

La difficulté et l'originalité de l'exercice sont notées de 1 à 3. Les exercices d'originalité 1 sont des classiques qu'il faut bien comprendre et savoir refaire sans hésitations. Les exercices d'originalité 3 sont des exercices plus éloignés du cours, dans lesquels il est nécessaire de s'adapter à la nouveauté (ou de faire face à des difficultés calculatoires).

Programme d'interrogation orale

- La démonstration du premier principe industriel peut-être demandée à l'écrit. Sa démonstration doit savoir être retrouvée sans trop d'hésitations.
- Définir le cycle de Carnot et calculer son rendement (pour un moteur, une machine frigorifique, ou une pompe à chaleur).
- Démontrer que le rendement de Carnot est maximal lorsque le cycle est réversible.
- Écrire le premier principe industriel en version « massique » et en version « puissance » (et en connaître la signification).
- Écrire le deuxième principe industriel en version « massique » et en version « puissance ».
- Connaître ou savoir retrouver rapidement l'expression du premier principe industriel pour chaque composant industriel abordé dans le cours (conseil : ne pas les retenir par cœur ! il faut connaître leur rôle, et en déduire le PPI).
- Savoir tracer des transformations simples sur des diagrammes thermodynamiques (frigoristes, entropique, etc.)

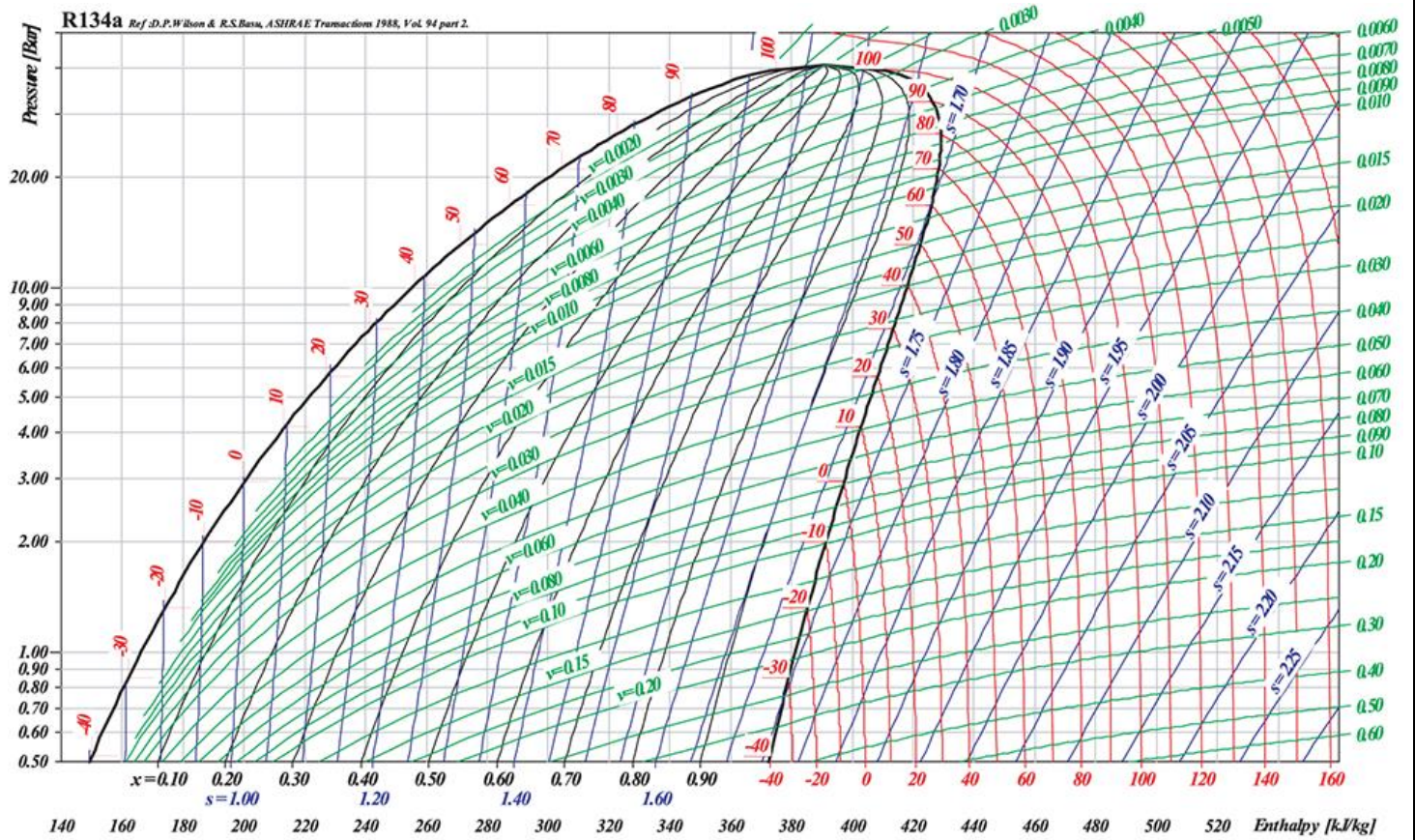
I - ÉTUDE DE COMPOSANTS INDUSTRIELS

Exercice 1 – Étude d'un détendeur calorifugé

Difficile 1 – Original 1

Un fluide s'écoule dans une conduite où un détendeur calorifugé provoque une chute de pression importante. On néglige les variations d'énergie cinétique et potentielle et on étudie l'évolution de divers fluides à travers la vanne.

1. Quelles hypothèses courantes peut-on faire ici pour étudier ce détendeur ?
2. En déduire une expression simplifiée du premier principe de la thermodynamique en système ouvert.
3. Le fluide est un gaz parfait et entre dans le détendeur à $T_e = -20^\circ\text{C}$. Établir sa température de sortie T_s .
4. Le fluide est du R134a, et entre dans le détendeur sous forme de liquide saturant à $P_e = 4$ bar et en sort à $P_s = 1$ bar. En déduire sa température de sortie, son état physique, et la fraction massique en vapeur.
5. Le R134a entre dans le détendeur à $(60^\circ\text{C}, 10 \text{ bar})$ et sort à 1 bar. En déduire son état physique et sa température de sortie.
6. Identifier dans le diagramme la zone où le fluide est approximativement parfait. Comment évolue la température d'un gaz parfait lors du passage dans le détendeur ? Donner la réponse via un calcul, et par une lecture graphique.



| Exercice 2 – Étude d'un compresseur | | | | Difficile 1 – Original 1 |
|---|----------------|--|---|--------------------------|
| Un compresseur de turboréacteur admet un débit massique de $D_m = 1,5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ d'air. Les données thermodynamiques du fluide aux pressions d'entrée et de sortie sont : | | | | |
| | Pression (bar) | Énergie interne ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) | Volume massique ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) | |
| Entrée | 1 | 289,6 | 0,242 | |
| Sortie | 10 | 359,2 | $5,26 \cdot 10^{-2}$ | |
| 1. Quelles hypothèses courantes peut-on faire ici pour étudier ce compresseur ? 2. En déduire une expression simplifiée du premier principe de la thermodynamique en système ouvert. 3. Calculer l'enthalpie massique en entrée et sortie du compresseur. 4. On suppose que le compresseur est également calorifugé, quelle est sa puissance ? Commenter le signe obtenu. Le rendement isentropique du compresseur est $\eta_{\text{isen}} = [h_{\text{isen}}]_s^e / [h_{\text{reel}}]_s^e = 0,811$. 5. En déduire l'enthalpie et le volume massique en sortie du compresseur réversible. | | | | |

| Exercice 3 – Étude d'une turbine | | | | | Difficile 1 – Original 1 |
|--|----------------|------------------------------------|---|--|--------------------------|
| Une turbine à vapeur calorifugée (parfois appelée « turbine à gaz ») équipe une petite centrale électrique. La combustion de déchets organiques sert de source chaude à un circuit de vapeur, qui passe ensuite par une turbine (et ensuite une pompe). Les propriétés de la vapeur en entrée et sortie de la turbine sont : | | | | | |
| | Pression (bar) | Température ($^{\circ}\text{C}$) | Volume massique ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) | Énergie interne ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) | |
| Entrée | 45 | 400 | 0,0648 | 2914,2 | |
| Sortie | 0,75 | 91,6 | 2,122 | 2316,3 | |
| 1. Quelles hypothèses courantes peut-on faire ici pour étudier cette turbine ? 2. En déduire une expression simplifiée du premier principe de la thermodynamique en système ouvert. 3. Quel est le travail indiqué massique délivré par cette turbine ? Commenter le signe obtenu. 4. Quel débit de vapeur doit-on faire circuler pour obtenir une puissance indiquée de $P_i = 4,0 \text{ MW}$? | | | | | |

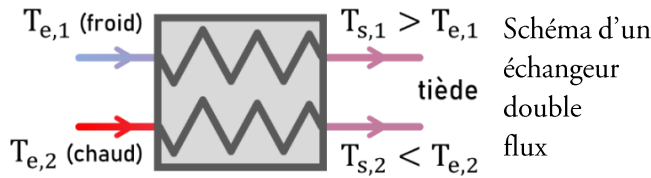
| Exercice 4 – Étude d'une tuyère | | | | | Difficile 1 – Original 1 |
|--|--|----------------|------------------------------------|---|--------------------------|
| On s'intéresse à la tuyère d'un turboréacteur, dans laquelle l'écoulement d'air est compressible ce qui a pour conséquence que la pression de l'air chute tandis que sa vitesse augmente. Le débit massique d'air à travers la tuyère est de $D_m = 26 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Les données thermodynamiques sont les suivantes : | | | | | |
| | Vitesse ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | Pression (bar) | Température ($^{\circ}\text{C}$) | Volume massique ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) | |
| Entrée | 10 | 2,28 | 950 | 1,36 | |
| Sortie | ? | 1,00 | 780 | 2,55 | |
| On admettra que les propriétés thermodynamiques de l'air, notamment sa capacité thermique massique $c_v = 0,823 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ restent inchangées. 1. Quelles hypothèses courantes peut-on faire ici pour étudier cette tuyère ? 2. En déduire une expression simplifiée du premier principe de la thermodynamique en système ouvert. 3. Calculer alors la vitesse des gaz en sortie de tuyère. 4. Le débit volumique est-il inchangé ? Commenter. | | | | | |

Exercice 5 – Étude d'un échangeur thermique à double flux

Difficile 2 – Original 1

On considère un échangeur thermique constitué de deux circulations d'eau à contre-courant. L'échangeur est supposé parfaitement calorifugé et les écoulements supposés isobares et en régime permanent. La capacité thermique massique de l'eau est supposée indépendante de la température et on note $T_{e,1}$ et $T_{e,2}$ les températures d'entrée dans l'échangeur et $T_{s,1}$ et $T_{s,2}$ les températures de sortie. Le débit massique est noté D_1 dans la conduite $e_1 \rightarrow s_1$ et D_2 dans la conduite $e_2 \rightarrow s_2$.

On donne $T_{e,2} = 350 \text{ K}$, $T_{s,2} = 290 \text{ K}$, $T_{e,1} = 280 \text{ K}$, $T_{s,1} = 340 \text{ K}$, $c_p(\text{eau}) = 4,17 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $D_1 = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.



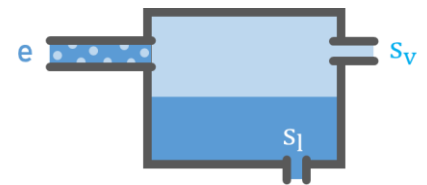
Echangeur double flux (pour piscine)

1. Quelles hypothèses courantes peut-on faire ici pour étudier cet échangeur thermique ?
2. En déduire une expression simplifiée du premier principe de la thermodynamique en système ouvert.
3. Exprimer puis calculer D_2 en fonction des données du problème. Calculer sa valeur numérique.
4. Exprimer le deuxième principe de la thermodynamique industriel dans le cas de l'échangeur double flux.
5. Exprimer puis calculer le taux d'entropie dS_c/dt créée dans l'échangeur en fonction des données. Commenter.

Exercice 6 – Étude d'une séparateur isobare

Difficile 1 – Original 2

On considère un séparateur isobare parcouru par un écoulement de fluide R134a, dont le diagramme des frigoristes est donné dans les exercices précédents. Ce fluide entre en e à l'état diphasique à la température $T_e = -10^\circ\text{C}$ dans les conditions d'équilibre liquide-vapeur. Le séparateur permet d'obtenir un écoulement de vapeur saturée en s_v , et un écoulement de liquide saturé en s_l . Le débit massique entrant est de $D_e = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

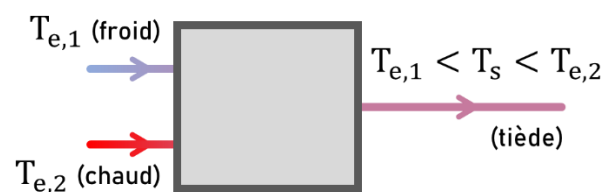


1. Quelle pression règne dans le séparateur ?
2. Quelle valeur d'enthalpie massique peut-on en déduire pour les sorties s_v et s_l ?
3. On donne $D_l = 0,8 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. En déduire la valeur d'enthalpie massique de l'entrée e , puis le titre en vapeur x_v à l'entrée.

Exercice 7 – Étude d'un mélangeur isobare

Difficile 1 – Original 2

On considère un mélangeur parcouru par un écoulement entrant en e_1 à la température $T_{e,1} = 10^\circ\text{C}$ à l'état liquide et par un courant de vapeur d'eau entrant en e_2 à la température $T_{e,2} = 150^\circ\text{C}$. L'écoulement résultant du mélange isobare sort du mélangeur par la sortie S à la température $T_s = 50^\circ\text{C}$.



On note $T_0 = 25^\circ\text{C}$ la température du milieu extérieur. On suppose le régime permanent établi et on donne : $D_1 = 0,938 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, $D_2 = 0,062 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ainsi que les valeurs thermodynamiques données ci-après.

1. Quelles hypothèses courantes peut-on faire pour étudier ce mélangeur ?
2. En déduire une expression simplifiée du premier principe de la thermodynamique en système ouvert.
3. Montrer que l'hypothèse de mélange adiabatique est raisonnable.
4. Établir l'expression littérale puis la valeur numérique du taux de création d'entropie dS_c/dt dans le mélangeur. Commenter.

| | État | Enthalpie ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) | Entropie ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) |
|--|----------|--|---|
| | Entrée 1 | 42 | 0,151 |
| | Entrée 2 | 2746 | 6,838 |
| | Sortie | 209,6 | 0,703 |

II - ÉTUDE DE CYCLES INDUSTRIELS

Exercice 8 – Pompe à chaleur fonctionnant avec le fluide R22

Difficile 1 – Original 1

Une habitation est équipée d'une pompe à chaleur au R22, qui prélève de l'énergie thermique à une source froide et la cède à une source chaude. Les variations d'énergie cinétique et potentielle massiques seront systématiquement négligeables devant les variations d'enthalpie. Le cycle que décrit le R22 est le suivant :

- 1 → 2 : vaporisation dans l'évaporateur noté (E) jusqu'à l'état de vapeur saturante ;
- 2 → 3 : compression calorifugée et réversible dans un compresseur noté (CP), jusqu'à la pression P_3 ;
- 3 → 4 : liquéfaction dans un condenseur noté (CD) jusqu'à l'état de liquide saturant ;
- 4 → 1 : détente brutale dans un détendeur noté D.

On donne par ailleurs le diagramme des frigorigènes du fluide R22 :

- Établir le premier principe de la thermodynamique en système ouvert.
- On donne $P_2 = 5 \text{ bar}$ et $P_3 = 15 \text{ bar}$, placer les points 1, 2, 3 et 4.
- Compléter alors le tableau ci-dessous :

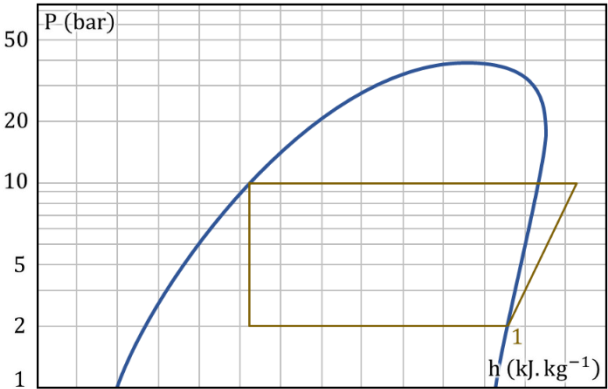
| Points | Pression (bar) | Température (°C) | Enthalpie massique (kJ.kg⁻¹) | Entropie massique (kJ.K⁻¹.kg⁻¹) |
|--------|----------------|------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |

- En déduire la valeur des travaux indiqués massiques et énergies thermiques massiques échangées lors de chaque étape.
- Montrer que la transformation subie dans le détendeur est irréversible.
- Définir et calculer l'efficacité de cette pompe. La comparer à celle d'un cycle de Carnot passant par les mêmes températures « chaudes » et « froides ». Commenter.

Exercice 9 – Climatiseur fonctionnant avec le fluide R22

Difficile 2 – Original 1

Le schéma de la figure ci-contre représente l'allure du cycle décrit par le fluide frigorigène d'un climatiseur dans le diagramme des frigorigères. On néglige toute variation d'énergie cinétique et potentielle au cours du cycle. Dans ce cycle, un compresseur aspire le fluide sous 2 bar, et le refoule à 10 bar de manière adiabatique et réversible. On nomme 1 l'état du fluide à l'entrée du compresseur. Le détendeur est calorifugé, sans pièce mobile et les évaporateurs et condenseurs sont des échangeurs thermiques isobares, sans pièces mobiles. On suppose que les pressions sont uniformes dans les parties haute pression et basse pression du circuit.

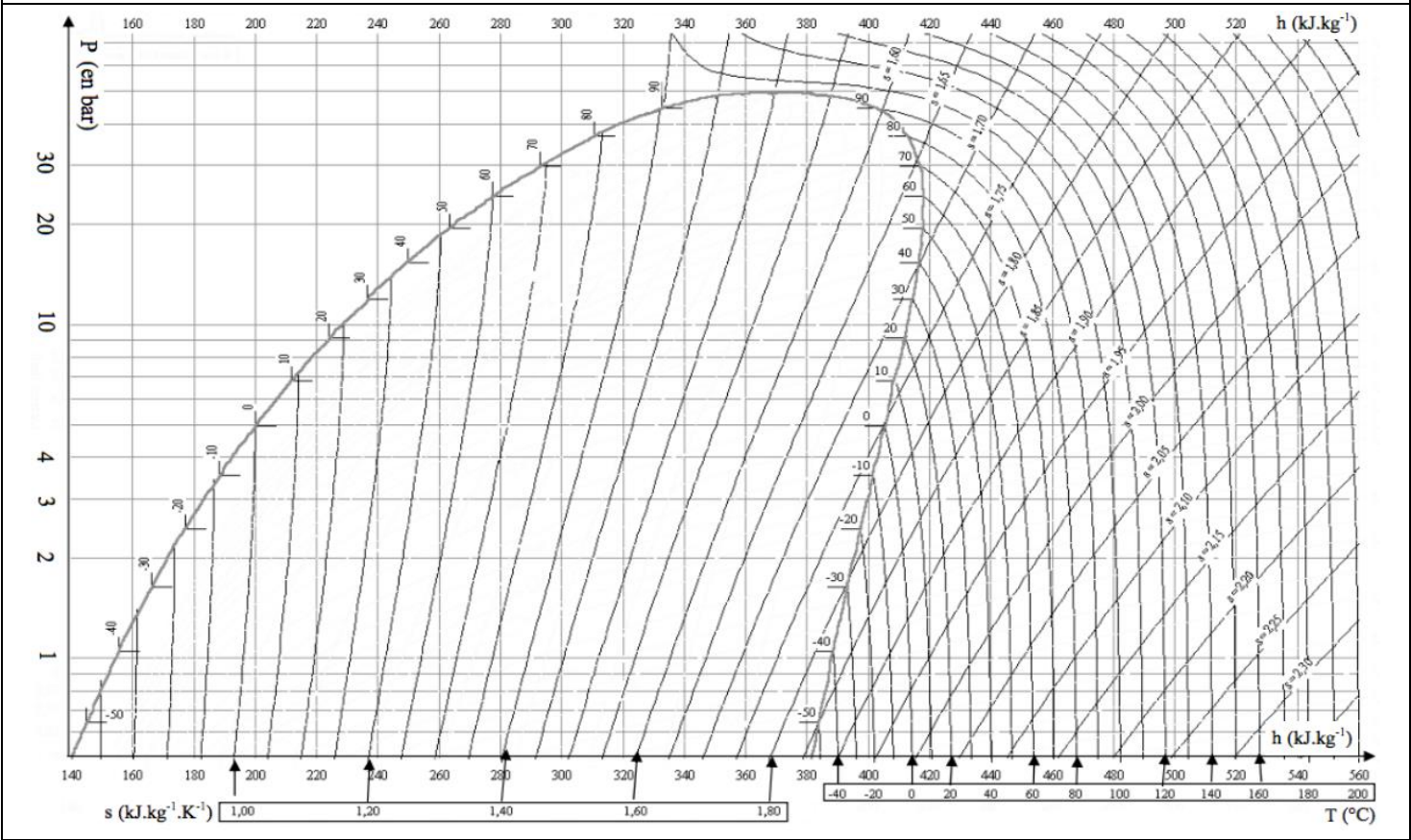


- 1. Écrire l'expression la plus générale du premier principe de la thermodynamique en système ouvert.
- 2. Sur la figure ci-contre, reporter le sens du cycle et indiquer les étapes (compresseur, détendeur, condenseur, évaporateur).
- 3. Préciser la nature de la transformation 1 → 2.
- 4. Après avoir rappelé les hypothèses usuelles de chacun des composants, évaluer littéralement tous les transferts énergétiques massiques $w_{i \rightarrow j}$ et $q_{i \rightarrow j}$ en fonction des enthalpies massiques des points remarquables du cycle.
- 5. Donner l'expression de l'efficacité e de l'installation en fonction des enthalpies massiques adéquates. Calculez sa valeur.

À la sortie de l'évaporateur, les vapeurs sont surchauffées de 5°C de façon isobare à la température T'_1 avant d'être aspirées par le compresseur. De même, la liquide est sous-refroidi de 10°C avant d'entrer dans le détendeur.

- 6. À quoi peut servir la surchauffe ?
- 7. Reporter le point 1' sur le diagramme fourni et en déduire le point 2' représentatif du fluide à la sortie du compresseur. Même chose pour le point 3' et 4'.
- 8. Compléter le tableau ci-contre à l'aide du diagramme.
- 9. Déterminer la nouvelle expression de e et calculer sa valeur. Commenter.

| État du fluide | 1' | 2' | 3' | 4' |
|---|----|----|----|----|
| Pression (bar) | | | | |
| Température (°C) | | | | |
| Enthalpie massique (kJ.kg ⁻¹) | | | | |
| Titre en vapeur | | | | |



Exercice 10 – Centrale électrique avec un fluide à eau (cycle de Rankine)

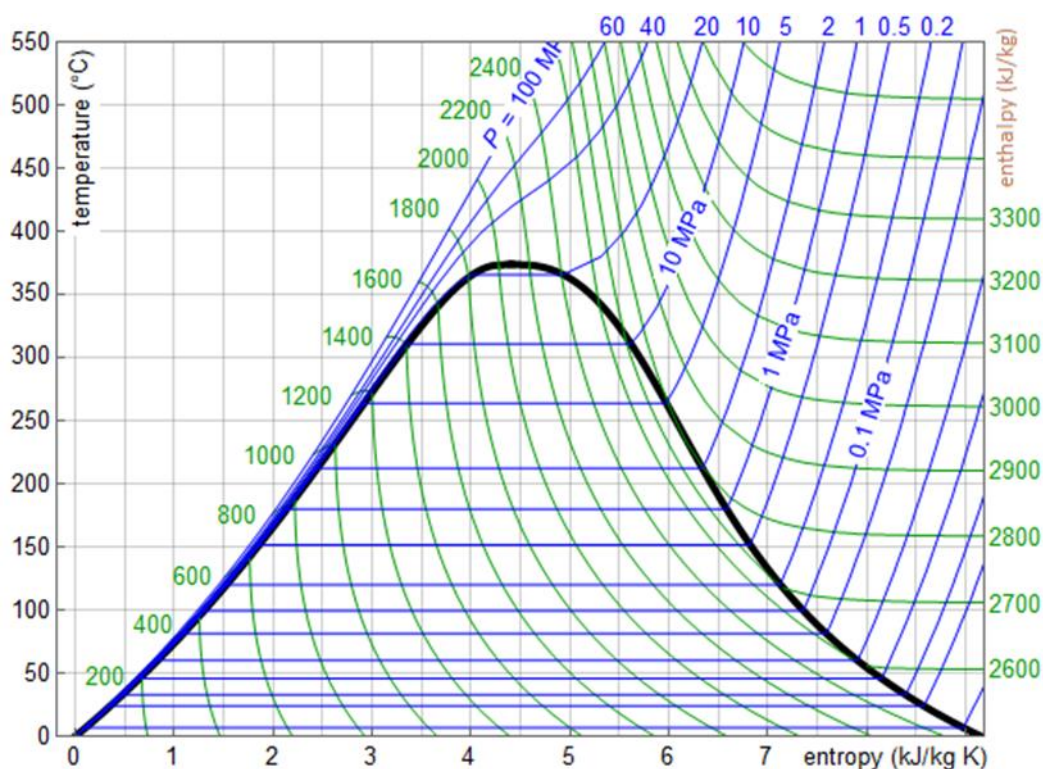
Difficile 3 – Original 1

Une centrale électrique reçoit de l'énergie thermique issue de la combustion de fioul et utilise un cycle à vapeur pour alimenter une génératrice électrique.

Dans la centrale l'eau évolue entre les pressions de 0,05 bar et 70 bar. Le cycle est basé sur un cycle de Rankine que l'on détaillera au fur et à mesure et le diagramme (T,s) de l'eau.

La capacité thermique de l'eau liquide est $c_p = 4200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

- On commence l'étude du cycle au point A, liquide saturant à 306 K. Placer le point sur le diagramme température - entropie (T,s) fourni.
- A → B : Une pompe adiabatique et réversible permet d'amener la pression du liquide incompressible de 0,05 bar à 70 bar de façon adiabatique et réversible. En utilisant l'identité thermodynamique, évaluer la puissance utile de la pompe, en déduire la température de l'eau en sortie de pompe. Comment peut-on alors placer le point B' sur le diagramme (T,s) ?
- B → B' → C : Échauffement du liquide saturant de T_B à T'_B correspondant à la pression $P'_B = P_C$. Ensuite, le fluide passe dans l'évaporateur, où il subit un changement d'état isobare, qui l'amène à la forme de vapeur saturante, à la température de 559 K. Placer les points B' et C
- En déduire l'énergie thermique massique reçue par le fluide $q_{B \rightarrow C}$. La transformation est-elle réversible ?
- C → D : Le fluide passe par la turbine, modélisée par une transformation adiabatique et réversible. Placer le point D, en déduire la fraction massique en gaz x_D , puis le travail massique utile w_u . Quel problème peut-on évoquer ? Quelle(s) solution(s) peut-on y apporter ?
- En supposant un rendement mécanique de $\eta_{\text{meca}} = 0,9$, en déduire le débit d'eau nécessaire pour atteindre une puissance de 60 MW.
- Définir le rendement de l'installation, et calculer sa valeur.

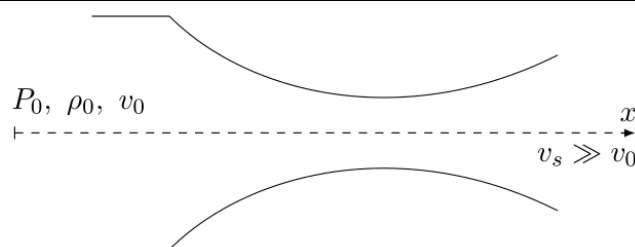


Exercice 11 – Tuyère calorifugée (oral banque PT)

Difficile 2 – Original 3

Une tuyère est une simple conduite de section variable, dans laquelle un gaz se détend tout en étant accéléré. On étudie l'écoulement d'un gaz parfait dans une tuyère calorifugée.

On suppose négligeable la vitesse d'entrée du fluide par rapport à sa vitesse de sortie. Les grandeurs d'entrée de la tuyère sont indicées d'un « 0 ».



- Montrer que $h(x) + \frac{1}{2}v(x)^2 = \text{cte}$, où $h(x)$ est l'enthalpie massique et $v(x)$ la vitesse d'écoulement du gaz dans la tuyère à l'abscisse x (on considère les grandeurs uniformes sur les sections de tuyère).
- En déduire que $v(x) = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \left(\frac{P_0}{\rho_0} - \frac{P(x)}{\rho(x)} \right)}$ où ρ est la masse volumique du fluide et γ le coefficient de Laplace.
- Dans l'hypothèse d'un écoulement irréversible, établir la loi de Barré saint-Vincent : $v(x) = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{P_0}{\rho_0} \left(1 - \left(\frac{P(x)}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}$.