

DEVOIR EN TEMPS LIMITÉ N° 3 (08/11/07)

Ce document comporte 6 pages.

THERMODYNAMIQUE CLASSIQUE

Problème I : Étude d'une machine réfrigérante

d'après CCP (MP) 2005

L'objectif de ce problème est l'étude du fonctionnement stationnaire d'une machine ditherme de réfrigération. Le cycle représenté, dans un diagramme de Clapeyron, par la fig. 1 constitue un modèle de fonctionnement d'une machine de réfrigération dans laquelle une masse  $m$  de fluide frigorigène subit les transformations suivantes :

- $A \rightarrow B$  : compression adiabatique dans le compresseur ;
- $B \rightarrow D$  : refroidissement et liquéfaction isobares de la vapeur dans le condenseur ;
- $D \rightarrow E$  : détente adiabatique et isenthalpique dans le détendeur ;
- $E \rightarrow A$  : vaporisation isobare dans l'évaporateur.

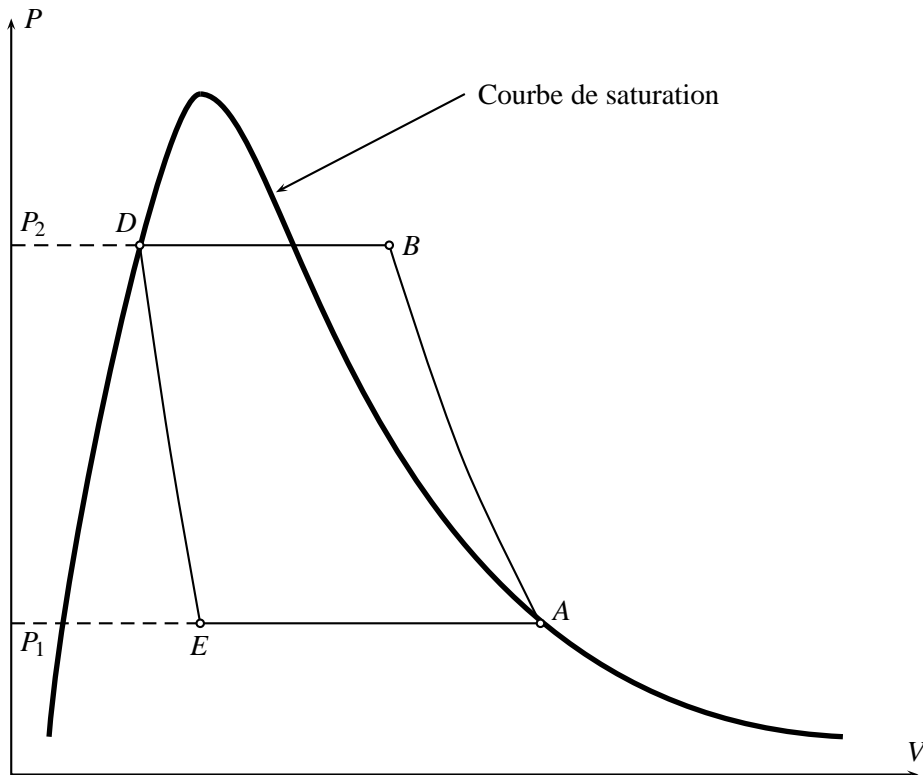


FIG. 1 – Diagramme de Clapeyron

Les sources froide  $\Sigma_F$  (intérieur de l'enceinte à réfrigérer) et chaude  $\Sigma_C$  (milieu ambiant) sont assimilées à des thermostats de températures respectives  $T_F$  et  $T_C$  constantes. Les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle du fluide sont négligeables.

Données :

$$m = 1 \text{ kg}$$

$$T_F = 278 \text{ K} ; T_C = 293 \text{ K}$$

Enthalpies massiques du fluide frigorigène dans les états représentés par les points A, B et D :

$$h_A = 390,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} ; h_B = 448,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} ; h_D = 286,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

### I-A : Performances de l'installation

- 1. Un système fermé subit une transformation isobare qui le fait évoluer de l'état initial  $i$  à l'état final  $f$ . Au cours de cette transformation le système reçoit les quantités d'énergie  $Q_{i \rightarrow f}$  par transfert thermique et  $W_{i \rightarrow f}$  par transfert mécanique (travail). Appliquer le premier principe de la thermodynamique à cette transformation. Établir la relation entre la variation d'enthalpie  $\Delta H_{i \rightarrow f}$  du système et  $Q_{i \rightarrow f}$ .
- 2. On désigne par  $Q_F$  et  $Q_C$  les quantités d'énergie reçues par le fluide, par transfert thermique, respectivement, au contact de la source froide et au contact de la source chaude, au cours du cycle défini ci-dessus. Exprimer  $Q_F$  et  $Q_C$  en fonction des données. Calculer  $Q_F$  et  $Q_C$ .
- 3. On désigne par  $W$  l'énergie reçue par le fluide, par transfert mécanique (travail), au cours d'un cycle. Exprimer  $W$  en fonction des données. Calculer  $W$ .
- 4. On désigne par  $S_F$  et  $S_C$  les valeurs algébriques des entropies échangées par le fluide, respectivement, avec la source froide et la source chaude au cours du cycle. Exprimer  $S_F$  et  $S_C$  en fonction des données. Calculer  $S_F$  et  $S_C$ . Calculer l'entropie  $S_p$  créée au cours du cycle. Conclusion.
- 5. Définir et calculer l'efficacité  $\mu$  de cette installation.
- 6. Sachant que la puissance  $P_F$  à extraire de la source froide pour maintenir sa température constante est de 500 W, calculer le débit massique  $q_m$  que l'on doit imposer au fluide frigorigène.

### I-B : Étude de la compression de la vapeur

La vapeur issue de l'évaporateur est comprimée de la pression  $P_1 = 2,008$  bar (état  $A$ ) à la pression  $P_2 = 16,810$  bar (état  $B$ ). Dans cette partie du problème on admettra que l'on peut assimiler la vapeur à un gaz parfait dont le rapport  $\gamma$  des capacités thermiques conserve une valeur constante égale à 1,14 dans le domaine étudié.

- 7. On envisage le cas où cette compression pourrait être supposée adiabatique et réversible. Établir la relation que vérifieraient les variables température  $T$  et pression  $P$ . Sachant que  $T_A = 263$  K, calculer la température  $T'$  que l'on atteindrait en fin de compression.

En réalité la compression  $A \rightarrow B$  subie par la vapeur peut être supposée adiabatique mais n'est pas réversible car on ne peut pas négliger les frottements fluides qui se produisent à l'intérieur du compresseur ; de ce fait la température en fin de compression est supérieure à celle calculée précédemment.

La transformation polytropique  $A \rightarrow B$  est la transformation réversible qui permettrait au fluide d'évoluer de l'état  $A$  à l'état  $B$  en recevant, par transfert thermique, une quantité d'énergie  $Q_f$  équivalente à celle générée par les frottements internes au cours de la transformation irréversible  $A \rightarrow B$ . Pour établir la loi d'évolution polytropique, on considère une transformation élémentaire réversible caractérisée par les variations d'énergie interne  $dU$ , d'entropie  $dS$  et de volume  $dV$ . La quantité d'énergie  $\delta Q_f$  reçue par le fluide, par transfert thermique, au cours de cette transformation, s'écrit  $\delta Q_f = a dU$  ; dans cette expression  $a$  désigne un facteur qui sera supposé constant dans tout le domaine étudié.

- 8. Relier  $dU$ ,  $dS$  et  $dV$ .
- 9. Montrer qu'au cours de l'évolution polytropique  $A \rightarrow B$  les variables pression  $P$  et volume  $V$  vérifient la relation  $PV^k = \text{constante}$ , dans laquelle  $k$  désigne une constante appelée facteur polytropique. Exprimer  $k$  en fonction de  $a$  et de  $\gamma$ .

### I-C : Détermination des conditions de fonctionnement permettant d'obtenir l'efficacité maximale

- 10. Préciser la nature du cycle réversible que devrait décrire le fluide afin de parvenir à l'efficacité maximale  $\mu_{\max}$  de la machine de réfrigération. On indiquera avec précision la nature et le rôle des différentes transformations subies par le fluide au cours de ce cycle.
- 11. Sachant qu'au cours de ce cycle la variation d'entropie massique  $\Delta S_C$  du fluide au cours de la transformation qu'il subit au contact de la source chaude est de  $-416 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , calculer les quantités d'énergie  $Q'_F$  et  $Q'_C$  reçues, par transfert thermique, par 1 kg de fluide frigorigène, au cours d'un cycle, respectivement, au contact de la source froide et au contact de la source chaude.
- 12. Exprimer l'efficacité  $\mu_{\max}$  en fonction des températures  $T_F$  et  $T_C$  et calculer  $\mu_{\max}$ .

### I-D : Conditions permettant d'obtenir une consommation minimale

On considère de nouveau la machine de réfrigération définie ci-dessus et on suppose maintenant que le fluide frigorigène décrit un cycle réversible au cours duquel les transferts thermiques avec les sources froide et chaude se produisent lors de transformations isothermes aux températures respectives  $T_1 < T_F$  et  $T_2 > T_C$ .

On admet que, lors de l'échange thermique avec la source froide, la puissance reçue par le fluide frigorigène s'écrit  $\mathcal{P}_F = \sigma_1(T_F - T_1)$ ; la conductance thermique  $\sigma_1 > 0$  de la paroi de l'échangeurs situé au contact de la source froide est une constante. De même, la puissance cédée par le fluide frigorigène à la source chaude s'écrit  $\mathcal{P}_C = \sigma_2(T_2 - T_C)$ ; la conductance thermique  $\sigma_2 > 0$  est également constante.

□ 13. On désigne respectivement par  $Q_1$  et  $Q_2$  les quantités d'énergie reçues par le fluide, par transfert thermique, au contact des sources froide et chaude et par  $t_1$  et  $t_2$  les durées de transfert de ces quantités d'énergie. Exprimer  $t_1$  et  $t_2$ . Quelles sont les unités de mesure de  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  ?

□ 14. Exprimer l'efficacité  $\mu'$  du cycle décrit par le fluide en fonction de  $T_1$  et de  $T_2$ . Sachant que  $T_1 = 263$  K et  $T_2 = 333$  K, calculer  $\mu'$ . Exprimer  $Q_1$  et  $Q_2$  en fonction de  $T_1$ ,  $T_2$  et du travail  $W$  reçu par le fluide au cours d'un cycle.

□ 15. Exprimer  $t_1$  en fonction de  $W$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_F$  et  $\sigma_1$  et  $t_2$  en fonction de  $W$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_C$  et  $\sigma_2$ .

On cherche à déterminer les températures  $T_1$  et  $T_2$  qui rendent minimale la puissance consommée par la machine au cours d'un cycle. Lors du transfert thermique entre le fluide à la température On suppose que la durée des transformations adiabatiques est négligeable devant celle nécessaire aux transferts thermiques.

□ 16. Exprimer la puissance moyenne  $\mathcal{P}$  consommée par le fluide au cours d'un cycle en fonction de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_F$  et  $T_C$ .

□ 17. On pose  $Z = 1/\mathcal{P}$ ,  $x = T_2/T_1$  et  $y = T_2 - T_1$ . Exprimer  $Z$  en fonction de  $x$  et de  $y$ . Déterminer les conditions que doivent vérifier  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_F$ ,  $T_C$ ,  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  pour que la puissance consommée soit minimale.

## Problème II : Détentes d'un gaz réel

d'après CCP (MP) 2006

Les parties A et B sont totalement indépendantes.

### II-A : Détente en système fermé

#### II-A-1 : Fonctions d'état d'un système fermé

Pour un système fermé, on définit les coefficients calorimétriques  $C_p$ ,  $C_v$ ,  $\ell$  et  $k$  à partir des transferts thermiques réversibles reçus par le système,  $\delta Q_{\text{rev}} = C_v dT + \ell dV$  et  $\delta Q_{\text{rev}} = C_p dT + k dP$ .

Ces définitions sont équivalentes aux deux expressions des différentielles des fonctions d'état énergie interne  $U(T, V)$  et enthalpie  $H(T, p)$  selon  $dU = C_v dT + (\ell - P) dV$  et  $dH = C_p dT + (k + V) dP$ .

On désigne enfin par  $S$  l'entropie du système; on définit les fonctions d'état *énergie libre*  $F(T, V)$  et *enthalpie libre*  $G(T, P)$  d'un système respectivement par  $F = U - TS$  et  $G = H - TS$ .

□ 18. Établir les valeurs des coefficients calorimétriques  $\ell$  et  $k$  pour un gaz parfait.

□ 19. Exprimer les différentielles  $dF$  et  $dG$  d'un système fermé, en fonction de  $dT$ ,  $dV$  et  $dP$ .

□ 20. Montrer que  $\ell$  et  $k$  vérifient les relations  $\frac{\ell}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T$  et  $\frac{k}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T$ .

On rappelle le *lemme de Schwartz*: si  $f(x, y)$  est une fonction des deux variables  $x$  et  $y$ , dont la différentielle s'écrit  $df = \alpha dx + \beta dy$ , avec donc  $\alpha = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_y$  et  $\beta = \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_x$ , l'identité des dérivées partielles secondes croisées de la

fonction  $f(x, y)$  impose  $\left(\frac{\partial \alpha}{\partial y}\right)_x = \left(\frac{\partial \beta}{\partial x}\right)_y$ .

□ 21. En appliquant le lemme de Schwartz aux fonctions  $F$  et  $G$ , montrer les relations de Clapeyron,  $\ell = T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V$

et  $k = -T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$ . Que deviennent ces expressions dans le cas particulier où  $PV/T$  est une constante ?

□ 22. Établir la relation  $\left(\frac{\partial C_v}{\partial V}\right)_T = T \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_V$ .

#### II-A-2 : Détente de Joule et Gay-Lussac d'un gaz réel

L'équation d'état d'une mole de gaz réel s'écrit  $\left(P + \frac{a}{TV^2}\right)(V - b) = RT$  dans laquelle  $a$ ,  $b$  et  $R$  sont des constantes.

□ 23. Expliquer pourquoi  $R$  est la constante molaire des gaz parfaits.

□ 24. Établir l'expression de la capacité thermique à volume constant  $C_v(T, V)$  du gaz sachant qu'elle tend vers une valeur  $C_0$ , indépendante de  $T$ , lorsque  $V \rightarrow \infty$ .

□ 25. Établir l'expression de l'énergie interne  $U$  de ce gaz en fonction de  $T$ , de  $V$  et de constantes.

On fait subir à ce gaz une détente de Joule et Gay-Lussac qui fait passer son volume de  $V_1$  à  $V_2 = 2V_1$ .

- 26. Quelles conditions expérimentales permettent de réaliser cette détente ? En déduire la variation d'énergie interne  $\Delta U$  du fluide.
- 27. On note  $T_1$  la température initiale du gaz et  $\Delta T$  la variation de température qu'il subit au cours de cette détente. Sachant que l'on peut considérer  $|\Delta T| \ll T_1$ , exprimer  $\Delta T$  en fonction de  $T_1$ ,  $V_1$  et de constantes.
- 28. Que peut-on dire, a priori, de la variation d'entropie du gaz ? Justifier.
- 29. Application numérique :  $a = 100$  SI ;  $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;  $T_1 = 300 \text{ K}$  ;  $C_0 = 29,1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;  $V_1 = 10 \text{ L}$ . Calculer  $\Delta T$ . Commenter.

## II-B : Détente en système ouvert

### II-B-1 : Écoulements d'un fluide

L'objectif de cette étude est d'établir une expression générale permettant de calculer les variations des grandeurs thermodynamiques caractéristiques d'un gaz qui s'écoule dans un élément mécanique : conduite, tuyère, échangeur thermique, turbine, compresseur, etc. L'évolution d'un fluide gazeux dans une installation industrielle est schématisée par la fig. 2 ci-dessous.

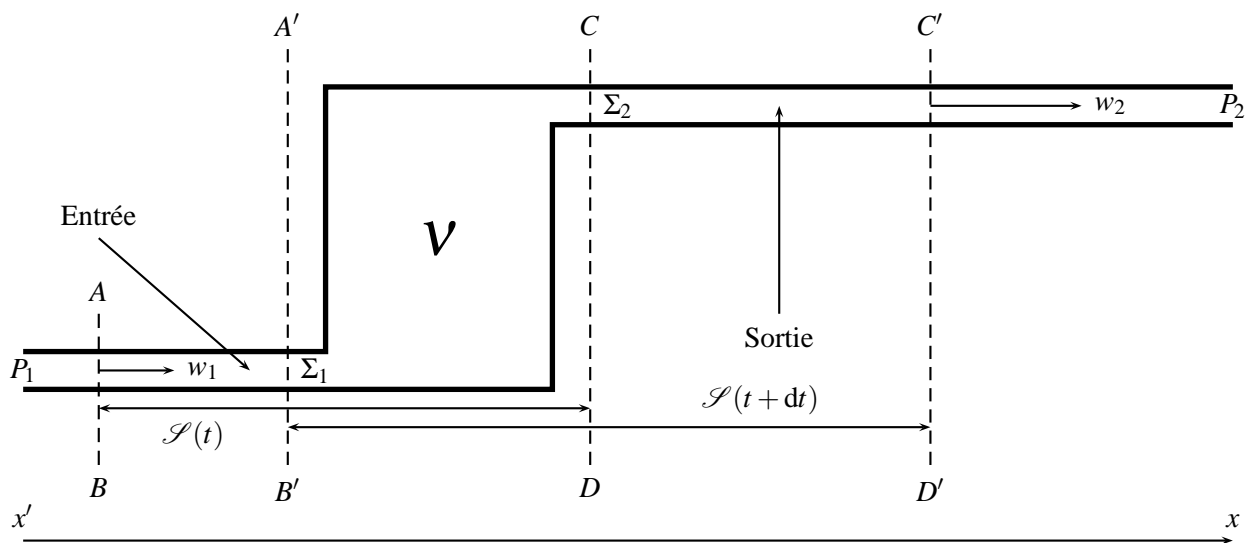


FIG. 2 – Installation à circulation de fluide

Le fluide gazeux s'écoule dans la direction et le sens de l'axe horizontal  $x'$ . Le volume  $v$  délimité par les plans  $A'B'$  et  $CD$  constitue un volume de contrôle qui peut, éventuellement, contenir une machine : compresseur, turbine, etc. Le fluide entre dans  $v$  par une conduite cylindrique dont l'aire de la section droite est notée  $\Sigma_1$  et dont l'axe, parallèle à  $x'$ , est situé à l'altitude  $z_1$  dans le champ de pesanteur. Il en ressort par une conduite cylindrique, dont la section droite a une aire  $\Sigma_2$  et dont l'axe, parallèle à  $x'$ , est situé à l'altitude  $z_2$  dans le champ de pesanteur. On désigne par  $w$  le vecteur vitesse des particules fluides et on admet que la viscosité du fluide est négligeable, le vecteur vitesse reste donc constant en tout point d'un plan de section droite perpendiculaire à l'écoulement.

On désigne par  $m$ ,  $P$ ,  $T$ ,  $E$ ,  $E_c$ ,  $E_p$ ,  $U$ ,  $H$  et  $S$ , respectivement, la masse, la pression, la température, l'énergie totale, l'énergie cinétique macroscopique, l'énergie potentielle de pesanteur, l'énergie interne, l'enthalpie et l'entropie du fluide. Les valeurs massiques des différentes grandeurs extensives seront représentées par des lettres minuscules. Ces grandeurs seront affectées de l'indice 1 ou de l'indice 2 suivant qu'elles caractériseront l'état du gaz à l'entrée ou à la sortie du volume  $v$ .

- 30. Définir l'énergie totale  $E$  d'un système thermodynamique. Écrire le premier principe de la thermodynamique, sous sa forme générale, pour un système fermé, en mouvement dans le champ de pesanteur, qui, au cours d'une transformation ouverte, reçoit les quantités d'énergie  $Q$  par transfert thermique et  $W$  par transfert mécanique.

À l'instant  $t$  le système fermé considéré, désigné par  $\mathcal{S}$  sur la fig. 2, occupe le volume compris entre les plans  $AB$  et  $CD$ . Il comprend le fluide contenu dans  $v$  à cet instant et le fluide qui va entrer dans  $v$  pendant la durée  $dt$ . Son énergie totale est notée  $E(t)$ . À l'instant  $t + dt$  ce même système, désigné par  $\mathcal{S}(t + dt)$ , occupe le volume délimité par les plans  $A'B'$  et  $C'D'$ . Il comprend le fluide contenu dans  $v$  à l'instant  $t + dt$  et le fluide qui est sorti de  $v$  pendant la durée  $dt$ . Son énergie totale est notée  $E(t + dt)$ .

Entre les instants  $t$  et  $t + dt$  le fluide gazeux reçoit les quantités algébriques d'énergie  $\delta Q$  par transfert thermique (chaleur),  $\delta W'$  par transfert mécanique dû au travail des forces de pression d'entrée et de sortie et  $\delta W$  par transfert mécanique avec une machine qui se trouve dans  $v$ . On suppose que le régime stationnaire est atteint et on admet que les pressions  $P_1$  et  $P_2$ , respectivement en amont de l'entrée dans  $v$  et en aval de la sortie de  $v$ , restent constantes au cours du transfert du fluide. Les vitesses  $w_1$  et  $w_2$  du fluide, dans les conduites d'entrée et de sortie, sont constantes.

□ **31.**  $\rho_1, w_1, \Sigma_1, \rho_2, w_2, \Sigma_2$  désignent la masse volumique, la vitesse du fluide et l'aire de la section droite des conduites, respectivement, à l'entrée et à la sortie de  $v$ . Effectuer un bilan de masse sur le système fermé considéré, entre les instants  $t$  et  $t + dt$  et en déduire en relation liant  $\rho_1, \Sigma_1, w_1, \rho_2, \Sigma_2$  et  $w_2$ . Que représente l'expression  $\rho \Sigma w$ ? Quelle est son unité de mesure?

□ **32.** On désigne par  $\delta m$  la masse de fluide qui traverse le volume  $v$  pendant la durée  $dt$ . On note  $g$  l'intensité du champ de pesanteur et on fixe l'origine de l'énergie potentielle de pesanteur au niveau  $z = 0$ . Par application du premier principe de la thermodynamique au fluide gazeux, entre les instants  $t$  et  $t + dt$ , établir la relation  $\delta m \left[ \left( \frac{1}{2} w_2^2 + g z_2 + h_2 \right) - \left( \frac{1}{2} w_1^2 + g z_1 + h_1 \right) \right] = \delta Q + \delta W$ . Quelles conditions expérimentales permettent de faire subir au fluide une détente de Joule Thomson?

### II-B-2 : Détente d'un fluide gazeux dans une tuyère

Le fluide gazeux se détend, de manière adiabatique, dans une tuyère dans laquelle sa vitesse varie. La tuyère est constituée d'un tube de révolution autour d'un axe horizontal  $x'x$  (fig. 3). La section droite, d'abscisse  $x$ , de la tuyère a une aire  $\Sigma(x)$  variable le long de l'axe  $x'x$ . Cette variation est assez lente pour que le vecteur vitesse des éléments de volume du gaz qui s'écoule reste, pratiquement, parallèle à  $x'x$ , de même sens et que sa composante  $w(x)$  ait la même valeur pour tous les éléments de volume situés dans une tranche de gaz, d'abscisse  $x$ , perpendiculaire à  $x'x$ .

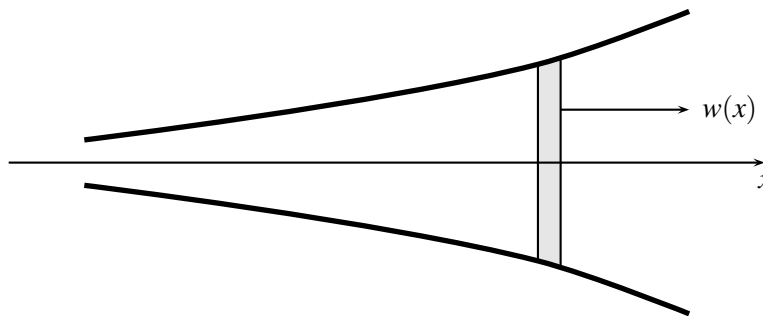


FIG. 3 – Tuyère (divergente) de révolution

On suppose que le régime d'écoulement stationnaire est atteint et on néglige toute perte d'énergie, par frottement, le long des parois de la tuyère. On note  $\bar{H}(x)$  l'enthalpie d'une mole de gaz sous la pression  $P(x)$ , à la température  $T(x)$ . On désigne par  $\mathcal{M}$  la masse molaire du gaz et par  $\rho(x)$  sa masse volumique à l'abscisse  $x$ .

$w_1, P_1, T_1, \bar{H}_1, \rho_1, w_2, P_2, T_2, \bar{H}_2, \rho_2$  désignent, respectivement, les valeurs de  $w(x), P(x), T(x), \bar{H}(x), \rho(x)$  dans la section droite d'entrée de surface  $\Sigma_1$  et dans la section droite de sortie de surface  $\Sigma_2$ .

□ **33.** On considère l'évolution d'une mole de gaz entre son entrée dans la tuyère et son passage dans la tranche d'abscisse  $x$ . À partir des relations générales établies dans la partie précédente et compte tenu des conditions de fonctionnement de la tuyère, établir la relation que vérifient  $\mathcal{M}, w_1, w(x), \bar{H}_1, \bar{H}(x)$ .

□ **34.** Aucune hypothèse n'est faite sur l'équation d'état du gaz. On admet que chaque élément de volume du gaz subit, dans la tuyère, une détente adiabatique réversible. Montrer que  $\frac{1}{2} (w^2(x) - w_1^2) + \int_{P_1}^{P(x)} \frac{dp}{\rho(x)} = 0$ .

On suppose, maintenant, que le gaz est un gaz parfait; on désigne par  $\bar{C}_p$  et  $\bar{C}_v$  les capacités thermiques molaires à pression et volume constants, et on suppose que le rapport  $\gamma = \bar{C}_p / \bar{C}_v$  est indépendant de la température. On admet enfin que l'évolution du gaz, dans la tuyère, se produit de manière adiabatique et réversible. On pose  $\varepsilon = P(x) / P_1$

□ **35.** Exprimer  $w(x)$  en fonction de  $w_1, \bar{C}_p, T_1, \mathcal{M}, \gamma$  et  $\varepsilon$ .

□ **36.** Exprimer le débit massique  $q_m$  du gaz, à l'abscisse  $x$ , en fonction de  $\rho_1, \varepsilon, \gamma, \Sigma(x)$  et  $w(x)$ .

On suppose que la section d'entrée de surface  $\Sigma_1$  de la tuyère est très grande. On peut alors considérer  $w_1 \sim 0$ .

- **37.** Montrer que, dans ces conditions, le débit massique s'écrit  $q_m = K_1 \Sigma(x) f(\varepsilon)$ , expression dans laquelle  $K_1$  ne dépend que des caractéristiques du gaz et des valeurs des paramètres relatifs à l'entrée de la tuyère et  $f(\varepsilon)$  est une fonction de  $\varepsilon$ . On explicitera  $K_1$  et  $f(\varepsilon)$ .
- **38.** On admet que  $P(x)$  décroît de manière monotone quand  $x$  croît. Par étude de la fonction  $f(\varepsilon)$  pour  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , montrer que :
- Si  $P_2/P_1$  est supérieur à une valeur  $\varepsilon_0$  que l'on précisera, la section  $\Sigma(x)$  de la tuyère doit être une fonction décroissante de  $x$  (tuyère convergente).
  - Si  $P_2/P_1$  est inférieur à  $\varepsilon_0$ , la section de la tuyère doit, d'abord, être une fonction décroissante de  $x$  puis devenir une fonction croissante de  $x$  (tuyère convergente-divergente). Dans ce cas on note  $w_0$  et  $P_0$  les valeurs de  $w(x)$  et  $P(x)$  dans la section la plus étroite de la tuyère. Exprimer  $P_0$  en fonction de  $P_1$  et  $\gamma$  et  $w_0$  en fonction de  $\gamma$ ,  $R$ ,  $T_1$  et  $\mathcal{M}$ .
- **39.** *Applications numériques* : le gaz parfait considéré est de l'air pour lequel  $\gamma = 1,4$  et  $\mathcal{M} = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ . On rappelle que  $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Sachant que  $P_1 = 20 \text{ bar}$  et  $T_1 = 2\,000 \text{ K}$ , calculer  $w_0$  et  $P_0$ . Calculer, dans les mêmes conditions, la vitesse du gaz, à la sortie de la tuyère, où  $P_2 = 1 \text{ bar}$ .