

INSTALLATION DE COMPRESSION D'AIR

Le problème comprend deux parties indépendantes (1° et 2°) ; il n'est donc pas nécessaire d'avoir traité la première partie pour aborder la seconde.

Hypothèses générales:

On néglige les variations d'énergie cinétique E_c et d'énergie potentielle E_{pot} de situation de l'air. On assimile l'air à un gaz parfait de constante massique: $r = 287 \text{ J.kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et de rapport de chaleurs massiques $\gamma = C_p / C_v = 1,4$. C_p et C_v désignent les chaleurs massiques (ou capacités calorifiques) à pression et volume constant ($C_p = 1 \text{ kJ.kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); on rappelle que $C_p - C_v = r$.

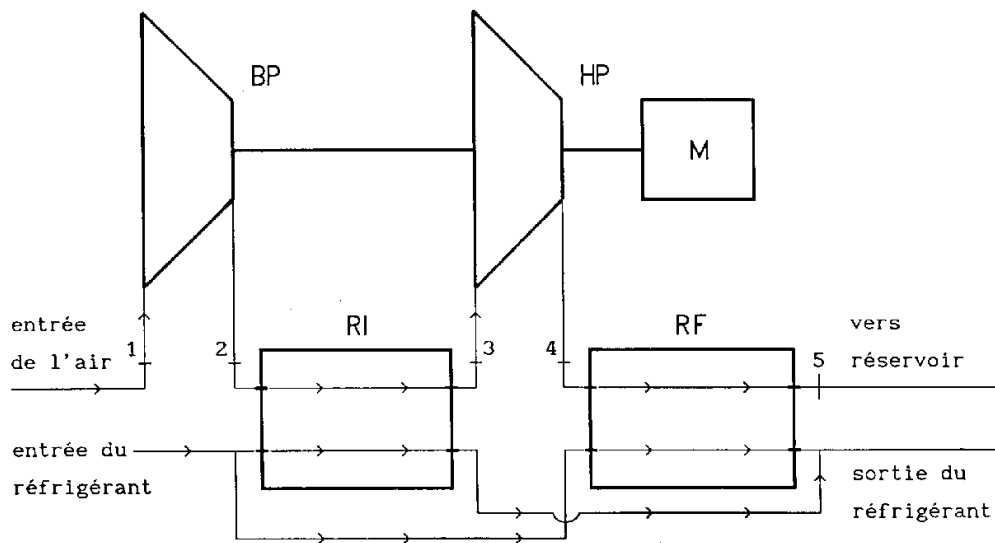


Figure 1

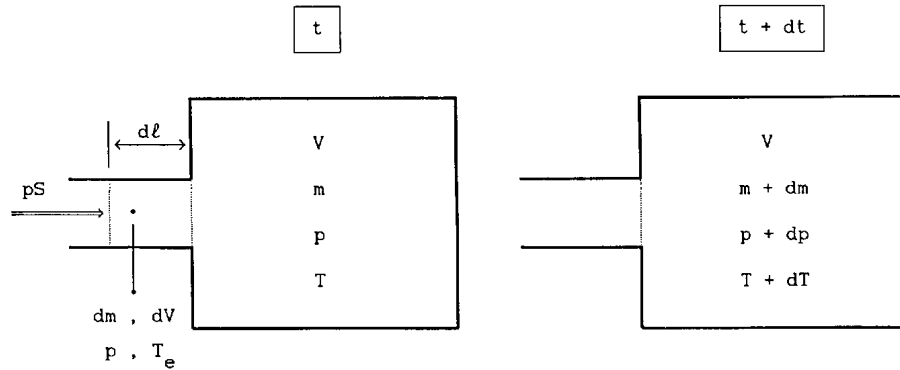


Figure 2

1°) ETUDE DU COMPRESSEUR

Le compresseur (figure 1) entraîné par le moteur M se compose d'un corps basse pression (BP ; évolution de l'air 1 → 2) ET d'un corps haute pression (HP; évolution de l'air 3 → 4). Ces évolutions (1 → 2 et 3 → 4) sont adiabatiques et suivent la loi de compression: $T.p^{-a} = \text{cte}$ (a: scalaire).

T: température (en degré Kelvin)

p: pression

On donne: $p_1 = 1 \text{ bar}$; $p_4 = 75 \text{ bar}$; $\theta_1 = 10^\circ\text{C}$ (θ : température en degré Celsius)

L'air sort du réfrigérant intermédiaire RI à la température $\theta_3 = 30^\circ\text{C}$ et du réfrigérant final RF à la température $\theta_5 = 50^\circ\text{C}$; ($T = \theta + 273$). On néglige les pertes de charge dans les canalisations et les réfrigérants: $p_2 = p_3$; $p_4 = p_5$.

L'écoulement de l'air est permanent et de débit masse $q_m = 108 \text{ kg/s}$.

On rappelle l'expression du premier principe appliqué aux transvasements permanents dans les machines: $W_i + Q_e = \Delta h + \Delta E_c + \Delta E_{\text{pot}}$.

On pose: $x = P_2/P_1$; $y = P_4/P_3$.

1-1 Ecrire l'expression littérale du travail indiqué total W_{iT} fourni par le compresseur à un kilogramme d'air transvasé; $W_{iT} = W_{iT}(C_p, T_1, T_3, x, y, a)$.

1-2 En posant $\tau = x.y = P_4/P_1$ et en éliminant la variable y , écrire l'expression de $W_{iT} = f(x)$.

1-3 Rechercher la valeur littérale de x minimisant la valeur de W_{iT} .

1-4 Applications numériques.

1-4-1 Calculer pour $a = 1/3$: x , y , T_2 , T_4 , p_2 ou p_3 .

1-4-2 Calculer le travail indiqué total W_{iT} (en kJ/Kg) ainsi que la puissance indiquée P_i (en kW) à fournir par le moteur.

1-5 On remplace les deux corps BP et HP par une machine unique comprimant de la pression p_1 à la pression $P_6 = P_4$ SANS réfrigération intermédiaire, et suivant la même loi de compression: $T.p^{-a} = \text{cte}$ (a : scalaire).

1-5-1 Calculer la température de sortie T_6 .

1-5-2 En déduire le gain de travail indiqué massique W_i (en kJ/kg) procuré par la réfrigération

Quels que soient les résultats trouvés aux questions précédentes, on continuera le problème avec le résultat approché: $P_2 = 10$ bar.

1-6 Etude de l'évolution $1 \rightarrow 2$.

Cette compression peut être caractérisée par le rapport: $b = \frac{\delta Q_f}{dh} = \text{cte}$ δQ_f désignant la quantité de chaleur (massique) de frottement élémentaire apparaissant au sein du fluide à cause des frottements visqueux, correspondant à un tronçon élémentaire de l'écoulement dans le

turbocompresseur pour lequel l'augmentation élémentaire d'enthalpie massique est dh . Pour simplifier, la compression $1 \rightarrow 2$ est supposée thermiquement isolée ($Q_e = 0$), et on admet que b est constant tout le long de cette évolution.

On rappelle les expressions différentielles de l'enthalpie massique et de l'entropie massique s :

$$dh = Tds + vdp \quad \text{et} \quad ds = (\delta Q_e + \delta Q_f)/T$$

- 1-6-1 Calculer la nouvelle valeur de T_2 .
- 1-6-2 Donner l'expression différentielle reliant la pression p , dp , la température T , dT et le scalaire a .
- 1-6-3 En partant de l'expression différentielle de dh , chercher l'équation différentielle reliant p , dp , T , dT , b et γ .
- 1-6-4 Dédire des deux résultats précédents l'expression littérale de b en fonction de a et γ .; pour $a = 1/3$, calculer numériquement b .
- 1-6-5 Calculer pour l'évolution $1 \rightarrow 2$, la chaleur massique de frottement δQ_{f12} (en kJ/kg).
- 1-6-6 Peut-on définir un rendement pour cette compression? si oui, l'exprimer littéralement et calculer la valeur numérique correspondante.

2) ETUDE DU REMPLISSAGE DU RESERVOIR

On recherche la température finale θ_f régnant dans un réservoir de volume constant

$V = 230\,000 \text{ m}^3$ après remplissage avec de l'air.

Initialement, le réservoir est rempli d'air à la pression $P_i = 55$ bar et à la température $\theta_i = 15^\circ\text{C}$.

Le remplissage de ce réservoir se fait avec un air à la température d'entrée $\theta_e = 50^\circ\text{C}$ et se poursuit jusqu'à la pression finale $p_f = 75$ bar. Le débit masse reste constant et égal à $q_m = 108$ kg/s.

On néglige les échanges de chaleur entre l'air et la paroi du réservoir (le remplissage est donc adiabatique).

La figure 2 représente l'état de l'air aux instants t et $t + dt$ dans le réservoir et à l'entrée de celui-ci.

On précise les notations suivantes:

S: section de la conduite d'alimentation du réservoir

dl: longueur élémentaire de cette conduite

m: masse de l'air contenu dans le réservoir à l'instant t

p: pression exercée par le piston lors du remplissage supposé quasi-statique

V: volume du réservoir

T: température (en degré Kelvin)

θ : température (en degré Celsius); $T = \theta + 273$

t: temps

On rappelle l'équation d'état: $pV = mrT$

et l'expression différentielle du premier principe: $\delta W + \delta Q = dU + dE_c$.

Le système à isoler pourra être le suivant: masse m d'air contenu dans le réservoir à l'instant t plus la masse dm pénétrant dans celui-ci entre les instants t et $t + dt$.

2-1 Calculer l'expression du travail élémentaire δW reçu par le système en fonction de dm , r , T_e .

2-2 Donner l'expression de la variation d'énergie interne dU de la masse d'air $m + dm$ entre les instants t et $t + dt$; après avoir écrit l'expression rigoureuse, on ne conservera que les termes du premier ordre.

2-3 En appliquant le premier principe, donner la relation différentielle reliant: m , dm , T , T_e , dT et γ .

2-4 En appliquant l'équation d'état à l'air contenu dans le réservoir à l'instant t , donner l'équation différentielle reliant: p , dp , m , dm , T et dT .

2-5 Dédurre des deux résultats précédents l'équation différentielle reliant la pression p et la température T .

2-6 Après avoir obtenu la valeur littérale de p/P_i , donner l'expression littérale de T_f ;

$$T_f = T_f(V, T_e, p_f/p_i, T_f).$$

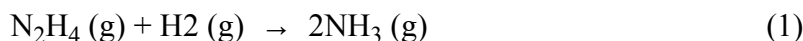
2-7 Calculer numériquement θ_f (en °C).

Exercice 1: Décomposition de l'hydrazine

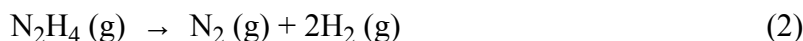
On introduit 10^{-2} mol d'hydrazine (N_2H_4) et 10^{-2} mol de dihydrogène (H_2) dans une enceinte rigide et close, E, de volume $V = 2,315$ litres.

A 427°C , N_2H_4 est un gaz qui se décompose spontanément.

Les deux réactions suivantes sont envisageables:



et



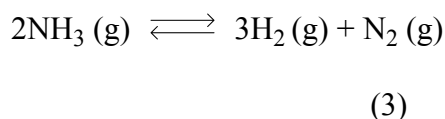
I-1. Déterminer la nature et le nombre de moles des espèces qui seraient présentes dans l'enceinte A à la fin de chacune des réactions précédentes prises séparément. Vous supposerez dans chaque cas que la réaction est totale.

I-2. Soit 2α le nombre de moles de NH_3 formées selon la réaction (1) suite à la décomposition totale de N_2H_4 . Etablir la relation existant à 427°C entre α et la pression totale P dans l'enceinte E. Pour ce faire vous supposerez que les deux réactions (1) et (2) interviennent simultanément et que les gaz sont parfaits.

On donne $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$

I-3. La pression totale dans l'enceinte A à la fin de la décomposition de l'hydrazine à 427°C est de 100251 Pa. Déterminer la valeur de α et la nature de la réaction de décomposition prépondérante.

I-4. Dans l'enceinte A la réaction



doit aussi être considérée.

Quand l'état stable est atteint (état d'équilibre), la pression dans l'enceinte A est de 100251 Pa (question I.3). Déterminer:

- a - la variation $\Delta_{R_3} G(427^\circ\text{C})$ d'enthalpie libre de cette réaction à 427°C.
- b - les pressions partielles de NH_3 de H_2 et de N_2 à la même température.

I-5. Les pressions partielles calculées précédemment correspondent à l'état d'équilibre à $P = 100251$ Pa.

a - Elles ne permettent pas d'accéder rigoureusement à la variation d'enthalpie libre standard de la réaction (3) $\Delta_{R_3} G(427^\circ\text{C})$. Pourquoi ?

b - Toutefois, pensez-vous que la valeur $D_{R_3} G(427^\circ\text{C})$ calculée à partir de ces

pressions partielles soit très différente de celle fournie par les tables thermodynamiques ? Justifiez votre réponse.

- c - Calculer $\Delta_{R_3} G(427^\circ\text{C})$.

Exercice II : Solubilité du chlorure d'argent

II-1. On dissout 100 mg de chlorure d'argent (AgCl) dans 100 litres d'eau pure à 25°C. Sachant qu'à cette température le produit de solubilité K_s de AgCl est de $1,56 \cdot 10^{-10}$, déterminer le volume d'eau à évaporer à 25°C pour voir apparaître les premiers cristaux de AgCl .

On donne les masses molaires atomiques:

Ag: $107,86 \text{ g.mol}^{-1}$ et Cl: $35,45 \text{ g.mol}^{-1}$.

II-2. En augmentant la température, la solubilité de AgCl dans l'eau pure augmente. Ainsi à 40°C le volume minimum d'eau pure permettant de dissoudre entièrement 100 mg de AgCl est de 28,844 litres.

Déterminer la variation d'enthalpie de la réaction standard:



où (aq) précise que l'ion est en solution dans l'eau pure dans les conditions standard utilisées en chimie des solutions. Les variations d'enthalpie et d'entropie de cette réaction standard peuvent être considérées comme indépendantes de la température entre 25 et 40°C

On donne $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.

Exercice III: Diagramme $E = f(\text{pH})$ simplifié de l'iode

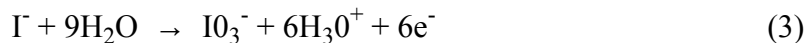
Dans ce qui suit les solutions envisagées sont maintenues à 25°C .

En solution dans l'eau, l'iode peut exister sous les formes I^- (ion iodure), I_2 (iode dissous) et IO_3^- (ion iodate).

III-1 Déterminer les degrés d'oxydation correspondant à chacune de ces espèces et écrire les demi-équations redox de chacun des couples (I_2/I^- et IO_3^-/I_2)

III-2. Proposer une procédure expérimentale permettant la détermination du potentiel standard E^0 du couple redox I_2/I^- .

III-3. Sachant que les potentiels standard sont $E_1^0 = 0,533\text{V}$ pour le couple redox I_2/I^- et $E_2^0 = 1,195\text{V}$ pour IO_3^-/I_2 , calculer le potentiel standard E_3^0 correspondant à:



III-4. Exprimer en fonction des concentrations en I^- , I_2 et IO_3^- les lois de variation du potentiel E en fonction du pH pour chacun des trois couples redox précédents.

III-5. Définir sur un graphique $E = f(\text{pH})$ les domaines de prédominance de chacune des espèces. Vous considérerez que la solution contient au total 10^{-2} mole d'atome d'iode, quelle qu'en soit la forme.

On donne $\frac{2,303RT}{F} \approx 59\text{mV}$ à 25°C .