

DS7 de Physique du 21/03/26**Calculatrice interdite****4h****Rappel des consignes :***Présentation de la copie :*

- Laisser une marge à gauche pour la notation.
- Encadrer ou souligner les résultats.
- Donner le numéro complet de la question à laquelle vous répondez.

Rédaction :

- Répondre précisément aux questions posées
- Respecter les notations de l'énoncé.
- Ne pas utiliser d'abréviations (sauf si elles ont été définies)
- Justifier tous les résultats.
- Rédiger de façon claire, précise et concise.
- Citer le nom des lois utilisées.
- Toujours donner un résultat littéral (avant de faire éventuellement l'application numérique), sans application numérique intermédiaire, sans mélanger littéral et numérique.
- Contrôler l'homogénéité du résultat.

Applications numériques :

- **En l'absence de calculatrice, les applications numériques seront faites avec au plus 2 chiffres significatifs.**
- Arrondir correctement la valeur donnée par la calculatrice.
- Ne jamais oublier les unités.
- Contrôler que l'ordre de grandeur est raisonnable.
- Ne jamais réutiliser le résultat arrondi d'une application numérique précédente (pour éviter les erreurs d'arrondis)

La notation prendra en compte le respect de ces consignes (aucun point pour un résultat non homogène, des points de rédaction...)

Problème 1 : L'anémométrie à fil chaud – Etude énergétique

L'anémométrie à fil chaud est une technique permettant de mesurer la vitesse d'écoulement d'un fluide. Elle est basée sur l'influence de la vitesse d'écoulement du fluide sur le transfert thermique conducto-convectif d'un solide conducteur plongé dans ce fluide.

Le système le plus couramment utilisé est un petit fil cylindrique, d'un diamètre typique d_w de l'ordre de quelques micromètres, parcouru par un courant et donc chauffé par effet Joule.

Ce petit fil est fixé à des broches d'alimentation par l'intermédiaire d'une gaine d'adaptation qui permet notamment l'alimentation du fil et de fixer la longueur active du fil, notée L_w qui est ici de l'ordre de quelques millimètres.

Quelques valeurs numériques concernant certaines caractéristiques physiques du fil chaud sont rassemblées dans le tableau ci-dessous.

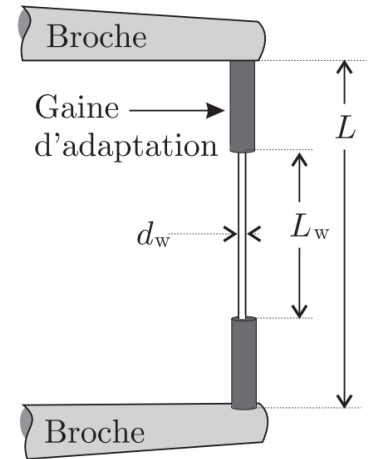


FIGURE 1 – Anémomètre

Matériau	Résistivité à 20°C : ρ_{20} [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]	Conductivité thermique : λ_w [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	Masse volumique : μ_w [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] $\times 10^4$	Capacité thermique massique : c_w [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
Tungstène	5,5	1,9	1,93	0,14
Platine	9,8	0,72	2,15	0,13
Platine-iridium	32	0,17	2,16	0,13

Les applications numériques seront réalisées avec au plus 2 chiffres significatifs.

A. Bilan d'énergie dans le fil chaud

Le fil conducteur (en tungstène par exemple) est parcouru par un courant électrique continu d'intensité I . Il est plongé dans un fluide en écoulement. On utilisera les notations suivantes :

- Caractéristiques du fil (que l'on repère avec l'indice « w » pour *wire* en anglais) : masse volumique μ_w , capacité thermique massique c_w , température T_w , résistivité (inverse de la conductivité) électrique ρ_w , conductivité thermique λ_w , longueur L_w et diamètre d_w .
- Caractéristiques du fluide (généralement de l'air que l'on repère lorsqu'il a ambiguïté avec l'indice « f » pour fluide) et de l'écoulement : masse volumique μ_f , viscosité η , température T_f , pression p_f , vitesse de l'écoulement $\vec{V}$. Ces caractéristiques sont supposées constantes pendant la mesure.

Si l'on note h le coefficient de transfert thermique conducto-convectif, la puissance thermique surfacique cédée par le fil au fluide à travers la surface S est donnée par la loi de Newton :

$$\frac{\delta \dot{Q}_f}{dS} = h (T_w - T_f) \quad (1)$$

On notera (Ox) l'axe du fil, ses extrémités étant situées en $x = -L_w/2$ et $x = +L_w/2$.

- – 1. Rappeler la loi d'Ohm locale. Définir les grandeurs intervenant dans cette loi et donner leurs unités usuelles. Établir l'expression de la résistance électrique totale, notée R_w , du fil en fonction de ρ_w , L_w et d_w .

En déduire la puissance $\mathcal{P}_j$ dissipée par effet Joule dans le fil en fonction de ρ_w , L_w , d_w et I , puis la puissance volumique dissipée par effet Joule : $\mathcal{P}_v = \frac{d\mathcal{P}_j}{d\tau}$.

- – 2. Rappeler la loi de Fourier de la conduction thermique. Définir les grandeurs intervenant dans cette loi. On dit souvent qu'il s'agit d'une loi phénoménologique. Que cela signifie-t-il ? La température est supposée homogène sur chaque section du fil d'abscisse x . Que peut-on en déduire ?
Établir l'équation de diffusion thermique dans le cas d'un fil à la température $T(x,t)$ où seuls les transferts thermiques par conduction ont lieu.

On se place en régime permanent dans tout le reste du problème et on suppose la vitesse $\vec{V}$ de l'écoulement uniforme et indépendant du temps. En plus des transferts thermiques par conduction, on prend en compte les transferts thermiques par conducto-convection et ceux provenant de l'effet Joule. Les transferts thermiques sont intégrés dans le terme conducto-convectif.

- – 3. Dans la loi de Newton (1), la grandeur h dépend de la vitesse $\vec{V}$ de l'écoulement. Quelle est son unité ? Expliquer qualitativement comment varie h en fonction de $V = \|\vec{V}\|$. Expliquer alors comment évolue T_w quand V augmente.
- – 4. En effectuant un bilan énergétique sur un élément de volume de fil compris entre les abscisses x et $x + dx$, établir l'équation aux dérivées partielles vérifiée par la température $T_w(x,t)$.

La résistivité du fil dépend en fait de la température T_w de ce dernier. Expérimentalement, on mesure que si le fil est en contact avec un fluide à la température T_f , sa résistivité ρ_w vérifie la relation :

$$\rho_w = \rho_f [1 + \alpha (T_w - T_f)] \quad (2)$$

où ρ_f est sa résistivité à la température du fluide et $\alpha = 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ est un coefficient expérimental supposé constant. On note enfin $T_1(x) = T_w(x) - T_f$.

- – 5. Mettre l'équation obtenue à la question 4 sous la forme :

$$\frac{d^2 T_1(x)}{dx^2} + K_1 T_1(x) + K_2 = 0 \quad (3)$$

Exprimer les constantes K_1 et K_2 en fonction de l'intensité I et des caractéristiques du fil, du fluide et de l'écoulement. On montrera, en particulier, que $\alpha K_2 = K_1 + 4h/(\lambda_w d_w)$. Dans la plupart des anémomètres à fil chaud, K_1 est négatif. Déterminer la condition correspondante sur le coefficient conducto-convectif h . On se place dans ce cas dans toute la suite et on pose :

$$\ell_c = \frac{1}{\sqrt{|K_1|}}$$

On considère que le contact thermique assuré par les gaines d'adaptation entre les extrémités du fil et les broches de l'anémomètre (voir figure 1) se fait sans résistance thermique (contact parfait). Les broches et les gaines sont à la température T_f du fluide.

- – 6. Rappeler la définition d'une résistance thermique ainsi que son unité. Quelle est la conséquence d'un contact sans résistance thermique ?
Déterminer la solution générale de l'équation différentielle (3).
En tenant compte des conditions aux limites dans le problème et de sa symétrie, montrer que $T_1(x)$ s'exprime assez simplement à partir de la fonction cosinus hyperbolique. En déduire l'expression du profil de température $T_w(x)$ dans le fil de la sonde en fonction de x , ℓ_c , K_2 , T_f et L_w .

- – 7. Déterminer la puissance thermique $\dot{Q}_g$ cédée par le fil à l'ensemble des *deux* gaines d'adaptation en fonction de ℓ_c , K_2 , L_w , λ_w et d_w .
- – 8. Montrer que la moyenne spatiale $\langle T_w \rangle$ de la température du fil s'écrit selon la relation

$$\langle T_w \rangle = T_f + K_2 \ell_c^2 \left[1 - \Lambda \tanh \left(\frac{L_w}{2\ell_c} \right) \right]$$

dans laquelle on précisera l'expression du paramètre Λ .

La figure 2 représente la distribution de température dans le fil chaud pour différentes valeurs du rapport $k = \frac{L_w}{2\ell_c}$. La fonction tracée est

$$f(y) = \frac{T_w - T_f}{\langle T_w \rangle - T_f} \quad \text{avec} \quad y = x/L_w$$

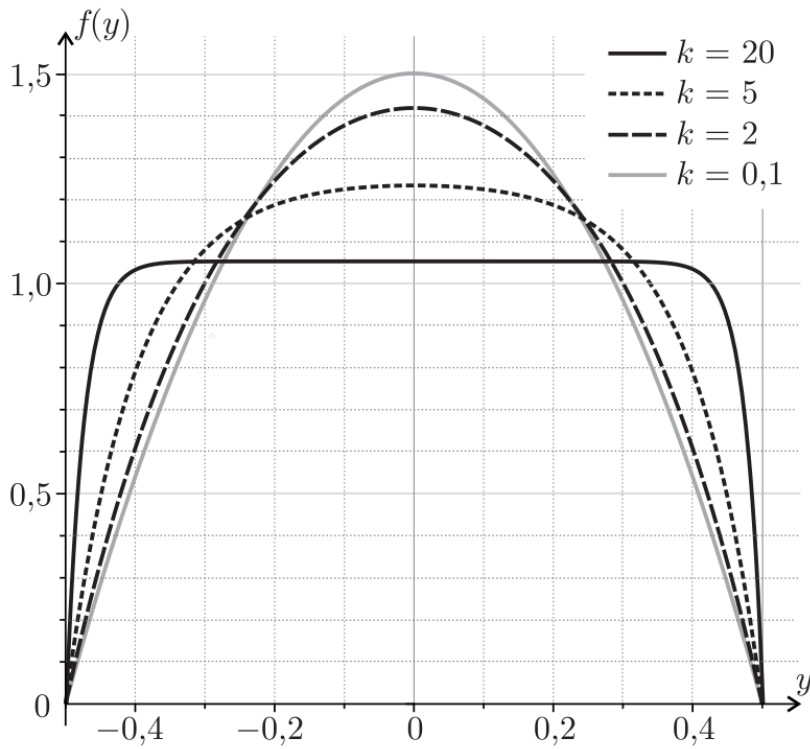


FIGURE 2 – Représentation graphique de la fonction $f(y)$ pour quatre valeurs du paramètre k .

- – 9. Pour un fil de tungstène de diamètre $d_w = 5 \mu\text{m}$, de longueur $L_w = 1,2 \text{ mm}$ et fonctionnant dans un régime de température T_w tel que $\ell_c = 30 d_w$, évaluer, en faisant les approximations pertinentes, la valeur numérique du coefficient

$$\xi = \frac{T_{w, \max} - T_f}{\langle T_w \rangle - T_f}$$

où $T_{w, \max}$ est la température maximale atteinte dans le fil. En exploitant la figure 2, commenter la valeur trouvée.

B. Puissance thermique cédée au fluide

- – 10. Commenter les courbes de la figure 2. Quelle approximation peut-on faire quant à la température T_w dans le cas d'un fil long (on précisera ce que « long » signifie ici) ?

La résistivité ρ_w du fil est toujours supposée dépendre de la température du fluide avec lequel il est en contact selon la relation (2).

- – 11. Calculer la résistance $R_{w,\infty}$ d'un fil supposé long en fonction de sa résistance R_f à la température T_f , de α et des températures $\langle T_w \rangle$ et T_f .

Toujours dans le cadre d'un fil long, on fait l'hypothèse que la puissance thermique $\dot{Q}_g$ cédée par le fil aux deux gaines d'adaptation est négligeable devant la puissance $\dot{Q}_j$ dissipée par effet Joule le long du fil ou celle, notée $\dot{Q}_f$, correspondant aux échanges thermiques conducto-convectifs reçus par le fluide à l'interface entre le fil et le fluide.

- – 12. Déterminer, en régime permanent, l'expression de $\dot{Q}_j$ en fonction de la différence $\langle T_w \rangle - T_f$ et des constantes d_w , L_w et h .

Pour un fluide de viscosité η et de masse volumique μ_f , qui s'écoule à la vitesse V autour d'un obstacle fixe de taille caractéristique d_w , on définit le nombre de Reynolds $\mathcal{R}_e = \mu_f V d_w / \eta$. Il compare deux modes de transport au sein du fluide.

- – 13. Sachant que la viscosité η s'exprime en $\text{Pa} \cdot \text{s}$ déterminer la dimension de $\mathcal{R}_e$.

On définit par ailleurs le nombre de Nusselt, $\mathcal{N}_u = h d_w / \lambda_f$.

- – 14. Déterminer la dimension de $\mathcal{N}_u$ et proposer une interprétation physique de cette quantité. Comment varie $\mathcal{N}_u$ lorsque la vitesse V du fluide s'écoulant autour du fil augmente ?

On admet que le nombre de Nusselt vérifie la loi de King $\mathcal{N}_u = A + B \sqrt{\mathcal{R}_e}$ où A et B sont des constantes connues qui ne dépendent que de la nature du fluide en écoulement.

- – 15. En exploitant l'expression de $\langle T_w \rangle$ obtenue à la question 8 et les résultats de la question 5, montrer que dans le cas d'un fil long on peut écrire

$$\ell_c = \frac{d_w}{2} \theta^\nu \quad \text{avec} \quad \theta = \frac{1}{\mathcal{N}_u} \frac{\lambda_w}{\lambda_f} \frac{R_{w,\infty}}{R_f}. \quad (4)$$

On précisera la valeur numérique de l'exposant ν .

- – 16. On considère de nouveau un fil de longueur L_w quelconque. Établir l'expression de la puissance thermique $\dot{Q}_f$ associée au transfert conducto-convectif du fil vers le fluide.

On suppose que la relation (4) reste valable en ordre de grandeur pour un fil de longueur quelconque et que, de plus, le coefficient θ qu'elle fait intervenir est de l'ordre de l'unité pour toutes les mesures effectuées.

- – 17. En étudiant le rapport $\dot{Q}_f / \dot{Q}_g$, et sachant que dans le contexte d'étude $\mathcal{N}_u \simeq 10$ SI, justifier *a posteriori* que l'on puisse simplifier le problème en ne considérant pas les pertes dans les gaines d'adaptation sous l'hypothèse d'un fil long.

En utilisant le résultat de la question 12 et en supposant que l'on puisse appliquer la loi de King, montrer que, pour un fil long, la mesure de la vitesse V du fluide se ramène à une mesure de résistance. On déterminera l'expression de V en fonction *notamment* de $R_{w,\infty}$, R_f et I .

Problème 2 : L'énergie thermiques des mers

Des données numériques sont présentes en fin d'énoncé page 10 (débits des fluides et constantes).
En l'absence de calculatrice, les applications numériques seront faites si possible avec 2 chiffres significatifs.
Les annexes (pages 11 et 12) sont à détacher et à rendre avec la copie. Ne pas oublier de noter votre nom !

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. (*Démonstration attendue*)

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.

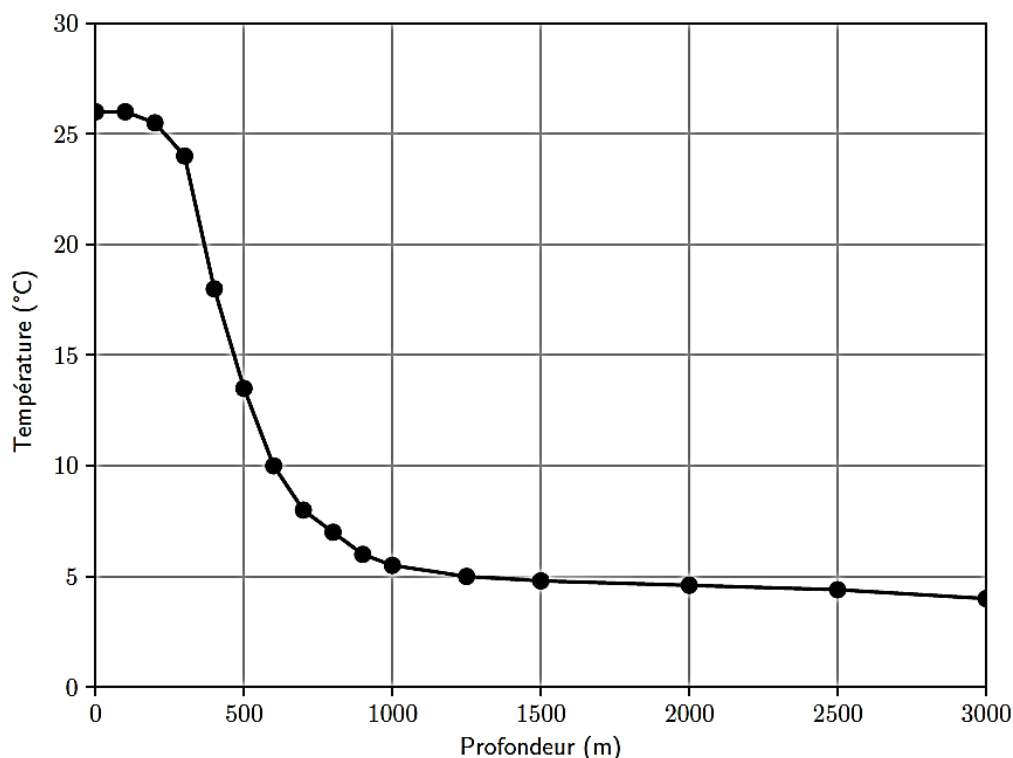


Figure 1 Température de l'eau de l'océan en fonction de la profondeur à La Réunion.

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.

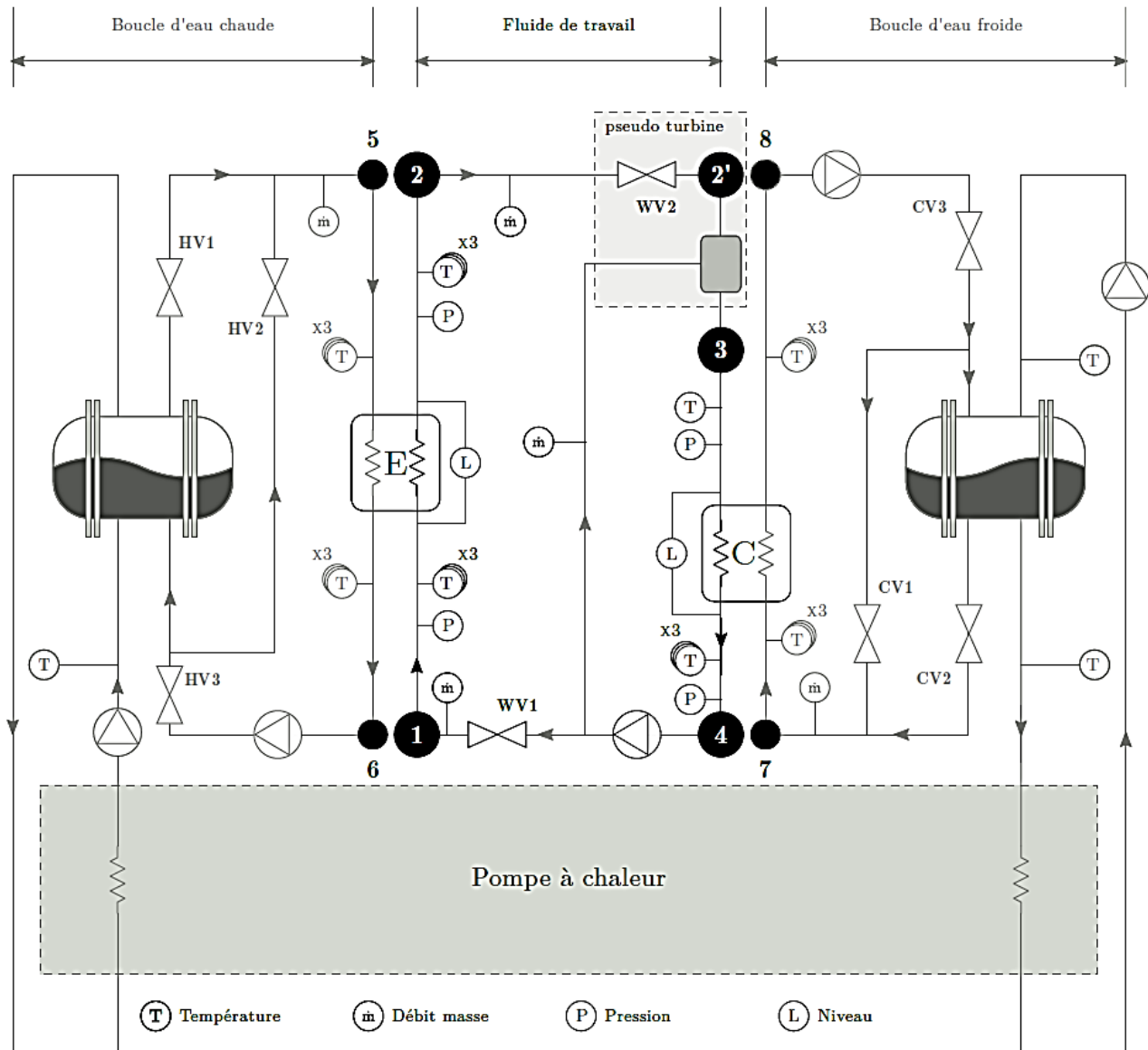


Figure 2 Schéma global du prototype ETM. Hal open science, Étude expérimentale d'un prototype ETM à La Réunion.

- 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).

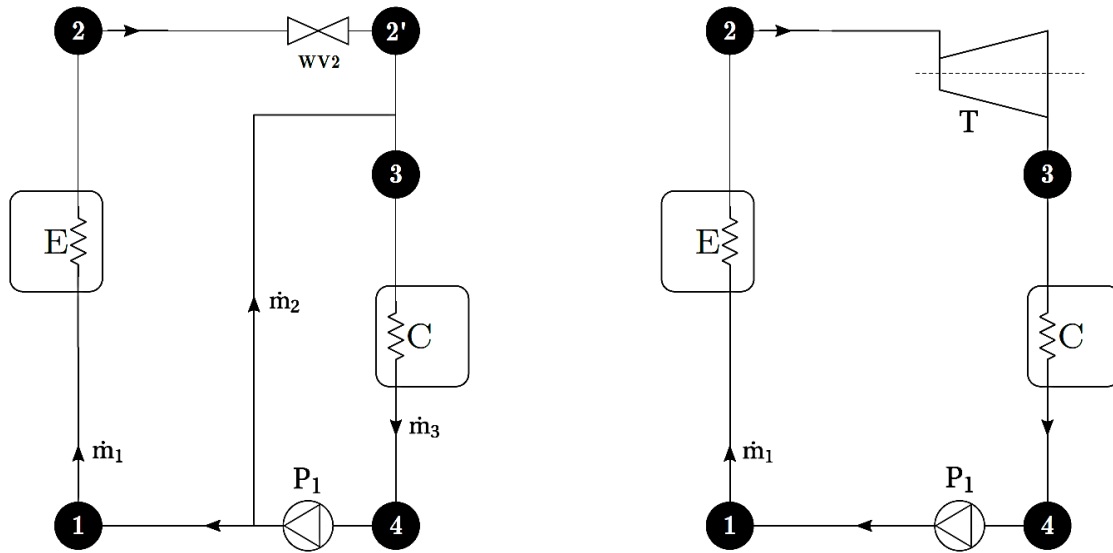


Figure 3 Cycle réel (a) à gauche et cycle virtuel (b) à droite de l'ammoniac.
Hal open science, Étude expérimentale d'un prototype ETM à La Réunion.

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 :

Point i	$T_i(^{\circ}\text{C})$	$P_i(\text{bar})$	x_i	$h_i(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	$s_i(\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1})$
1	12	9		240	1,15
2'		6			

Tableau 2 Quelques paramètres pour deux points du cycle.

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 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 $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$;
- 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 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

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 $\Delta h_{\text{vap,HP}} = \Delta h_{\text{vap}}(9 \text{ bar})$ et $\Delta h_{\text{vap,BP}} = \Delta h_{\text{vap}}(6 \text{ bar})$.

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.

On rappelle que les débits massiques d'ammoniac sont dans les données page 10.

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 $\mathcal{P}_{th,E,R}$ 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.

(Exprimer ces puissances thermiques en fonction des h_i et des débits $\dot{m}_i$)

Q 18. Exprimer, en fonction des températures, $\mathcal{P}_{th,ec}$, 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 $\mathcal{P}_{C,R}$ et $\mathcal{P}_{C,V}$, puissances reçues par l'ammoniac au niveau du condenseur lors des cycles respectivement réel et virtuel, puis commenter leur signe. (Exprimer en fonction des h_i et des débits $\dot{m}_i$)

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

Q 24. Exprimer $\mathcal{P}_{T,V}$, puissance utile reçue par l'ammoniac dans la turbine T entre les points 2 et 3 du cycle virtuel. Commenter son signe. (Exprimer en fonction des h_i et des débits $\dot{m}_i$)

Q 25. Exprimer et calculer $\mathcal{P}_{P_1,R}$ et $\mathcal{P}_{P_1,V}$, puissances utiles reçues par l'ammoniac au niveau de la pompe P_1 lors des cycles respectivement réel et virtuel.

Q 26. Déduire de l'étude précédente le rendement η_V du cycle virtuel. (Exprimer et calculer η_V .) Commenter.

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

Données

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 $\dot{m}_2 = 5,0 \times 10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$

Document réponse à rendre avec la copie

Nom :

DOCUMENT RÉPONSE 1

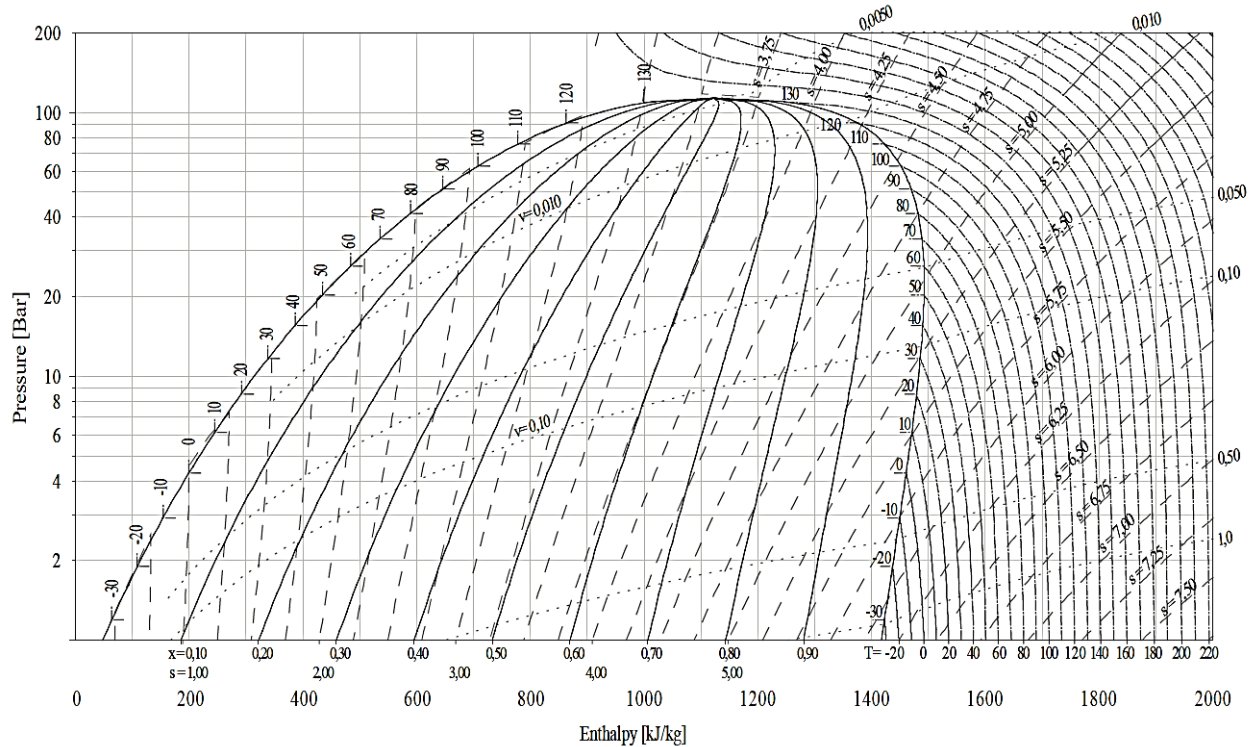


Diagramme de l'ammoniac (P, h). DTU, Department of Energy Engineering, s en ($\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$), v en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, T en $^{\circ}\text{C}$, M.J. Skovrup & H.J.H Knudsen (23-10-03).

DOCUMENT RÉPONSE 2

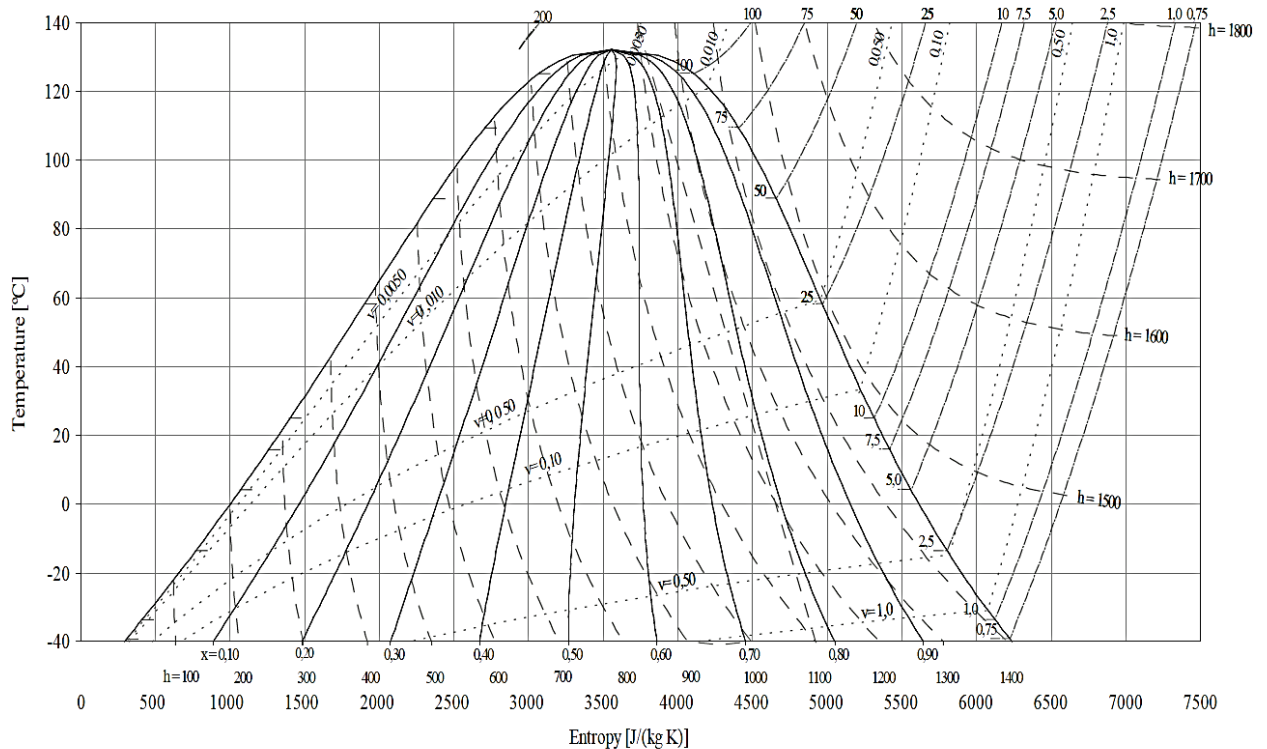
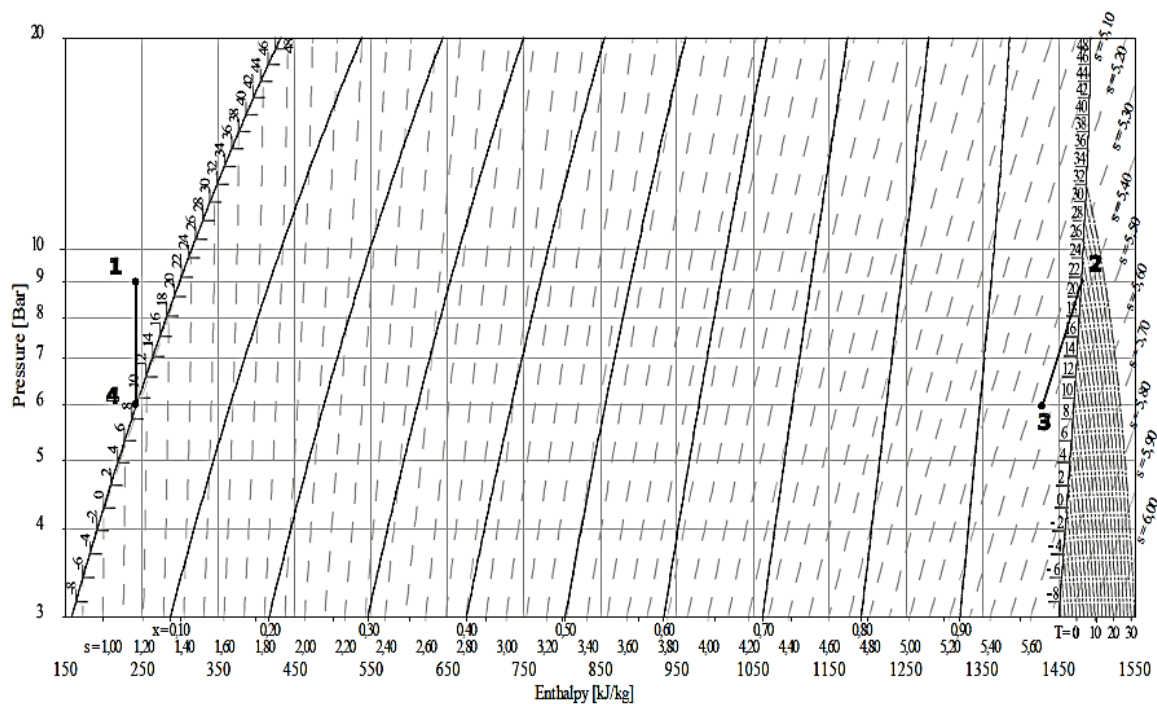


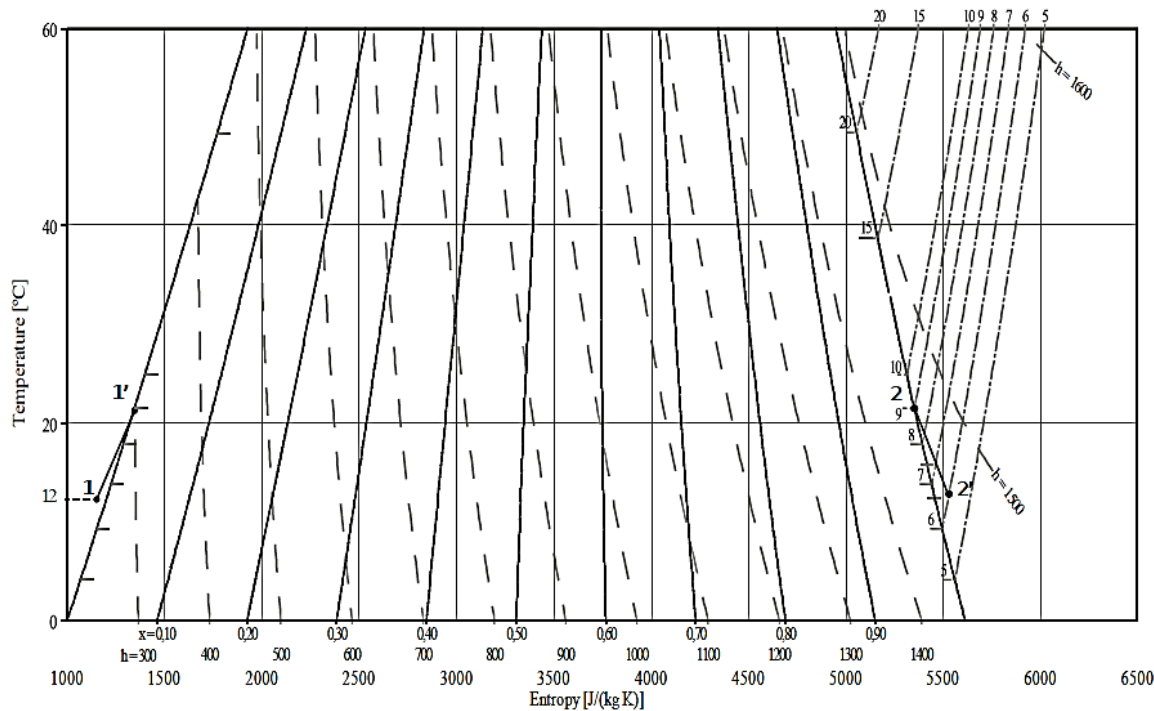
Diagramme de l'ammoniac (T, s). DTU, Department of Energy Engineering, h en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, v en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, p en bar, M.J. Skovrup & H.J.H Knudsen (23-10-03).

DOCUMENT RÉPONSE 3



Agrandissement d'une partie du diagramme de l'ammoniac (P, h). DTU, Department of Energy Engineering, s en ($\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$), v en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, T en $^{\circ}\text{C}$, M.J. Skovrup & H.J.H Knudsen (23-10-03).

DOCUMENT RÉPONSE 4



Agrandissement d'une partie du diagramme de l'ammoniac (T, s). DTU, Department of Energy Engineering, h en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, v en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, p en bar, M.J. Skovrup & H.J.H Knudsen (23-10-03).

DOCUMENT RÉPONSE 5

Point i	T_i ($^{\circ}\text{C}$)	P_i (bar)	x_i	h_i ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	s_i ($\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1	12	9		240	1,15
1'					
2					
2'		6			
3					
4					