

- 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 .
- 3- Le moteur décrit par cet inventeur peut-il exister ?

✱ **Exercice 02 : Refroidissement d'une centrale nucléaire**

Une centrale nucléaire fournissant une puissance $P_{centrale} = 1000$ MW est installée au bord d'un fleuve dont la température est $T_{Fleuve} = 300$ K et le débit $D = 400$ m³.s⁻¹. La température de la source chaude de cette centrale est $T_0 = 700$ K. Son rendement vaut 60,0 % de son rendement maximal.

Donnée : Capacité thermique massique de l'eau : $c_{eau} = 4,18$ kJ.K⁻¹.kg⁻¹.

- 1- Donner l'expression du rendement maximal de la centrale en fonction de T_{Fleuve} et de T_0 . En déduire que son rendement vaut 34,3 %.
- 2- Déterminer la valeur du travail W algébriquement reçu chaque seconde par le fluide caloporteur de la centrale ainsi que les valeurs des transferts thermiques Q_C et Q_F algébriquement reçus chaque seconde par le fluide caloporteur de la centrale de la part de la source chaude et de la part de la source froide.
- 3- En déduire l'élévation de température de l'eau du fleuve qui résulte du fonctionnement de la centrale.

✱ **Exercice 03 : Efficacité d'un congélateur**

Le compresseur d'un congélateur a une puissance électrique $P_{elec} = 28$ W, ce qui permet de congeler 22 kg d'aliments par 24 h.

Données :

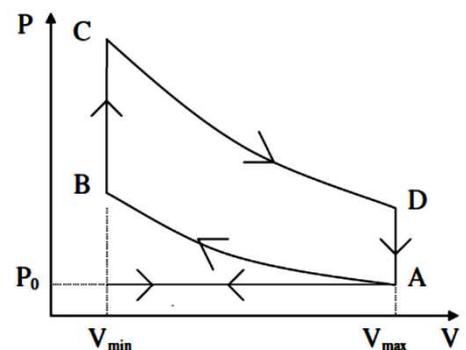
- Capacité thermique massique des aliments décongelés : $c_d = 3,6$ kJ.K⁻¹.kg⁻¹ ;
- Capacité thermique massique des aliments congelés : $c_c = 1,5$ kJ.K⁻¹.kg⁻¹ ;
- Enthalpie massique de fusion des aliments à 0°C : $\Delta h_{fus} = 2,5 \cdot 10^2$ kJ.kg⁻¹.

- 1- En considérant que le compresseur a un rendement de 100 %, déterminer la valeur du travail mécanique W_{elec} algébriquement reçu par le fluide frigorigène en une journée.
- 2- Montrer que le transfert thermique Q_{1kg} algébriquement reçu par 1,0 kg d'aliments pour passer d'une température extérieure $\theta_1 = 20$ °C à une température intérieure $\theta_2 = -18$ °C vaut $Q_{1kg} = -3,5 \cdot 10^5$ J.
- 3- En déduire l'efficacité frigorifique de ce congélateur.

✱ **Exercice 04 : Moteur thermique dans un véhicule hybride**

Un véhicule hybride fonctionne à l'aide d'un moteur électrique et d'un moteur thermique, ce dernier servant à recharger le premier. Le fonctionnement du moteur thermique peut être décrit par le cycle réversible de Beau de Rochas décrit ci-dessous 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 : $R = 8,31$ J.K⁻¹.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_{Vm} 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 05 : 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. Cet élément singularise le moteur Stirling par rapport aux autres moteurs. Il était répandu au temps de la domination des machines à vapeur qui présentaient le grave risque d'exploser.

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 06 : 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 $m = 200 \text{ g}$ 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 $P_1 = 3,00 \text{ bars}$ et à une température $\theta_1 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$. 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 $\theta_3 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. 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.

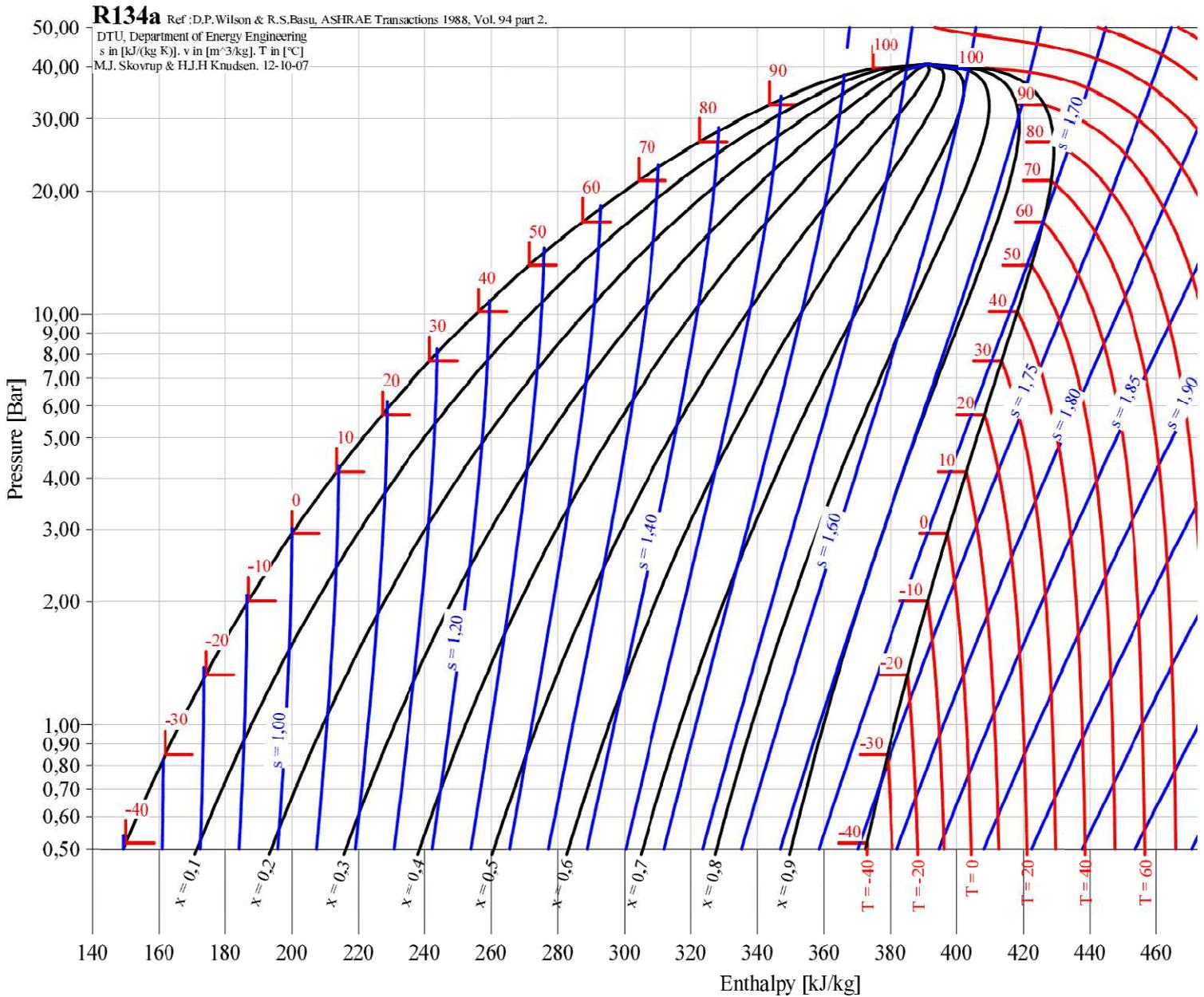
Donnée : Débit massique du fluide frigorigène : $D_m = 300 \text{ g.s}^{-1}$

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 07 : Etude d'une centrale solaire**

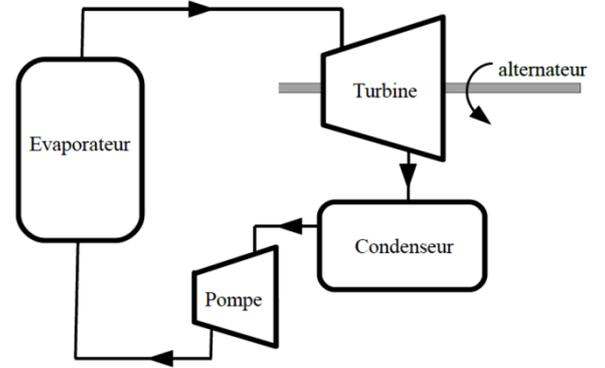
La plus grande centrale solaire actuellement en service est la centrale d'Ivanpah, située en Californie dans le désert de Mojave près de Las Vegas. Elle génère 392 MW d'électricité à partir de trois tours solaires sur un site de 1400 ha. Chaque tour reçoit la lumière du soleil concentrée par des miroirs 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.

On étudie dans la suite le cycle d'une machine thermique ditherme au cours duquel un fluide échange de l'énergie thermique avec deux thermostats de température T_C (source chaude) et T_F (source froide) ainsi qu'un travail W avec le milieu extérieur.

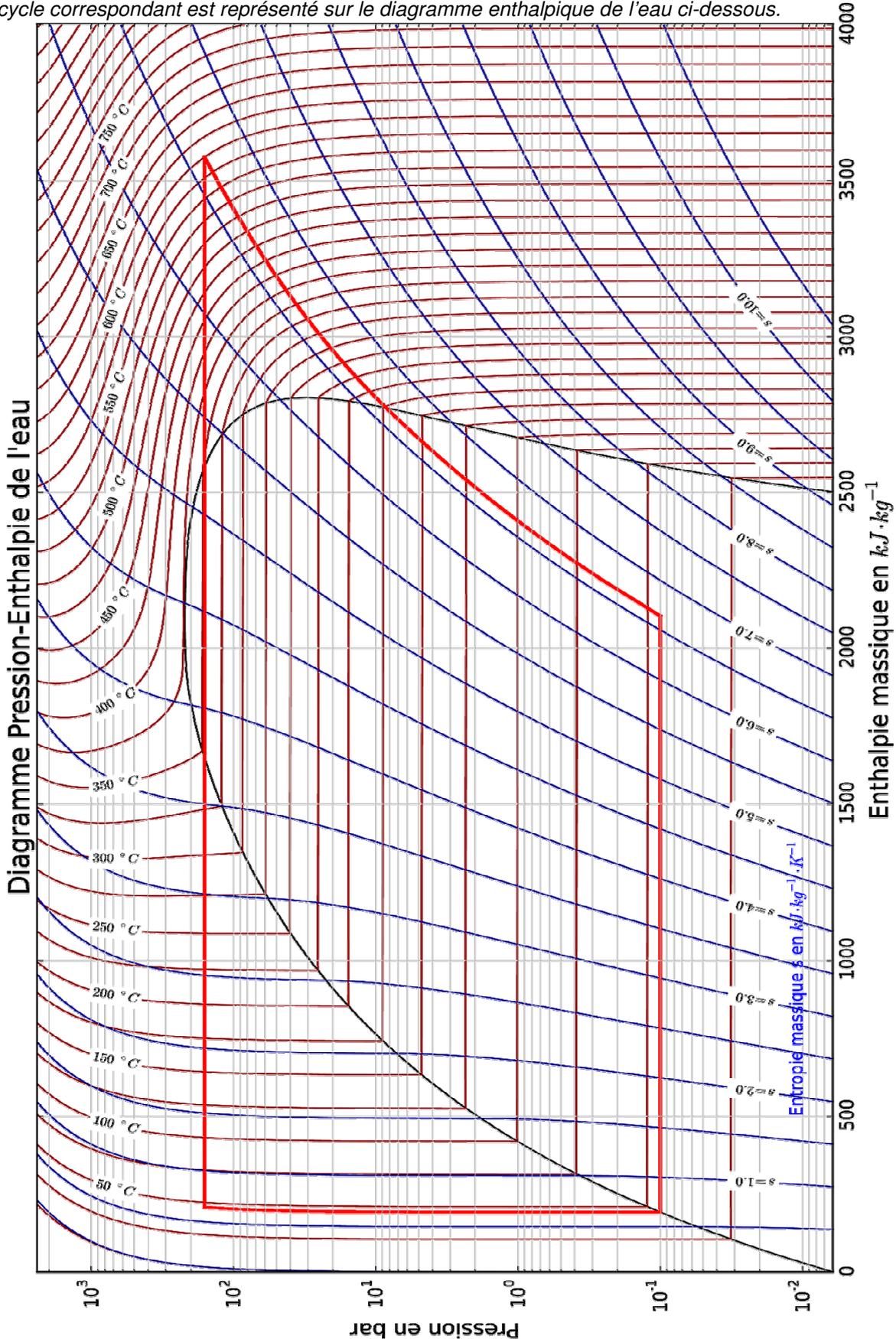
- 1- En se plaçant dans l'hypothèse où les variations d'énergie potentielle et d'énergie cinétique sont négligeables, énoncer le premier principe de la thermodynamique des systèmes fermés.
- 2- Que peut-on dire de la variation d'énergie interne ΔU d'une machine thermique au cours d'un cycle ?
- 3- Énoncer l'inégalité de Clausius pour une machine thermique ditherme.
- 4- Définir le rendement d'un moteur thermique et retrouver l'expression du rendement maximum en fonction de T_C et T_F .

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 :

- $A \rightarrow B$: évolution isobare à la pression P_1 de l'eau dans le condenseur vers l'état de liquide saturant par échange thermique avec l'air.
- $B \rightarrow C$: passage dans la pompe. L'eau, après une compression adiabatique réversible, atteint la pression P_2 .
- $C \rightarrow D$: passage dans l'évaporateur qui porte l'eau de façon isobare à l'état vapeur à la température T_2 .
- $D \rightarrow A$: détente adiabatique réversible dans la turbine de la pression P_2 à la pression P_1 .



Le cycle correspondant est représenté sur le diagramme enthalpique de l'eau ci-dessous.



5- Écrire le premier principe de la thermodynamique des systèmes ouverts.

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

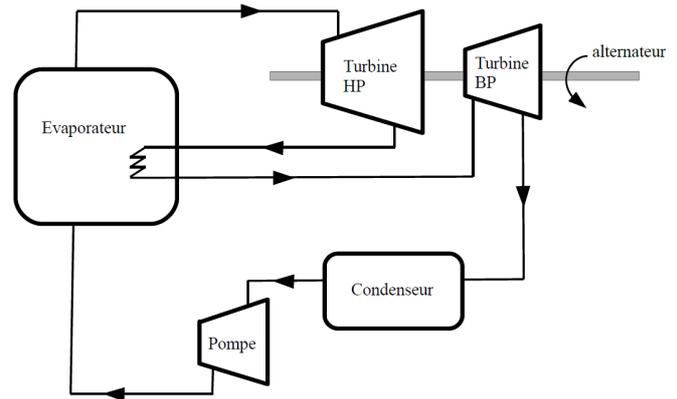
6- Identifier sur le diagramme enthalpique précédent les états A, B, C et D. Pour chacun de ces points, préciser l'état physique de l'eau, la pression et la température (*Aides de lecture* : la température la plus basse atteinte vaut 45 °C et la pression la plus haute atteinte vaut 160 bar).

7- Déterminer les travaux massiques w_i et les transferts thermiques massiques q_i algébriquement reçus par le fluide pour chacune des 4 transformations (*Aides de lecture* : les enthalpies massiques remarquables de ce cycle valent environ 200, 2125 et 3600 kJ.kg⁻¹).

8- Calculer le rendement thermodynamique de ce cycle puis comparer cette valeur avec celle du rendement maximum (on supposera que $T_F = 25$ °C et $T_C = 600$ °C). Commenter.

9- Les turbines des centrales thermiques ne fonctionnent correctement que si la proportion de vapeur dans le fluide est supérieure à 90 %. En déduire si ce cycle peut être exploité en pratique.

Pour pallier le problème associé au cycle précédent, on utilise le cycle de Rankine avec resurchauffe. Deux turbines sont utilisées au cours de ce cycle :



- Une turbine haute pression permet de passer de l'état D à l'état E où le fluide est à l'état de vapeur saturante : cette étape se fait selon une transformation adiabatique réversible ;
- La vapeur atteint l'état F caractérisé par une température T_2 en étant chauffée de façon isobare dans l'évaporateur ;
- La vapeur est ensuite injectée dans la deuxième turbine (turbine basse pression) où elle suit une nouvelle transformation adiabatique réversible jusqu'à la pression P_1 (État A').

10- Sur le diagramme enthalpique, représenter les étapes DE, EF et FA' qui remplacent l'étape DA du cycle précédent.

11- Quel est le transfert thermique massique total reçu de la source chaude ? Quel est le travail massique fourni à la turbine ? En déduire le rendement du cycle. Le problème soulevé à la question 9- a-t-il été résolu ?

* Exercice 08 : Compression de l'air

Un compresseur comprime de l'air atmosphérique ($P_1 = 1,00$ bar ; $T_1 = 300$ K) jusqu'à $P_2 = 6,00$ bar à la température T_2 de façon adiabatique en régime stationnaire. La puissance du compresseur vaut $P_{\text{compresseur}} = 1,50$ kW et le débit massique de l'air dans le compresseur vaut $D_m = 6,50$ g.s⁻¹. On néglige les variations d'énergie cinétique et potentielle de pesanteur de l'air au cours de cette transformation et on considère l'air comme un gaz parfait.

Données : Capacité thermique massique de l'air à pression constante : $c_p = 1,00$ kJ.kg⁻¹.K⁻¹

1- Énoncer le premier principe pour un fluide en écoulement.

2- Calculer la température T_2 .

* Exercice 09 : Echangeur thermique réfrigérant

Dans un échangeur thermique parfaitement calorifugé, on refroidit de façon isobare et stationnaire de l'air chaud ($P_1 = 6,00$ bar ; $T_1 = 500$ K) jusqu'à la température $T_0 = 300$ K. Le fluide réfrigérant en contact thermique avec l'air est de l'eau qui entre dans l'échangeur à une température $\theta_e = 12,0$ °C et en ressort à la température θ_s .

Le débit de l'eau est $D_{m,\text{eau}} = 100$ g.s⁻¹ et celui de l'air est $D_{m,\text{air}} = 6,50$ g.s⁻¹. On néglige les variations d'énergie cinétique et potentielle de pesanteur de l'air et de l'eau au cours de cette transformation et on considère l'air comme un gaz parfait.



Données : Capacité thermique massique de l'air à pression constante : $c_{p,\text{air}} = 1,00$ kJ.kg⁻¹.K⁻¹
Capacité thermique massique de l'eau à pression constante : $c_{p,\text{eau}} = 4,18$ kJ.kg⁻¹.K⁻¹.

1- Énoncer le premier principe pour l'eau puis pour l'air.

2- Quelle est la relation entre la puissance thermique reçue par l'air et celle reçue par l'eau ?

3- Calculer la température θ_s .