

Chapitre 1

Propriétés des fluides

DOUGHA MOSTEFA

1.2.1 Masse volumique (ρ)

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. Elle est définie par l'expression suivante :

$$\rho = \frac{\text{Masse de matière}}{\text{Volume de matière}} \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{ou} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (1-1)$$

Voici la masse volumique de quelques substances :

Fluide	[k(g/m ³)]	Fluide	ρ [kg/m ³]
Air	1,29	Fer (Fe)	7860
Hydrogène (H ₂)	0,09	Cuivre (Cu)	8920
Hélium (He)	0,18	Argent (Ag)	10500
Oxygène (O ₂)	1,43	Plomb (Pb)	11300
Eau	1000	Or (Au)	19300
Eau de mer	1025	Mercure (Hg)	13600
Sang	1050	Glace (T° < 0)	917

Tableau 1.1 : Masse volumique de quelques substances (sous pression atmosphérique (P) et température normale (T) de 4°C).

- Pour un fluide : $\rho_{\text{gaz}} = f(P, T^\circ)$ et $\rho_{\text{liquide}} \approx g(T^\circ)$ faible dépendance à la pression (P)

Pour une eau à T = 20°C et P = pression atmosphérique, la masse volumique (ρ) est 998 kg/m³.

Si la pression change à P = 10⁷ Pa, la masse volumique (ρ) change légèrement de 1003 kg/m³.

La figure 1.2 indique la variation de la masse volumique (ρ) de l'eau en fonction de la température et sous la pression atmosphérique.

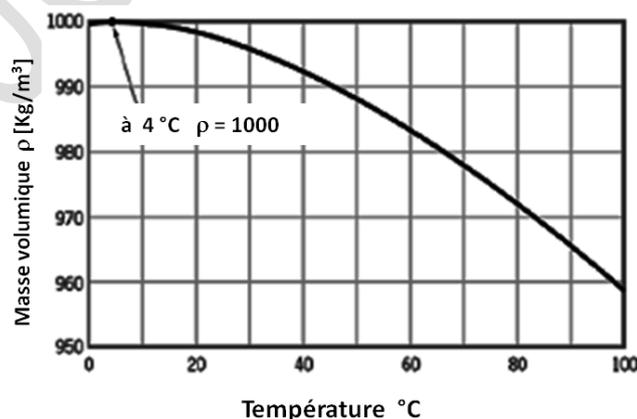


Figure 1.2 : Variation de la masse volumique de l'eau en fonction de T° sous la pression atmosphérique.

- Pour les gaz parfaits, la masse volumique est calculable à partir de son équation d'état :

$$\rho = \frac{P}{R.T} \quad (1-2)$$

Avec : P est la pression absolue [Pa], ρ est la masse volumique [kg/m^3], T est la température en [$^\circ\text{K}$] et R est la constante du gaz parfait, voir le tableau A.5.

$$\text{Où : } R = \frac{r}{M} = \frac{\text{Constante molaire des gaz parfaits}}{\text{Masse molaire}} = \frac{8,314}{M} \quad [\text{J/kg. K}]$$

Pour l'air à $T = 20^\circ\text{C}$ et $P =$ pression atmosphérique, la masse volumique (ρ) est $1,202 \text{ kg/m}^3$. Pour d'autres valeurs de T° , la masse volumique de l'air change. Voir le tableau A.2.

- L'inverse de la masse volumique par unité de masse est appelé le volume spécifique.

1.2.2 Poids volumique (ϖ)

Le poids volumique (ou le poids spécifique) est le poids par unité de volume :

$$\varpi = \rho \cdot g \quad [\text{N/m}^3] \quad (1-3)$$

Où : g est l'accélération de la gravitation en [m/s^2], ρ est la masse volumique en [kg/m^3].

Le poids spécifique de l'eau est généralement égal à $1000 \times 9,81 \approx 10000 \text{ N/m}^3$.

1.2.3 Densité (d)

La densité d'une substance est le rapport entre sa masse volumique et la masse volumique de référence dans les conditions standards.

- Pour un liquide :

$$d_{\text{liquide}} = \frac{\rho_{\text{solide ou liquide}}}{\rho_{\text{eau}}} \quad [\text{sans unité}] \quad (1-4)$$

- Pour un gaz :

$$d_{\text{gaz}} = \frac{\rho_{\text{sgaz}}}{\rho_{\text{air}}} \quad [\text{sans unité}] \quad (1-5)$$

La densité de l'eau est de 1,00 et celle du mercure est de 13,6.

- La densité des liquides nous informe sur la flottabilité de la substance.
 - Si ($d_{\text{liquide}} > 1$), la substance coule dans l'eau (Cas du Mercure) ;
 - Si ($d_{\text{liquide}} < 1$), la substance flotte (partiellement) sur l'eau (Cas de l'huile de table).
- De même pour les gaz :
 - Si ($d_{\text{gaz}} > 1$), la substance descend sur le sol (Cas de l'Oxygène) ;
 - Si ($d_{\text{gaz}} < 1$), la substance monte dans l'atmosphère (Cas d'Hydrogène).

1.2.4 Viscosité d'un fluide

1.2.4.1 Viscosité dynamique

La viscosité d'un fluide est la propriété moléculaire qui indique la présence des forces de résistance internes d'un fluide en mouvement.

Pour donner plus d'explication à la notion de viscosité, nous considérons deux grandes plaques parallèles séparées par un fluide d'une épaisseur e , voir la figure 1.3. Le fluide au contact de la plaque supérieure va adhérer à celle-ci et se déplace à la vitesse V , tandis que le fluide au contact de la plaque fixe aura une vitesse nulle.

L'expérience de Couette montre que la force de frottement (résistante) F est proportionnelle à la surface de la plaque S , à la vitesse V et inversement proportionnelle à la distance e . C.-à-d., $F \approx S \cdot \frac{V}{e}$

Couette a montré qu'il existe un coefficient μ qui ne dépend que du fluide, telle que la relation de la force de frottement devient : $F = \mu \cdot \frac{S \cdot V}{e}$

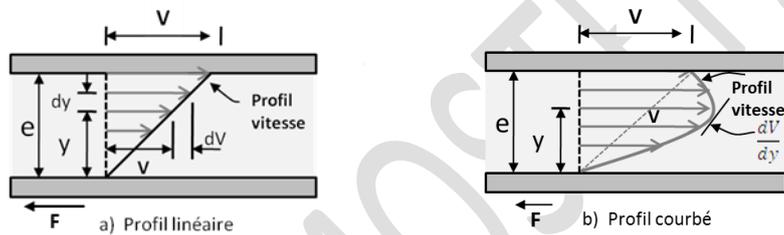


Figure 1.3 : Mouvement de fluide entre deux plaques.

Pour expliquer le phénomène à l'intérieur du liquide, nous considérons deux couches de fluide contiguës distante de Δy . La force de frottement F qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit ΔV , à leur surface S et inversement proportionnelle à Δy :

Pour une faible distance $\Delta y \rightarrow \partial y$ et la différence de vitesse $\Delta V \rightarrow \partial V$, dans ce cas, la formule des contraintes de frottement devient :

$$\frac{F}{S} = \mu \frac{\partial V}{\partial y} \quad \text{où} \quad \mu = \frac{F/S}{\partial V/\partial y} \quad [\text{N.s/m}^2] \quad (1-6)$$

μ : est la viscosité dynamique, en système SI, l'unité est le Poiseuille (Pa.s), ou (N.s/m²)

En système (CGS), l'unité est le poise, tel que 1 poise $\approx 0,1 \text{ N.s/m}^2$.

Pour l'eau à 20° C, la viscosité dynamique est $\mu \approx 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$. Voir le Tableau A.1.

1.2.4.2 Viscosité cinématique :

Ce paramètre ν est le quotient de la viscosité dynamique μ par la masse volumique ρ du fluide. Il représente la capacité de rétention des particules du fluide et il quantifie sa capacité à s'épancher.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (1-7)$$

En système (CGS), l'unité est le stokes. Un stokes est égal à $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Pour l'eau à 20° C, la viscosité cinématique est $\nu \approx 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Pour d'autres fluides, voir le tableau A.1.

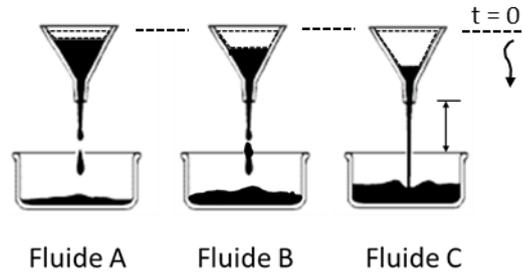


Figure 1.4 : Expérience simple montrant l'effet de la viscosité cinématique sur l'écoulement d'un fluide.

Quelques valeurs de viscosité (μ) à 20°C.

Substance	μ [N.S/m ²]	ν [m ² /s]
Eau	$1,005 \cdot 10^{-3}$	$1,007 \cdot 10^{-6}$
Air	$18,5 \cdot 10^{-6}$	$15,6 \cdot 10^{-6}$

Tableau 1.2 : Viscosité dynamique et cinématique de l'eau et l'air.

1.2.5 Fluide newtonien :

Pour lequel le taux de déformation d'un fluide ($\frac{V}{e} \approx \frac{\partial V}{\partial y}$) est proportionnel à la contrainte de cisaillement ($\tau = \frac{F}{S}$) est appelé fluide newtonien.

La figure suivante indique les lois de comportement des fluides newtoniens et non-newtoniens.

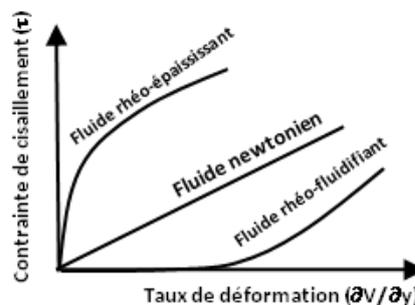


Figure 1.5 : Relation entre la contrainte et le taux de déformation pour différents fluides.

La figure 1.6 permet de déterminer le coefficient de viscosité dynamique pour quelques fluides newtoniens.

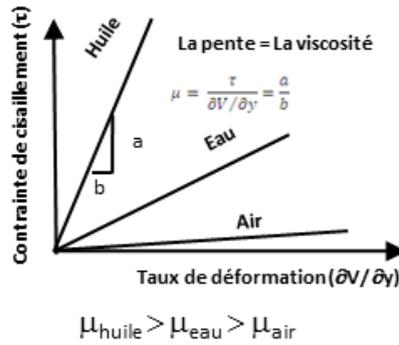


Figure 1.6 : Evolution de la contrainte en fonction du taux de déformation permettant de déterminer le coefficient de viscosité de certains fluides newtoniens.

Diverses valeurs de viscosité sont présentées dans le Tableau A.3.

Remarque

La viscosité dynamique des liquides diminue lorsque la température augmente. Contrairement à celle des liquides, la viscosité des gaz augmente avec la température, voir la figure 1.7.

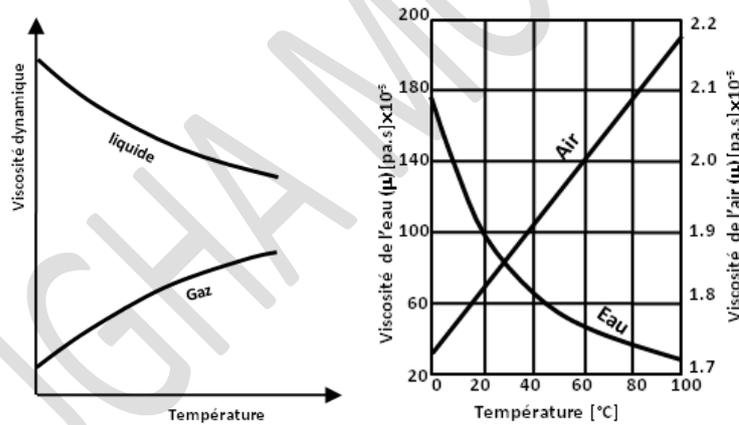


Figure 1.7 : Variation de la viscosité dynamique en fonction de la température (T°).

Remarque

Dans ce qui suit, on considère particulièrement les fluides newtoniens.

1.2.5 Tension superficielle (σ)

La tension superficielle est la force par unité de longueur qui s'exerce sur tout élément de ligne faisant partie de la surface de séparation entre deux milieux fluides non miscibles. La tension superficielle résulte des différences entre les interactions entre les molécules du liquide situées sous l'interface et celles entre les molécules situées au sein du liquide. Il s'agit d'une énergie par unité de surface ou une force par unité de longueur.

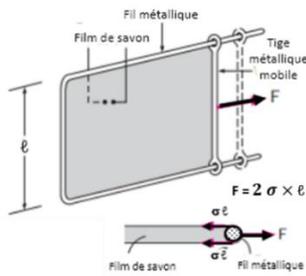


Figure 1.8 : La tension de surface crée une force normale à la tige.

Le phénomène provoque la tension superficielle dont la direction est perpendiculaire à la surface de séparation. Généralement, on désigne la tension superficielle (σ) par unité de longueur d'une ligne quelconque de la surface de séparation.

$$\sigma = F/\ell \quad [N/m] \quad (1-8)$$

Dans cette formule F est la force élastique perpendiculaire à tout élément ℓ de la surface, voir la figure 1.8.

Dans le tableau 1.3, sont indiquées des valeurs de σ pour quelques substances.

Liquide	Surface liquide	Tension superficielle [N/m]
Mercure	Air	476×10^{-3}
Mercure	Eau	373×10^{-3}
Eau	Air	$72,8 \times 10^{-3}$
Chlore	Air	34×10^{-3}
Ethanol	Air	23×10^{-3}
Azote	Air	9×10^{-3}
Glycérine	Air	63×10^{-3}

Tableau 1.3 : La tension superficielle de quelques substances (sous la température de 20°C).

- Cas d'une bulle sur une surface plane :
Vu l'équilibre des forces, voir la figure 1.9.

Forces de pression = Forces capillaires

$$\Delta P \times \pi R^2 = 2 \times 2\pi R\sigma \quad \Delta P = 4\sigma \left(\frac{1}{R}\right) \quad (\text{Loi de Laplace})$$

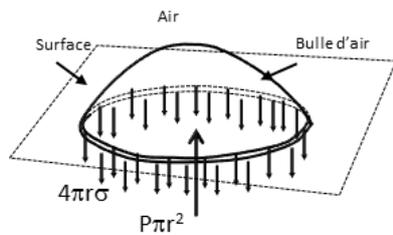


Figure I.9 : Présence de la force de tension de surface sur une bulle de gaz

- Cas d'une gouttelette de liquide sur une surface plane
Même principe à appliquer, voir la figure 1.10.

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R}$$

(Loi de Laplace)

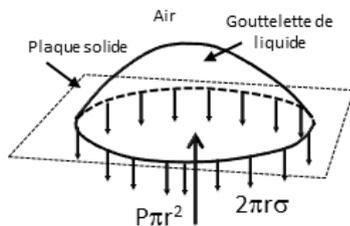


Figure I.10 : Présence de la force de tension de surface sur une gouttelette de liquide

- Cas d'une surface avec différentes courbures dans les deux directions perpendiculaires (par exemple, cas d'un ellipsoïde), l'expression de Laplace est réécrite comme suit :

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

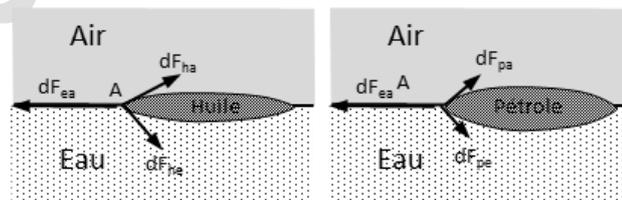


Figure I.11 : Présence de gouttelette d'huile/pétrole sur la surface libre de l'eau en contact de l'air.

- La figure suivante indique la relation entre la tension de surface et la propreté de la plaque en verre en présence d'une gouttelette d'eau.

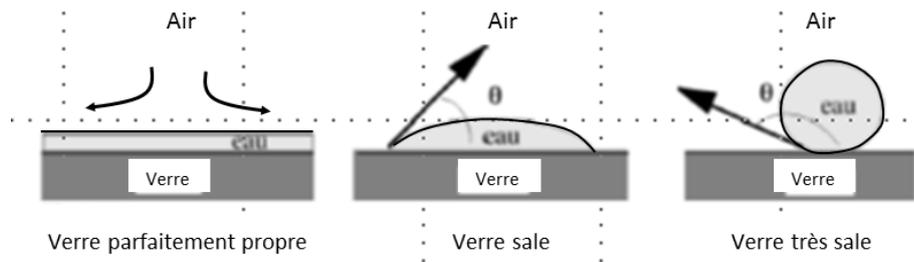


Figure 1.12 : Tension de surface de l'eau sur une plaque en verre.

- Les photos suivantes montrent le phénomène de tension de surface sur les insectes et les objets.

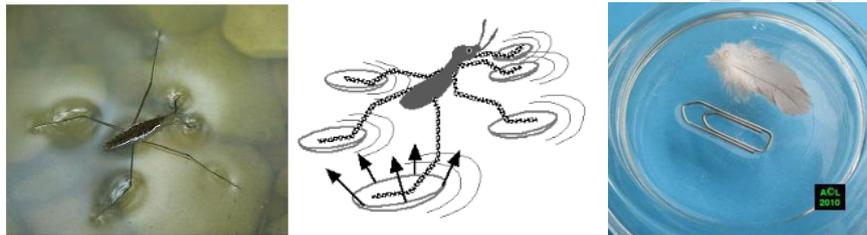


Figure 1.9 : Tension de surface crée une force normale à la tige.

1.2.6 Capillarité (h)

L'ascension d'un liquide dans un tube capillaire est provoquée par la tension superficielle et dépend des grandeurs relatives de la cohésion du liquide et de son adhésion aux parois du récipient.

Les liquides s'élèvent dans les tubes qu'ils mouillent (la force d'adhésion supérieure à la force de cohésion) et s'enfoncent dans les tubes qu'ils ne mouillent pas (la cohésion supérieure à l'adhésion).

La capillarité est importante lorsqu'on utilise des tubes de diamètre inférieur à 10 mm.

La capillarité est négligeable pour les tubes de diamètre supérieur à 12 mm.

On a approximativement :

$$h = \frac{2\sigma}{\varpi \cdot r} \cdot \cos(\theta) \quad [m] \quad (1-9)$$

Avec : σ est la tension superficielle $[N/m]$, θ est l'angle de raccordement ou de mouillage $[^\circ]$, r est le rayon du tube $[m]$, et ϖ est le poids volumique du liquide $[N/m^3]$.

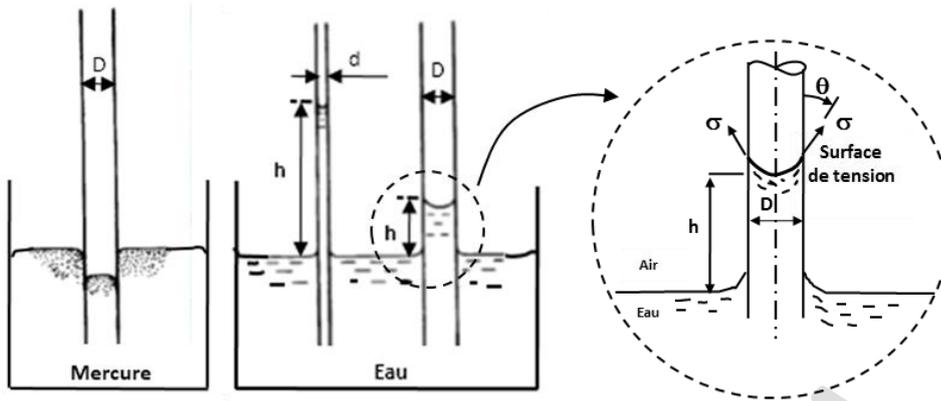


Figure 1.13 : La capillarité d'un tube circulaire en verre qui contient un liquide.

- Application : Ascension ou dépression capillaire

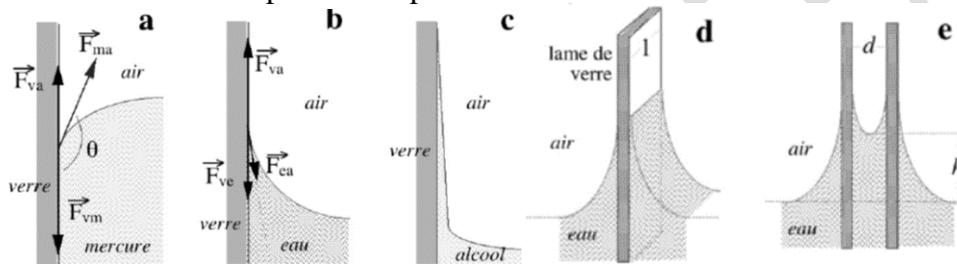


Figure 1.14 : Phénomène de tension de surface en présence d'une lame immergée dans un liquide.

1.2.7 Tension de vapeur d'eau (h_v)

La tension de vapeur est la pression que la vapeur exerce dans un milieu confiné. La tension de vapeur de saturation croît avec la température et devient égale à la pression atmosphérique au point d'ébullition.

L'atmosphère qui nous entoure exerce sur nous une pression de l'ordre 10^5 Pa. On peut mesurer cette pression par un dispositif simple. Un tube rempli de mercure est immergé dans un bassin, voir la figure 1.15. Après certain temps l'équilibre dans le tube est effectué, c.-à-d., on commence à apercevoir le vide à partir de 760 mm de la surface libre. La colonne de mercure qui reste dans le tube compense, donc la pression atmosphérique appliquée sur la surface libre.

La figure suivante explique le lien entre la colonne de mercure et la pression atmosphérique qui varie en fonction de l'altitude.

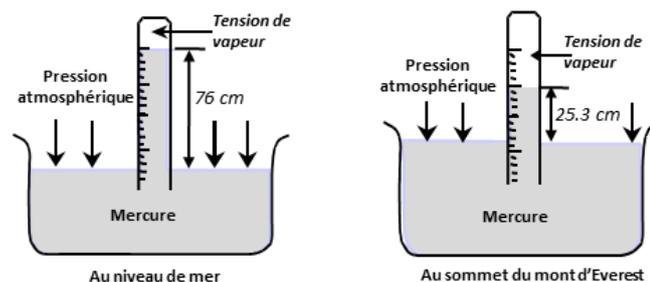


Figure 1.15 : Expérience indiquant le principe du baromètre pour mesurer la pression atmosphérique.

1.2.8 Compressibilité (χ)

Ce paramètre traduit la souplesse d'un fluide vis-à-vis de la compression.

La compressibilité est le rapport de variation relative de volume $\frac{\Delta V}{V}$ à la variation de pression ΔP , voir la figure 1.16.

$$\chi = -\frac{\Delta V/V}{\Delta P} \quad \text{à } T^\circ = \text{Cte} \quad [m^2/N] \quad (1-10)$$

Avec :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_2 - V_1}{V_1} ; \Delta p = p_2 - p_1$$

Le fluide peut être considéré comme un milieu élastique, la présence d'une différence de pression peut comprimer les fluides et les volumes comprimés retournent à leurs volumes initiaux une fois la pression appliquée supprimée. Le signe moins exprime la diminution de volume.

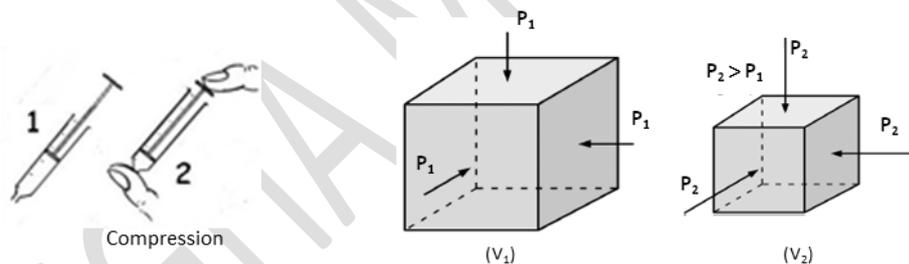


Figure 1.16 : Phénomène de compressibilité des fluides.

Pour l'eau, une variation de pression de $22 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ provoquera une variation de volume d'environ 1 %.

Pour l'air au $T^\circ = 15^\circ$: $\chi = 0,885 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$, voir le tableau A.4.

Remarque

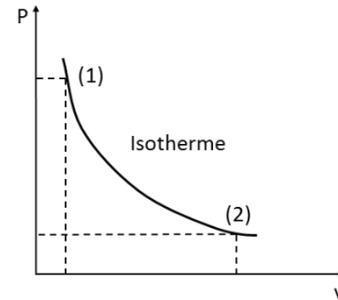
Le coefficient d'élasticité (**E**) d'un fluide représente l'inverse de la compressibilité $E = 1/\chi$

1.2.9 Condition isotherme

Pour un gaz parfait dans un milieu isotherme ($T^\circ = Cte$), le produit $P \times V$ reste constant.

Lors d'une transformation de l'état (1) vers l'état (2), la condition est :

$$p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2 \quad \text{et} \quad \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_2}{\rho_2} = Cte \quad (1-11)$$



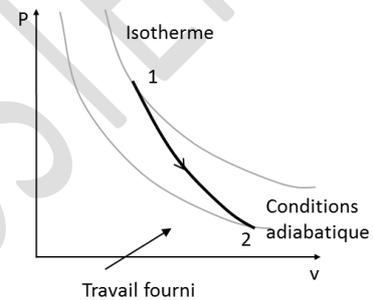
1.2.10 Conditions adiabatiques

Dans le cas d'absence d'échange de chaleur entre le gaz et son environnement externe, les équations sont ainsi modifiées :

$$p_1 \times V_1^k = p_2 \times V_2^k \quad \text{Ou} \quad \frac{p_1}{\rho_1^k} = \frac{p_2}{\rho_2^k} = Ct \quad (1-12)$$

$$\text{Avec :} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k} \quad ; \quad k = \frac{C_P}{C_V}$$

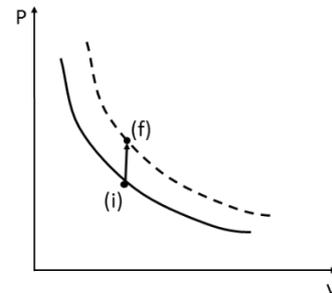
C_P , C_V sont les coefficients de la chaleur spécifique pour $P = Cte$ et $V = Ct$ respectivement. k est l'exposant adiabatique, voir le tableau A.5.



1.2.11 Condition isochore (Isovolume)

Dans le cas d'un volume de gaz parfait dans un milieu confiné et qui vérifie la condition suivante :

$$\text{Travail (W)} = \int_{V_i}^{V_f} P \cdot dV = \int_{V_f}^{V_i} P \cdot dV = 0 \quad (1-13)$$



1.2.12 Vitesse de propagation d'une onde de pression

La possibilité de compresser un fluide est à l'origine une onde (de surpression ou de dépression) dans le milieu considéré. La vitesse de propagation de l'onde est appelée la célérité. La valeur de cette vitesse dans le fluide dépend de la valeur de sa compressibilité par la formule suivante :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho \chi}} \quad (1-14)$$

Dans un gaz parfait : $c = \sqrt{k \cdot R \cdot T}$, R : constante du gaz parfait, T : température.

Pour l'eau $c_{\text{eau}} \approx 1470$ m/s et pour l'air $c_{\text{air}} \approx 300$ m/s.

1.3 Résumé des formules importantes du chapitre

Masse volumique $\rho = \frac{\text{Masse de matière}}{\text{Volume de matière}}$ (1-1)

Loi des gaz parfaits $\rho = \frac{P}{R.T}$ (1-2)

Fluide newtonien $\frac{F}{S} = \mu \frac{\partial V}{\partial y}$ (1-6)

Capillarité des tubes $h = \frac{2\sigma}{\rho \cdot r} \cdot \cos(\theta)$ (1-9)

Compressibilité $\chi = -\frac{\Delta V/V}{\Delta P}$ (1-10)
