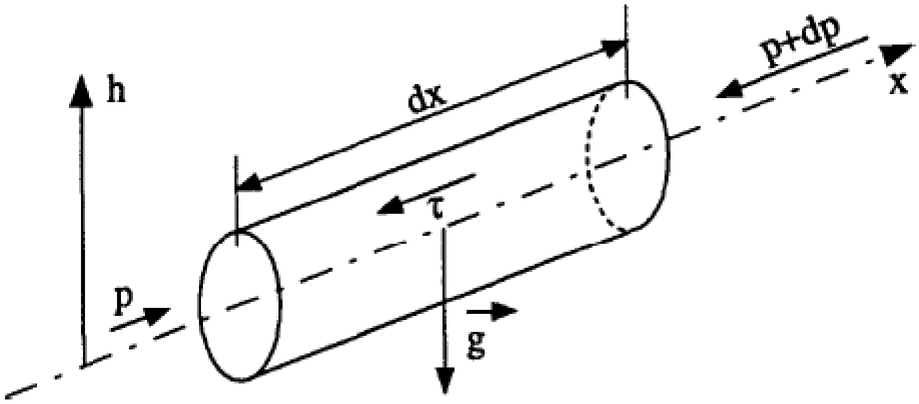
Chapitre I - Le transport du gaz naturel

I-2 Lois des pertes de charge :

I-2-1 Equation de Bernoulli généralisée :

Soit une conduite de section constante S dans laquelle s'écoule un élément de gaz compressible figure I-1.



L'écoulement est supposé permanent et les variables p (pression) et u (vitesse) sont uniformes dans une section droite du tube.

En se basant sur la loi fondamentale de la dynamique on peut écrire :

$$dm \cdot \frac{du}{dt} = p.S - \left(p + \frac{dp}{dx} \cdot dx\right) \cdot S - g \cdot \frac{dh}{dx} \cdot dm - \tau \cdot \pi \cdot D \cdot dx \qquad \text{I-1}$$

Où :

- dm = ρ S dx (masse de l'élément de gaz)
- τ contrainte tangentielle

En simplifiant I-1 on trouve :

$$\frac{dp}{\rho} + g.dh + u.du = \frac{4\tau}{\rho D} \cdot dx$$

La contrainte τ est exprimée par la formule suivante :

$$\tau = \frac{\lambda}{4}\frac{\rho u^2}{2}$$

Où λ : coefficient de frottement (dépend de Re, D et de la rugosité de la conduite)

Cela nous permet d'arriver à l'équation de Bernoulli généralisée :

$$\frac{dp}{\rho} + g.dh + u.du = -\ \lambda.\frac{u^2}{2D}\ .\ dx$$

Etant donné que :

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{z_0 T_0}{zT}$$ et

$$u = \frac{4Q}{\pi D^2}, Q = \frac{z}{z_0} \cdot \frac{p_0}{T_0} \cdot \frac{T}{P} \cdot Q_0$$

Où Q et z représentent respectivement le débit et le facteur de compressibilité du gaz. L'indice $_0$ désigne les conditions de référence.

On en déduit :

$$\rho u \cdot \frac{du}{dx} + \rho_0 g.\frac{p}{p_0} \cdot \frac{z_0 T_0}{zT}\frac{dh}{dx} + \frac{8}{\pi^2} \cdot \rho_0 \cdot \frac{p_0}{p} \cdot \frac{T}{T_0}\lambda\frac{Q_0^2}{D^5} \cdot \frac{z}{z_0} + \frac{dp}{dx} = 0 \qquad \text{I-2}$$

Avec :

$$R = \frac{uD}{\upsilon} = \frac{\rho u D}{\mu} = \frac{4\rho_0 Q_0}{\pi \mu D}$$

<u>Cas d'une conduite horizontale :</u>

Dans ce cas : $\frac{dh}{dx} = 0$

L'équation I-2 devient

$$p \cdot \frac{dp}{dx} = -\ \frac{8}{\pi^2} \cdot \rho_0 \cdot p_0 \cdot \frac{T_m}{T_0} z_m \cdot \lambda \cdot \frac{Q_0^2}{D^5}$$

En intégrant :

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{16}{\pi^2} \cdot \rho_0 \cdot p_0 \cdot \frac{T_m}{T_0} \cdot z_m \lambda_m \cdot \frac{Q_0^2}{D^5} \cdot L$$

λ_m, z_m et T_m désignent les valeurs moyennes le long de l'écoulement.

I-2-2 Equation de Panhandle B :

L'équation de Panhandle B est souvent utilisée dans le cas de conduites de gros diamètre et un écoulement largement turbulent (Re de 4 à 40 Millions). Elle est donnée par la formule suivante :

$$Q = 1{,}002\,.\,10^{-2}.\,E\,(\frac{T_b}{p_b})^{1{,}02}.\,(\frac{p_1^2 - p_2^2}{s^{0{,}961}T_f L z})^{0{,}51}.\,D^{2{,}53}$$

Où :

Q : débit du gaz aux conditions standards [Sm^3/j]

E : coefficient d'efficacité du pipeline

T_b : température de base [K]

P_b : pression de base [kPa]

T_f : température moyenne du gaz à l'écoulement

p_1 : pression amont [kPa]

p_2 : pression aval [kPa]

L : longueur du pipe en km

z : facteur de compressibilité

D : diamètre intérieur [mm]

s : densité du gaz

Le coefficient de frottement f est exprimé par :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 9{,}54\,.\,E\,.\,(\frac{Q\,s}{D})^{0{,}01961}$$

I-2-3 Formule de Colebrook :

Cette formule est utilisée pour calculer le coefficient de perte de charge d'un écoulement turbulent d'un gaz dans une conduite et donnée comme suit :

$$\frac{1}{\sqrt{\mathrm{f}}} = -2\, log_{10}\,\left(\frac{e}{3{,}7\,D} + \frac{2{,}51}{Re\,\sqrt{\mathrm{f}}}\right)$$

Où :

f : coefficient de frottement

D : diamètre intérieur de la conduite [mm]

e : rugosité de la conduite [mm]

Re : nombre de Reynolds

Les méthodes itératives sont souvent utilisées pour résoudre ce type d'équation.

I- 3 Puissance de compression

I-3-1 Calcul de la puissance de compression théorique :

Une compression théorique correspond à un compresseur parfait fonctionnant avec un rendement parfait c.-à-d. égale à 1 (sans pertes). Dans ce cas le calcul de la compression théorique W_{th} est déterminé selon deux situations :

- compression isotherme

$$W_{th} = \frac{P_0}{T_0} \cdot Q_0 \cdot z_m \cdot T_1 \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

- compression adiabatique

$$W_{th} = \frac{P_0}{T_0} \cdot Q_0 \cdot z_m \cdot T_1 \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1\right]$$

Où :

- W_{th} puissance théorique de compression
- P_1, P_2 pressions absolues d'aspiration et de refoulement

- T_1, T_2 températures du gaz à l'aspiration et au refoulement
- P_0, T_0 pression et température absolues de référence
- Q_0 débit volumique dans les conditions de référence P_0, T_0
- z_m facteur de compressibilité "moyen" du gaz au cours de la compression
- γ rapport de la chaleur spécifique à pression constante Cp à la chaleur spécifique à volume constant Cv.

I-3-2 Calcul de la puissance réelle :

Cette dernière est calculée à partir de la puissance théorique suivant la formule suivante :

$$W_{réelle} = \frac{1}{\eta} \cdot W_{th}$$

Où η représente le rendement global qui est souvent le produit du rendement mécanique avec le rendement thermodynamique.

Travaux dirigés

TD N°01

Exo 1 :

Soit un mélange de gaz naturel composé de 90 % de méthane, 8% d'éthane et 2 % de propane. Déterminer la densité du mélange (rép : s = 0,6096).

Exo 2 :

Soit un mélange homogène de gaz composé de 20 % d'un gaz A (M_A = 18 g/mole, $\mu_A = 0,6 \cdot 10^{-05}$ Pa s) et 80 % d'un gaz B (M_B = 17 g/mole, $\mu_B = 0,8 \cdot 10^{-05}$ Pa s). Déterminer la viscosité de ce mélange. (rép : $\mu = 0,759 \cdot 10^{-05}$ Pa s).

Exo 3 :

Soit un mélange de gaz naturel composé de 82 % de méthane ($\mu = 1,3\ 10^{-05}$ Pa s), 10% d'éthane ($\mu = 1,12 \cdot 10^{-05}$ Pa s) , 0,05 % de propane ($\mu = 0,98.10^{-05}$ Pa s) et de 0,03% de butane ($\mu = 0,91.10^{-05}$ Pa s). Déterminer la viscosité du mélange (rép : $\mu = 1,23\ 10^{-05}$ Pa s).

Exo 4 :

Déterminer la température et pression réduite du méthane à la pression de 300 K et 68,95 bar.

Exo 5 :

Déterminer la température et la pression critiques d'un mélange de gaz naturel composé de 83 % de méthane, 12 % d'éthane et 5 % de propane.(Rép : Tcr =213,33 K et Pcr = 46,09 bar)

TD N° 02

Remarque : Dans les exercices suivants utiliser la formule de Colebrook pour calculer le coefficient de frottement.

Exo 1 :

Un gazoduc de 0,4826 m de diamètre transporte un gaz au rythme de 1,3785 m^3/s. Calculer le coefficient de frottement pour cette conduite sachant que la rugosité e = 0,01524 mm , $\mu = 1{,}19 \cdot 10^{-05}$ Pa s et $\rho = 17{,}424\ kg/m^3$.

Rép : f = 0,0105

Exo 2 :

Soit une conduite de 380 mm de diamètre intérieur transportant du gaz naturel. Déterminer le coefficient de frottement en prenant Re = 7 166 823, $\mu = 1{,}19.\ 10^{-05}$ Pa s et e = 0,02 mm. (Rép : f = 0,0111).

Exo 3:

Soit une conduite de 476 mm de diamètre intérieur transportant du gaz naturel. Déterminer le coefficient de frottement en prenant Re = 11347470, $\mu = 1{,}2.\ 10^{-05}$ Pa s et e = 0,03 mm. (f = 0,0112).