

THERMODYNAMIQUE

Les questions 1, 2 et 4 sont indépendantes

Dans le cadre d'expériences spatiales, il est intéressant de disposer d'une enceinte de grand volume V_0 dans laquelle on a fait le vide. En général, cette opération s'effectue à l'aide d'une pompe "à vide" qui rejette l'air aspiré dans l'atmosphère.

Ce problème étudie les 3 phases de ce procédé puis la remontée en pression dans le réservoir à la fin des expériences:

- 1 La vidange de l'enceinte.
- 2 L'aspiration, refoulement par la pompe.
- 3 Le rejet de l'air dans l'atmosphère après refroidissement dans un échangeur.
- 4 La remise en pression du réservoir.

Dans tout le problème, l'air transvasé sera considéré comme un gaz parfait et les énergies cinétiques seront négligées.

Les conditions de pression et température de l'atmosphère sont notées P_0 et T_0 .

$$P_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad T_0 = 288 \text{ K} \quad V_0 = 500 \text{ m}^3$$

(C_p et C_v sont les chaleurs massiques)

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \approx 1,4$$

$$R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \text{ (constante des gaz parfaits)}$$

$$M_{\text{air}} = 29 \text{ g (masse molaire de l'air)}$$

$$r = R/M_{\text{air}}$$

1 ETUDE DE LA VIDANGE DU RÉSERVOIR

À l'état initial, l'air contenu dans le réservoir est à la pression P_0 et à la température T_0 .

On admettra que cette vidange s'effectue de façon isotherme réversible.

1-a) Faut-il que le réservoir reçoive ou cède de la chaleur à l'extérieur ?

1-b) La tuyauterie reliant le réservoir et la pompe est de dimension assez importante pour que entre 2 instants infiniment voisins la masse élémentaire sortie du réservoir ne soit pas encore rentrée dans la pompe et reste donc à la même pression et à la même température que le réservoir.

Ecrire l'expression du premier principe de la thermodynamique entre 2 instants infiniment voisins en cours de vidange.

1-c) La pompe s'arrête lorsque la pression de l'air dans le réservoir est devenue $\frac{1}{1000}$ de P_0 . Calculer alors la quantité de chaleur échangée avec l'extérieur à travers les parois du réservoir.

2 ETUDE DE L'ASPIRATION, COMPRESSION, REFOULEMENT PAR LA POMPE

2-a) Question préliminaire:

Lors du transvasement adiabatique en régime permanent d'une masse unité par une pompe, montrer que le travail w' reçu par le fluide de la part du rotor, est égal à la variation de l'enthalpie massique entre les états P, T_0 (à l'aspiration de la pompe) et P_0, T (au refoulement). P, T_0 sont les pression et température à l'aspiration de la pompe et P_0, T au refoulement. Pour cela, exprimer le travail des forces de pression lié à l'aspiration du fluide à l'entrée et au refoulement à la sortie.

2-b) A un instant donné t , la pompe aspire une masse élémentaire d'air $|dm|$ (m désigne la masse restant à l'instant t dans le réservoir) à $P(t)$, T_0 et la refoule à P_0 , $T(t)$ ($P(t)$ et $T(t)$ sont les pression et température à l'instant t) après l'avoir comprimée de façon instantanée.

A partir de l'expression précédente, déduire le travail élémentaire $\delta W'$ correspondant à cette masse élémentaire transvasée.

2-c) Calculer le travail W' nécessaire à l'abaissement de pression dans le réservoir jusqu'à $\frac{P_0}{1000}$ si l'opération est effectuée de manière adiabatique et réversible.

- Donner d'abord l'expression littérale,
- calculer la valeur numérique de W' .

3 REJET DE L'AIR DANS L'ATMOSPHERE APRÈS REFROIDISSEMENT

On utilise un échangeur de chaleur isobare considéré comme un tuyau indéformable qui permet de renvoyer dans l'atmosphère à P_0 , T_0 l'air entré à P_0 , $T(t)$ après lui avoir prélevé une quantité de chaleur Q .

3-a) En raisonnant comme en 2 sur une masse élémentaire $|dm|$ traversant l'échangeur, écrire le 1er principe en introduisant l'énergie interne, les travaux de pression entrée-sortie de l'échangeur et la quantité de chaleur δQ .

3-b) Comparer δQ et $\delta W'$ défini en 2-b).

3-c) Calculer Q .

4 REMISE EN PRESSION DU RÉSERVOIR

Une deuxième pompe de technologie différente permettrait de faire le vide dans le réservoir ($P \approx 0$). Après avoir réalisé les expériences spatiales, on se propose d'étudier le remplissage de l'enceinte de volume V_0 par une masse d'air extérieur jusqu'à ce que la pression dans V_0 redevienne égale à P_0 . Le remplissage d'une pression nulle jusqu'à P_0 se faisant de façon très rapide, est supposé être adiabatique. On veut ici calculer la température finale T_f de l'air dans le réservoir.

4-a) Exprimer le travail de pression mis en jeu lors du remplissage de ce réservoir en fonction de T_0 et de la masse d'air m qui entrera dans V_0 .

4-b) Calculer le rapport $\frac{T_f}{T_0}$ en fonction de γ .

4-c) Calculer numériquement T_f .

MECANIQUE DES FLUIDES COMPRESSIBLES

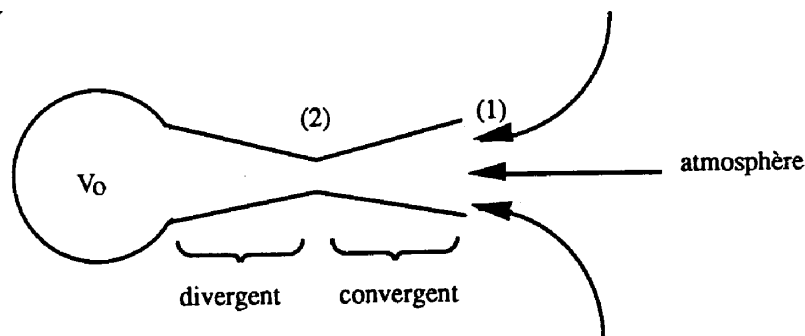
Un réservoir dans lequel a été fait le vide, comme dans le problème 2, peut être utilisé pour faire fonctionner une soufflerie à rafale.

Ce problème étudie quelques relations simples applicables à l'air (considéré toujours comme un gaz parfait) qui, aspiré à l'atmosphère (P_0 , T_0) traverse une tuyère (tuyau convergent et divergent) avant de rentrer dans le réservoir. Certains résultats et notations du problème 2 seront utilisés.

Si le réservoir a un grand volume V_0 et que le débit massique dans la tuyère est petit, on peut admettre que pendant la durée de l'expérience, l'écoulement dans le tuyau est permanent.

On supposera que l'air aspiré est un fluide parfait (sans frottement visqueux) mais que les vitesses (et donc les

D'autre part, la transformation subie par les particules fluides passant de l'atmosphère dans V_0 est supposée être adiabatique et réversible.



1 . En admettant que dans cette configuration pour une masse unité $w' = 0$ (cf problème 2), trouver une relation entre la variation d'enthalpie massique et la variation d'énergie cinétique massique.

2 . Le fluide est mis en vitesse dans la tuyère; soit c_1 sa vitesse dans la section d'entrée (1) et T_1 , P_1 les conditions de pression et température au même endroit.

En utilisant les résultats de la question 1, trouver la relation entre la température de l'atmosphère notée T_a et T_1 , c_1 et la chaleur massique C_p .

3 . Au niveau de la section (1), on place un thermomètre qui arrête de façon isentropique des particules arrivant avec la vitesse c_1 et la température T_1 ; relier T_{i1} , température absolue, mesurée par le thermomètre à T_1 et c_1 .

Comparer à T_a

4 . Que peut-on dire de la température mesurée par le thermomètre dans n'importe quelle section de la tuyère ?

5 . On place maintenant un capteur de pression en (1) qui arrête isentropiquement des particules arrivant à c_1 , P_1 , T_1 et qui mesure une pression P_{i1} . Relier P_{i1} , P_1 , T_{i1} , T_1 .

6 . Donner l'expression du débit massique m (en kg.s^{-1}) en fonction de ρ , S , c , (ρ et c désignant respectivement la masse volumique et la vitesse de l'air dans la section considérée S).

$$M = \frac{c}{\sqrt{\frac{dp}{d\rho}}}$$

7 . Pour des particules en mouvement la variable M (appelée nombre de Mach) est définie par $M = \frac{c}{\sqrt{\frac{dp}{d\rho}}}$ où dp et $d\rho$ sont les variations élémentaires de pression et de masse volumique des particules lors d'une transformation isentropique.

Le régime étant permanent, montrer que l'on peut écrire: $\frac{ds}{s} + (1 - M^2) \frac{dc}{c} = 0$.

Pour établir cette relation, on utilisera les résultats de la question 1.

8 . En supposant que dans cette expérience, le nombre de Mach est toujours inférieur ou égal à 1, étudier l'évolution de c dans le tuyau convergent puis divergent; où se situe le maximum de vitesse ?

9 . Donner l'expression de M en fonction de c , γ , r , T pour une transformation isentropique d'un gaz parfait.

10 . En utilisant les relations établies en 5 et 9, exprimer T_{i1} en fonction de T_1 , M_1 , γ , puis P_{i1} en fonction de P_1 , M_1 , γ (M_1 désigne le nombre de Mach dans la section (1)).

11 . Application numérique:

Pour un avion volant à haute altitude (température extérieure très basse) et grande vitesse c , on retrouve la situation des questions précédentes.

T_1 et P_1 sont les températures et pressions des particules de l'atmosphère qui, dans le repère lié à l'avion se déplacent à la vitesse c .

Dans le cas de Concorde volant à Mach 2,2 à 11 km d'altitude ($T_1 = -56,5^\circ\text{C}$), calculer T_i sachant que $\gamma = 1,4$.

Cette température est appliquée sur les parois de l'avion à cause de l'effet thermique de couche limite. Dans ces conditions, doit-on réchauffer ou refroidir la cabine de l'avion ?

Faire le même calcul pour la Navette spatiale à Mach 5. Conclusions ?