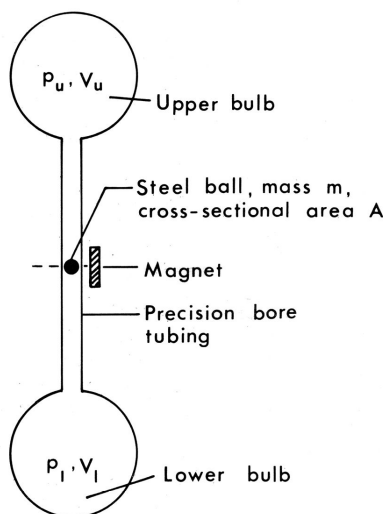


## EXERCICE 1

### Mesure de $\gamma$



Le dispositif étudié est constitué de deux ampoules (« Lower bulb » et « Upper bulb ») reliées par un tube de section  $A$  très régulière. Une bille d'acier (« Steel ball »), de masse  $m$  et de section  $A$ , peut coulisser librement dans le tube.

Avant de débiter l'expérience, grâce à un aimant, on retient la bille et on attend que les très faibles fuites d'air autour de la bille égalisent les pressions dans les deux ampoules. Ainsi, on a la même pression  $P_0$  partout dans l'appareil. Le volume d'air à l'instant initial dans les ampoules sera noté  $V_{u0}$  et  $V_{l0}$ .

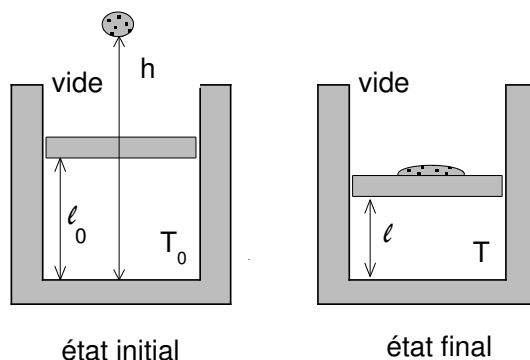
Pour débiter l'expérience, on enlève d'un seul coup l'aimant : on constate que la bille oscille dans le tube avec des mouvements de très faible amplitude. On négligera tout défaut d'étanchéité (on considère que l'air ne peut pas passer sur les côtés de la bille pendant l'oscillation).

1. Quelles hypothèses peut-on formuler pour les transformations subies par l'air ?
2. Déterminez l'équation différentielle du mouvement de la bille.
3. Avec  $m = 5.35$  g, un tube de diamètre 11 mm, des ampoules de volume initial  $V_{u0} = V_{l0} = 5$  L, et une pression initiale dans l'appareil de  $P_0 = 1$  bar, on observe une période d'oscillation de la bille de  $T = 649$  ms.  
Déduisez  $\gamma$ , puis commentez la valeur obtenue.

## EXERCICE 2

### Sable

Un récipient cylindrique d'axe vertical contient  $n$  moles de gaz parfait. Il est obturé par un piston horizontal, de masse  $M$  et d'aire  $A$ , pouvant coulisser sans frottement. Un sac de sable de masse  $m$  est suspendu à la hauteur  $h$  au-dessus du fond du cylindre. L'ensemble est placé dans le vide. On notera  $C$  la capacité calorifique à volume constant du système constitué par le récipient, le piston, le sable et le gaz, et on la supposera invariable dans le domaine de température considéré. Initialement, la température de l'ensemble vaut  $T_0$ , et on appelle  $\ell_0$  la distance entre le piston et le fond du récipient.



1. Que valent, dans l'état initial, la pression  $p_0$  du gaz et la distance  $\ell_0$  entre le piston et le fond du récipient ?
2. On lâche le sac de sable sur le piston qui s'immobilise finalement à une hauteur  $\ell$ .  
Que valent la pression  $p$ , la distance  $\ell$  entre le piston et le fond du récipient, et la température  $T$  dans l'état final ?
3. Vérifiez que, selon la valeur de  $h$ , le volume du gaz peut diminuer ou augmenter.
4. On laisse maintenant tomber le sable grain par grain, toujours depuis la même hauteur  $h$ . La transformation est-elle rendue réversible ?

## EXERCICE 3

### Détente dans le vide

Un piston calorifugé peut coulisser sans frottement le long d'un cylindre calorifugé ; leurs capacités thermiques sont supposées nulles. Le cylindre est séparé en deux compartiments (A) et (B) par une paroi fixe (F). Sur la face extérieure du piston s'exerce la pression atmosphérique  $P_0$  qu'on suppose uniforme et constante. Dans la situation initiale, le compartiment A de volume  $V_A$  contient  $n$  moles d'un gaz parfait de coefficient  $\gamma$  constant. Le compartiment B de volume  $V_B$  est initialement vide.

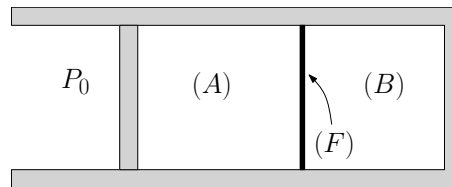


FIGURE 1 –

1. On perce un orifice dans la paroi fixe (F) et on cherche à décrire les caractéristiques du nouvel état d'équilibre qu'on supposera atteint.
  - (a) En analysant qualitativement le problème, montrer que selon la valeur de  $V_B$  par rapport à une valeur seuil  $V_{Bs}$  (qu'on ne cherchera pas à ce stade de l'étude), deux types de solutions existent ; pour répondre à cette question, on pourra s'intéresser à l'équilibre mécanique du piston dans l'état final.
  - (b) En supposant que  $V_B$  est inférieure à la valeur seuil, déterminer les caractéristiques  $P_1$ ,  $V_1$ ,  $T_1$  du gaz enfermé dans le cylindre A + B quand le nouvel état d'équilibre est atteint ; on exprimera ces grandeurs en fonction de toutes ou de certaines des données :  $P_0$ ,  $\gamma$ ,  $n$ ,  $V_A$ ,  $V_B$  et de  $R$ .
  - (c) Déterminer la valeur seuil  $V_{Bs}$  en fonction de  $V_A$  et de  $\gamma$ .
  - (d) On suppose cette fois  $V_B$  supérieure à  $V_{Bs}$ . Déterminer  $P_2$ ,  $V_2$ ,  $T_2$  du gaz enfermé à l'intérieur du cylindre dans le nouvel état d'équilibre ; on exprimera ces grandeurs en fonction de toutes ou de certaines des données  $P_0$ ,  $\gamma$ ,  $n$ ,  $V_A$ ,  $V_B$  et de  $R$ .
2. Calculer l'expression de la variation d'entropie  $\Delta S_1$  du gaz en fonction de  $n$ ,  $\gamma$ ,  $V_A$ ,  $V_B$  dans le cas où l'état final est celui du 1.b. Ce résultat est-il conforme au second principe ?
  - 2.b. Déterminer de la même façon la variation d'entropie  $\Delta S_2$  l'état final étant celui du 1.d. Ce résultat est-il conforme au second principe ?

## EXERCICE 4

### Compression

L'enceinte, adiabatique aux questions (1) et (2), contient 1,0 mol d'un gaz parfait diatomique ( $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{7}{5}$ ), initialement à l'équilibre, occupant  $V(0) = V_0$  connu a priori et de température  $T(0)$  (pas forcément égale à  $T_0$ ). La forme globale de l'enceinte est représentée qualitativement à titre d'exemple. Les seuls impératifs géométriques sont l'égalité des sections des pistons  $\Sigma = 1000 \text{ cm}^2$  = sections droites des zones où ils évoluent, la verticalité du cylindre contenant (a)- qui surmonte le gaz étudié-, l'axe du ressort perpendiculaire à (b) et l'immobilité de son extrémité non liée à (b). Les masses des pistons (a), (b) (seules parois mobiles de l'enceinte) et du ressort sont négligeables. Les pistons étant à l'équilibre, on lâche  $M$  sans vitesse à la limite du contact avec (a) et on attend un nouvel équilibre thermodynamique (1).

1. Prédire avec le moins de calculs possibles les sens de déplacement des deux pistons pour l'enceinte schématisée.

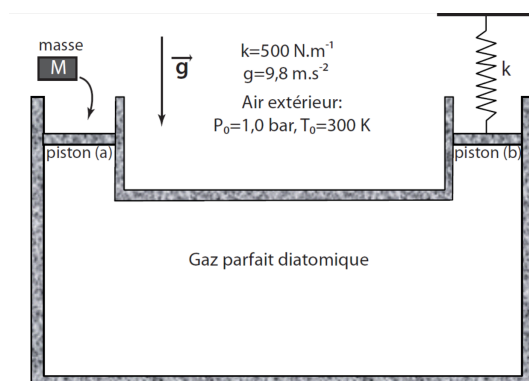


FIGURE 2 –

- Pour quelle valeur de  $M$  le changement de température du gaz est-il indépendant de la pression extérieure ? L'enceinte du schéma autorise-t-elle ce cas ? Si besoin, proposer une forme d'enceinte plus adaptée (en respectant les impératifs cités). Application numérique pour  $T(0) = T_0$ .
- Le gaz ayant atteint l'état (1) de la question précédente, on bloque les deux pistons et on attend très longtemps. A cette échelle, l'enceinte ne peut plus être supposée adiabatique et un nouvel état d'équilibre (2) finit par s'établir. Quelles forces les fixations des pistons devront-elles exercer ? Faire un bilan entropique pour les deux évolutions du gaz étudié.

## EXERCICE 5

### Chaudière

- Rappelez ce qu'est un cycle moteur de Carnot.  
Donnez, en les justifiant, le sens des différents transferts d'énergie entre le moteur et l'extérieur.  
Établissez l'expression du rendement du cycle.
- On utilise un cycle récepteur de Carnot pour réaliser une pompe à chaleur (PAC).  
Donnez, en les justifiant, le sens des différents transferts d'énergie entre la PAC et l'extérieur.  
Établissez l'expression de l'efficacité du cycle.
- Une chaudière délivre une puissance thermique fixée à la température  $T_c = 373\text{K}$ . On envisage deux façons de maintenir une pièce à la température  $T_{amb} = 293\text{K}$  :
  - ☐ soit en chauffant directement la pièce grâce à la chaudière,
  - ☐ soit en se servant de la chaudière et de l'atmosphère extérieure de température  $T_{atm} = 273\text{K}$  comme sources de chaleur pour faire fonctionner un moteur, qui lui-même entraîne une pompe à chaleur qui chauffe la pièce en prélevant de la chaleur dans l'atmosphère.

La deuxième méthode peut-elle être avantageuse par rapport à la première ?

## EXERCICE 6

### Trois sources

On considère  $n$  moles de gaz parfait décrivant le cycle réversible suivant :

- ☐ De  $A$  à  $B$  : détente isotherme à la température  $T_1$  avec  $V_B = k_1 V_A$ .
- ☐ De  $B$  à  $C$  : détente adiabatique.
- ☐ De  $C$  à  $D$  : détente isotherme à la température  $T_2$  avec  $V_D = k_2 V_C$ .
- ☐ De  $D$  à  $E$  : détente adiabatique.
- ☐ De  $E$  à  $F$  : compression isotherme à la température  $T_3$  avec  $V_F = k_3 V_E$ .
- ☐ De  $F$  à  $A$  : compression adiabatique.

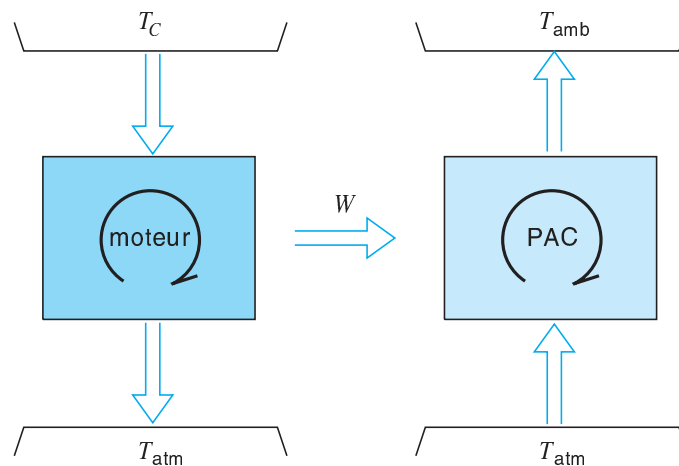


FIGURE 3 – Schéma de principe de la deuxième méthode.

1. Tracez le cycle dans le diagramme de Clapeyron. Quelles sont les sources chaudes et froides ? Dans quel sens est décrit le cycle ?
2. Exprimez le rendement de ce moteur en fonction de  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  et  $k_3$ .
3. Trouvez une relation entre  $k_1$ ,  $k_2$  et  $k_3$ .
4. Les températures des sources étant fixées, à quelle condition le rendement est-il maximal ? Généralisez le résultat précédent à un fluide caloporteur quelconque.

## EXERCICE 7

### Surfusion

On place une bouteille d'un litre d'eau au congélateur. Cette eau se refroidit lentement et atteint une température de  $-10^\circ\text{C}$  tout en restant à l'état liquide (état métastable de surfusion). On sort ensuite la bouteille du congélateur, et on lui donne un choc : l'état métastable cesse, l'eau se solidifie d'abord au niveau du point d'impact, puis la solidification s'étend progressivement et rapidement dans la bouteille. La photo a été prise pendant la phase de solidification :



Données numériques :

Enthalpie massique de fusion de la glace à  $0^\circ\text{C}$  :  $\Delta_{fus}h = 335 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

Capacité thermique massique de l'eau liquide :  $c_l = 4.18 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Capacité thermique massique de la glace :  $c_s = 2.06 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

1. Lors de la solidification, l'eau va-t-elle absorber ou dégager de la chaleur ? Quelles hypothèses peut-on faire sur la transformation subie par l'eau ?
2. Dans l'état d'équilibre final, estimez la masse de glace obtenue ainsi que la température finale du système.
3. Effectuez le bilan d'entropie de cette transformation. Commentez.

4. Considérons maintenant la solidification complète d'un litre d'eau surfondue maintenu à  $-10^\circ\text{C}$  et à pression atmosphérique tout au cours de la transformation. Quel est le transfert thermique reçu par l'eau lors de cette transformation ? Comparez ce transfert avec celui reçu lors d'une solidification à pression atmosphérique effectuée à  $0^\circ\text{C}$ .

## EXERCICE 8

### Patinoire

Une patinoire de longueur 60 m et de largeur 30 m, est initialement remplie d'eau à  $15^\circ\text{C}$  sur une épaisseur de 3 cm. Une machine frigorifique fonctionne de manière réversible entre la « source froide » constituée par l'eau de la patinoire, et la « source chaude » constituée par l'atmosphère de température constante  $15^\circ\text{C}$ . La machine est alimentée par une puissance électrique  $P = 200\text{ kW}$ .

On donne la capacité thermique massique de l'eau :  $c = 4.18\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , et sa chaleur latente massique de fusion à  $0^\circ\text{C}$  :  $\ell = 333\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

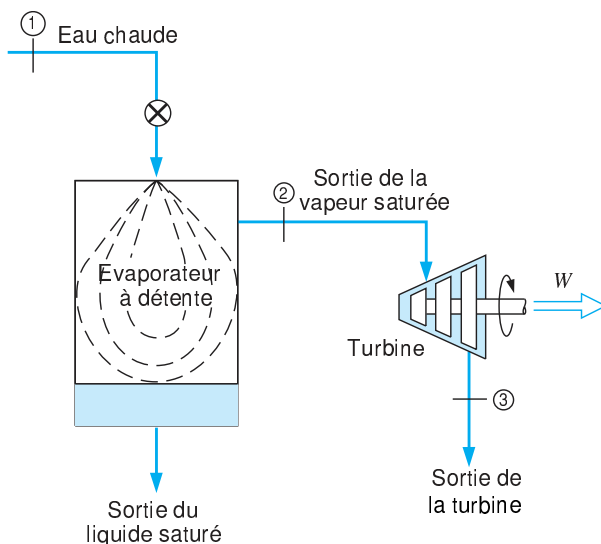
- Quelle est l'efficacité maximale d'une machine frigorifique fonctionnant entre deux thermostats de température fixe :  $T_c$ , et  $T_f < T_c$  ?
- Calculez le temps nécessaire de fonctionnement de la machine pour que toute l'eau soit sous forme de glace.
- Quelle a été l'efficacité moyenne de la machine frigorifique lors de cette opération de congélation ?
- Pour expliquer pourquoi on peut patiner sur la glace, un élève avance l'hypothèse suivante : l'augmentation de pression sous les patins provoque la fusion de la glace, et le patineur glisse alors sur le pellicule d'eau ainsi formée.
  - Sur un diagramme  $(P, T)$ , représentez les différentes phases (solide, liquide, et gazeuse) de l'eau. Qualitativement, l'explication de l'élève est-elle satisfaisante ?
  - Le point triple de l'eau a une température  $T_T = 273.16\text{ K}$ , et une pression  $P_T = 611\text{ Pa}$ . Estimez la surface des patins pour pouvoir, en supposant correcte l'hypothèse de l'élève, patiner sur une glace à  $-2^\circ\text{C}$ , puis commentez.

## EXERCICE 9

### Géothermie

- Comment s'écrit le premier principe de la thermodynamique pour un système en écoulement en régime stationnaire ? De quelle(s) variable(s) d'état dépend l'enthalpie massique d'une phase condensée ?

On se propose d'utiliser une source géothermique d'eau chaude pour faire tourner une turbine à vapeur. L'eau chaude captée dans la source géothermique est à  $180^\circ\text{C}$  et 15 bar. Cette eau traverse un détendeur avant d'arriver dans l'évaporateur à détente pour former du liquide et de la vapeur à une pression de 4 bar. Le liquide sort au bas de l'évaporateur, alors que la vapeur extraite est dirigée vers la turbine. À la sortie de la turbine, la vapeur est à une pression de 0.1 bar et à un titre massique de 90 %.



Le tableau ci-dessous indique les enthalpies massiques de l'eau dans différents états saturés (indice « l » pour le liquide, « v » pour la vapeur) :

| $T$ (°C) | $P$ (bar) | $h_l$ (kJ/kg) | $h_v$ (kJ/kg) |
|----------|-----------|---------------|---------------|
| 198      | 15,0      | 845           | 2792          |
| 180      | 10,0      | 763           | 2778          |
| 144      | 4,0       | 605           | 2739          |
| 46       | 0,1       | 192           | 2585          |

On suppose que tous les fluides se déplacent lentement dans toute l'installation (pas de variations d'énergie cinétique).

- Comment est constitué un détendeur ? Quelle quantité massique est conservée à sa traversée ? Déduisez le titre en vapeur dans l'évaporateur à détente.
- Comment s'écrit le premier principe à la traversée de la turbine ?  
La turbine fournit une puissance de 1 MW, déduisez le débit massique la traversant.
- Quel débit d'eau chaude doit fournir la source géothermique ?

## EXERCICE 10

### Humidité de l'air et évaporation d'une flaque d'eau

Le taux d'humidité d'une atmosphère constituée d'air et de vapeur d'eau est le quotient de la pression partielle qu'y détient la vapeur d'eau, par la pression de vapeur saturante de l'eau.

- L'air ambiant d'un garage de longueur  $L$ , largeur  $l$ , hauteur sous plafond  $h$ , est à température  $T_i$ . L'atmosphère du garage étant initialement au taux d'humidité  $x_i$ , se répand au sol une flaque de volume  $v_i$ . Exprimer puis calculer à l'état d'équilibre final : le volume  $v_f$  de la flaque et le taux d'humidité  $x_f$ .
- Une mole d'air humide initialement située au sol, où le taux d'humidité est  $y$  et la température  $T_s$ , est entraînée par le vent et s'élève au sommet d'une montagne d'altitude  $z$ . Pendant son ascension, chacun des deux gaz (air et vapeur d'eau) subit une détente adiabatique réversible en suivant l'évolution de la pression atmosphérique, et la vapeur d'eau s'adapte à la température de l'air. À l'arrivée au sommet de la montagne :

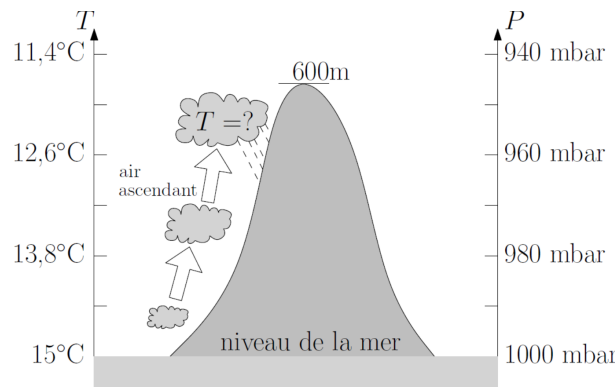


FIGURE 4 – Température et pression totale dans l'atmosphère

- quelle est la température atteinte par la mole d'air humide avant son retour à l'équilibre et pourquoi la transformation a-t-elle été adiabatique ?
- un nuage de gouttes d'eau se forme-t-il ?
- que se passerait-il si la température était négative ?
- que se passerait-il si l'air au sol était plus sec ?

Données :

- ☐ température du garage :  $T_i = 20^\circ\text{C}$ ; température du sol :  $T_s = 15^\circ\text{C}$ ;
- ☐ longueur, largeur, hauteur du garage :  $L = 4\text{ m}$ ,  $l = 3\text{ m}$ ,  $h = 2.5\text{ m}$ ;
- ☐ masse molaire de l'eau :  $M = 18\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ; facteur de Laplace de l'air :  $\gamma = 1.4$ ;
- ☐ taux d'humidité initial :  $x_i = 60\%$ ; taux d'humidité au sol :  $y = 80\%$ ;
- ☐ altitude de la montagne :  $z = 600\text{ m}$ ;

En figure 4 : une topographie de la température et de la pression (totale) dans l'atmosphère à l'équilibre, en fonction de l'altitude.

Ci-dessous : pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température

|                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $T^{\circ}\text{C}$ | -10  | -8   | -6   | -4   | -2   | 0    | 2    | 4    | 6    |      |
| $P_{\text{mbar}}$   | 2.79 | 3.28 | 3.86 | 4.52 | 5.27 | 6.13 | 7.07 | 8.13 | 9.33 |      |
| $T^{\circ}\text{C}$ | 8    | 10   | 12   | 14   | 15   | 16   | 18   | 20   | 22   | 24   |
| $P_{\text{mbar}}$   | 10.7 | 12.2 | 13.9 | 15.9 | 16.9 | 18.0 | 20.5 | 23.2 | 26.2 | 29.6 |

## EXERCICE 11

### Cycle de Rankine

Une centrale énergétique est prévue pour exploiter la différence de température de l'eau de mer près de la surface ( $25^{\circ}\text{C}$  et la température à une plus grande profondeur ( $5^{\circ}\text{C}$ ). Pour cela on envisage d'utiliser comme fluide caloporteur de l'Ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) dont le diagramme Pression - Enthalpie est fourni ainsi qu'une table de données thermodynamiques. Le principe de l'installation est décrit sur la figure ci-dessous, ainsi que les différents états du fluide aux points 1,2,3 et 4.

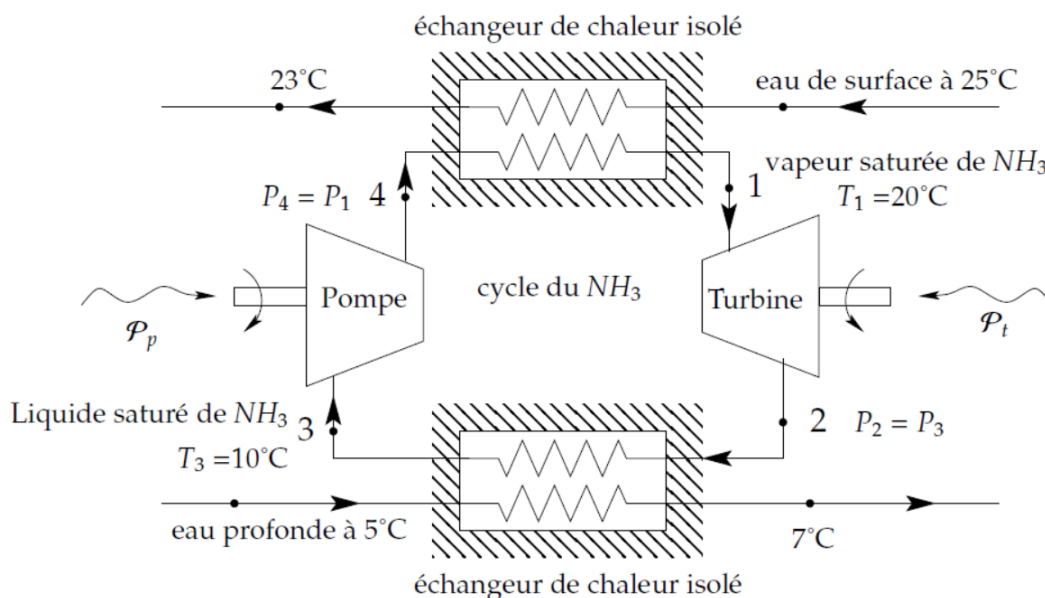


FIGURE 5 –

On note  $\mathcal{P}_p$  et  $\mathcal{P}_t$  les puissances utiles, algébriquement reçues, respectivement par la pompe et la turbine. Le débit d'ammoniac dans l'installation est  $D = 1 \times 10^3 \text{ kg/s}$ . On note  $D_1$  (respectivement  $D_2$ ) les débits massiques d'eau en surface (respectivement en profondeur).

- 1) Énoncer les premier et second principes de la thermodynamique pour un élément de machine ouvert en régime permanent.
- 2) Donner un argument qui suggère l'hypothèse faites dans tout l'exercice de transformations adiabatiques dans la pompe et la turbine.
3. On néglige dans un premier temps toute irréversibilité dans la pompe et la turbine.
  - a) Déterminer complètement l'état thermodynamique du fluide ammoniac aux différents points et tracer le cycle dans le diagramme P-h fourni.
  - b) Calculer la puissance  $\mathcal{P}_{t,s}$  de la turbine et celle  $\mathcal{P}_{p,s}$  de la pompe.
  - c) Calculer le débit massique d'eau de mer circulant dans les échangeurs de chaleur.
  - d) Définir et calculer le rendement thermique de l'installation. Commenter.
4. On définit les rendements isentropiques de la pompe et de la turbine par les relations :

$$\eta_{s,pompe} = \frac{w_{p,s}}{w_{p,r\acute{e}el}}, \quad \text{et} \quad \eta_{s,turb} = \frac{w_{t,r\acute{e}el}}{w_{t,s}}$$

avec  $w_{p,s}, w_{t,s}$  les travaux massiques dans les conditions de réversibilité et  $w_{p,r\acute{e}el}, w_{t,r\acute{e}el}$  les travaux réels échangés par la pompe et la turbine respectivement. Ces deux rendements valent 80%.

- a) Déterminer l'état réel du fluide en sortie de la pompe et de la turbine. Montrer comment est modifié le cycle dans le diagramme p-h.
- b) Calculer le rendement thermique réel de l'installation.

## DOCUMENTS

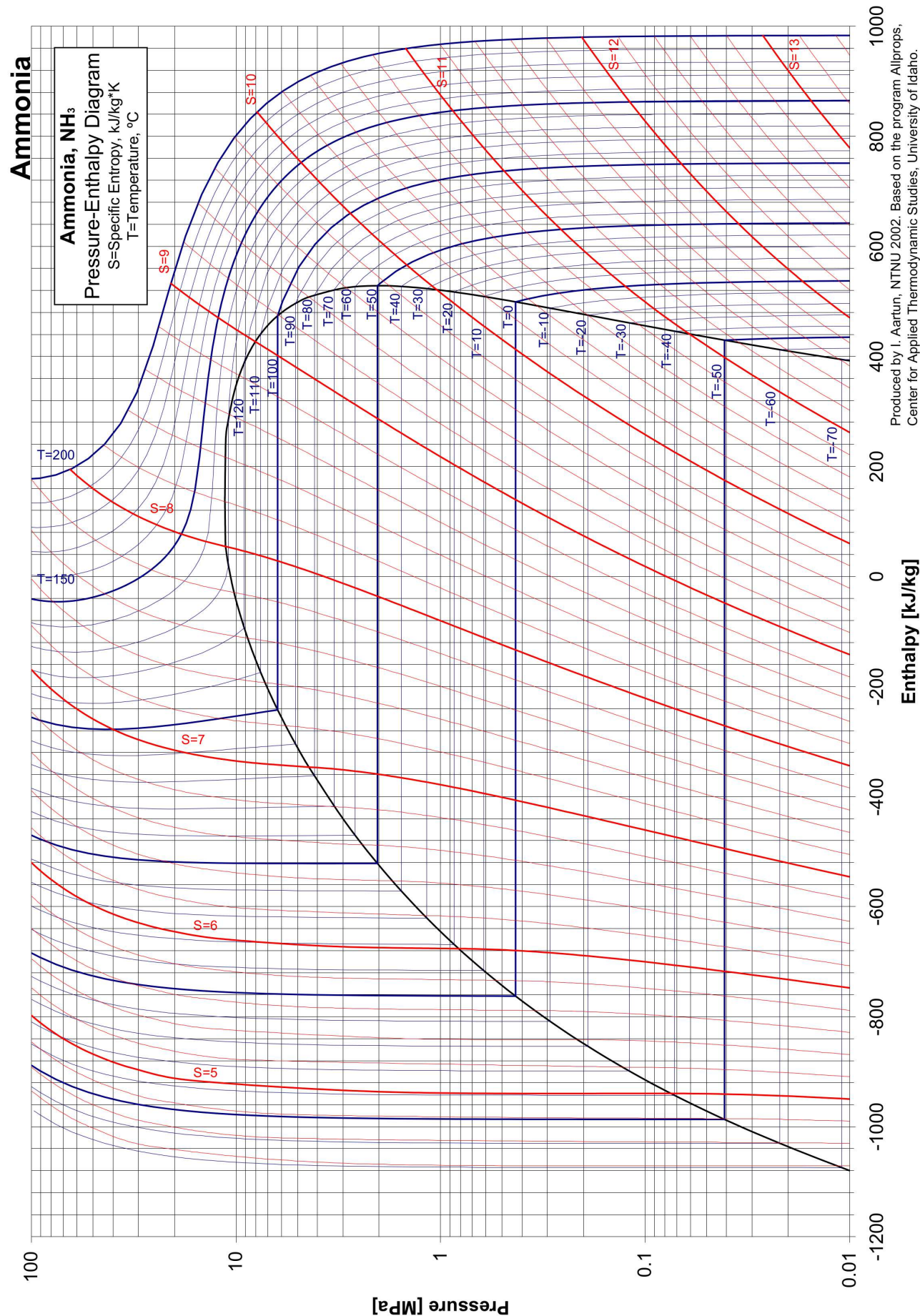
Extrait de *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* par M. Moran and H. Shapiro

**TABLE A-13** Properties of Saturated Ammonia (Liquid-Vapor): Temperature Table

| Temp.<br>°C | Press.<br>bar | Specific Volume<br>m <sup>3</sup> /kg |                        | Internal Energy<br>kJ/kg |                        | Enthalpy<br>kJ/kg       |                   |                        | Entropy<br>kJ/kg · K    |                        | Temp.<br>°C |
|-------------|---------------|---------------------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------|
|             |               | Sat.<br>Liquid<br>$v_f \times 10^3$   | Sat.<br>Vapor<br>$v_g$ | Sat.<br>Liquid<br>$u_f$  | Sat.<br>Vapor<br>$u_g$ | Sat.<br>Liquid<br>$h_f$ | Evap.<br>$h_{fg}$ | Sat.<br>Vapor<br>$h_g$ | Sat.<br>Liquid<br>$s_f$ | Sat.<br>Vapor<br>$s_g$ |             |
| -50         | 0.4086        | 1.4245                                | 2.6265                 | -43.94                   | 1264.99                | -43.88                  | 1416.20           | 1372.32                | -0.1922                 | 6.1543                 | -50         |
| -45         | 0.5453        | 1.4367                                | 2.0060                 | -22.03                   | 1271.19                | -21.95                  | 1402.52           | 1380.57                | -0.0951                 | 6.0523                 | -45         |
| -40         | 0.7174        | 1.4493                                | 1.5524                 | -0.10                    | 1277.20                | 0.00                    | 1388.56           | 1388.56                | 0.0000                  | 5.9557                 | -40         |
| -36         | 0.8850        | 1.4597                                | 1.2757                 | 17.47                    | 1281.87                | 17.60                   | 1377.17           | 1394.77                | 0.0747                  | 5.8819                 | -36         |
| -32         | 1.0832        | 1.4703                                | 1.0561                 | 35.09                    | 1286.41                | 35.25                   | 1365.55           | 1400.81                | 0.1484                  | 5.8111                 | -32         |
| -30         | 1.1950        | 1.4757                                | 0.9634                 | 43.93                    | 1288.63                | 44.10                   | 1359.65           | 1403.75                | 0.1849                  | 5.7767                 | -30         |
| -28         | 1.3159        | 1.4812                                | 0.8803                 | 52.78                    | 1290.82                | 52.97                   | 1353.68           | 1406.66                | 0.2212                  | 5.7430                 | -28         |
| -26         | 1.4465        | 1.4867                                | 0.8056                 | 61.65                    | 1292.97                | 61.86                   | 1347.65           | 1409.51                | 0.2572                  | 5.7100                 | -26         |
| -22         | 1.7390        | 1.4980                                | 0.6780                 | 79.46                    | 1297.18                | 79.72                   | 1335.36           | 1415.08                | 0.3287                  | 5.6457                 | -22         |
| -20         | 1.9019        | 1.5038                                | 0.6233                 | 88.40                    | 1299.23                | 88.68                   | 1329.10           | 1417.79                | 0.3642                  | 5.6144                 | -20         |
| -18         | 2.0769        | 1.5096                                | 0.5739                 | 97.36                    | 1301.25                | 97.68                   | 1322.77           | 1420.45                | 0.3994                  | 5.5837                 | -18         |
| -16         | 2.2644        | 1.5155                                | 0.5291                 | 106.36                   | 1303.23                | 106.70                  | 1316.35           | 1423.05                | 0.4346                  | 5.5536                 | -16         |
| -14         | 2.4652        | 1.5215                                | 0.4885                 | 115.37                   | 1305.17                | 115.75                  | 1309.86           | 1425.61                | 0.4695                  | 5.5239                 | -14         |
| -12         | 2.6798        | 1.5276                                | 0.4516                 | 124.42                   | 1307.08                | 124.83                  | 1303.28           | 1428.11                | 0.5043                  | 5.4948                 | -12         |
| -10         | 2.9089        | 1.5338                                | 0.4180                 | 133.50                   | 1308.95                | 133.94                  | 1296.61           | 1430.55                | 0.5389                  | 5.4662                 | -10         |
| -8          | 3.1532        | 1.5400                                | 0.3874                 | 142.60                   | 1310.78                | 143.09                  | 1289.86           | 1432.95                | 0.5734                  | 5.4380                 | -8          |
| -6          | 3.4134        | 1.5464                                | 0.3595                 | 151.74                   | 1312.57                | 152.26                  | 1283.02           | 1435.28                | 0.6077                  | 5.4103                 | -6          |
| -4          | 3.6901        | 1.5528                                | 0.3340                 | 160.88                   | 1314.32                | 161.46                  | 1276.10           | 1437.56                | 0.6418                  | 5.3831                 | -4          |
| -2          | 3.9842        | 1.5594                                | 0.3106                 | 170.07                   | 1316.04                | 170.69                  | 1269.08           | 1439.78                | 0.6759                  | 5.3562                 | -2          |
| 0           | 4.2962        | 1.5660                                | 0.2892                 | 179.29                   | 1317.71                | 179.96                  | 1261.97           | 1441.94                | 0.7097                  | 5.3298                 | 0           |
| 2           | 4.6270        | 1.5727                                | 0.2695                 | 188.53                   | 1319.34                | 189.26                  | 1254.77           | 1444.03                | 0.7435                  | 5.3038                 | 2           |
| 4           | 4.9773        | 1.5796                                | 0.2514                 | 197.80                   | 1320.92                | 198.59                  | 1247.48           | 1446.07                | 0.7770                  | 5.2781                 | 4           |
| 6           | 5.3479        | 1.5866                                | 0.2348                 | 207.10                   | 1322.47                | 207.95                  | 1240.09           | 1448.04                | 0.8105                  | 5.2529                 | 6           |
| 8           | 5.7395        | 1.5936                                | 0.2195                 | 216.42                   | 1323.96                | 217.34                  | 1232.61           | 1449.94                | 0.8438                  | 5.2279                 | 8           |
| 10          | 6.1529        | 1.6008                                | 0.2054                 | 225.77                   | 1325.42                | 226.75                  | 1225.03           | 1451.78                | 0.8769                  | 5.2033                 | 10          |
| 12          | 6.5890        | 1.6081                                | 0.1923                 | 235.14                   | 1326.82                | 236.20                  | 1217.35           | 1453.55                | 0.9099                  | 5.1791                 | 12          |
| 16          | 7.5324        | 1.6231                                | 0.1691                 | 253.95                   | 1329.48                | 255.18                  | 1201.70           | 1456.87                | 0.9755                  | 5.1314                 | 16          |
| 20          | 8.5762        | 1.6386                                | 0.1492                 | 272.86                   | 1331.94                | 274.26                  | 1185.64           | 1459.90                | 1.0404                  | 5.0849                 | 20          |
| 24          | 9.7274        | 1.6547                                | 0.1320                 | 291.84                   | 1334.19                | 293.45                  | 1169.16           | 1462.61                | 1.1048                  | 5.0394                 | 24          |
| 28          | 10.993        | 1.6714                                | 0.1172                 | 310.92                   | 1336.20                | 312.75                  | 1152.24           | 1465.00                | 1.1686                  | 4.9948                 | 28          |
| 32          | 12.380        | 1.6887                                | 0.1043                 | 330.07                   | 1337.97                | 332.17                  | 1134.87           | 1467.03                | 1.2319                  | 4.9509                 | 32          |
| 36          | 13.896        | 1.7068                                | 0.0930                 | 349.32                   | 1339.47                | 351.69                  | 1117.00           | 1468.70                | 1.2946                  | 4.9078                 | 36          |
| 40          | 15.549        | 1.7256                                | 0.0831                 | 368.67                   | 1340.70                | 371.35                  | 1098.62           | 1469.97                | 1.3569                  | 4.8652                 | 40          |
| 45          | 17.819        | 1.7503                                | 0.0725                 | 393.01                   | 1341.81                | 396.13                  | 1074.84           | 1470.96                | 1.4341                  | 4.8125                 | 45          |
| 50          | 20.331        | 1.7765                                | 0.0634                 | 417.56                   | 1342.42                | 421.17                  | 1050.09           | 1471.26                | 1.5109                  | 4.7604                 | 50          |

Source: Tables A-13 through A-15 are calculated based on equations from L. Haar and J. S. Gallagher, "Thermodynamic Properties of Ammonia," *J. Phys. Chem. Reference Data*, Vol. 7, 1978, pp. 635-792.

FIGURE 6 –



Produced by I. Aartun, NTNU 2002. Based on the program Allprops, Center for Applied Thermodynamic Studies, University of Idaho.