

# Chapitre 01

7.0

DR. ABDERRAHIM MOKHEFI  
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ORAN  
DÉPARTEMENT DE FORMATION PRÉPARATOIRE EN TECHNOLOGIE  
EMAIL : ABDERRAHIM.MOKHEFI@ENP-ORAN.DZ

# Table des matières



<b>I - Chapitre 01. Propriétés des fluides</b>	<b>5</b>
A. Notion d'un fluide.....	6
B. Propriétés des fluides.....	7
1. Compressibilité.....	7
2. Masse volumique et densité.....	7
3. Poids volumique.....	8
4. Viscosité.....	9
5. Tension superficielle.....	10
C. Variation des propriétés dynamiques des fluides.....	11
1. Variation due à la température.....	11
2. Variation due à la vitesse.....	11
3. Variation due à la pression.....	12
4. Variation en fonction de l'espace.....	12
D. Classification des fluides.....	13
1. Classification des fluides selon la compressibilité.....	13
2. Classification des fluides selon la viscosité.....	15
E. Notion sur la rhéologie.....	16
1. Classification des fluides non-Newtonien.....	17
2. Lois de comportement.....	19
F. Fluide avec multi-constitutions.....	20
1. Solutions.....	20
2. Suspensions.....	21
3. Émulsions.....	22
G. Conclusion.....	22
H. Exercices du chapitre 01.....	23
1. Exercice : Exercice 01.....	23
2. Exercice : Exercice 02.....	23
3. Exercice : Exercice 03.....	24
4. Exercice 04.....	24
5. Travaux dirigés.....	24

# Chapitre 01.

# Propriétés des fluides



Notion d'un fluide	6
Propriétés des fluides	7
Variation des propriétés dynamiques des fluides	11
Classification des fluides	13
Notion sur la rhéologie	16
Fluide avec multi-constitutions	20
Conclusion	22
Exercices du chapitre 01	23

## Objectifs

A l'issue de ce chapitre, l'apprenant sera capable de :

- Connaître les propriétés et la classification des fluides.
- Comprendre les concepts fondamentaux du phénomène de frottement fluide.
- Appliquer les lois mathématiques qui permette d'identifier les propriétés pour une variété des fluides.
- Analyser les phénomènes liés aux propriétés des fluides.
- Synthétiser les lois pour mettre en évidence l'interférence de plusieurs fluides.

Dans ce chapitre, nous présentons la terminologie essentielle de la mécanique des fluides permettant de mettre en évidence les concepts de base des fluides. En maîtrisant ces concepts clés, nous ouvrons la porte à une compréhension approfondie de la mécanique des fluides en générale. Nous commençons par définir et clarifier les principaux termes et notions, jetant ainsi les bases d'une communication claire et précise au sein de ce domaine dynamique.

## A. Notion d'un fluide

### Fluide

Les fluides sont des substances qui ont la capacité de s'écouler et de prendre la forme du contenant dans lequel ils se trouvent. En effet, un fluide est un milieu matériel continu, déformable, sans rigidité, qui peut se déformer sous l'action d'une force très faible force. Ils englobent les liquides, les gaz ainsi que des corps de comportement plus complexe tels que les polymères ou des fluide alimentaire. D'un point de vue scientifique, les fluides se caractérisent par leur capacité à répondre à des forces de cisaillement (forces qui agissent parallèlement à leur surface) en se déformant de manière continue. Cette déformation peut se traduire par des mouvements internes ou un changement de forme (White, 2016 [1] ; Kundu et al., 2011 [2]). Un fluide englobe principale-ment deux états physiques : l'état gazeux et l'état liquide.

En termes plus précis, un fluide est une substance qui n'a pas de rigidité structurale propre, ce qui permet aux molécules ou aux atomes qui le composent de se déplacer les uns par rapport aux autres plus librement que dans un solide. Cette propriété fondamentale de l'écoulement et de la déformation continue distingue les fluides des solides, qui ont une structure rigide et conservent leur forme sous l'influence des forces extérieures (Munson et al., 2015 [3]).

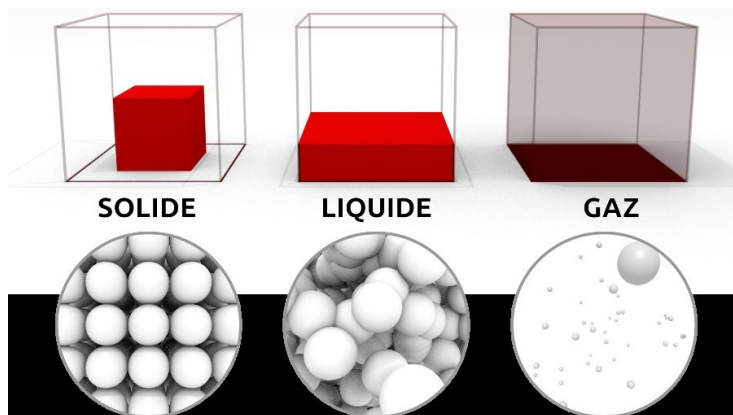


FIGURE 1.1 Structure sub-microscopique et microscopique de fluides.

Fondamentalement, le comportement fluide est lié, au niveau moléculaire, à l'absence d'ordre à longue portée et à l'existence d'un chaos moléculaire. Ces propriétés se retrouvent notamment chez les gaz et les liquides, voir figures 1.1 (cf. FIGURE 1.1 Structure sub-microscopique et microscopique de fluides. p 6) et 1.2 (cf. FIGURE 1.2 Passage de l'état solide à l'état gazeux. p 6).

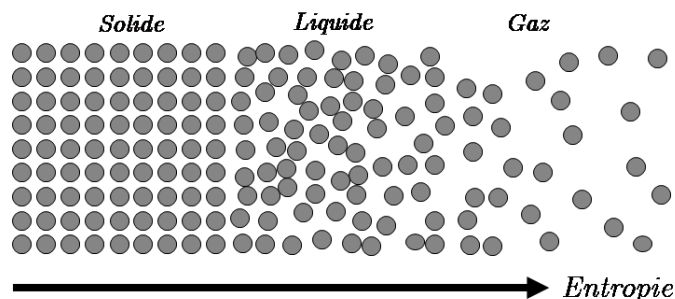


FIGURE 1.2 Passage de l'état solide à l'état gazeux.

## B. Propriétés des fluides

Les propriétés des fluides sont les caractéristiques physiques qui définissent leur comportement et leur interaction dans diverses situations. Ces propriétés diffèrent selon le domaine d'application de fluides : dynamique, thermique, chimique ou électrique. Nous nous focalisons dans ce chapitre sur les propriétés dynamiques que nous aurons besoin pour mettre en œuvre les prochains chapitres de la mécanique des fluides.

### 1. Compressibilité

La compressibilité d'un fluide se réfère à la manière dont son volume change en réponse à une variation de la pression  $dp$ . Lorsque la pression agit sur un fluide, il subit une diminution de volume par une variation  $dV$ . En d'autres termes, si l'on exerce une pression accrue sur un fluide, les espaces entre les molécules du fluide se réduiront, entraînant une réduction de son volume (Munson et al., 2015 [3]). Cette propriété est mesurée à partir d'un coefficient de compressibilité noté  $\beta$ . Si  $p$  en Pa présente la pression du fluide et  $V$  en  $m^3$  sont volume, le coefficient de compressibilité en  $Pa^{-1}$  est calculé par :

$$\beta = -\frac{\frac{dV}{V}}{\frac{dp}{p}} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1.1)$$

### 2. Masse volumique et densité

#### a) Masse volumique

La masse volumique d'un fluide notée  $\rho$ , est une propriété physique qui mesure la quantité de masse contenue dans une unité de volume d'une substance donnée. La masse volumique peut d'autre part dépendre de la température et de la pression du fluide. Si  $m$  est la masse du fluide et  $V$  sont volume, la masse volumique est mesurée en  $kg.m^{-3}$  par la formule suivante :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.2)$$

Chaque fluide est caractérisé par une masse volumique spécifique.

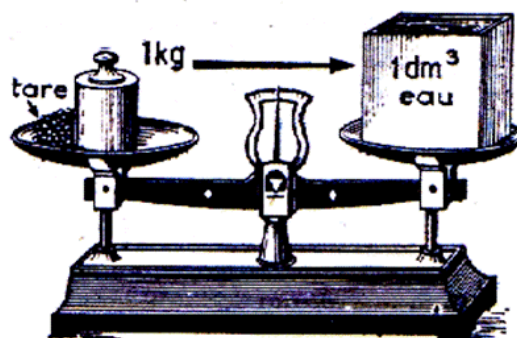


FIGURE 1.3 Litre d'eau devant 1 kilogramme de masse.

### b) Densité

La densité d'un fluide mesure le rapport de la masse volumique de ce fluide rapportée à un corps (fluide) de référence. Elle présente une grandeur sans unité d (adimensionnelle) définie par :

$$d = \frac{\rho}{\rho_{ref}} \tag{1.3}$$

Le fluide de référence diffère selon l'état du fluide. En effet, il est conventionnellement reconnu que l'eau présente un fluide référentiel pour les liquides, cependant l'air présente celui des gaz. On peut ainsi définir la densité des liquides  $d_{liquide}$  et celle des gaz  $d_{gaz}$  respectivement par :

$$d_{liquide} = \frac{\rho}{\rho_{eau}} = \frac{\rho}{1000} \text{ Et } d_{gaz} = \frac{\rho}{\rho_{air}} = \frac{\rho}{1.293} \tag{1.4}$$

La densité constitue une mesure essentielle pour évaluer la flottabilité relative des divers fluides par rapport à un fluide de référence donné. Plus précisément, un fluide présentant une densité inférieure à 1 est considéré comme plus léger que cette référence. En conséquence, après une agitation, il a naturellement tendance à se positionner en partie supérieure, comme illustré dans la figure 1.4 (cf. FIGURE 1.4 Disposition de l'huile sur l'eau par effet de densité. p 8).

Il est à noter que, l'utilisation de notion de densité dans le domaine industriel ou de la recherche désigne parfois comme un terme éternel la masse volumique.

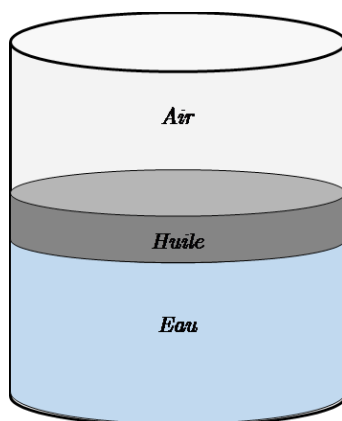


FIGURE 1.4 Disposition de l'huile sur l'eau par effet de densité.

### 3. Poids volumique

Le poids volumique ou encore poids spécifique noté  $\varpi$  représente la force d'attraction exercée par la terre sur l'unité de volume, c'est-à-dire le poids de l'unité de volume. En  $N.m^{-3}$ , le poids volumique est donné par :

$$\varpi = \frac{mg}{V} = \rho g \tag{1.5}$$

## 4. Viscosité

### a) Viscosité dynamique

En raison des interactions entre les molécules de fluide ainsi que des forces entre les molécules de fluide et celles de la surface environnante, les molécules de fluide ne se déplacent pas uniformément. Cette disparité dans les vitesses de déplacement est à l'origine du profil de vitesse comme illustré dans la figure 1.5 (cf. FIGURE 1.5 Frottement des couches d'un fluide les unes par rapport aux autres. p 9). Si l'on utilise des vecteurs pour représenter les vitesses de chaque particule située dans une section droite perpendiculaire au flux, la trajectoire formée par les extrémités de vecteurs illustre le profil de vitesse.

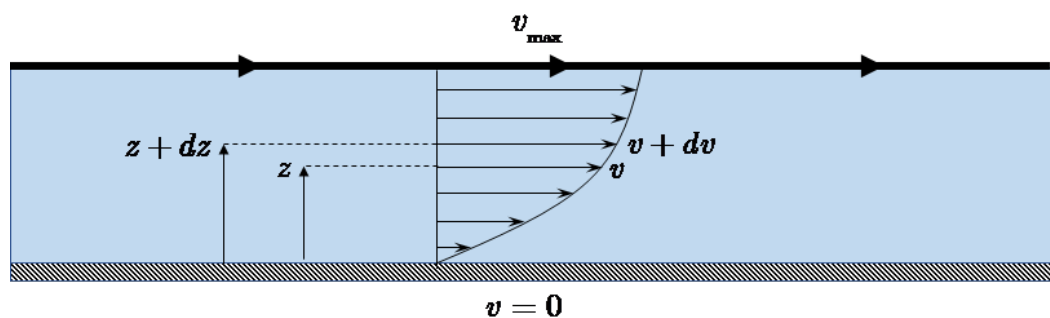


FIGURE 1.5 Frottement des couches d'un fluide les unes par rapport aux autres.

Si l'on considère un fluide s'écoulant entre deux plaques parallèles de dimensions infinies dont la paroi supérieure se déplace horizontalement avec une vitesse constante  $v_{max}$  (figure 1.5 (cf. FIGURE 1.5 Frottement des couches d'un fluide les unes par rapport aux autres. p 9)), le mouvement du fluide peut être conceptualisé comme étant le résultat du déplacement relatif des différentes couches de fluide les unes par rapport aux autres. En d'autres termes, le glissement entre ces couches conduit à des vitesses différentes.

Chaque couche de fluide possède ainsi une vitesse qui varie en fonction de la distance  $z$ . La force de frottement, notée  $\vec{F}$ , agissant tangentiellement à la surface de séparation entre ces deux couches de fluide, agit contre le glissement d'une couche sur l'autre. Cette force est directement proportionnelle à la différence de vitesse entre les couches  $dv$ , ainsi qu'à la surface de contact  $S$ , tandis qu'elle est inversement proportionnelle à la différence de distance  $dz$ . Le coefficient de proportionnalité  $\mu$  représente le coefficient de viscosité dynamique du fluide qui exprime la facilité ou la difficulté de l'écoulement du fluide.



FIGURE 1.6 Fluides avec différentes viscosités.

La viscosité dynamique mesurée en Pa.s, est calculée en se basant sur la relation mathématique suivante:

$$F = \mu S \frac{dv}{dz} \quad (1.6)$$

En divisant les deux membres de l'équation Eq. (1.6) (cf. p 10) par la surface de frottement  $S$ , nous obtenons :

$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} \quad (1.7)$$

La grandeur  $\tau$  présente une unité de pression (Pa). Toutefois, elle ne présente pas une pression comme elle n'agit pas normalement sur la surface  $S$ . Cette quantité est appelé contrainte de cisaillement entre les différentes couches du fluide résultante de deux forces tangentielles opposées : la force de mouvement et celle frottement. Ainsi, une autre définition de la viscosité peut y avoir lieu. En effet, la viscosité d'un fluide se réfère à sa capacité à s'opposer aux forces tangentes qui cherchent à provoquer le déplacement des différentes couches de ce fluide les unes par rapport aux autres.

### b) Viscosité cinématique

La viscosité cinématique ne représente que le rapport entre la viscosité dynamique  $\mu$  du fluide et sa masse volumique. Elle caractérise le temps d'écoulement. Elle est notée  $\nu$  et mesurée en  $m^2.s^{-1}$  en se basant sur la formule suivante :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.8)$$

## 5. Tension superficielle

La tension superficielle d'un fluide est une propriété physique qui se manifeste à l'interface entre ce fluide et un autre matériau, généralement de l'air. Elle est due à la cohésion entre les molécules du fluide à la surface, qui interagissent différemment avec les molécules environnantes par rapport à celles à l'intérieur du fluide. Cette tension résulte en une mince "peau" à la surface du fluide qui exerce une force perpendiculaire à la surface et qui tend à minimiser la surface libre du liquide. La tension superficielle est responsable de plusieurs phénomènes observables, tels que la capillarité (l'ascension ou la descente des liquides dans des tubes fins), la formation de gouttelettes, la formation de bulles, et bien d'autres. Elle joue également un rôle crucial dans les interactions entre les liquides et les solides, comme c'est le cas lorsqu'un liquide mouille ou ne mouille pas une surface, voir figure 1.7 (cf. FIGURE 1.7 Tension superficiel de l'eau par rapport à l'air. p 10).

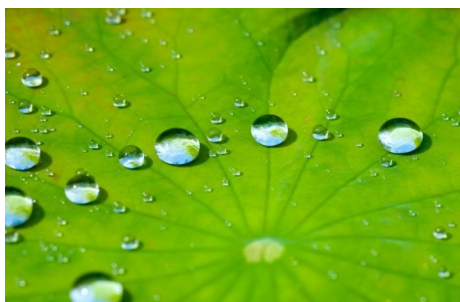


FIGURE 1.7 Tension superficiel de l'eau par rapport à l'air.



## C. Variation des propriétés dynamiques des fluides

Les propriétés des fluides, telles que la viscosité et la densité, peuvent varier en fonction de la température ( $T$ ), de la vitesse et de la pression. Ces variations jouent un rôle important dans de nombreux phénomènes et processus impliquant les fluides, et elles sont essentielles à considérer dans les domaines de l'ingénierie, de la physique et de la chimie.

$$\rho = \rho(p, v, T) \text{ et } \mu = \mu(p, v, T) \quad (1.9)$$

### 1. Variation due à la température

Les propriétés dynamiques des fluides sont en réalité des fonctions étroitement liées à la température. Elles peuvent subir des variations notables lorsque les conditions thermiques du milieu qui les entoure subissent des changements. Ainsi, afin de tenir compte de ces fluctuations, les données relatives à certaines propriétés dynamiques des fluides sont spécifiées à des températures de fonctionnement courantes.

Généralement la Viscosité d'un fluide diminue avec une augmentation de la température. Les molécules de fluide gagnent en énergie cinétique à des températures plus élevées, ce qui diminue la cohésion intermoléculaire et facilite le glissement entre les couches de fluide.

La densité d'un fluide a tendance à diminuer avec l'augmentation de la température. Les molécules se dispersent davantage, réduisant ainsi la compacité du fluide, voir figure 1.8 (cf. FIGURE 1.8 Variation thermique de la densité de l'eau. p 11).

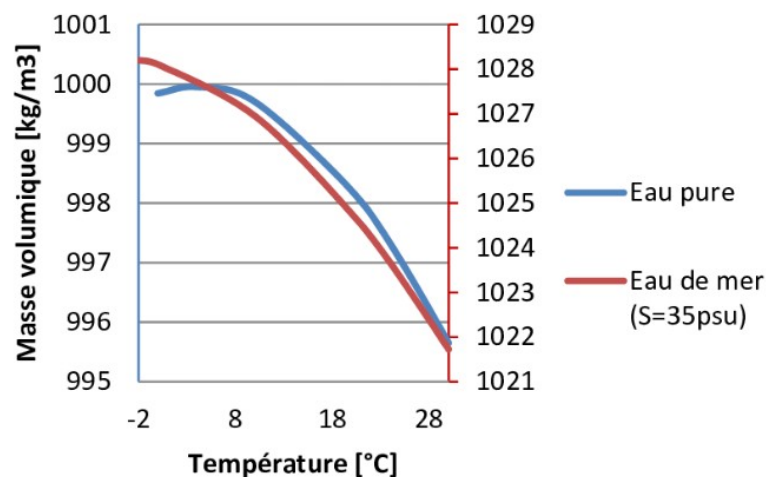


FIGURE 1.8 Variation thermique de la densité de l'eau.

### 2. Variation due à la vitesse

L'écoulement d'un fluide à une certaine vitesse peut induire des variations substantielles dans ses propriétés dynamiques. Plus précisément, des caractéristiques telles que la masse volumique et la viscosité sont particulièrement sensibles à cette vitesse d'écoulement, ce qui fait appel aux notions de compressibilité et de rhéologie.

La vitesse n'a généralement qu'une influence minimale sur la densité des fluides. Cependant, dans les cas où la vitesse est extrêmement élevée, des phénomènes

comme la compression adiabatique peuvent entraîner des variations de densité. Lorsque le fluide se déplace à une vitesse significative, les interactions entre ses molécules sont modifiées. Ainsi, il peut subir des modifications de densité en raison de la pression exercée par le mouvement rapide des particules. Cela peut être particulièrement prononcé dans les gaz, où la compression peut entraîner des variations de densité remarquables.

En parallèle, la viscosité du fluide, qui représente sa résistance au glissement entre les couches, peut également être influencée par la vitesse d'écoulement. En effet, les frottements entre les molécules du fluide peuvent varier en fonction de la vitesse, ce qui peut accroître ou minimiser sa viscosité. Cela entraîne des changements notables dans le comportement d'écoulement du fluide et avoir des conséquences importantes sur sa capacité à transmettre les forces et à s'adapter aux contraintes externes. Dans ce cas, ce type de fluide est dit non-Newtonien.

### 3. Variation due à la pression

Les propriétés physiques des fluides peuvent également varier en fonction de la pression. En effet, la pression exerce une influence significative sur le comportement des fluides, que ce soit sous forme de gaz ou de liquide.

La densité d'un fluide peut changer sous l'effet de la pression. Dans les gaz, une augmentation de la pression peut entraîner une augmentation de la densité car les molécules sont rapprochées. Dans les liquides, la variation de densité avec la pression peut être moins prononcée, mais elle peut même avoir un impact non significatif.

Viscosité : La viscosité, qui mesure la résistance interne d'un fluide au mouvement, peut également être influencée par la pression. Par exemple, dans certains liquides, la viscosité peut augmenter avec une augmentation de la pression.

### 4. Variation en fonction de l'espace

Les propriétés des fluides peuvent également varier en fonction de la direction de l'espace, créant ainsi les notions d'homogénéités et d'isotropie.

#### a) Homogénéités

Un fluide homogène est un type de fluide dont les propriétés physiques et chimiques, telles que la densité, la composition et les caractéristiques thermiques, sont uniformes à travers tout son volume. En d'autres termes, un fluide homogène ne présente pas de variations perceptibles dans ses propriétés en fonction de la position à l'intérieur de celui-ci. Dans le cas contraire, le fluide est dit hétérogène.

#### b) Isotropie

Un fluide isotrope est un fluide dont les propriétés physiques sont uniformes dans toutes les directions de l'espace. Cela signifie que les propriétés telles que la viscosité, la densité, la conductivité thermique et d'autres caractéristiques physiques ne varient pas en fonction de l'orientation. Dans le cas contraire, le fluide est dit anisotrope. Certains fluides, en particulier les fluides colloïdaux ou les suspensions de particules, peuvent montrer une viscosité différente selon la direction dans laquelle la force est appliquée. Dans le cas contraire le fluide est dit anisotrope, voir figure 1.9 (cf. FIGURE 1.9 Homogénéités et isotropie. p 13).

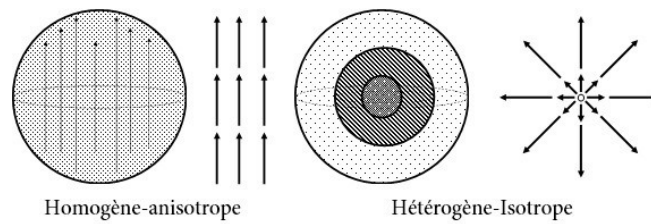


FIGURE 1.9 Homogénéités et isotropie.

## D. Classification des fluides

Nous avons examiné l'impact des facteurs d'écoulement sur les fluctuations des propriétés physiques des fluides, en mettant particulièrement l'accent sur la densité et la viscosité. Cette exploration des effets de ces facteurs a conduit à l'établissement de classifications conventionnelles des fluides en fonction de leur réaction à ces variations. Ainsi, les fluides sont classés en fonction de leur compressibilité et de leur viscosité.

### 1. Classification des fluides selon la compressibilité

Les fluides peuvent être classés en fonction de leur réponse à une pression extérieurement appliquée en deux catégories principales : les fluides incompressibles et les fluides compressibles.

#### a) Fluides incompressibles

Les fluides incompressibles sont ceux pour lesquels la variation de volume est négligeable en réponse à des changements de pression. Cela signifie que leur densité reste essentiellement constante quelle que soit la pression appliquée. Les liquides, tels que l'eau et les huiles, sont généralement considérés comme des fluides incompressibles dans la plupart des conditions. Nous pouvons écrire :

$$\text{Fluide incompressible} \iff \rho = cte \quad (1.10)$$

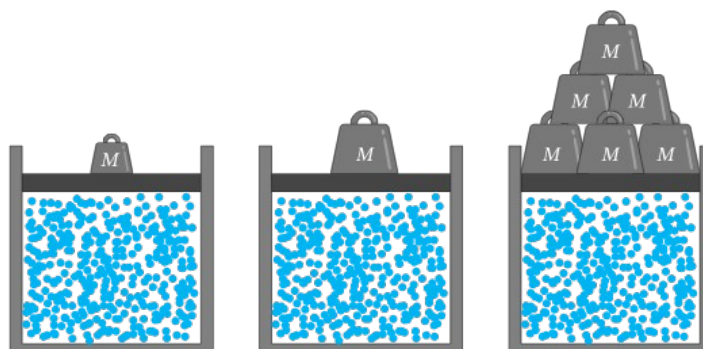


FIGURE 1.10 Fluides incompressibles.

#### b) Fluides compressibles

Les fluides compressibles sont ceux qui subissent une variation significative de volume en réponse à des changements de pression. Cela signifie que leur densité

peut changer de manière notable avec des variations de pression. Les gaz sont généralement des fluides compressibles, car les molécules de gaz peuvent être comprimées ou dilatées de manière importante en fonction de la pression exercée.

$$\text{Fluide compressible} \iff \rho = \rho(p, v) \tag{1.11}$$

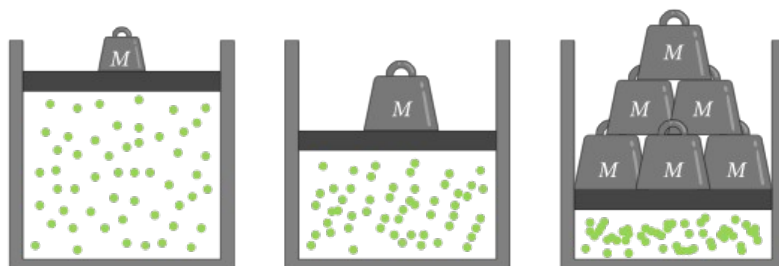


FIGURE 1.11 Fluides compressibles.



### Attention

La masse volumique peut également varier en fonction de la température malgré la nature incompressible de fluide.

## 2. Classification des fluides selon la viscosité

La classification des fluides en fonction de leur viscosité donne lieu à deux sous-classifications distinctes. La première se fonde sur l'ampleur de la valeur de la viscosité en fluides réels ou parfaits. Cependant, la seconde repose sur la manière dont la viscosité varie en relation avec le gradient de vitesse ou encore en fonction des effets produits sous l'action d'une contrainte de cisaillement en fluides : **Newtoniens** ou **non-Newtoniens**.

### a) Selon l'importance de la viscosité

Nous considérons un volume d'un fluide quelconque  $V$  délimité par une surface fermée  $S$ .  $d\vec{F}$  présente la force d'interaction au niveau de la surface élémentaire  $dS$  de vecteur normal unitaire  $N$  entre le fluide et le milieu extérieur, voir figure 1.14 (cf. FIGURE 1.12 Force normale et tangentielle p 15). La force  $d\vec{F}$  peut être toujours décomposée en deux composantes : tangentielle à la surface  $dS$  notée  $d\vec{F}_T$  et normale à cette surface notée  $d\vec{F}_N$  telle que :

$$d\vec{F} = d\vec{F}_T + d\vec{F}_N \tag{1.12}$$

Sur la base de définition de ces forces tangentielle et normale, nous distinguons deux types de fluide : parfaits et réels. Ces deux notions sont essentiellement prononcées lors des écoulements des fluides (Ben Hamouda, 2008 [4]).

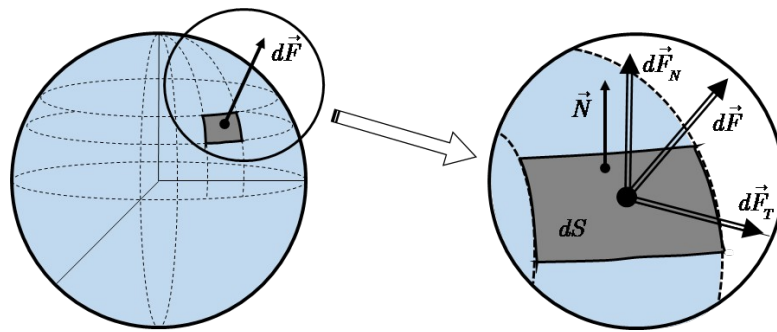


FIGURE 1.12 Force normale et tangentielle

### i Fluides parfaits

Un fluide est considéré comme parfait lorsque son déplacement ne tient pas compte des influences de la force de frottement, et plus spécifiquement lorsque les forces agissant tangentiellement à ses surfaces sont négligeables ( $dF_T = 0$ ). Cela s'aligne avec l'absence d'un coefficient de frottement ou d'une viscosité nulle ( $\mu = 0$ ). Ainsi, seules les forces normales qui agissent. Un fluide parfait, ou fluide idéal, est une abstraction en mécanique des fluides décrivant un fluide hypothétique caractérisé par une densité invariable sous différentes pressions, une viscosité nulle. Les fluides parfaits ne présente qu'une simplification théorique utilisée pour faciliter les calculs mais rarement présente dans la nature.

### ii Fluides réels

Un fluide réel se réfère à un fluide qui présente des caractéristiques et des comportements réels, notamment la viscosité, la compressibilité et d'autres propriétés physiques inhérentes aux fluides du monde réel. Contrairement aux fluides parfaits, les fluides réels ont une viscosité non nulle, ce qui signifie qu'ils présentent une résistance au glissement entre les couches de fluide, entraînant des phénomènes de frottement. De plus, les variations de pression peuvent influencer la densité du fluide réel. Cependant, lorsque le fluide réel est au repos (ne s'écoule pas), on suppose qu'il se comporte comme un fluide parfait, voir figure 1.13 (cf. FIGURE 1.13 Couches de fluides parfait et réel lors d'un écoulement. p 15).

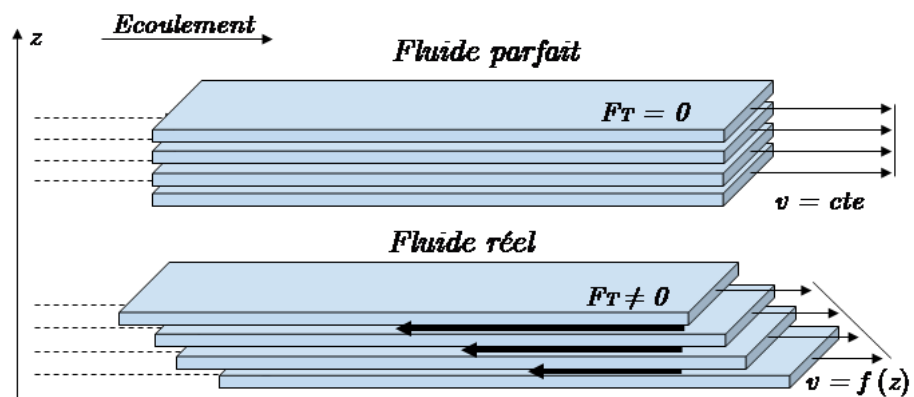


FIGURE 1.13 Couches de fluides parfait et réel lors d'un écoulement.

## b) Selon la vitesse de cisaillement

### i Fluide Newtonien

Les fluides Newtoniens présentent une viscosité constante indépendamment de la vitesse de cisaillement, c'est-à-dire la variation de vitesse entre les différentes couches du fluide lorsqu'il s'écoule. Les liquides courants tels que l'eau et les gaz

comme l'air sont généralement considérés comme des fluides Newtoniens dans des conditions normales. Leur viscosité reste stable même lorsque la vitesse d'écoulement change. Ils montrent une relation linéaire entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$ . Cette relation de dépendance est dite loi de Newton.

$$\text{Fluide Newtonien} \iff \mu = cte \iff \tau = \mu\dot{\gamma} \quad (1.13)$$

## ii Fluide non-Newtonien

Les fluides non-Newtoniens dit encore complexe présentent des variations de viscosité en réponse aux forces appliquées. Leur viscosité peut augmenter ou diminuer en fonction de la contrainte de cisaillement ou de la déformation subie. Ces fluides peuvent exhiber différents comportements faisant la naissance d'une science dite « **rhéologie** ». Un fluide non-Newtonien présente une relation non linéaire entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  sous contrainte décrite au biais de la viscosité apparente. Cette viscosité est égale à la contrainte de cisaillement divisée par le taux de cisaillement.

$$\text{Fluide non Newtonien} \iff \mu = \mu(\dot{\gamma}) \iff \tau = \mu(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (1.14)$$

## E. Notion sur la rhéologie

La rhéologie est la branche de la science qui étudie le comportement de déformation et d'écoulement de la matière, en particulier des fluides et des matériaux viscoélastiques, sous l'application de contraintes mécaniques telles que la force, la déformation ou le cisaillement. Elle englobe l'étude des propriétés visqueuses (résistance au glissement ou à l'écoulement) et élastiques (capacité à reprendre sa forme après une déformation) des matériaux. Elle est utilisée dans de nombreux domaines, tels que la chimie, la physique, la biologie, l'ingénierie des matériaux, l'industrie alimentaire, la médecine et bien d'autres.

### 1. Classification des fluides non-Newtonien

Selon cette science, les fluides non-Newtoniens sont souvent classés selon la dépendance de leurs viscosités apparentes du temps. Ils sont classés en trois catégories : Fluides à viscosité indépendante du temps, Fluides à viscosité dépendante du temps et Fluides viscoélastiques.

#### a) Fluides à viscosité indépendante du temps

Les fluides à viscosité indépendante du temps sont des fluides pour lesquels le taux de cisaillement en tout point n'est déterminé que par la valeur de la contrainte de cisaillement en ce point à cet instant. Parmi ces fluides on distingue : les fluides pseudo-plastiques, dilatants et viscoplastiques.

##### i Fluides rhéofluidifiants

Les fluides pseudoplastiques ou fluidifiants (encore : Rhéofluidifiants) sont les plus courants parmi les fluides non-Newtoniens indépendants du temps. Ils sont caractérisés par une viscosité apparente qui diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement. À titre d'exemple, on peut citer : les solutions et les suspensions aqueuses, les pétroles, la pâte à papier, les colles, certaines peintures.

## ii Fluides rhéoépaississants

Les fluides dilatants ou encore rhéoépaississants, leur viscosité apparente augmente avec l'augmentation du taux de cisaillement ; ainsi, ces fluides sont également appelés épaissement par cisaillement. Ce type de comportement fluide a été observé à l'origine dans des suspensions concentrées. On rencontre ce type de comportement dans le cas des solutions aqueuses d'amidon ou de sable et du quartz (Koller, 2002 [5]).

## iii Fluides viscoplastiques

Les fluides viscoplastiques, leur type de comportement est caractérisé par l'existence d'une limite d'élasticité ( $\tau_0$ ) qui doit être dépassée avant que le fluide ne se déforme ou ne s'écoule.

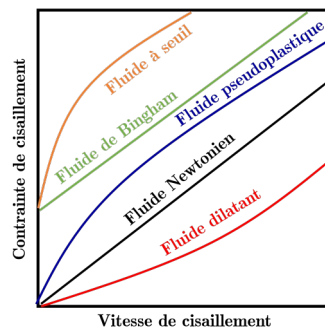


FIGURE 1.14 Différents comportements de fluides non-Newtoniens dont la viscosité est indépendante du temps.

Une fois que l'amplitude de la contrainte externe a dépassé la valeur de la limite d'élasticité, la courbe d'écoulement peut être linéaire ou non linéaire mais ne passera pas par l'origine. Ainsi, en l'absence d'effets de tension superficielle, un tel matériau ne se nivellera pas sous l'effet de la gravité pour former une surface libre absolument plane (Barnes, et al., 1989 [6]). Les exemples les plus répondus dans cette catégorie de fluides sont : les pâtes de fruits et de chocolat, les peintures à huiles, les graisses, le dentifrice, les boues de forage (Koller, 2002 [5]).

## b) Fluides à viscosité dépendante du temps

Les fluides à viscosité dépendante du temps sont des fluides plus complexes pour lesquels la relation entre contrainte de cisaillement et vitesse de cisaillement dépend, en outre, de la durée de cisaillement et de leur histoire cinématique. Parmi ces fluides, on distingue : les fluides thixotropes et ceux antithixotropes.

### i Fluides thixotropes

Les fluides sont dits thixotropes si, lorsqu'ils sont cisailés à vitesse constante, leurs viscosités apparentes diminuent avec le temps de cisaillement (Nguyen et Uhlherr, 1983 [7]). Par conséquent, ils peuvent définir un comportement pseudo-plastique dépendant du temps. A l'arrêt du cisaillement, la viscosité augmente avec le temps, ce qui indique une réversibilité du phénomène. Les exemples les plus courants sont : le ketch-up, le yaourt, la peinture, les encres.

### ii Fluides anti-thixotropes

Pour les fluides antithixotropes ou encore rhéopexes, la structure s'accumule par cisaillement et se décompose lorsque le matériau est au repos. Leurs viscosités apparentes augmentent avec le temps.



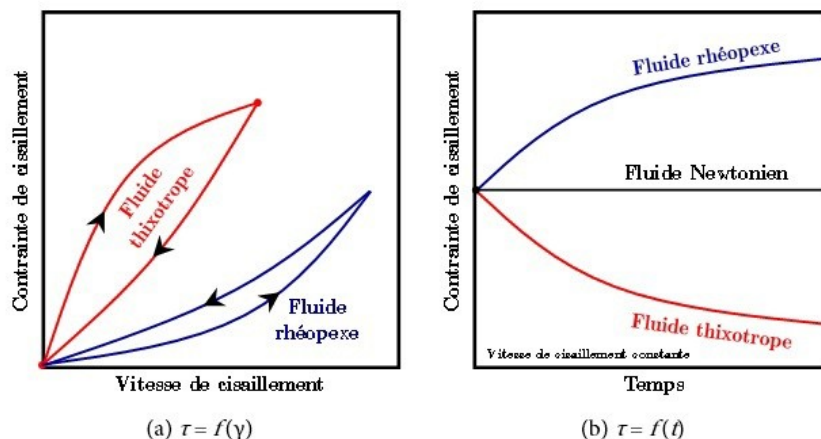


FIGURE 1.15 Comparaison entre un comportement thixotropique et anti-thixotropique.

Le comportement de ces fluides peut être décrit comme un comportement dilatant dépendant du temps, ce qui signifie qu'ils deviennent épais quand ils sont secoués. Parmi eux : polyester saturé à 60°C (Steg et Katz, 1965 [8]), le béton, la crème chantilly, les lubrifiants.

### c) Fluides viscoélastiques

Les fluides viscoélastiques sont des substances présentant des caractéristiques à la fois de fluides idéaux et de solides élastiques et montrant une récupération élastique partielle, après déformation (Chhabra et Richardson, 1999 [10] [10]). Les matériaux viscoélastiques sont communs dans les solutions de polymère et les polymères fondus et se comportent à la fois comme un liquide et un solide dans une certaine mesure et qui a une contrainte temporelle. Comme exemples, on cite : la pâte de silicone, les fluides synoviaux.

## 2. Lois de comportement

De nombreuses expressions mathématiques de complexité et de forme variables ont été proposées dans la littérature pour modéliser les caractéristiques des fluides non-Newtoniens. Certains d'entre eux sont des tentatives directes d'ajustement de courbe, donnant des relations empiriques pour la contrainte de cisaillement - courbes de taux de cisaillement par exemple, tandis que d'autres ont une base théorique en mécanique statistique. Seule une sélection des modèles de viscosité les plus largement utilisés est donnée dans cette partie.

### a) Fluide sans contrainte seuil

La relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement (tracée sur des coordonnées logarithmiques doubles) pour un fluide non-Newtonien sans seuil peut souvent être approximée par une ligne droite sur une plage limitée de taux de cisaillement (ou de contrainte). Par conséquent, La loi de puissance ou modèle d'Ostwald de Wael peut être appliqué. Il fournit une expression de la forme suivante :

$$\tau = M\dot{\gamma}^n \tag{1.15}$$



Ainsi, la viscosité apparente pour le fluide dit de loi de puissance (ou d'Ostwald de Wael) est donc donnée par :

$$\mu = M|\dot{\gamma}|^{n-1} \tag{1.16}$$

- Pour  $n < 1$  : Le fluide présente des propriétés fluidifiantes ;
- Pour  $n = 1$  : le fluide présente un comportement Newtonien ;
- Pour  $n > 1$  : le fluide présente un comportement dilatant.

Dans ces équations,  $M$  et  $n$  sont deux paramètres empiriques d'ajustement de courbe et sont appelés respectivement coefficient de consistance du fluide et indice de comportement de l'écoulement. Le modèle d'Ostwald de Wael présente un certain nombre de défauts. En général, il ne s'applique qu'à une plage limitée de taux de cisaillement et, par conséquent, les valeurs ajustées de  $M$  et  $n$  dépendront de la plage de taux de cisaillement considérée. De plus, il ne prédit pas les viscosités de cisaillement nul et infini. Malgré ces limitations, il s'agit peut-être du modèle le plus largement utilisé dans la littérature traitant des applications en génie des procédés. De ce fait, les chercheurs ont proposé d'autre modèle en cas de l'impossibilité de son application. On citera dans la table 1.1 (cf. TABLE 1.1 Modèles en loi de puissance. p 19) les plus populaires.

Modèles par auteur	Modèles rhéologiques
Modèle de Carreau	$\frac{\mu_{app} - \mu_{\infty}}{\mu_0 - \mu_{\infty}} = \left[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2\right]^{\frac{n-1}{2}}$
Modèle de Sisko	$\tau = \mu_0\dot{\gamma} + m\dot{\gamma}^n$
Modèle de Cross	$\tau = \left[\mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^n}\right]\dot{\gamma}$
Modèle d'Ellis	$\eta = \frac{\mu_0}{1 + \left(\frac{\tau_{yx}}{\tau_{v2}}\right)^{n-1}}$

TABLE 1.1 Modèles en loi de puissance.

### b) Fluide avec contrainte seuil

Les fluides à contrainte seuil ou encore viscoplastiques sont exprimés par un des modèles présentés dans la table 1.2 (cf. TABLE 1.2 Modèles rhéologiques les plus utilisés pour les fluides à seuil. p 19). Il convient de noter que les modèles des fluides à seuil se comportent comme des solides rigides ( $\dot{\gamma} = 0$ ) si leur contrainte de cisaillement ne dépasse pas la contrainte seuil ( $\tau < \tau_0$ ). Cependant, les lois de comportement mentionnées dans la table 1.2 (cf. TABLE 1.2 Modèles rhéologiques les plus utilisés pour les fluides à seuil. p 19) ne considèrent que le cas de fluidité où la contrainte de cisaillement dépasse le seuil ( $\tau \geq \tau_0$ ).

Modèle par auteur	Modèles rhéologiques
Modèle de Bingham	$\tau = \tau_0 + m\dot{\gamma}$
Modèle de Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + m\dot{\gamma}^n$
Modèle de Casson	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu_0\dot{\gamma}}$
Modèle de Casson globale	$\sqrt[n]{\tau} = \sqrt[n]{\tau_0} + \sqrt[n]{\mu_0\dot{\gamma}}$

TABLE 1.2 Modèles rhéologiques les plus utilisés pour les fluides à seuil.

## F. Fluide avec multi-constitutions

La diversité des fluides dans notre monde ne se limite pas aux seules classifications basées sur la compressibilité et la rhéologie. Elle s'étend bien au-delà, englobant la constitution chimique et la structure même des fluides. De ce fait, il existe une multitude d'autres fluides complexes qui peuvent présenter des comportements aussi bien non homogènes et anisotropes que homogènes et isotropes, résultant de mélanges subtils de différentes substances fluides, y compris des particules solides comme : Les solutions, les suspensions et les émulsions.

### 1. Solutions

Une solution fluide, dans le contexte chimique, désigne un mélange homogène de deux ou plusieurs substances où l'une des substances est dissoute dans l'autre, formant ainsi une phase unique. La substance dissoute est appelée le soluté, et la substance dans laquelle le soluté est dissous, est appelée le solvant. Les solutions fluides peuvent prendre différentes formes, telles que liquides, gaz ou même solides dans certains cas. Dans le domaine quotidien, le terme "solution fluide" peut également être utilisé de manière plus générale pour décrire une approche ou une réponse qui coule naturellement et facilement pour résoudre un problème ou répondre à une situation donnée.

Dans un fluide de base (fluide),  $n$  type de solutés liquides totalement miscibles notée  $f_1, f_2, \dots, f_n$  de volumes respectives  $V_1, V_2, \dots, V_n$ , et de masse volumique  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  sont dissolus. La masse volumique de cette solution est calculée par :

$$\rho_{solution} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \rho_i + V_{fluide} \rho_{fluide}}{\sum_{i=1}^n V_i + V_{fluide}} \quad (1.17)$$

Dans la plupart des cas courants, la viscosité d'un mélange de fluides n'est pas simplement la moyenne des viscosités individuelles des fluides constitutifs. La viscosité d'un mélange dépend en réalité de la structure moléculaire, des interactions entre les molécules, et d'autres facteurs complexes qui peuvent rendre son calcul difficile sans des données spécifiques. Cependant, il existe une formule empirique appelée la loi de mixage d'Einstein (1906) [13], qui peut être utilisée pour estimer approximativement la viscosité d'un mélange binaire (deux fluides) sous certaines conditions simplifiées :

$$\mu_{mix} = \frac{V_1 \mu_1 + V_{fluide} \mu_{fluide}}{V_1 + V_{fluide}} \quad (1.18)$$

### 2. Suspensions

Une suspension est une combinaison d'un fluide (liquide ou gaz) et de particules solides qui ne se dissolvent pas complètement dans le fluide. Les particules solides restent en suspension grâce à l'agitation continue du fluide. Les suspensions peuvent varier en termes de taille et de concentration ou fraction volumique des particules. Elles peuvent être homogènes ou hétérogènes, selon la distribution des particules dans le fluide. Les suspensions sont courantes dans de nombreuses applications, comme l'industrie pharmaceutique, la fabrication de peintures et de revêtements, ainsi que dans certains produits alimentaires comme les vinaigrettes.

Dans ce contexte, les nanofluides (Choi, 1995 [11]) sont des suspensions particulières fluidiques aux lequel des nanoparticules solides sont dispersées dans

un fluide de base, généralement un liquide. Les nanoparticules ont des dimensions extrêmement réduites, typiquement de l'ordre du nanomètre (1 nanomètre =  $10^{-9}$  mètre), ce qui confère des propriétés uniques au mélange résultant. Ils sont largement utilisés dans divers domaines de transfert de chaleur notamment dans les applications de refroidissement.

La masse volumique et la viscosité dynamique des suspensions est souvent calculée en fonction de la fraction volumique des particules suspendue. Cette fraction volumique est donnée par :

$$\phi = \frac{V_{particules}}{V_{fluides} + V_{particules}} \quad (1.19)$$

La masse volumique est calculée souvent en tenant compte des diamètres nanométrique ou micrométrique des particules par :

$$\rho_{suspension} = \phi\rho_{particules} + (1 - \phi)\rho_{fluide} \quad (1.20)$$

Quant à la viscosité dynamique selon Brinkmann (1952) [12], elle est calculée par :

$$\mu = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (1.21)$$

Ou encore selon Einstein (1906) [13] :

$$\mu = \mu_f(1 + 2.5\phi) \quad (1.22)$$

S'il s'agit d'une suspension hybride en  $n$  espèce de nanoparticule  $P_1, P_2, \dots, P_n$  dans fluide  $f$ , la fraction volumique  $\phi$  sera la somme de toutes les fractions volumiques de chaque espèce et est définie par :

$$\phi = \sum \phi_i \text{ Avec } \phi_i = \frac{V_{P_i}}{V_{fluide} + \sum V_p} \quad (1.23)$$

La masse volumique et la viscosité dynamique des particules hybrides sont donc calculées par :

$$\rho_{particules} = \frac{1}{\phi} \sum \phi_i \rho_{pi} \quad (1.24)$$

Les relations Eqs. (1.20) (cf. p 21)-(1.22) (cf. p 21) ainsi restent applicables (Hesam et al., 2020 [14]).



FIGURE 1.16 Nanofluide en nanoparticules d'alumine suspendues dans l'eau pure.

### 3. Émulsions

Une émulsion est une dispersion de gouttelettes de liquides non miscibles, généralement de l'huile et de l'eau, dans un milieu continu. Les émulsions sont formées en agitant énergiquement les deux liquides ensemble avec l'aide d'un émulsifiant (un agent qui aide à stabiliser l'émulsion). Les émulsions peuvent être de deux types : eau dans l'huile (E/H) où l'eau est dispersée dans l'huile, ou huile dans l'eau (H/E) où l'huile est dispersée dans l'eau. Les produits courants tels que les vinaigrettes, les crèmes cosmétiques et certaines lotions sont des exemples d'émulsions.

## G. Conclusion

Nous avons exploré en profondeur les propriétés physiques qui caractérisent les fluides, ainsi que leurs variations en fonction de divers paramètres. À travers cette exploration, nous avons abordé la classification des fluides selon différents critères. Parmi les points clés que nous avons assimilés, nous retenons que les fluides se distinguent par des propriétés dynamiques majeures : la densité, la viscosité et la tension superficielle. Ces caractéristiques influencent leur comportement lorsqu'ils sont soumis à des forces et à des mouvements.

Un aspect important que nous avons saisi est la différence entre les fluides compressibles et incompressibles, basée sur leur réponse à la compression. De même, nous avons distingué les fluides réels des fluides parfaits, ce dernier étant un état théorique simplifié. L'impact de la viscosité a également été abordé, permettant de diviser les fluides en deux catégories distinctes : les fluides Newtoniens, dont la viscosité reste constante, et les fluides non-Newtoniens, qui montrent des comportements complexes en répondant à des variations de vitesse de cisaillement.

En outre, nous avons exploré des fluides plus complexes tels que les suspensions et les émulsions, qui présentent des compositions mixtes et des comportements particuliers. Ces fluides hybrides illustrent la diversité des propriétés que les fluides peuvent manifester, allant au-delà des classifications fondamentales.

## H. Exercices du chapitre 01

### Objectifs

**A l'issue de cette série l'apprenant sera capable de pouvoir adapter sa connaissance des principes généraux de la mécanique des fluides à des situations variées et à des systèmes tout à fait divers.**

### 1. Exercice : Exercice 01

*La viscosité dynamique d'un pétrole ayant  $900 \text{ kg/m}^3$  de densité et une viscosité cinématique de  $3.6 \text{ cSt}$  est de*

<input type="checkbox"/>	3240 Pa.s
<input type="checkbox"/>	3.24 Pa.s
<input type="checkbox"/>	0.324 Pa.s
<input type="checkbox"/>	0.0324 Pa.s

## 2. Exercice : Exercice 02

Un fluide dont la contrainte de cisaillement pour un taux de cisaillement nul vaut 100 Pa est un fluide :

<input type="checkbox"/>	Newtonien
<input type="checkbox"/>	Non-Newtonien
<input type="checkbox"/>	Pseudo-plastique
<input type="checkbox"/>	A seuil

## 3. Exercice : Exercice 03

La viscosité  $\mu$  de l'eau contenant une concentration  $c$  de nanoparticules cuivre se calcule par

<input type="checkbox"/>	$\mu = \mu_{eau}/(1 - c)^{2.5}$
<input type="checkbox"/>	$\mu = \mu_{eau}(1 + c)^{2.5}$
<input type="checkbox"/>	$\mu = \mu_{eau}(1 - c)^{-2.5}$
<input type="checkbox"/>	$\mu = \mu_{eau}(1 + 2.5c)$

## 4. Exercice 04

### Exercice 04

Pour mesurer la viscosité du carboxyméthyl cellulose (1% CMC), un rhéomètre rotatif RheolabQC couplé au logiciel Rheoplus a été utilisé, ce qui a permis d'enregistrer le rhéogramme contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement montré dans la table 3 (cf. Table 3. Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement. p 23). La température a été maintenue constante aux conditions normales.

$\dot{\gamma}$ (s <sup>-1</sup> )	1	100	200	300	400	500	600	700	800
$\tau$ (Pa)	8.359	52.741	69.593	81.847	91.828	100.40	107.99	114.86	121.16

Table 3. Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.

### Question 1

1. Tracer le graphe  $\tau = f(\dot{\gamma})$ . En déduire la nature du fluide.

### Question 2

2. La viscosité de 1% CMC suit en effet une loi de puissance selon le modèle d'Ostwald De Waele.

- Tracer le graphe  $\log \tau = f(\log \dot{\gamma})$ .

## 5. Travaux dirigés

Série d'exercice 01. Propriétés des fluides

*Série 01- Propriétés des fluides.pdf*  
*Document 1*

Solution de la série d'exercice 01. Propriétés des fluides

*Solution de Série 01- Propriétés des fluides.pdf*  
*Document 2*