

OPTION PHYSIQUE CHIMIE

Thermodynamique /thermique

1. Ondes sonores

- (a) Rappeler ce qui constitue un phénomène vibratoire et ce qui définit une onde
- (b) Donner différents exemples d'ondes, en précisant la nature de la grandeur vibrante, son caractère scalaire ou vectoriel, et sa direction de vibration par rapport à la direction de propagation. Préciser la nature du milieu. Peut-on parler d'onde de matière, ou d'onde thermique ?
- (c) Dans le cas des ondes sonores, rappeler ce que l'on appelle la hauteur d'un son, son volume, et comment le corps humain y réagit. Quels sont les systèmes de notations de ces grandeurs les plus usités et pourquoi ?
- (d) On néglige dans un premier temps les phénomènes dissipatifs, ce qui revient à considérer le caractère isentropique de propagation des ondes sonores. On néglige également la pesanteur. On note μ la variation de masse volumique du fluide sous l'effet de l'onde, p la variation de pression, et \vec{v} le vecteur vitesse d'une particule de fluide de masse volumique $\mu_0(x)$ et de pression $P_0(x)$. Ces quantités seront supposées petites par rapport aux grandeurs au repos $\mu_0(x)$ et $P_0(x)$.
Montrer que le coefficient de compressibilité isentropique

$$\chi_S = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_S$$

vaut approximativement

$$\chi_S \approx \frac{1}{\mu_0} \frac{\mu}{p}$$

- (e) Écrire l'équation de conservation de la masse.
- (f) Dans quelles conditions peut-on approcher cette équation par

$$\mu_0 \operatorname{div} \vec{v} + \frac{\partial \mu}{\partial t} = 0$$

- (g) Exprimer ces conditions en fonction de la période T de l'onde puis de la longueur d'onde λ et de la célérité c
- (h) Exprimer l'équation de propagation de la chaleur dans l'air de conductivité $\lambda_T = 0,0262$ USI dans les conditions normales de température et de pression, et après avoir établi l'équation bilan donnant la variation temporelle de température d'une zone de fluide soumise à l'onde sonore, en déduire la fréquence f au dessus de laquelle la conduction thermique n'est pas négligeable et donc l'hypothèse isentropique est fautive. On pourra introduire la distance

$$d = \sqrt{\frac{h}{f}}$$

avec $h = \frac{\lambda_T}{\mu C_v}$ diffusivité thermique de l'air de capacité calorifique C_v à volume constant. Si on désire obtenir par ultrasons des images du corps humain avec une résolution bien inférieure au mm, que risque-t-il de se passer ?

- (i) Écrire l'équation d'Euler puis après linéarisation au premier ordre montrer que celle-ci est équivalente au principe fondamental de la dynamique appliqué à une tranche de fluide située entre x et $x + dx$ et soumise aux forces de pression sur chaque face.

(j) En regroupant les trois résultats précédents montrer que l'on obtient

$$\Delta p - \mu_0 \chi_S \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

et commenter

(k) Exprimer χ_S pour un gaz parfait diatomique et faire l'application numérique dans les conditions normales de température et de pression pour en déduire la célérité c du son

(l) Une onde plane progressive $p = p_0 e^{i(kx - \omega t)}$ se caractérise par l'impédance acoustique Z du milieu

$$Z = \frac{p}{v}$$

Montrer que

$$Z = \mu_0 c$$

2. Turboréacteur

On considère le turboréacteur du Concorde, supposé horizontal, aspirant de l'air ralenti et mis en forme par une entrée d'air spécifique, à la pression $P_1 = 1 \text{ atm}$, température $T_1 = 300 \text{ K}$, vitesse $v_1 = 0 \text{ m/s}$, et le rejetant à la pression $P_f = 1 \text{ atm}$, température T_f , vitesse v_f , après l'avoir fait passer successivement par un compresseur lui apportant le travail w'_1 par unité de masse, une chambre de combustion injectant du kérosène donnant une chaleur q par unité de masse, une turbine extrayant un travail $w'_2 = |w'_1|$ par unité de masse afin d'alimenter le compresseur, et une deuxième chambre de combustion donnant une chaleur q' par unité de masse (post-combustion) suivie d'une détente et d'une accélération des gaz dans une tuyère. On se place en régime permanent.

(a) Compresseur

On considère le compresseur aspirant de l'air assimilé à un gaz parfait à une pression P_1 et le rejetant à une pression P_2 en lui fournissant un travail w'_1 par unité de masse. Le phénomène est supposé adiabatique et on néglige la vitesse de l'écoulement (décollage). On se place en régime permanent.

- i. En considérant un système fermé constitué de l'air situé initialement entre deux plans AB et CD situés de part et d'autre du compresseur, puis après $t = dt$ entre deux plans A'B' et C'D', calculer la variation d'enthalpie massique de l'air. Même question en appliquant le premier principe pour un système ouvert.
- ii. Si la transformation est réversible montrer que

$$w'_1 = \int_1^2 v dP$$

où v est le volume massique.

- iii. Exprimer la température finale T_{2is} dans ce cas.
- iv. On suppose désormais que la transformation est irréversible mais que le caractère visqueux du fluide induit des pertes et donc une création d'entropie δS_c par intervalle de temps dt . Réexprimer w'_1 .
- v. On considère dans ce cas une transformation polytropique (transformation non adiabatique correspondant à la même variation d'entropie que la transformation réelle mais réversible).

Exprimer le travail élémentaire $\delta w'_{pol}$ dans ce cas et en déduire le rendement

$$\eta_{pol} = \frac{\delta w'_{pol}}{\delta w'_{reel}}$$

que l'on considèrera constant tout au long de la transformation.

- vi. En dèduire une relation entre température et pression dans la transformation et commenter le résultat.
- (b) *Poussée* En appliquant le premier principe pour un système ouvert (ou fermé), calculer le bilan total de variation d'enthalpie massique pour l'air en revenant à l'hypothèse d'un compresseur idéal. L'air est supposé être un gaz parfait diatomique de masse molaire 29g contenant un cinquième de dioxygène. La température après la première combustion vaut $T_c=1100$ K , et en sortie de la turbine cette température vaut $T_t=1200$ K lorsque la post-combustion est allumée. Après la tuyère, la température vaut $T_f=700$ K, Exprimer la vitesse v_f en sortie du système puis faire l'application numérique.
- (c) Exprimer la densité de l'air ρ , considéré comme un gaz parfait, dans les conditions d'entrée du turboréacteur puis faire l'application numérique.
- (d) Soit S la surface totale efficace des turboréacteurs. Exprimer le débit massique d'air D en régime permanent puis, en supposant que les gaz d'échappement sont de même nature, la poussée correspondante \vec{F} exercée par les 4 réacteurs à partir de la conservation de la quantité de mouvement totale de l'avion, en fonction de v_f et D , puis de v_f , S , et ρ . Application numérique : $S = 0.5m^2$.
- (e) Dans les documentations de l'époque, on lit que chaque réacteur exerce "une poussée de 17 tonnes" (commenter) et que l'avion de 80 tonnes à vide consomme 100 tonnes de carburant (kérosène de masse molaire 140g/l nécessitant 15.5 mol de dioxygène pour sa combustion) lors d'une traversée de l'Atlantique en 3 heures, sachant que les réacteurs ne sont à la poussée maximum qu'au décollage et au passage du mur du son, la postcombustion étant coupée le reste du temps.
- (f) Ces valeurs vous semblent elles globalement compatibles avec les hypothèses et résultats précédents ?
- (g) Calculer le rendement du système défini par le rapport de l'énergie cinétique massique des gaz de sortie et $q + q'$ en considérant que les combustions sont isobares et les détentees sont adiabatiques

Le taux de compression par le compresseur est de 5.