

## الفصل الأول: خواص الموائع

### Chapitre1 : Propriétés des fluides

#### 1 المقدمة:

ميكانيكا الموائع وهي دراسة سكون أو حركة الموائع:

- في الحالة الاولى ندرس سكون أو توازن الموائع كما في الخزانات السدود.
- أثناء الحركة، اين نتحدث عن ديناميكا الموائع في الانابيب المحركات وكذلك الكائنات الحية.

تدرس ميكانيكا الموائع أيضًا تأثيرات السوائل على الحدود التي يمكن أن تكون :

- أسطحًا صلبة مثل الأنابيب والسدود والخزانات وغيرها.
- واجهات مع سوائل أخرى مثل مخاليط الغازات - السوائل الغاز - الغاز، إلخ.

عدد التطبيقات التي تنطوي على الموائع في الهندسة هائل، نذكر على سبيل المثال: التنفس، تدفق الدم، السباحة، المضخات، المراوح، الطائرات، القوارب، الأنهار، الأنابيب، الصواريخ، الجبال الجليدية، المحركات، المرشحات، ...

#### 1) Introduction :

La Mécanique Des Fluides (MDF) c'est l'étude des fluides :

- Au repos, c'est la statique des fluides.
- En mouvement, on parle alors de la dynamique des fluides. La MDF étudie aussi les effets des fluides sur les limites qui peuvent être des :
- Surfaces solides comme les conduites, les barrages, réservoirs,...
- Interfaces avec d'autres fluides comme les mélanges gaz-liquides, gaz-gaz,...

Le nombre d'applications faisant intervenir les fluides en engineering est énorme, on cite par exemple :

La respiration, l'écoulement du sang, la natation, les pompes, les hélices, les ventilateurs, les avions, les bateaux, les rivières, les pipes, les missiles, les icebergs, les moteurs, les filtres et les jets,...



سد بني هارون  
Barrage Beni Haroun



اسطوانة هيدروليكية  
Vérin hydraulique



تدفق المياه  
Écoulement de l'eau

<p>تدفق الدم Ecoulement du sang</p>	<p>CFD (طائرة ، سيارة) CFD (avion, voiture)</p>	<p>محرك نفثات وخطوط الأنابيب Turboréacteur et pipelines</p>

يمكن للمرء أن يلاحظ أن معظم الأجسام الموجودة على الكوكب مائعة أو تتحرك بالقرب من الموائع. إن تدفق المائع هو فرع من فروع الميكانيكا، فهو يخضع لقوانين الميكانيكا.

العانقان الرئيسيان لميكانيكا الموائع هما:

- الهندسة المعقدة.
- تأثير اللزوجة.

في الهندسة المعقدة، من الصعب جدًا حل معادلات حركة المائع. تركز معظم الكتب على الأشكال الهندسية البسيطة مثل اللوحات أو الصفائح المسطحة والأنابيب الدائرية وغيرها من الأشكال الهندسية البسيطة. ومع ذلك، لا يزال من الممكن حل معادلات الأشكال الهندسية المعقدة عددًا عن طريق الكمبيوتر، وهذا الفرع من ميكانيكا الموائع يسمى CFD (ديناميكا السوائل الحاسوبية أو ميكانيكا السوائل العددية).

العقبة الثانية لميكانيكا الموائع هي اللزوجة وعملها، ولا يمكن إهمالها إلا في حالات السائل المثالي. إن تدخل اللزوجة يزعزع استقرار تدفق السوائل ويعطي تدفقات مضطربة مما يزيد من صعوبة المعادلات التي تصف الظاهرة.



مثال على الهندسة المعقدة  
Exemple de géométrie complexe



سوائل مختلفة اللزوجة  
Fluides à différentes viscosités

• On peut remarquer que la plupart des objets sur la planète sont fluides où se déplaçant près de fluides.

L'écoulement d'un fluide est une branche de la mécanique, il obéit aux lois de la mécanique.

Les deux grands obstacles de la théorie des fluides sont :

- Les géométries complexes.
- L'effet de la viscosité.

Dans les géométries complexes, les équations du mouvement d'un fluide sont très difficiles à résoudre. La plupart des livres se concentrent sur les géométries simples telles que les plaques, les tubes circulaires et d'autres géométries simples. Il reste cependant possible de résoudre les équations pour les géométries complexes numériquement par ordinateur, cette branche de la MDF est dite CFD (Computational Fluid Dynamics) ou mécanique des fluides numériques.

Le second obstacle de la MDF est la viscosité et son action, elle peut être négligée seulement dans les cas d'un fluide idéal. L'intervention de la viscosité déstabilise l'écoulement des fluides et donne des écoulements turbulents ce qui augmente la difficulté des équations qui décrivent le phénomène.

## (2) تعريف المائع

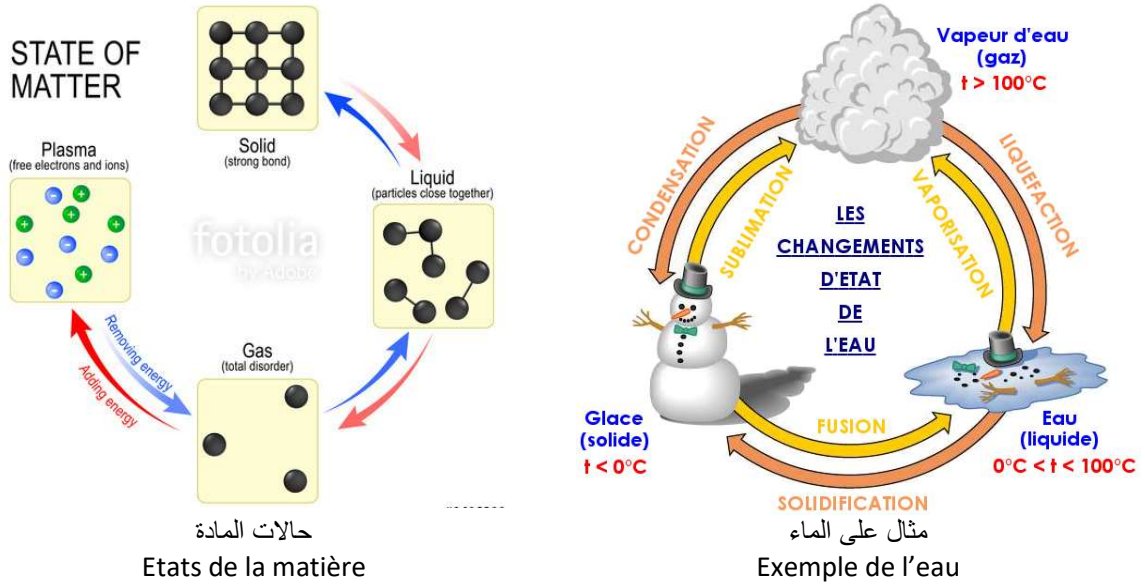
بشكل عام، توجد المادة في ثلاث حالات لجسم بسيط:

- الحالة الصلبة وهي مادة عند درجة حرارة منخفضة،
- السائلة وهي مادة عند درجة حرارة متوسطة وضغط مرتفع بدرجة كافية،
- الغازية وهي مادة عند درجة حرارة عالية بدرجة كافية وضغط منخفض.

## 2) Définition d'un fluide

En général, la matière existe en trois états pour un corps simple :

- Solide ou matériau à faible température,
- Liquide qui est un matériau à température moyenne et pression suffisamment élevée,
- Gaz ou matériau à température suffisamment élevée à faible pression.



الحالات الغازية والسائلة لها أوجه تشابه، يطلق عليها اسم الموائع. يحتوي المائع على الخصائص التالية:

- ليس لها شكلها الخاص، إذا وضعت في وعاء، فإنها تأخذ شكله.
- السائل له سطح حر في مجال الجاذبية، إذا وضعنا سائلاً في وعاء، فإننا نلاحظ واجهة واضحة مع الهواء تسمى السطح الحر، أما الغاز فيميل إلى شغل كل الحجم المتاح له، لذلك ليس للغاز سطح حر.
- المادة الصلبة يمكن أن تقاوم إجهاد التشويه أما السائل لا يمكن أن يقاوم أي إجهاد حتى وإن كان بسيطاً، حيث يولد تطبيقه حركة السائل. يتحرك الأخير ويتشوه باستمرار طالما يتم تطبيق إجهاد. كنتيجة، يمكن أن نقول أن السائل في حالة السكون يجب أن يكون في حالة إجهاد صفري.

كما رأينا، تنقسم الموائع إلى فئتين هما السوائل والغازات:

- يتكون السائل من جزيئات قريبة نسبياً ومكدسة بقوة تماسك قوية. يحاول الأخير الحفاظ على الحجم وتشكيل سطح حر في مجال الجاذبية.
- الغاز به جزيئات متباعدة مع قوى تماسك ضئيلة، يكون الغاز حرراً في التمدد حتى يشغل كل الحجم، ولا يمكن أن يشكل سطحاً حرّاً.

تتعلق معظم مشاكل هندسة ميكانيكا الموائع بما يلي:

- السوائل مثل الماء والزيت والزيئق والديزل والكحول....
- الغازات مثل الهواء والهيليوم والهيدروجين والبخار....

Les états gazeux et liquides présentent des similarités, on les appelle les fluides. Un fluide a les caractéristiques suivantes :

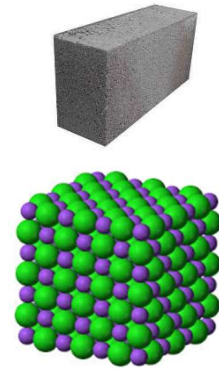
- Il n'a pas de forme propre, s'il est placé dans un récipient, il adopte la forme du récipient.
- Un liquide a une surface libre dans le champ de gravité, si on place un liquide dans un bol, on observe une interface nette avec l'air appelée surface libre. Un gaz a tendance à occuper tout le volume qui s'offre à lui, donc le gaz n'a pas de surface libre.



غاز يحتل حجماً  
Un gaz occupant un volume



السطح الحر من السائل  
Surface libre d'un liquide



جسم صلب  
Corp solide

- Un solide peut résister à une contrainte de déformation ; par contre le fluide ne peut pas. N'importe quelle contrainte même petite, appliquée au fluide, engendre un mouvement du fluide. Ce dernier se déplace et se déforme en continu tant que la contrainte est appliquée. Comme corolaire, ou peut dire qu'un fluide au repos doit être à l'état de contrainte de déformation nul.

Comme on a vu, les fluides se divisent en deux classes qui sont les liquides et les gaz :

- Un liquide est composé de molécules relativement proches et empilées avec des forces cohésives fortes. Ces dernières tentent à maintenir le volume et forment une surface libre dans le champ de gravité.
- Un gaz a des molécules espacées avec des forces cohésives négligeables, le gaz est libre de se détendre jusqu'à occuper tout de volume, il ne peut pas former une surface libre.

La plupart des problèmes d'engineering de mécanique des fluides concernent :

- Les liquides comme l'eau, l'huile, mercure, gasoil, l'alcool, ....
- Les gaz tels que l'air, l'hélium, hydrogène, la vapeur ....



### 3) Matières divisées : dispersions, suspensions, émulsions :

En réalité, les fluides (liquides ou gaz) ne sont jamais à l'état pur. Généralement, on rencontre des fluides ou des phases (mélanges) qui coexistent en équilibre thermodynamique. Dans les liquides, ces phases sont caractérisées par la présence de particules qui peuvent être des bulles de gaz, particules solides, gouttelettes, .... Ce mélange implique la présence d'une multitude d'interfaces entre le liquide (phase continue) et les particules (phase dispersée), qui peuvent radicalement changer la nature du mélange.

On peut classer les mélanges liquides-particules comme suit :

#### Les dispersions :

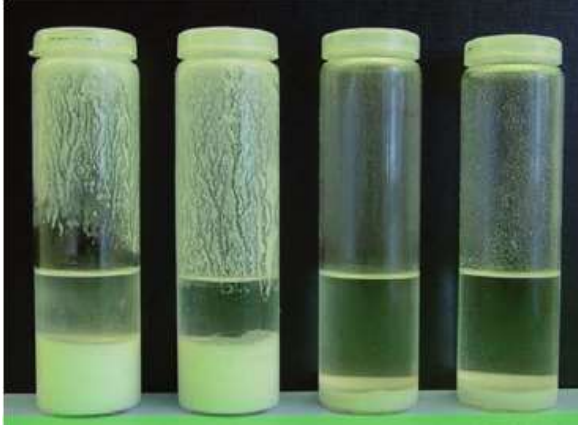
Ce sont des mélanges de particules très fines (taille inférieure à 1 micromètre ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$ )). Ce sont souvent des colloïdes de particules telles que les argiles. Les dispersions ne sédimentent (déposent) pas spontanément, par exemple, il est très difficile de filtrer une eau contenant des particules argileuses fines. En revanche, ce sont des mélanges très sensibles chimiquement à tout ce qui peut modifier la nature des interactions entre particules. Par exemple la modification du PH affecte le comportement des interfaces des particules ce qui produit des variations brutales du comportement mécanique à l'échelle macroscopique.



Dispersions qui ne sédimentent pas (colloïdes)

Les suspensions :

En général, les suspensions sont des particules fines où grossières (taille supérieure à  $1 \mu\text{m}$ ), sans interaction entre elles. Les suspensions se sédimentent et peuvent être filtrés mécaniquement. Elles sont peu sensibles aux variations chimiques du liquide.



Exemple de suspension



Exemple d'émulsion

Les émulsions :

Ce sont des mélanges de fines gouttelettes d'un liquide dans un autre. Les émulsions en gel sont des émulsions très concentrées où les gouttelettes ne peuvent quasiment pas se déplacer les unes par rapport aux autres. Puisque la plupart des liquides sont non miscibles, les émulsions sont très courantes. La physique de ces mélanges est dictée par le comportement des interfaces.

### (3) المائع المثالي والموائع الحقيقية:

لتعريف هذه الموائع نحتاج الى تبيان القوى المؤثرة فيها. يوجد في المائع نوعان من القوى: قوى تؤثر في الحجم وقوى تؤثر في السطح.

- قوى الحجم هي تلك الناتجة عن مجال ما، على سبيل المثال مجالات الجاذبية والكهرباء والمغناطيسية ...
- تنقسم قوى السطح إلى قوى احتكاك وضغط.
- قوى الاحتكاك ناتجة عن اللزوجة، فهي موازية للسطح.
- القوى الناتجة عن الضغط عمودية على السطح.

يعرف المائع المثالي بأنه مائع لا يوجد فيه احتكاك، أي أن اللزوجة صفرية أو لا تذكر. بالإضافة إلى ذلك، إذا تم إهمال قوى الحجم فهذا يعني أن القوى الداخلية في أي قسم من المائع عمودية على هذا القسم، حتى أثناء الحركة. إذا منشأ هذه القوى لا يمكن ان يكون الا الضغط. مثل هذا المائع غير موجود في الواقع.

المائع الحقيقي هو المائع الذي توجد فيه لزوجة مما ينتج عنه قوى الاحتكاك أثناء حركته (السريان، الجريان أو التدفق)، وهذا ما يعارض حركة الجزيئات.

#### 4) Fluide parfait et fluide réel :

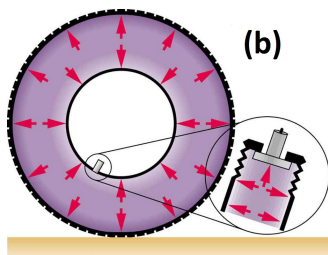
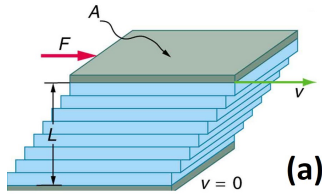
Dans un fluide il y a **deux types de forces** : Forces de **volume** et forces de **surface**.

- **Les forces de volume** sont celles engendrées par un **champ**, par exemple les champs de gravité, électrique, magnétique, ...
- **Les Forces de surface** se divisent en forces de frottement et de pression.
  - **Les forces de frottement** sont causées par la viscosité, elles sont tangentielles à la surface.
  - **Les forces produites par la pression** sont normales à la surface.

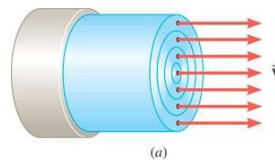
**Un fluide parfait** est un fluide où il n'y a **pas de frottement**, c'est-à-dire que la **viscosité est nulle** ou **négligeable**. Si en plus on néglige les forces de volume, cela implique que les forces internes à n'importe quelle section du fluide sont normales à cette section, même pendant le mouvement. Alors les forces sont engendrées par la pression, un tel fluide n'existe pas en réalité.



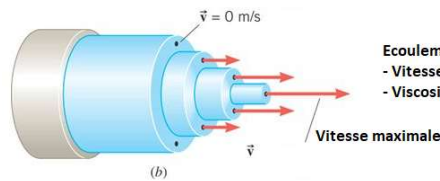
Un **fluide réel** est un fluide dans lequel les forces tangentielles ou de cisaillement sont présentes lors de son mouvement (écoulement), cela augmente le frottement du fluide, car ces forces s'opposent au mouvement des particules les unes par rapport aux autres. Ces forces de frottement sont dues à la viscosité du fluide.



(a) Force de frottement (b) Force de pression



Écoulement d'un fluide parfait:  
- Vitesse constante  
- Viscosité nulle



Écoulement d'un fluide réel :  
- Vitesse variable selon le rayon  
- Viscosité non nulle

(a) Fluide parfait (b) Fluide réel

#### 4 لزوجة المائع:

لزوجة المائع هو قياس مقاومته للتشوه الزاوي. تنتج قوى الاحتكاك في المائع عن التماسك وتبادل كمية الحركة -الزخم- بين جزيئات الموائع. بالنسبة للسوائل، فإن قوة التماسك بين الجزيئات هي السائدة. تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى تقليل هذه القوة، مما يقلل اللزوجة. من ناحية أخرى، بالنسبة للغازات، فإن تبادل الجزيئات بين الطبقات المختلفة هو السائد. يزداد هذا التبادل البيني مع درجة الحرارة التي تضع الجزيئات الساخنة السريعة على اتصال مع الجسيمات الباردة البطيئة. والنتيجة هي انخفاض الحركة العامة وزيادة اللزوجة.

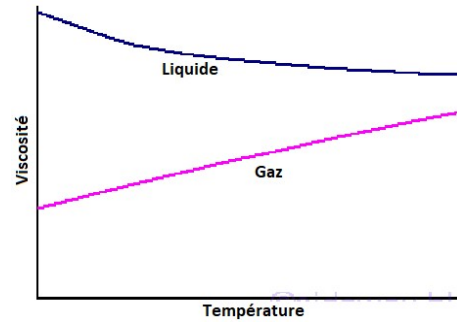
#### 4 Viscosité d'un fluide :

La viscosité d'un fluide et la mesure de sa résistance à la déformation angulaire. Les forces de frottement dans un fluide sont le résultat de la cohésion et l'échange de la quantité de mouvement entre les molécules du fluide. Pour les liquides, la force cohésive entre les molécules est prédominante. L'augmentation de la température diminue cette force, ce qui diminue la viscosité. Par contre pour les gaz c'est l'inter-échange des molécules entre les différentes couches qui prédomine. Cet inter-échange augmente avec la température ce qui met en contact les particules chaudes rapides avec celles froides lentes. Le résultat est la diminution du mouvement général et l'augmentation de la viscosité.

- عندما ترتفع درجة الحرارة:
- انخفاض لزوجة السوائل ،
  - زيادة لزوجة الغاز.

Lorsque la température augmente :

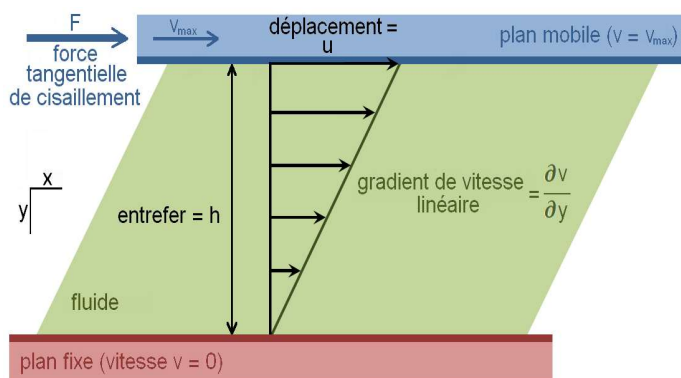
- La viscosité des liquides diminue,
- La viscosité des gaz augmente :



تباين اللزوجة كدالة لدرجة الحرارة  
Variation de la viscosité en fonction de la température

لدراسة ظاهرة اللزوجة، نأخذ لوحين متوازيين عريضين بدرجة كافية ذات السطح  $S$  ومفصولة بمسافة (فجوة)  $h$ ؛ يتم ملء الفراغ بين الألواح بمائع. تم تثبيت اللوحة السفلية، وتطبق القوة  $F$  على اللوحة العلوية التي تتحرك بسرعة  $v_{max}$  موازية للصفحة السفلية.

Pour étudier le phénomène de la viscosité, prenant deux plaques parallèles suffisamment larges de surface  $S$  et séparées par une distance (entrefer)  $h$ ; l'espace entre les plaques est remplie par un fluide. La plaque inférieure est fixe, on applique une force  $F$  à celle supérieure qui se met en mouvement avec une vitesse  $v=v_{max}$  parallèlement à la plaque inférieure.



لاحظ أن:  $F$  يتناسب مع  $S$ .  
On note que :  $F$  est proportionnelle à  $S$   
→  $F \propto S$   
Aussi  $F \propto v$   
et  $F \propto 1/h$   
→  $F \propto \frac{Sv}{h}$  d'ou :  
$$F = \mu \frac{Sv}{h}$$
  
مع معامل التناسب  $\mu$  يقال له اللزوجة.  
Avec  $\mu$  coefficient de proportionnalité est dit viscosité.

إذا كان توزيع السرعة بين اللوحين  $(y)$  خطياً، من الشكل والتشابه بين المثلثات، يمكننا استبدال  $v/h$  بـ  $\frac{\partial v}{\partial y}$  وهو تدرج السرعة. بإدخال ثابت التناسب يجعل من الممكن الحصول على إجهاد الاحتكاك بين طبقتين رفيفتين من السائل  $\tau$ :

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{v}{h} = \mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

يسمى  $\frac{\partial v}{\partial y}$  معدل التشوه الزاوي ويرمز له  $\dot{\gamma} = \frac{\partial v}{\partial y}$  وحدته هي  $(s / 1)$ .

تُقال المعادلة  $\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y}$  معادلة NEWTON للزوجية، ونحسب أيضًا  $\mu = \frac{\tau}{\frac{\partial v}{\partial y}}$

$\mu$  يسمى اللزوجة ، معامل اللزوجة ، اللزوجة المطلقة أو اللزوجة الديناميكية (تعني القوة).

يمكن تصنيف السوائل والمواد الصلبة من خلال تفاعلها مع ضغوط التشوه (القص). نحن نعلم أنه في المعادلة

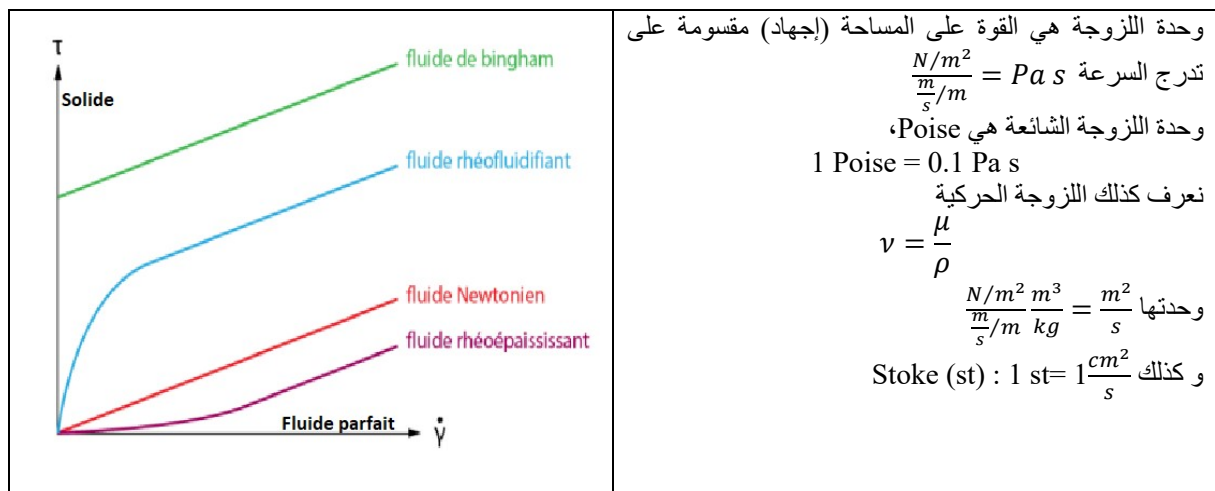
$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y} = \mu \dot{\gamma}$$

يتناسب إجهاد القص مع معدل التشوه الزاوي.

يقال إن المائع الذي لا تعتمد لزوجته على معدل التشوه الزاوي نيوتروني NEWTONIEN. يتم تمثيل إجهاد هذا

المائع بالخط المستقيم الذي يمر عبر المبدأ، وميله هو اللزوجة. بالنسبة للمائع المثالي تكون اللزوجة صفر والتي يمثلها المحور

الأفقي. من ناحية أخرى، يتم تمثيل المادة الصلبة المرنة بالمحور العمودي.



Si le profile  $v(y)$  est linéaire, de la figure et de la similarité des triangles, on peut remplacer  $v/h$  par  $\frac{\partial v}{\partial y}$  qui est le gradient de vitesse. On introduit une constante de proportionnalité  $\mu$ , cela permet d'obtenir la contrainte de frottements entre deux couches minces de fluide  $\tau$  avec :

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{v}{h} = \mu \frac{\partial v}{\partial y} \tag{1.1}$$

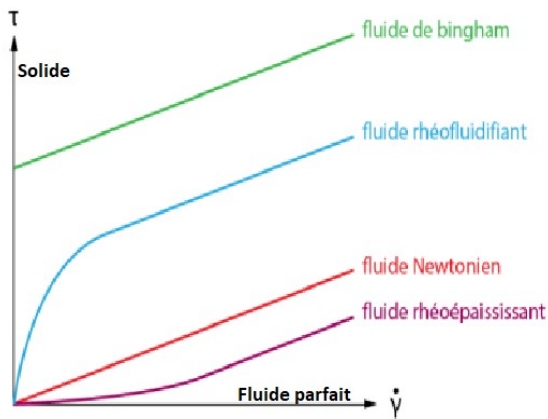
Le terme  $\frac{\partial v}{\partial y}$  est dit taux de déformation angulaire il est noté par  $\dot{\gamma} = \frac{\partial v}{\partial y}$  son unité est (1/s).

L'équation  $\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y}$  est dite de NEWTON de viscosité, on calcule aussi :  $\mu = \frac{\tau}{\frac{\partial v}{\partial y}}$ .

$\mu$  est dite viscosité, coefficient de viscosité, viscosité absolue ou viscosité dynamique (elle implique la force).

On peut classer les fluides et les solides par leurs réactions aux contraintes de déformation (cisaillement). On sait que dans l'équation  $\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y} = \mu \dot{\gamma}$  la contrainte de cisaillement est proportionnelle au taux de la déformation angulaire.

**Un fluide pour lequel la viscosité ne dépend pas du taux de déformation angulaire est dit Newtonien.** La contrainte pour ce fluide est représentée par la ligne droite qui passe par l'origine, sa pente est la viscosité. Pour le fluide parfait, la viscosité est nulle ce qui est représentée par l'axe horizontal. Par contre le solide élastique est représenté par l'axe vertical.



La dimension de la viscosité est la force par unité de surface (contrainte) divisée par le gradient de la vitesse :  $\frac{N/m^2}{m/s} = Pa \cdot s$ .

Une unité courante de la viscosité est le Poise :  
1 Poise = 0.1 Pa s

Dans plusieurs problèmes d'application le terme de viscosité divisé par la masse volumique est courant. On définit ainsi la viscosité cinématique par :  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  son unité  $\frac{N/m^2 \cdot m^3}{m/s \cdot kg} = \frac{m^2}{s}$

On utilise aussi le Stoke (st) : 1 st =  $1 \frac{cm^2}{s}$

### 5 الموانع القابلة للضغط والموانع غير القابلة للضغط:

تعريف الكتلة الحجمية والكثافة والجاذبية النوعية:

الكتلة الحجمية للمائع هي كتلته لكل وحدة حجم :

$$\rho = \frac{m}{V} \equiv \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

الحجم الكتلتي هو معكوس الكتلة الحجمية :

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} \equiv \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

بينما الثقل الحجمي هو وزنه لكل وحدة حجم :

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \frac{\rho V g}{V} = \rho g \equiv \left[ \frac{N}{m^3} \right]$$

إن الكتلة الحجمية بـ  $(kg/m^3)$  والثقل الحجمي بـ  $(N/m^3)$ .

كثافة السائل هي كتلته الحجمية مقسومة على الكتلة الحجمية المرجعية:

$$d = \frac{\rho_{\text{fluide}}}{\rho_{\text{ref}}}$$

في حالة الغازات، يتم استخدام الهواء كمرجع وفي حالة السوائل، يتم استخدام الماء. كثافة الماء عند 4 درجات مئوية هي 1 جم/سم<sup>3</sup> أو 1000 كجم/م<sup>3</sup>، وكثافة الهواء 1.225 كجم/م<sup>3</sup> عند 15 درجة مئوية. تتعامل ميكانيكا الموائع مع الموائع القابلة للضغط وغير القابلة للضغط، أي بكتلة حجمية متغيرة أو ثابتة. في الواقع لا توجد موائع غير قابلة للضغط، يتم تطبيق هذا المصطلح على الحالة التي يكون فيها تغير الكتلة الحجمية ضئيلاً، وهذا هو حال السوائل. يمكن أيضاً اعتبار الغازات غير قابلة للضغط إذا كان التغيير في الضغط صغيراً مقارنة بالضغط المطلق. بالنسبة للغازات، إذا لم تكن سرعة الجريان عالية جداً، فيمكن اعتبار الكتلة الحجمية ثابتة. من ناحية أخرى، إذا كانت السرعة عالية وتقترب من سرعة الصوت، فيعتبر الغاز قابلاً للضغط لأن الاختلاف في الكتلة الحجمية مرتفع. لقياس انضغاطية الموائع نستعمل معامل الانضغاط الذي يعطي فكرة عن هذه الخاصية.

## 5 Fluide compressible et fluide incompressible :

**Définition de la masse volumique, poids volumique et densité :**

La masse volumique d'un fluide est sa masse par unité de volume :  $\rho = \frac{m}{V} \equiv \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

Le volume massique est l'inverse de la masse volumique :  $v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} \equiv \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$

Tandis que le poids volumique est son poids par unité de volume :  $\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \frac{\rho Vg}{V} = \rho g \equiv \left[ \frac{N}{m^3} \right]$

Donc la masse volumique est en (kg/m<sup>3</sup>) et le poids volumique en (N/ m<sup>3</sup>).

La densité  $d$  d'un fluide est sa masse volumique divisée par une masse volumique de référence :

$$d = \frac{\rho_{\text{fluide}}}{\rho_{\text{ref}}}$$

Dans le cas des gaz on utilise l'air comme référence et dans le cas des liquides on utilise l'eau. La masse volumique de l'eau à 4°C est 1 g/cm<sup>3</sup> ou 1000 kg/m<sup>3</sup>, celle de l'air est 1.225 kg/m<sup>3</sup> à 15°C . Le terme « density » est utilisé dans les livres anglophones pour désigner la masse volumique.

La mécanique des fluides traite les fluides compressibles et incompressibles, c.à.d. avec masse volumique variable ou constante. En réalité il n'existe pas de fluides incompressibles, ce terme est appliqué pour le cas où la variation de la masse volumique est négligeable, c'est le cas des liquides. Les gaz aussi peuvent être considérés incompressibles si la variation de la pression est petite comparée à la pression absolue.

**Pour les gaz**, si la vitesse d'écoulement n'est pas très grande, la masse volumique peut être considérée constante. Par contre si la vitesse est importante et approche celle du son, le gaz est considéré comme compressible car la variation de la masse volumique est importante. Le module de compressibilité est une mesure qui caractérise la compressibilité des fluides.



انضغاط سائل وغاز



انضغاط الهواء الناتج عن السرعة الفوق صوتية

### 5.1 معامل الانضغاط للسوائل:

تتناسب قابلية انضغاط السائل عكسًا مع معامل الانضغاط الحجمي المعروف أيضًا بالمعامل العام، والذي يرمز له  $E_v$  أو  $K$  حيث انه :

$$K = -V \frac{dP}{dV} = -V \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

على سبيل المثال، معامل الفولاذ هو  $170000 \text{ MN/m}^2$ ، ومعامل الماء البارد هو  $2200 \text{ MN/m}^2$ ، وبالتالي فإن الماء هو  $80 \approx 77.27 = 2200 / 170000$  مرة أكثر قابلية للانضغاط من الفولاذ.

نظرًا لأن تغير هذا المعامل ليس كبيرًا لنفس المائع، فيمكن استخدام المعادلة التقريبية التالية:

$$\frac{P_2 - P_1}{K} = -\frac{v_2 - v_1}{v_1} = -\frac{V_2 - V_1}{V_1} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}$$

المعامل  $K$  في هذه الحالة هو القيمة المتوسطة للمعامل في مجال الضغط  $P_2 - P_1 = \Delta P$ .

### 5.2 معامل الانضغاطية للغازات:

لحساب معامل انضغاط الغازات، نفترض أنها مثالية. بالنسبة للغاز المثالي، تتم كتابة معادلة الحالة :

$$PV = NR_u T \rightarrow \frac{P}{\rho} = Pv = RT \text{ et } R = \frac{R_u}{m}$$

حيث ان الثقل الحجمي  $\gamma = \rho g$  أو  $\gamma = \frac{mg}{V}$  ومن معادلة الحالة نجد  $\rho = \frac{P}{RT}$  اذن  $\gamma = \rho g = \frac{Pg}{RT}$  وهو الثقل الحجمي للغاز.



نستعمل معادلة أساسية أخرى للغاز المثالي وهي :

$$PV^n = Cte$$

$n$  معامل التغير المتعدد الاتجاهات -polytropique- الذي يتغير من  $0$  إلى  $\infty$  ، اعتمادًا على العملية الديناميكية الحرارية. لدينا  $n = 1$  في درجة الحرارة  $T$  الثابتة، و  $n = C_p/C_v = k$  عندما تكون كمية الحرارة  $Q$  ثابتة.

لإيجاد معامل الانضغاط للغازات، نأخذ المعادلة  $PV^n = Cte$  ونحسب التفاضل:

$$d(PV^n) = Pd(V^n) + V^n dP = d(Cte) = 0$$

مما يعطي :

$$d(PV^n) = nV^{n-1}PdV + V^n dP = 0$$

$$K = -dP \frac{V}{dV} \quad \text{و من جهة أخرى :} \quad dP = -PnV^{n-1} \frac{dV}{V^n}$$

$$K = PnV^{n-1} \frac{dV}{V^n} = nP \quad \text{بالتعويض نجد:}$$

في تحول ذو درجة حرارة ثابتة نجد  $K = P$  ولعملية متعددة الاتجاهات  $K = nP$ .

كسبيل المثال، بالنسبة لضغط قدره 1 ضغط جوي، فإن معامل الانضغاط له قيمة 103103 باسكال في تحويل بدرجة حرارة ثابتة.

بالنسبة للمياه الباردة، تبلغ قيمة هذا المعامل 2206106 باسكال مما يعني أن الهواء  $21000 \cong 103103/2206106$  مرة أكثر قابلية للانضغاط من الماء البارد في تحويل بدرجة حرارة ثابتة أو  $15000 \cong (103103 * 1.4) / 2206106$  مرة عندما تكون كمية الحرارة  $Q$  ثابتة.

### 5.1 Module de compressibilité pour des liquides :

La compressibilité d'un liquide est inversement proportionnelle à son module volumique de compressibilité connu aussi par module global, il est noté par  $E_v$  ou  $K_-$  :

$$K = -V \frac{dP}{dV} = -V \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad 1.2$$

- A titre d'exemple, le module de l'acier est  $170\,000 \text{ MN/m}^2$ , celui de l'eau froide est  $2200 \text{ MN/m}^2$ , d'où l'eau est  $170\,000/2200 = 77.27 \cong 80$  fois plus compressible que l'acier.

Puisque la variation de ce module n'est pas importante pour le même fluide, l'équation approximative suivante peut être utilisée :

$$\frac{P_2 - P_1}{K} = -\frac{v_2 - v_1}{v_1} = -\frac{V_2 - V_1}{V_1} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \quad 1.3$$

$K$  dans ce cas est la valeur moyenne du module pour la plage de pression  $\Delta P$ .

## 5.2 Module de compressibilité pour les gaz :

Pour calculer le module de compressibilité des gaz, supposant qu'ils sont parfaits. Pour un gaz parfait, l'équation d'état s'écrit :  $PV = NR_u T \rightarrow \frac{P}{\rho} = Pv = RT$  et  $R = \frac{R_u}{m}$

On introduit le poids spécifique  $\gamma = \frac{mg}{V}$  ce qui donne  $\gamma = \rho g$  et  $\rho = \frac{P}{RT}$  d'où  $\gamma = \frac{Pg}{RT}$

Qui est le poids spécifique du gaz.

Une autre équation fondamentale du gaz parfait est :  $PV^n = Cte$   $n$  coefficient polytropique  $n$  varie de 0 à  $\infty$ , dépendant du procédé thermodynamique. On a  $n=1$  pour l'isotherme,  $n = Cp/Cv = k$  pour l'adiabatique.

Prenons l'équation  $PV^n = Cte$  et calculons la différentielle :

$$d(PV^n) = Pd(V^n) + V^n dP = d(Cte) = 0$$

$$d(PV^n) = nV^{n-1}PdV + V^n dP = 0 \quad \text{d'où} \quad dP = -PnV^{n-1} \frac{dV}{V^n} \quad (1)$$

On a aussi  $K = -dP \frac{V}{dV}$  (2). Remplaçant (1) dans (2) on aura :

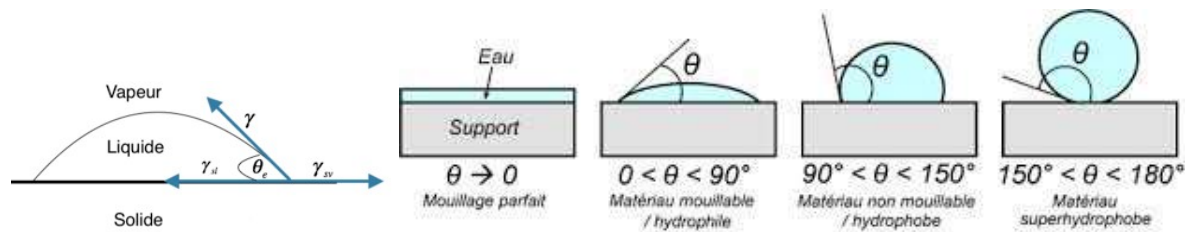
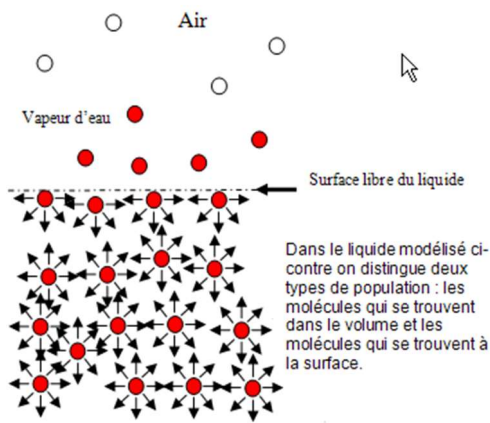
$$K = PnV^{n-1} \frac{dV}{V^n} \frac{V}{dV} = nP \quad 1.4$$

Pour un procédé isotherme  $K=P$  et pour un procédé isentropique  $K=nP$ .

Pour une pression de 1 atm le module de compressibilité a une valeur de  $103 \cdot 10^3$  Pa dans une transformation isotherme. Pour l'eau froide ce module a une valeur de  $2206 \cdot 10^6$  Pa cela veut dire que l'air est  $2206 \cdot 10^6 / 103 \cdot 10^3 \cong 21000$  fois plus compressible que l'eau froide dans un processus isotherme ou  $2206 \cdot 10^6 / (1.4 \cdot 103 \cdot 10^3) \cong 15000$  fois adiabatiquement.

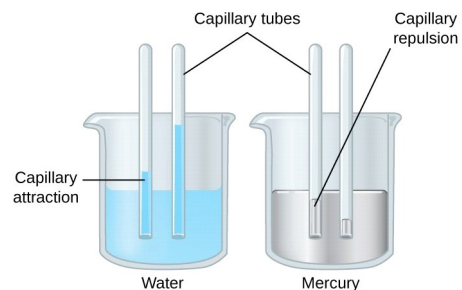
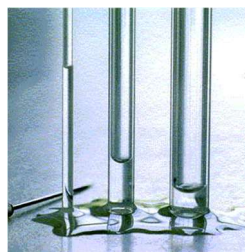
## 6 Tension de surface dans les liquides :

Les liquides ont deux formes d'attraction moléculaires, la cohésion et l'adhésion. La cohésion permet au liquide de résister aux contraintes d'étirement, tandis que l'adhésion lui permet d'adhérer à un corps.



L'attraction entre les molécules forme un film imaginaire capable de résister aux tensions à l'interface entre deux liquides non miscibles ou à l'interface entre un liquide et un gaz. La propriété du liquide qui crée cette aptitude est dite « tension de surface » et désignée par  $\sigma$  sur la figure  $\gamma$ . L'unité de la tension de surface  $\sigma \equiv [N/m]$

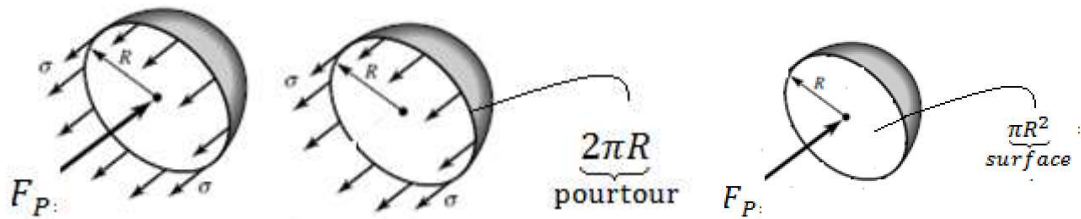
**7.1 Capillarité :** La capillarité est due à la cohésion et l'adhésion à la fois. Lorsque la force de cohésion est inférieure à celle d'adhésion, le liquide mouille la surface solide avec laquelle il est en contact et remonte au point de contact. Par contre si la cohésion est importante, la surface du liquide descend au point de contact. Par exemple, la capillarité fait monter l'eau dans un tube en verre, tandis que le mercure descend au-dessous du niveau réel.



**Exemples sur les tensions de surfaces et capillarité :**

Pour calculer la pression dans une goutte de fluide, prenons le schéma d'une demi-goutte sphérique et illustrons les forces qui agissent sur elle. La force développée sur le pourtour est due à la

tension de surface  $F_\sigma$ . Cette force doit être équilibrée par la force générée par la différence de pression  $\Delta P$  entre la pression interne  $P_i$  et externe  $P_e$ , agissant sur la surface circulaire.

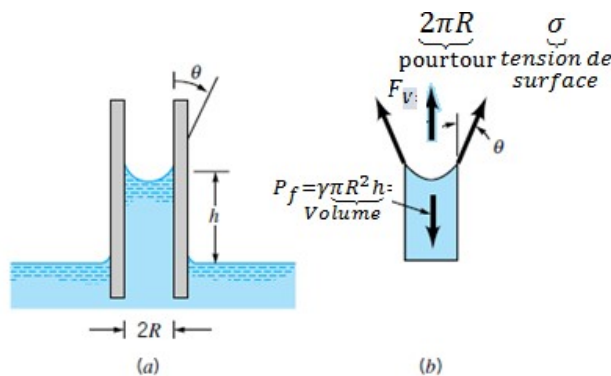


$$F_\sigma = \underbrace{2\pi R}_{\text{pourtour}} \underbrace{\sigma}_{\text{tension de surface}} \quad \text{et} \quad F_P = \Delta P \underbrace{\pi R^2}_{\text{surface}} = (P_i - P_e)\pi R^2$$

En faisant  $\sum F = 0 \Rightarrow F_P = F_\sigma \Rightarrow 2\pi R\sigma = \Delta P\pi R^2$  d'où  $\Delta P = P_i - P_e = \frac{2\sigma}{R}$

Il est clair que la pression à l'intérieur de la goutte est supérieure à celle extérieure.

Prenons maintenant le cas de la montée capillaire dans un tube. La hauteur  $h$  est gouvernée par la valeur de la tension de surface  $\sigma$  le rayon  $R$  et le poids volumique  $\gamma$  et l'angle de contact  $\theta$  entre le fluide et le tube.



De la figure la force verticale due à la tension de surface  $F_v$  est le poids  $P_f$  du fluide sont en équilibre cela donne :

$$F_v = 2\pi R\sigma \cos\theta \quad \text{et} \quad P_f = \gamma\pi R^2 h \quad \text{d'où} \quad F_v = P_f \Rightarrow h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\gamma R}$$