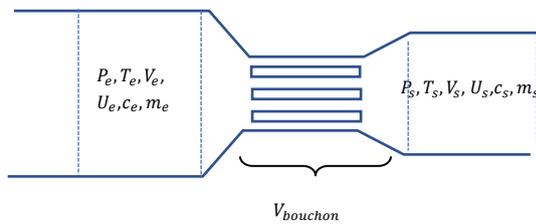


Activité 1 : Détente de Joule Thomson

La détente de Joule Thomson consiste à étudier un écoulement dans une conduite présentant une paroi poreuse et (ou) un étranglement contrariant le fluide dans son écoulement. Nous nous placerons dans les conditions d'études suivantes :

- En chaque point d'un volume de section $S(z)$ d'épaisseur dz de la conduite, on peut affecter une valeur à toute grandeur physique.
- L'écoulement est stationnaire.
- La conduite est horizontale et calorifugée.

On notera P_i les pressions, c_i les vitesses de l'écoulement, T_i les températures, U_i les énergies internes, V_i et m_i les volumes et masses associés aux tranches de fluides situées en amont et en aval. A l'instant t une masse donnée de fluide occupe le volume $V_e + V_{bouchon}$ et à l'instant $t + \Delta t$ la même masse occupe $V_{bouchon} + V_s$.



A) Questions de cours :

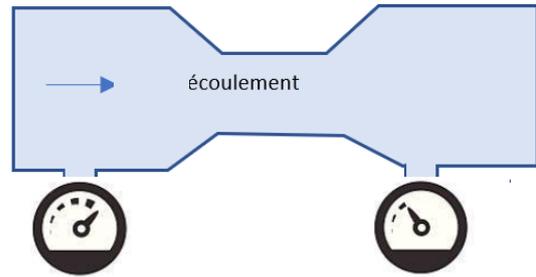
- 1) Montrer que le régime stationnaire implique la conservation du débit massique (le débit massique est le même en tout point).
- 2) Montrer, à partir du premier principe des systèmes fermés, que $h_s + \frac{c_s^2}{2} = h_e + \frac{c_e^2}{2}$ où h_e et h_s représentent l'enthalpie massique en amont et en aval du bouchon.

B) Détente d'une phase condensée visqueuse

Une phase condensée est peu compressible et peu dilatable. On pourra donc souvent négliger les variations de volume d'un système fermé contenant une phase condensée.

- 1) Que dire des volumes V_e et V_s ?
- 2) Si $S_e = S_s$, que dire de c_s par rapport à c_e ?
- 3) En déduire alors que la détente est isenthalpique.
- 4) A partir de l'identité thermodynamique, montrer que si cet écoulement se produit nécessairement pour $P_e > P_s$.
- 5) On peut réaliser la détente de Joule avec un simple rétrécissement imposé à un écoulement liquide. On apprécie alors la valeur de la

pression à l'aide de deux manomètres. Interpréter le résultat obtenu.



C) Détente d'un gaz parfait si $S_e \neq S_s$

Un gaz est compressible mais un écoulement stationnaire et « lent » (inférieur à 300m/s) n'impose pas des contraintes suffisantes pour modifier notablement la masse volumique. Dans la suite, nous allons donc considérer un gaz parfait de masse volumique quasi-uniforme dans la canalisation à chaque instant.

- 1) Que dire des volumes V_e et V_s ?
- 2) Soient S_e et S_s les sections a priori différentes en amont et en aval du bouchon. Si $S_s < S_e$, que dire de c_s par rapport à c_e ?
- 3) Comment est-il possible de refroidir un gaz supposé parfait avec ce type de dispositif ? Proposer alors une géométrie pour la canalisation assurant un refroidissement.

D) Détente d'un gaz si $S_e = S_s$

Si on a $S_e = S_s$ (et donc $c_e \approx c_s$ si on suppose le gaz faiblement comprimé ce qui impose un écoulement « lent ») alors : $\Delta h \approx 0$

- 1) Un gaz à faible pression supposé parfait pénètre dans le détendeur de Joule. Quelle est sa variation de température ?

Dans le cas d'un gaz réel, on peut proposer l'expression suivante de son équation d'état ($a > 0$) :

$$PV_m = RT - \frac{a}{RT}P$$

On définit l'enthalpie molaire H_m par $H_m = U_m + PV_m = C_{vm}T + U_0 + PV_m$ où C_{vm} (capacité thermique molaire à volume constant) et U_0 sont des constantes

- 2) Montrer qu'une détente isenthalpique vérifie $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{H_m} = \frac{\frac{a}{RT}}{C_{pm} + \frac{aP}{RT^2}}$.
- 3) Que dire de l'évolution de la température dans le cas d'une détente isenthalpique de Joule-Thomson ?

E) Etude d'un détendeur de plongée

Pour pratiquer la plongée sous-marine, l'air est stocké dans des bouteilles à la pression $P_e = 200\text{bar}$ et nécessite deux détendeurs de type capillaire pour « oxygéner » le plongeur.



On conserve les hypothèses précédentes (écoulement stationnaire, conduite horizontale calorifugée et variation d'énergie cinétique négligée : $dh \approx 0$). Le gaz est ici supposé « réel ».

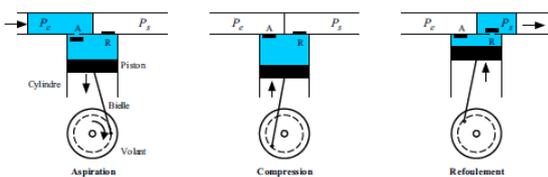
Le détendeur primaire, placé sur la bouteille, assure la détente de la haute pression (200 bar à 20°C) vers une moyenne pression (10 bar). Un détendeur secondaire, placé au niveau de la bouche du plongeur, assure la détente vers la basse pression (1 bar). La première détente est accompagnée d'une baisse importante de température. L'air se réchauffe ensuite de manière isobare en circulant dans le tuyau arrivant jusqu'au deuxième détendeur. La deuxième détente est pratiquement isotherme, et le plongeur ne ressent pas une sensation d'air froid lors de l'inspiration.

Tracer ces transformations sur le graphe donné à la fin du TD.

Activité 2 : Compresseur à air

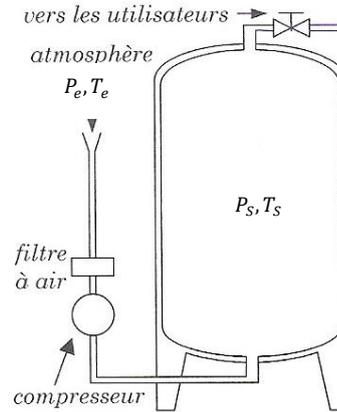
Un compresseur à air fonctionne sur le principe suivant :

- Une phase d'injection du fluide à comprimer : le fluide pousse la soupape A et pousse le piston.
- On ferme ensuite la soupape d'injection A et on comprime le gaz (on diminue le volume de la chambre en modifiant la position du piston et le gaz reçoit du travail par le compresseur)
- Une phase d'éjection du gaz comprimé vers une autre chambre lorsque la pression du gaz est suffisante pour ouvrir la soupape R.



On va étudier un compresseur qui prélève de l'air avec un débit permanent $D_m = 100\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ dans l'atmosphère à la pression P_e et à la température $T_e = 300\text{K}$, et l'envoie comprimé dans un grand réservoir de stockage à pression constante $P_s = 10\text{bar}$ alimentant une installation industrielle (la vitesse de l'air est nulle dans l'atmosphère et dans le réservoir). L'air est supposé équivalent à un gaz parfait de masse molaire $M \approx 30\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $\gamma \approx 1,5$ et $R \approx 10\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$. On suppose la compression

adiabatique, mécaniquement réversible et on néglige la variation d'énergie potentielle.



- 1) On différencie deux types de diagramme pour le traitement thermodynamique d'un fluide en écoulement. Le diagramme de Watt $P(V_{\text{réacteur}})$ (point de vue du réacteur : admission, refoulement et compression) et le diagramme de Clapeyron $P(V)$ (point de vue du gaz : seule la compression d'une quantité donnée de gaz est représentée). Dessiner ces deux diagrammes si le fluide à comprimer est un kilogramme de gaz.
- 2) Justifier que le fonctionnement du compresseur soit réversible et montrer que Δh peut être obtenu graphiquement à l'aide du diagramme de Watt.
- 3) Estimer la température T_s de l'air après compression et la puissance mécanique P_{gaz} reçue par l'air entre l'atmosphère et le réservoir. On prendra $10^{1/3} \approx 2$

Activité 3 : Compresseur multi étagé

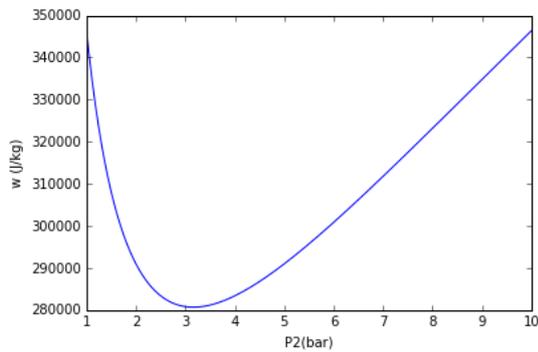
Le compresseur précédent présente un défaut : sa compression adiabatique mécaniquement réversible chauffe le gaz ce que ne facilite pas sa compression. On propose dans cet exercice d'étudier une alternative : une compression étagée avec une première compression adiabatique mécaniquement réversible de l'état 1 ($P_1 = 1\text{bar}, T_1 = 300\text{K}$), jusqu'à un état 2 (P_2, T_2). Un refroidissement isobare est alors amorcé entre l'état 2 et l'état 3 ($P_3 = P_2, T_3 = T_1$) puis une compression mécaniquement réversible et adiabatique jusqu'à l'état 4 ($P_4 = 10\text{bar}, T_4$). Un nouveau refroidissement isobare est ensuite opéré pour revenir à 300K. Le gaz sera considéré parfait et le facteur isentropique $\gamma = 1,5$. Les refroidissements sont effectués au contact d'échangeurs thermiques (aucun travail échangé pour ces transformations avec le gaz en écoulement).

- 1) Exprimer le travail massique total de compression en fonction de $\gamma, T_1, M, \frac{P_2}{P_1}$ et $\frac{P_3}{P_2}$

On définit sur python la fonction suivante retournant la grandeur $w(P_2)$

```
#constantes
gamma=1.5
R=10
T1=300
M=30*10**-3
P4=10
P1=1
K=(R*gamma*T1)/(M*(gamma-1))
# définition de w
def w(P2):
    return K*((P4/P2)**((gamma-1)/gamma)+
(P2/P1)**((gamma-1)/gamma))-2
```

Il est alors facile d'obtenir le graphe $w(P_2)$:



- 2) Décrire alors ce que calcule la fonction $P_{min}()$ ci-dessous :

```
def Pmin():
    Pinf=1
    Psup=1+0.1
    while w(Psup)-w(Pinf)<0:
        Pinf=Psup
        Psup=Psup+0.1
    return Psup
```

- 3) Exprimer « à l'aide d'un calcul fait main » la pression intermédiaire $P_2 = P_{2,min}$ conduisant au travail minimal pour P_1 et P_4 quelconques.
- 4) Tracer les transformations sur le diagramme $p(h)$ fourni à la fin du TD.
- 5) Comparer ce compresseur à celui de l'exercice précédent en utilisant un diagramme de Clapeyron.

