

Devoir surveillé n°1

Samedi 19 septembre 2026

Durée : 4h00

- Vous devez vérifier que le sujet comprend 09 pages numérotées et une annexe de 3 pages ;
- Vous êtes invités à porter une attention toute particulière à la rédaction : les copies illisibles ou mal présentées seront pénalisées.
- Toute réponse devra être justifiée et ce, même si l'énoncé ne le précise pas (sauf mention particulière).
- Vous devez établir une relation littérale avant d'effectuer toute application numérique (sauf mention particulière).
- Toute relation littérale présentant une erreur flagrante d'homogénéité ne donnera pas lieu à l'attribution de points.
- Toute application numérique ne comportant pas d'unité ne donnera pas lieu à l'attribution de points.
- Écrire le mot FIN à la fin de votre composition.
- Le téléphone portable est strictement interdit. Il doit être rangé éteint dans le sac.
- **La calculatrice est autorisée.**

Données pour tout le devoir :

L'entropie du gaz parfait a pour expression :

$$S(T, V) = S(T_0, V_0) + \mathcal{C}_V \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + nR \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

avec $\mathcal{C}_V$ capacité thermique à volume constant du gaz parfait
ou

$$S(T, P) = S(T_0, P_0) + \mathcal{C}_P \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) - nR \ln \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

avec $\mathcal{C}_P$ capacité thermique à pression constante du gaz parfait

L'entropie d'une phase condensée :

Pour un système de capacité thermique C (phase condensée incompressible, indilatable) :

$$S(T) = C \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + S(T_0)$$

Première partie

Hie Hie no Mi – Thermodynamique

Ce sujet aborde une question de physique très librement inspirées de One Piece, une série de mangas Shōnen créée par Eiichirō Oda.

Kuzan, plus connu sous le nom d'Aokiji est l'un des Trois Amiraux de la Marine. Possesseur du Hie Hie no Mi, ou Givro-Fruit en français, il peut créer, contrôler ou devenir de la glace en maîtrisant les changements d'états.

Document - L'eau liquide et/ou solide

Formule chimique : H_2O	Masse molaire : $M = 18,0 \text{ g.mol}^{-1}$	
Conditions d'équilibre liquide-solide atmosphérique	Pression $P^0 = 1 \text{ bar}$	Température $T_f = 273,15 \text{ K}$
Enthalpie massique de fusion (1 bar et 273,15 K)		$L_{fus} = 333,3 \text{ kJ.kg}^{-1}$
	Glace	Eau liquide
Masse volumique	990 kg.m^{-3}	$1\,000 \text{ kg.m}^{-3}$
Capacité calorifique massique isobare	$c_{glace} = 2,05 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$c_{eau} = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

I Machine frigorifique avec une source de température variable

Aokiji souhaite refroidir une partie de la mer et la geler ; il sera considéré ici comme une machine frigorifique ($\mathcal{S}$). Cette machine est supposée réversible, cyclique et de puissance P constante. Elle fonctionne, pendant un temps Δt , entre l'atmosphère qui constitue un thermostat de température θ_c constante et une masse d'eau de mer $m = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg}$, assimilée à de l'eau pure, de température T' qui passera de θ_c à T_f .

Les transferts thermiques et le travail seront comptés en convention récepteur : on appellera respectivement δQ_f et δQ_c les transferts thermiques reçus par ($\mathcal{S}$) de la part de la source froide et de la source chaude et δW le travail reçu par ($\mathcal{S}$) entre les instants t et $t + dt$. On suppose que la durée d'un cycle est petit devant le temps caractéristique de refroidissement de la mer qu'on assimile à de l'eau pure. La machine décrit toujours un nombre entier de cycles.

On néglige les échanges thermiques entre la masse m (partie de la mer "refroidie (ou gelée)") et le reste de la mer.

1. Donner le schéma de principe de cette machine frigorifique, en indiquant le sens réel des transferts thermiques et du travail à un instant quelconque du fonctionnement de la machine frigorifique.

On s'intéresse au refroidissement de la mer qui reste dans son état liquide pendant toute la transformation, passant de θ_c à T_f .

2. En appliquant le second principe sous forme infinitésimale, écrire la relation entre δQ_f , δQ_c , T' et θ_c .

3. En appliquant le premier principe sous forme infinitésimale, déterminer le temps nécessaire Δt pour faire passer la mer de θ_c à T_f .

4. Calculer la puissance minimale P_{min} pour que ce refroidissement dure moins que $\Delta t = 10$ min, avec $\theta_c = 293$ K.

On s'intéresse maintenant à la solidification de l'eau.

5. En faisant l'hypothèse que la puissance P reste constante et égale à P_{min} , exprimer le temps nécessaire $\Delta t'$ pour congeler la mer.

Calculer $\Delta t'$.

6. Exprimer l'efficacité totale η de la machine frigorifique en fonction de P , Δt , $\Delta t'$, T_f , m , L_{fus} , θ_c et de c_{eau} , puis la calculer.

Deuxième partie

L'énergie thermique des mers

Le formulaire et les données sont regroupés en fin d'énoncé. Un document réponse est à rendre avec la copie.

En 1869, dans son livre, *Vingt mille lieues sous les mers*, Jules Verne fait référence aux « eaux de surface et les eaux profondes des océans pour produire de l'électricité ». Cette idée d'utiliser la différence de température entre les eaux de surface et les eaux profondes afin de produire de l'électricité est appelée ETM (énergie thermique des mers) en français et OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) en anglais.

L'IFREMER considère que le coût du pompage des eaux profondes n'est rentable que pour une différence de température d'au moins 20 °C entre l'eau de mer chaude prélevée à la surface et l'eau de mer froide prélevée en profondeur.

I Généralités

Q 1. Représenter le diagramme synoptique d'une machine ditherme produisant du travail en précisant les signes des différents échanges énergétiques.

Q 2. Exprimer et calculer le rendement de Carnot de cette machine fonctionnant entre des sources de températures $T_c = 26^\circ\text{C}$ et $T_f = 5^\circ\text{C}$. Commenter le résultat.

On envisage l'installation d'une centrale ETM à La Réunion. Le profil de température de l'eau de l'océan autour de cette île est donné sur la figure 1.

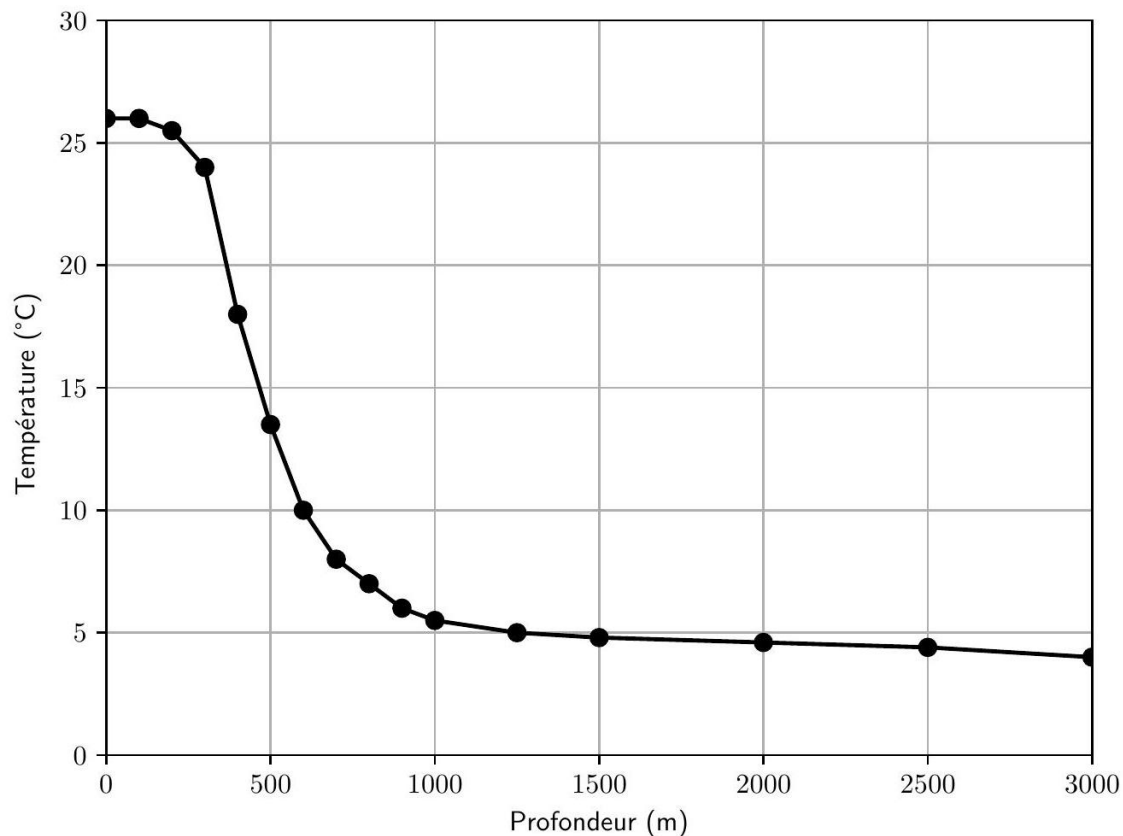


Figure 1 Température de l'eau de l'océan en fonction de la profondeur à La Réunion.

Q 3. Déterminer la profondeur à laquelle on devra prélever l'eau profonde pour qu'une installation à La Réunion soit rentable.

Q 4. Estimer la pression P à cette profondeur en explicitant la démarche suivie et toute hypothèse effectuée.

Q 5. Indiquer quelques avantages et quelques inconvénients d'une installation ETM.

II Centrale ETM en cycle fermé

Un prototype de centrale ETM est installé à La Réunion. Il n'est pas raccordé à l'océan et une pompe à chaleur simule les sources d'eau chaude et d'eau froide. L'ammoniac est le fluide de travail et son évolution est représentée sur la partie centrale de la figure 2. Le cycle réel de l'ammoniac est également représenté figure 3(a), ainsi qu'un cycle virtuel figure 3(b) expliqué ensuite.

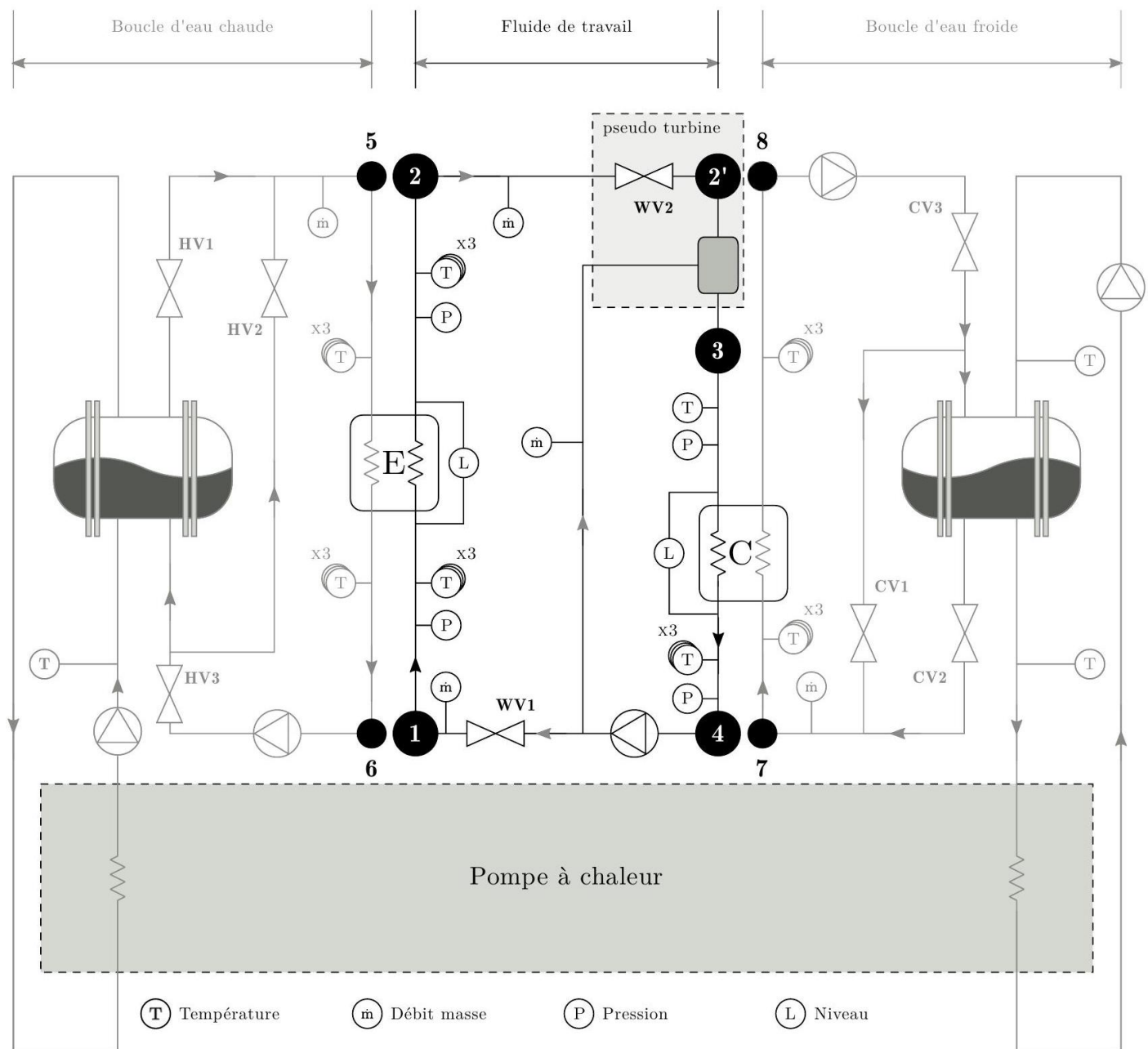


Figure 2 Schéma global du prototype ETM. Hal open science, Étude expérimentale d'un prototype ETM à La Réunion.

- L'ammoniac passe dans un évaporateur E adiabatique et isobare à double flux sous la pression de 9 bar où l'eau chaude le fait s'évaporer en vapeur juste saturante (point 1 à point 2).
- La vapeur produite est détendue de manière isenthalpique dans la vanne WV2 jusqu'à la pression de 6 bar (point 2 à point 2'). Une petite quantité de liquide froid, prélevée avant la vanne WV1, est injectée dans la vapeur chaude de façon à diminuer sa température (désurchauffe isobare) (point 2' à point 3). Ces transformations (détente et désurchauffe) sont contrôlées de telle sorte qu'elles donnent les mêmes propriétés au fluide que s'il avait été soumis à une détente isentropique dans une turbine jusqu'à la pression de 6 bar (point 2 au point 3 figure 3(b)).
- Le fluide de travail est ensuite condensé en liquide juste saturant par un condenseur C adiabatique et isobare à double flux grâce à l'eau froide (point 3 à point 4) puis ramené vers l'évaporateur avec une pompe à la pression de 9 bar (point 4 à point 1) en fonctionnement isentropique (la pompe est notée P_1 sur la figure 3).

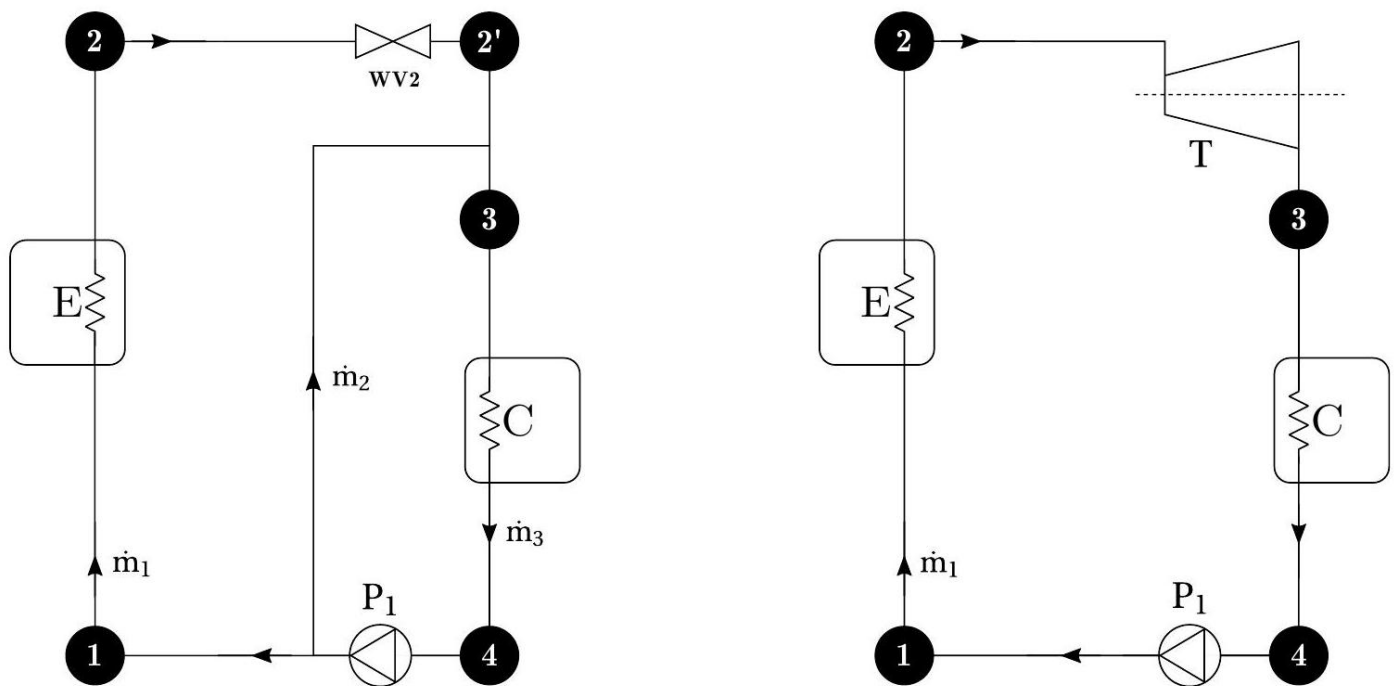


Figure 3 Cycle réel (a) à gauche et cycle virtuel (b) à droite de l'ammoniac. Hal open science, Étude expérimentale d'un prototype ETM à La Réunion.

La centrale fonctionne en régime stationnaire et on néglige les variations d'énergies potentielle et cinétique. Les liquides sont considérés comme incompressibles. Eau chaude et eau froide ont même débit massique. Les transformations isentropiques sont supposées adiabatiques et réversibles.

Données	Débit massique	Température d'entrée (en °C)	Température de sortie (en °C)
Eau chaude	$\dot{m}_e$	$T_5 = 26$	$T_6 = 24,5$
Eau froide	$\dot{m}_e$	$T_7 = 5$	T_8

Tableau 1 Données et notations relatives aux circuits d'eau.

On note x la fraction massique en vapeur de l'ammoniac. On donne le tableau suivant :

Les diagrammes d'état de l'ammoniac, nommé R717 en tant que fluide frigorigène, sont fournis dans les documents réponses 1 et 2, respectivement dans les systèmes de coordonnées (P, h) et (T, s) .

Q 6. Sur les diagrammes (P, h) et (T, s) des documents réponses 1 et 2, mentionner les noms des courbes de saturation, puis indiquer la phase stable associée à chaque domaine. Faire apparaître le point critique que l'on

Point i	T_i (°C)	P_i (bar)	x_i	h_i (kJ · kg ⁻¹)	s_i (kJ · K ⁻¹ · kg ⁻¹)
1	12	9		240	1,15
2'		6			

Tableau 2 Quelques paramètres pour deux points du cycle.

définira et donner sa température et sa pression.

On utilise désormais les diagrammes des documents réponses 3 et 4 qui présentent des agrandissements de parties des diagrammes des documents réponses 1 et 2 sans les courbes isochores pour plus de lisibilité :

- le document réponse 3 contient le diagramme (P, h) sur lequel figurent en tirets et points alternés les isothermes graduées en degrés Celsius et en tirets les isentropes graduées en kJ · K⁻¹ · kg⁻¹ ;
- le document réponse 4 contient le diagramme (T, s) sur lequel figurent en tirets et points alternés les isobares graduées en bars et en tirets les isenthalpes graduées en kJ · kg⁻¹.

Q 7. Déterminer $T_{\text{vap,HP}}$ et $T_{\text{vap,BP}}$, les températures de vaporisation aux pressions respectives de 9 bar et 6 bar.

Q 8. Déterminer les valeurs numériques des enthalpies massiques de vaporisation $\Delta h_{\text{vap,HP}} = \Delta h_{\text{vap}}$ (9 bar) et $\Delta h_{\text{vap,BP}} = \Delta h_{\text{vap}}$ (6 bar).

Q 9. La compression isentrope entre les points 4 et 1 est représentée sur le diagramme (P, h) du document réponse 3. Justifier sa forme.

Q 10. La détente isenthalpe entre les points 2 et 2' est représentée sur le diagramme (T, s) du document réponse 4. À l'aide des deux diagrammes, déterminer la température $T_{2'}$, l'enthalpie massique $h_{2'}$ et l'entropie massique $s_{2'}$. Préciser sous quelle(s) phase(s) se trouve l'ammoniac au point 2'.

Q 11. La détente isentrope entre les points 2 et 3 est représentée sur le diagramme (P, h) du document réponse 3. À l'aide des deux diagrammes, déterminer la température T_3 , l'enthalpie massique h_3 et l'entropie massique s_3 .

Q 12. Représenter sur les diagrammes (P, h) et (T, s) des documents réponses 3 et 4 le cycle effectué par l'ammoniac dans le dispositif ETM. On fera apparaître en particulier les points 1, 2, 2', 3, 4 et 1' (liquide juste saturant à 9 bar).

Q 13. Compléter le tableau du document réponse 5.

Q 14. En déduire la valeur de c_a , capacité thermique massique de l'ammoniac liquide.

Q 15. Expliquer pourquoi on utilise l'ammoniac comme fluide de travail et non de l'eau. Donner néanmoins un inconvénient de l'utilisation de l'ammoniac.

Q 16. Établir l'expression suivante du premier principe industriel dans le cas d'un système ouvert à une entrée et une sortie, en écoulement permanent avec un débit massique D_m , en explicitant bien toutes les hypothèses :

$$D_m (h_s - h_e) = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{th}$$

où h_s désigne l'enthalpie massique de sortie, h_e l'enthalpie massique d'entrée, $\mathcal{P}_u$ la puissance utile reçue par le système due aux pièces mobiles et $\mathcal{P}_{th}$ la puissance thermique reçue par le système.

En raison de la taille réduite du prototype, une véritable turbine capable de produire la puissance nécessaire n'était pas disponible. Néanmoins, en considérant le cycle virtuel représenté sur la figure 3(b), où la détente isentropique du point 2 au point 3 est attribuée à une turbine virtuelle, on peut calculer le rendement du cycle.

Q 17. Exprimer et calculer $\mathcal{P}_{th,E,R}$ et $\mathcal{P}_{th,E,V}$, les puissances thermiques reçues par l'ammoniac au niveau de

l'évaporateur lors des cycles respectivement réel et virtuel, puis commenter leur signe.

Q 18. Exprimer, en fonction des températures, $\mathcal{P}_{\text{th,ec}}$, la puissance reçue par l'eau chaude au niveau de l'évaporateur (cf. figure 2).

Q 19. En déduire l'expression et la valeur numérique de $\dot{m}_e$.

Q 20. Justifier que l'évolution de l'ammoniac traversant la vanne WV2 est isenthalpique.

Q 21. Au niveau du surchauffeur, situé entre les points 2' et 3, donner une relation entre $\dot{m}_1$, $\dot{m}_2$ et $\dot{m}_3$. Calculer $\dot{m}_3$.

Q 22. Exprimer et calculer $\mathcal{P}_{\text{C,R}}$ et $\mathcal{P}_{\text{C,V}}$, puissances reçues par l'ammoniac au niveau du condenseur lors des cycles respectivement réel et virtuel, puis commenter leur signe.

Q 23. Exprimer dans le cas réel $\mathcal{P}_{\text{ef}}$, la puissance reçue par l'eau froide au niveau du condenseur, puis en déduire la valeur de T_8 .

Q 24. Exprimer et calculer $\mathcal{P}_{\text{T,V}}$, puissance utile reçue par l'ammoniac dans la turbine T entre les points 2 et 3 du cycle virtuel. Commenter son signe.

Q 25. Exprimer et calculer $\mathcal{P}_{\text{P}_1,\text{R}}$ et $\mathcal{P}_{\text{P}_1,\text{V}}$, puissances utiles reçues par l'ammoniac au niveau de la pompe P₁ lors des cycles respectivement réel et virtuel.

Q 26. Déduire de l'étude précédente le rendement η_V du cycle virtuel.

Q 27. Le rendement obtenu est surestimé. Proposer des justifications.

Données et formulaire

Pression atmosphérique	$P^0 = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$
Accélération de la pesanteur	$g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Masse volumique de l'eau de mer	$\rho_1 = 1,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Capacité thermique massique de l'eau liquide	$c_e = 4,0 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Débits massiques de l'ammoniac	$\dot{m}_1 = 4,0 \times 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ et $\dot{m}_2 = 5,0 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Troisième partie

Conditionnement d'air dans la cabine d'un avion

Le renouvellement de l'air de la cabine d'un avion est essentiel au confort et à la sécurité des passagers. Pour maintenir un niveau suffisant d'oxygène, de l'air est prélevé à l'extérieur de l'avion. Cependant, cet air est trop froid pour être amené directement en cabine. Pour amener l'air extérieur à une température acceptable (en général réglable entre 18 et 26°C), on utilise de l'air chaud en provenance des moteurs que l'on refroidit. Cet air froid est ensuite à nouveau mélangé à de l'air chaud avant d'être envoyé en cabine.

On s'intéresse au système de climatisation pneumatique dont le principe de fonctionnement est présenté figure 1. De l'air provenant des moteurs et préalablement refroidi à 180°C est amené en entrée de l'ACM (« Air Cycle Machine ») ; la pression de l'air entrant vaut $P_1 = 2,5$ bar. Cet air est ensuite amené à $T_2 = 110^\circ\text{C}$ après avoir traversé un premier échangeur thermique, puis il est comprimé ($T_3 = 210^\circ\text{C}$), à nouveau refroidi dans un second échangeur thermique ($T_4 = 100^\circ\text{C}$) et finalement détendu dans une turbine ($T_5 = 5^\circ\text{C}$).

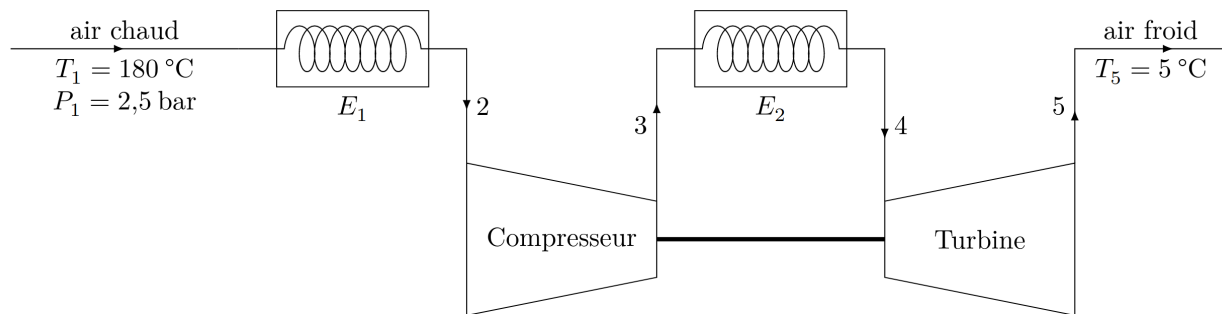


Figure 1 Air Cycle Machine

On fera les hypothèses de transformations adiabatiques réversibles pour l'air traversant le compresseur ou la turbine et de transformations isobares dans les échangeurs. L'air sera considéré comme un gaz parfait de coefficient $\gamma = C_p/C_v = 1,4$. On rappelle que C_p et C_v sont des capacités thermiques massiques à volume et pression constants.

1. Citer des différences entre ce dispositif et un système de climatisation « classique ».
2. Déterminer la pression d'air en sortie du compresseur (P_3), puis en sortie de la turbine (P_5).
3. Rappeler, pour un écoulement stationnaire, l'expression du premier principe "industriel", ou premier principe de la thermodynamique en système ouvert, mettant en jeu des grandeurs massiques, en définissant avec précision les notations utilisées.
4. La puissance récupérée par la turbine est-elle suffisante pour entraîner le compresseur ?
5. Montrer qu'envoyer directement l'air issu du premier échangeur thermique dans la turbine ne permet pas de produire, à une pression suffisante, un air à la température de sortie de 5°C.

Il faut une pression partielle en dioxygène supérieure à la pression limite $P_\ell = 0,148$ bar. Rappel : l'air est composé à 20% de dioxygène.

6. Pourquoi ne se contente-t-on pas de refroidir l'air à l'aide d'un simple échangeur thermique ?