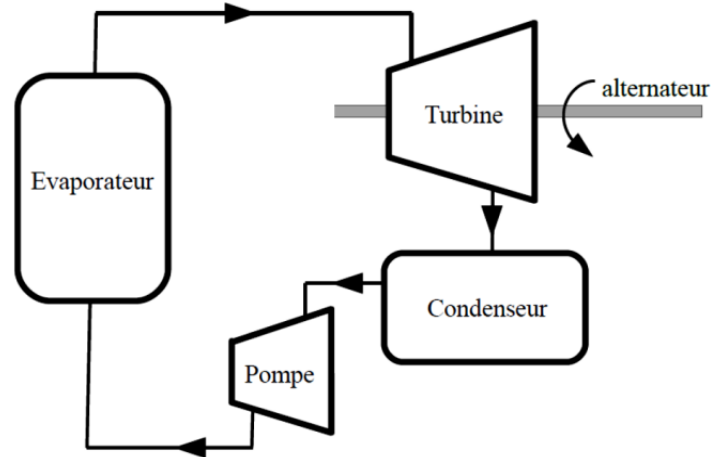
Donnée : débit massique du fluide frigorigène : $D_m = 300 \text{ g.s}^{-1}$

- 1- Représenter le cycle de transformations que subit le fluide dans le diagramme enthalpique.
- 2- Relevez les pressions, les températures, les enthalpies massiques et les titres en vapeur des différents points.
- 3- Calculez l'énergie thermique massique q_{EV} mise en jeu dans l'évaporateur ainsi que la puissance \mathcal{P}_{EV} de cet organe de la pompe à chaleur.
- 4- Calculer le travail massique w_{CO} mis en jeu dans le compresseur ainsi que la puissance \mathcal{P}_{CO} de celui-ci.
- 5- Calculer l'énergie thermique massique q_{COND} mise en jeu dans le condenseur ainsi que la puissance \mathcal{P}_{COND} de cet organe de la pompe à chaleur.
- 6- Calculer l'efficacité de la pompe à chaleur.

* Exercice 05 : Etude d'une centrale solaire

La plus grande centrale solaire actuellement en service est la centrale d'Ivanpah, située en Californie dans le désert de Mojave près de Las Vegas. Elle génère 392 MW d'électricité à partir de trois tours solaires sur un site de 1400 ha. Chaque tour reçoit la lumière du soleil concentrée par des miroirs appelés héliostats. L'énergie reçue est utilisée pour chauffer de l'eau dans les évaporateurs situés au sommet des tours. La température de l'eau atteint près de 600 °C, le fluide étant utilisé en circuit fermé. Le refroidissement de la vapeur, après passage dans la turbine, s'effectue avec des condenseurs à air à 25 °C. Ce système de refroidissement permet à la centrale de ne consommer que très peu d'eau par rapport aux autres centrales thermiques.

Le circuit de la centrale thermique comporte un générateur de vapeur, une turbine, un condenseur et une pompe qui permet la circulation de l'eau.



On modélise les transformations subies par l'eau par le cycle de Rankine décrit ci-dessous :

- **A → B** : L'eau, entièrement liquide et à la température T_A , est introduite dans l'évaporateur à une pression P_A supérieure à la pression atmosphérique. Elle est portée de façon isobare à l'état vapeur jusqu'à la température T_B .
- **B → C** : L'eau subit une détente adiabatique réversible dans la turbine, l'amenant dans un état diphasé où la pression vaut P_C et la température T_C .
- **C → D** : L'eau évolue de façon isobare dans le condenseur à la pression P_C vers l'état de liquide saturant par échange thermique avec l'air.
- **D → A** : Après un passage par une pompe, l'eau atteint la pression P_A par une compression adiabatique réversible.

Le cycle correspondant est représenté sur le diagramme enthalpique de l'eau reproduit page suivante.

On supposera dans la suite que les variations d'énergies potentielle et cinétique massiques sont faibles devant les variations d'enthalpie massique du fluide.

- 1- Identifier sur le diagramme enthalpique les états A, B, C et D. Pour chacun de ces points, préciser l'état physique de l'eau, la pression et la température.
- 2- S'agit-il d'un cycle moteur ou d'un cycle récepteur ?
- 3- A l'aide de lectures graphiques et/ou de calculs, déterminer les travaux massiques w_i et les transferts thermiques massiques q_i algébriquement reçus par le fluide pour chacune des 4 transformations.
- 4- Calculer le rendement thermodynamique réel de ce cycle.
- 5- Etablir l'expression du rendement maximal de ce cycle en fonction de la température de la source chaude (on prendra $T_C = 600 \text{ °C}$) et de la température de la source froide (on prendra $T_F = 25 \text{ °C}$). Faire l'application numérique et comparer au résultat de la question 4-.
- 6- Les turbines des centrales thermiques ne fonctionnent correctement que si la proportion de vapeur dans le fluide est supérieure à 90 %. Montrer que ce cycle ne peut pas être exploité en pratique.

NB : Pour pallier ce problème, on utilise un cycle de Rankine avec resurchauffe qui consiste à utiliser deux turbines au lieu d'une seule au cours d'un même cycle.

Diagramme Pression-Enthalpie de l'eau

