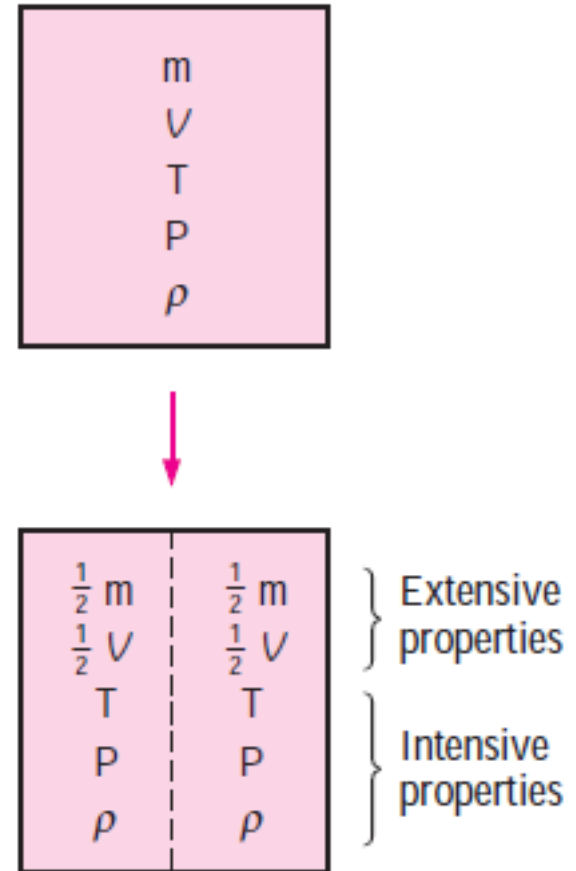

Chapitre 2

Propriétés des Fluides

2.1 INTRODUCTION

- Caractéristique d'un système = propriété (pression, température, volume, masse, viscosité, module d'élasticité, ...)
- Propriétés peuvent être extensives ou intensives
- Propriétés intensives sont indépendantes de la masse (pression, masse volumique, température)
- Propriétés extensives dépendent de la grandeur du système (masse, volume)
- Propriétés extensives par unité de masse = propriétés spécifiques ($v = V/m$, $e = E/m$).



2.2 MILIEU CONTINU

- ▶ Comme les solides, les fluides ont 3 propriétés de base : (1) grand nombre de molécules, (2) molécules possèdent un mouvement thermique aléatoire, (3) existence de force moléculaire entre les molécules
- ▶ Fluide = milieu continu : on assume que le fluide est composé des particules et non des molécules \Rightarrow toutes les propriétés des particules du fluide sont des fonctions continues de l'espace et du temps (x, y, z, t) .

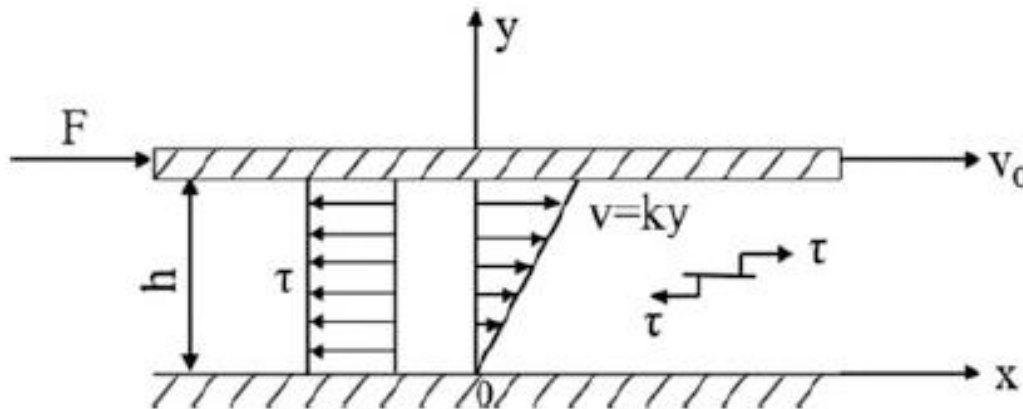
2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

- Masse volumique (ρ) & poids spécifique (γ)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$$

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad \gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV}$$

- Viscosité : résistance du fluide à s'écouler suite à son frottement interne
 - Loi de viscosité de Newton (distribution de vitesse linéaire)



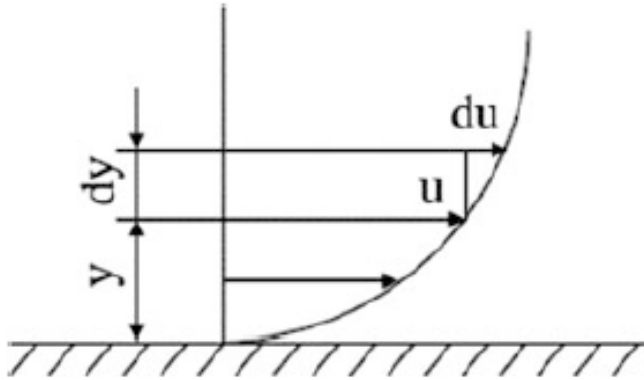
$$\tau = \mu \frac{v_0}{h}$$

μ : viscosité dynamique (Pa.s)

τ : contrainte de cisaillement

2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

- Viscosité : résistance du fluide à s'écouler suite à son frottement interne
 - Loi de viscosité de Newton (distribution de vitesse non linéaire)



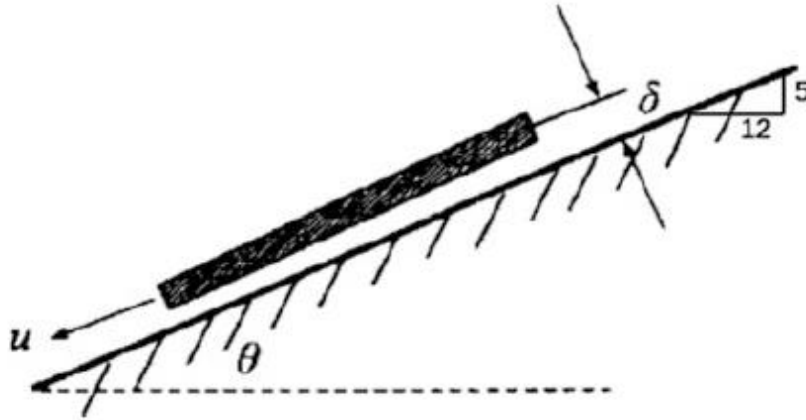
$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dy}$$

$\frac{du}{dy}$: gradient de vitesse (taux de cisaillement)

- Viscosité cinématique (m^2/s) : $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

Exemple 1 Une plaque de 1 cm de hauteur, section de 40 x 45 cm² et 5 kg de masse; vitesse de la plaque est 1 m/s et épaisseur de l'huile 1 mm. Calculer la viscosité dynamique de l'huile si gradient de vitesse est linéaire.



2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

- Relations entre viscosité et température (relations empiriques)

$$\mu = \mu_0 e^{-\lambda(t-t_0)},$$

μ_0 = viscosité à t_0 , λ = coefficient reflétant taux de variation de viscosité avec température

$$\mu = \mu_0 \frac{1 + \frac{C}{273}}{1 + \frac{C}{T}} \sqrt{\frac{T}{273}}$$

μ_0 = viscosité à 0 °C, T température en K, C une constante

Gas	Air	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Steam	Carbon dioxide	Carbon monoxide
C	122	83	110	102	961	260	100

- Fluide idéal : fluide dans lequel il n'y a pas de frottement $\Rightarrow \mu = \nu = 0$

2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

Valeurs de viscosité de l'eau et de l'air

Temp. t (°C)	Water		Air	
	μ (Pa s)	ν (m ² /s)	μ (Pa s)	ν (m ² /s)
0	1.792×10^{-3}	1.792×10^{-6}	0.0172×10^{-3}	13.7×10^{-6}
10	1.308×10^{-3}	1.308×10^{-6}	0.0178×10^{-3}	14.7×10^{-6}
20	1.005×10^{-3}	1.005×10^{-6}	0.0183×10^{-3}	15.3×10^{-6}
30	0.801×10^{-3}	0.801×10^{-6}	0.0187×10^{-3}	16.6×10^{-6}
40	0.656×10^{-3}	0.661×10^{-6}	0.0192×10^{-3}	17.6×10^{-6}
50	0.549×10^{-3}	0.556×10^{-6}	0.0196×10^{-3}	18.6×10^{-6}
60	0.469×10^{-3}	0.477×10^{-6}	0.0201×10^{-3}	19.6×10^{-6}
70	0.406×10^{-3}	0.415×10^{-6}	0.0204×10^{-3}	20.6×10^{-6}
80	0.357×10^{-3}	0.367×10^{-6}	0.0210×10^{-3}	21.7×10^{-6}
90	0.317×10^{-3}	0.328×10^{-6}	0.0216×10^{-3}	22.9×10^{-6}
100	0.284×10^{-3}	0.296×10^{-6}	0.0218×10^{-3}	23.6×10^{-6}

2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

► Compressibilité et expansibilité

Masse volumique d'un fluide varie en fonction de température & pression \Rightarrow volume occupé par un fluide varie en fonction de température et pression.

- Coefficient de compression : variation relative de volume causée par changement de pression à température constante

$$C_L = -\frac{\frac{dv}{v}}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \text{ m}^2/\text{N}$$

$$C_L = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \text{ m}^2/\text{N},$$

- Module E = inverse du coefficient de compression

$$E = \frac{1}{C_L} \text{ N/m}^2$$

2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

- Expansibilité : variation relative de volume suite au changement de température à pression constante

$$\beta_t = \frac{\frac{dv}{v}}{dt} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} 1/^{\circ}\text{C}$$

Valeurs d'expansibilité de l'eau (faibles valeurs)

Pressure/MPa	Temperature (°C)				
	1–10	10–20	40–50	60–70	90–100
0.1	0.14×10^{-4}	1.50×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.56×10^{-4}	7.19×10^{-4}
10	0.43×10^{-4}	1.65×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.48×10^{-4}	7.04×10^{-4}
20	0.72×10^{-4}	1.83×10^{-4}	4.26×10^{-4}	5.39×10^{-4}	–
50	1.49×10^{-4}	2.36×10^{-4}	4.29×10^{-4}	5.23×10^{-4}	6.61×10^{-4}
90	2.29×10^{-4}	2.89×10^{-4}	4.37×10^{-4}	5.14×10^{-4}	6.21×10^{-4}

Gaz : volume gaz change énormément en fonction de température et pression.

$$pV = mRT \text{ or } p = \rho RT,$$

p = pression absolue, $R = R_u/M$, R = constante du gaz, R_u = constante universelle des gaz

$$R_u = 8.314 \text{ kJ/kmol.K}$$

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273$$

2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

Masse molaire, constante de gaz des quelques substances

Molar mass, gas constant, and ideal-gas specific heats of some substances

Substance	Molar Mass M , kg/kmol	Gas Constant R , kJ/kg · K*	Specific Heat Data at 25°C		
			c_p , kJ/kg · K	c_v , kJ/kg · K	$k = c_p/c_v$
Air	28.97	0.2870	1.005	0.7180	1.400
Ammonia, NH ₃	17.03	0.4882	2.093	1.605	1.304
Argon, Ar	39.95	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Bromine, Br ₂	159.81	0.05202	0.2253	0.1732	1.300
Isobutane, C ₄ H ₁₀	58.12	0.1430	1.663	1.520	1.094
<i>n</i> -Butane, C ₄ H ₁₀	58.12	0.1430	1.694	1.551	1.092
Carbon dioxide, CO ₂	44.01	0.1889	0.8439	0.6550	1.288
Carbon monoxide, CO	28.01	0.2968	1.039	0.7417	1.400
Chlorine, Cl ₂	70.905	0.1173	0.4781	0.3608	1.325
Chlorodifluoromethane (R-22), CHClF ₂	86.47	0.09615	0.6496	0.5535	1.174
Ethane, C ₂ H ₆	30.070	0.2765	1.744	1.468	1.188
Ethylene, C ₂ H ₄	28.054	0.2964	1.527	1.231	1.241
Fluorine, F ₂	38.00	0.2187	0.8237	0.6050	1.362
Helium, He	4.003	2.077	5.193	3.116	1.667
<i>n</i> -Heptane, C ₇ H ₁₆	100.20	0.08297	1.649	1.566	1.053
<i>n</i> -Hexane, C ₆ H ₁₄	86.18	0.09647	1.654	1.558	1.062
Hydrogen, H ₂	2.016	4.124	14.30	10.18	1.405
Krypton, Kr	83.80	0.09921	0.2480	0.1488	1.667
Methane, CH ₄	16.04	0.5182	2.226	1.708	1.303
Neon, Ne	20.183	0.4119	1.030	0.6180	1.667
Nitrogen, N ₂	28.01	0.2968	1.040	0.7429	1.400
Nitric oxide, NO	30.006	0.2771	0.9992	0.7221	1.384
Nitrogen dioxide, NO ₂	46.006	0.1889	0.8060	0.6171	1.306
Oxygen, O ₂	32.00	0.2598	0.9180	0.6582	1.395
<i>n</i> -Pentane, C ₅ H ₁₂	72.15	0.1152	1.664	1.549	1.074
Propane, C ₃ H ₈	44.097	0.1885	1.669	1.480	1.127
Propylene, C ₃ H ₆	42.08	0.1976	1.531	1.333	1.148
Steam, H ₂ O	18.015	0.4615	1.865	1.403	1.329
Sulfur dioxide, SO ₂	64.06	0.1298	0.6228	0.4930	1.263
Tetrachloromethane, CCl ₄	153.82	0.05405	0.5415	0.4875	1.111
Tetrafluoroethane (R-134a), C ₂ H ₂ F ₄	102.03	0.08149	0.8334	0.7519	1.108
Trifluoroethane (R-143a), C ₂ H ₃ F ₃	84.04	0.09893	0.9291	0.8302	1.119
Xenon, Xe	131.30	0.06332	0.1583	0.09499	1.667

2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

Valeurs de module E de l'eau à température et pression donnée

Temp. (°C)	Pressure/MPa				
	0.5	1	2	4	8
0	1.852×10^9	1.862×10^9	1.882×10^9	1.911×10^9	1.940×10^9
5	1.891×10^9	1.911×10^9	1.931×10^9	1.970×10^9	2.030×10^9
10	1.911×10^9	1.931×10^9	1.970×10^9	2.009×10^9	2.078×10^9
15	1.931×10^9	1.960×10^9	1.985×10^9	2.048×10^9	2.127×10^9
20	1.940×10^9	1.980×10^9	2.019×10^9	2.078×10^9	2.173×10^9

Exemple 2 Condensation d'un liquide dans un récipient. À une pression de 10^6 Pa, le volume du liquide est 1 L. Quand la pression passe à 2×10^6 Pa, le volume du liquide devient 995 cm^3 . Trouver le module E.

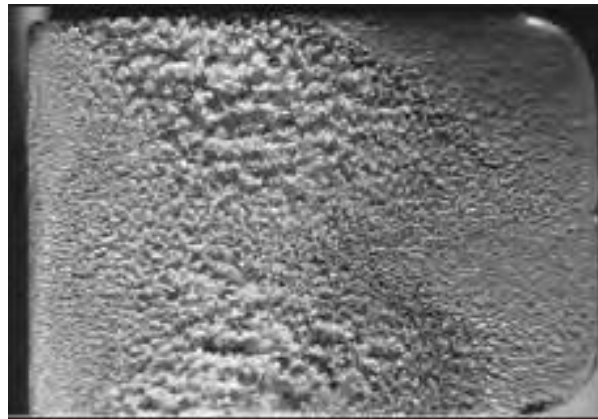
2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

Exemple 3 Déterminer la masse volumique, la densité (masse volumique relative) et la masse de l'air dans une salle de dimensions 4 m x 5 m x 6 m à 100 kPa et 25 °C.

2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

► Pression de vapeur & Cavitation

- Température à saturation (T_{sat}) : température à laquelle une substance change de phase à une pression donnée
- Pression à saturation (P_{sat}) : pression à laquelle une substance pure change de phase à une température donnée
- Pression de vapeur (P_v) d'une substance pure : pression exercée par sa vapeur en équilibre de phase avec son liquide à une température donnée $\Rightarrow P_v = P_{\text{sat}}$
- Pression partielle : pression d'un gaz ou de vapeur dans un mélange avec d'autres gaz
- Cavitation : bulles de vapeur (bulles de cavitation) forment des cavités dans le liquide génèrent des ondes d'extrêmes pressions (créent de l'érosion sur les pales de turbines)



2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

► Pression de vapeur & Cavitation

Pression à saturation ou pression de vapeur de l'eau à différentes températures

Temperature $T, ^\circ\text{C}$	Saturation Pressure $P_{\text{sat}}, \text{kPa}$
-10	0.260
-5	0.403
0	0.611
5	0.872
10	1.23
15	1.71
20	2.34
25	3.17
30	4.25
40	7.38
50	12.35
100	101.3 (1 atm)
150	475.8
200	1554
250	3973
300	8581

Exemple 4 Dans un système de distribution d'eau, la température de l'eau est 30 °C. Déterminer la pression minimale permise dans le système afin d'éviter la cavitation.

2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

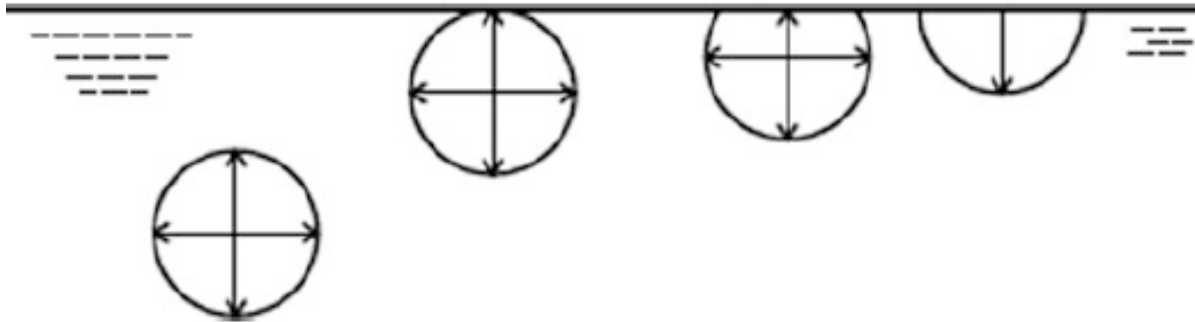
► Tension superficielle

– Tension superficielle :

- Molécules de liquide sous la surface agissent les unes avec les autres au moyen des forces égales dans toutes les directions
- Molécules près de la surface ont une forte attraction que celles sous la surface \Rightarrow tension donnée par :

$$T = \sigma L,$$

σ = tension superficielle (N/m), L = longueur



2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

► Tension superficielle

- Valeurs de tension superficielle de quelques liquides à 20 °C

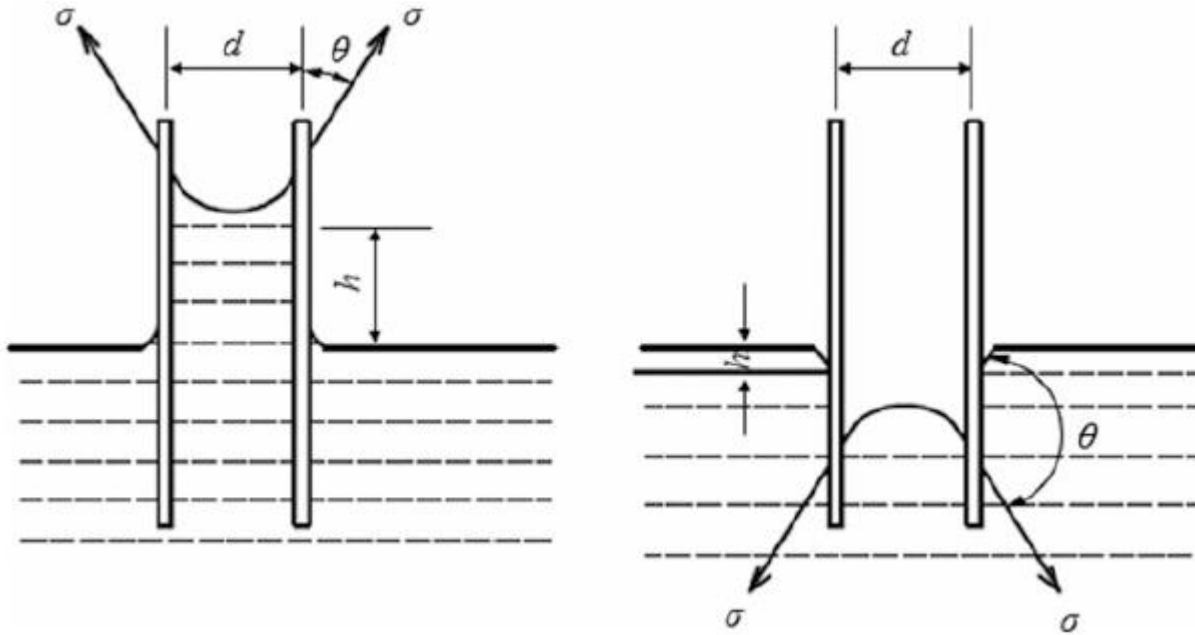
Liquids	Surface tension σ (N/m)	Liquids	Surface tension σ (N/m)
Alcohol	0.0223	Water	0.0731
Benzene	0.0289	Mercury	
Carbon tetrachloride	0.0267	With air	0.5137
Kerosene	0.0233–0.0321	With water	0.3926
Lubricant	0.0350–0.0379	With vacuum	0.4857
Crude oil	0.0233–0.0379		

2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

► Tension superficielle

– Capillarité :

- Tension superficielle = base du phénomène de capillarité



- Équilibre des forces : $\pi d \sigma \cos \theta = \rho g h \pi d^2 / 4$

- Hauteur capillaire :
$$h = \frac{4 \sigma \cos \theta}{\rho g d}$$

2.3 PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

► Tension superficielle

- Effets de tension superficielle sont négligeables dans plusieurs applications macroscopiques en ingénierie; mais plus importants dans applications microscopiques (études en nanotechnologies).