

Chapitre 01

1.0



DR DJAMILA DERBAL
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ORAN
DÉPARTEMENT DE FORMATION PRÉPARATOIRE EN TECHNOLOGIE
E MAIL : Wafa.Derbal@yahoo.fr

16-05-2024

Table des matières



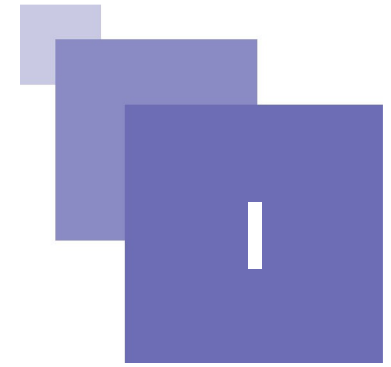
Objectifs	5
I - Propriétés des fluides	7
A. NOTION D'UN FLUIDE.....	7
B. PROPRIÉTÉS DES FLUIDES.....	8
1. Compressibilité.....	9
2. Masse volumique et densité.....	9
3. Poids volumique.....	10
4. Viscosité.....	10
C. VARIATION DES PROPRIÉTÉS DYNAMIQUES DES FLUIDES.....	11
1. Variation due à la température.....	12
2. Variation due à la vitesse.....	12
3. Variation due à la pression.....	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. Exercice.....	22
Solution des exercices	25
Bibliographie	27

Objectifs

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

- Connaître les principales propriétés des fluides.
- Acquérir une compréhension approfondie des mécanismes fondamentaux du frottement fluide.
- Appliquer les lois mathématiques qui permettent d'identifier les propriétés pour une variété de fluides.
- Analyser les phénomènes liés aux propriétés des fluides.
- Synthétiser les lois pour mettre en évidence l'interférence de plusieurs fluides.

Propriétés des fluides



NOTION D'UN FLUIDE	7
PROPRIÉTÉS DES FLUIDES	8
VARIATION DES PROPRIÉTÉS DYNAMIQUES DES FLUIDES	11
CLASSIFICATION DES FLUIDES	13
NOTION SUR LA RHÉOLOGIE	16
FLUIDE AVEC MULTI-CONSTITUTIONS	20
CONCLUSION	22
Exercice	22

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



Définition

Les fluides sont des substances ayant la propriété de s'écouler et de prendre la forme du récipient qui les contient. En réalité, un fluide englobant englobe principalement deux états physiques : l'état gazeux et l'état liquide, représente un milieu matériel continu, déformable, dépourvu de rigidité, susceptible de se déformer sous l'influence d'une force minime. Cette catégorie englobe les liquides, les gaz, ainsi que des matériaux aux comportements plus complexes tels que les polymères ou les fluides alimentaires. D'un point de vue scientifique, les fluides se distinguent par leur aptitude à réagir aux forces de cisaillement (forces agissant parallèlement à leur surface) en subissant une déformation continue. Cette déformation peut se manifester par des mouvements internes ou un changement de forme (White., 2015 [[1]]; Kundu et al., 2011 [[2]]).

Plus spécifiquement, un fluide se définit comme une substance dépourvue de rigidité structurale intrinsèque, autorisant ainsi un mouvement plus libre des molécules ou des atomes qui le composent par rapport les uns aux autres, par rapport à ce qui est observé dans un solide. Cette caractéristique fondamentale

d'écoulement et de déformation continue distingue les fluides des solides, ces derniers étant caractérisés par une structure rigide qui conserve leur forme sous l'effet des forces externes (Munson, 2015 [3]) (voir : MK Flu 1 - 1.A - Les fluides)¹.

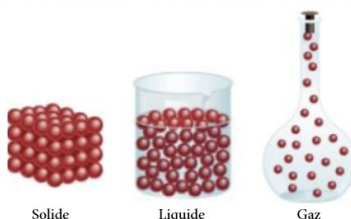


FIGURE 1.1 Structure sub-microscopique et microscopique de fluides

À un niveau moléculaire, le comportement fluide est fondamentalement caractérisé par l'absence d'ordre à grande échelle et par la présence d'un désordre moléculaire. Ces propriétés sont particulièrement manifestes dans les gaz et les liquides.

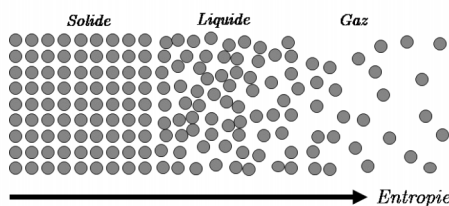


FIGURE 1.2 Passage de l'état solide à l'état gazeux.

B. PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

Les caractéristiques physiques des fluides, communément appelées propriétés, sont celles qui définissent leur comportement et leurs interactions dans divers contextes. Ces propriétés varient en fonction du domaine d'application des fluides, que ce soit en dynamique, thermique, chimie ou électricité. Dans ce chapitre, notre attention se concentre particulièrement sur les propriétés dynamiques, indispensables à la compréhension des futurs chapitres de mécanique des fluides (voir : *Propriétés des Fluides (Cours)*).²

1. Compressibilité

La compressibilité d'un fluide fait référence à la manière dont son volume réagit à une variation de la pression dp . Lorsqu'une pression agit sur un fluide, son volume subit une variation dV . En d'autres termes, l'application d'une pression accrue sur un fluide provoque une diminution des espaces entre ses molécules, entraînant ainsi une réduction de son volume (Munson et al., 2015 [3]). Cette propriété est quantifiée par un coefficient de compressibilité noté β . Si p , exprimée en Pascal (Pa), représente la pression du fluide, et V , en mètre cube (m^3), son volume, le coefficient de compressibilité en Pa^{-1} est calculé par :

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

1 - <https://m.youtube.com/watch?v=sN5buKf42ck>

2 - <https://m.youtube.com/watch?v=b4sZb3HrVjM>

2. Masse volumique et densité

a) Masse volumique

La masse volumique d'un fluide « ρ », est une caractéristique physique qui évalue la quantité de masse présente dans une unité de volume d'une substance particulière. Par ailleurs, la masse volumique peut varier en fonction de la température et de la pression du fluide. Si m représente la masse du fluide et V son volume, la masse volumique est exprimée en kg.m^{-3} et calculée comme suit :

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



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

b) Densité

La densité d'un fluide présente la relation entre la masse volumique de ce fluide et celle d'un corps de référence. C'est une grandeur sans unité d (adimensionnelle) définie par la formule suivante :

$$d = \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad (1.3)$$

Il est conventionnellement reconnu que l'eau présente un fluide référentiel pour les liquides, cependant l'air présente celui des gaz. On définit la densité des liquides $d_{liquide}$ et celle des gaz d_{gaz} respectivement comme suit :

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

La densité constitue une mesure importante pour évaluer la flottabilité relative de différents fluides par rapport à un fluide de référence spécifique. Plus précisément, un fluide ayant une densité inférieure à 1 est considéré comme plus léger que cette référence. Par conséquent, après une agitation, il a naturellement tendance à occuper une position supérieure, comme illustré dans la figure 1.4 (cf. FIGURE 1.4 Disposition de l'huile sur l'eau par effet de densité. p 9).



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

3. Poids volumique

Le poids volumique, également désigné par le symbole ϖ , traduit la force d'attraction exercée par la terre sur l'unité de volume, correspondant au poids de cette unité de volume. Mesuré en Newton par mètre cube (N.m^{-3}), le poids volumique est exprimé par la formule suivante :

$$\varpi = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1.5)$$

4. Viscosité

a) Viscosité dynamique

En raison des interactions entre les molécules de fluide et des forces agissant entre ces molécules et la surface environnante, les déplacements des molécules de fluide ne se produisent pas de manière uniforme. Cette disparité dans les vitesses de déplacement est à l'origine du profil de vitesse, tel qu'illustré dans la figure 1.5 (White, 2016 [3]). Si l'on utilise des vecteurs pour représenter les vitesses de chaque particule située dans une section transversale perpendiculaire au flux, la trajectoire formée par les extrémités de ces vecteurs illustre le profil de vitesse.

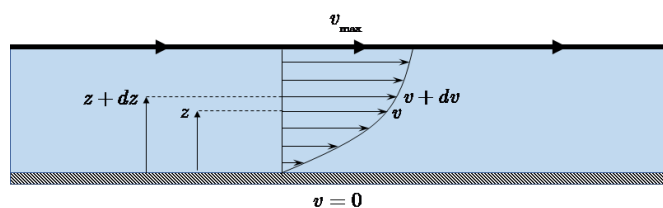


FIGURE 1.5 Frottement des couches d'un fluide les unes par rapport aux autres.

En examinant un fluide s'écoulant entre deux plaques parallèles de dimensions infinies, dont la paroi supérieure se déplace horizontalement à une vitesse constante v_{max} , le mouvement du fluide peut être interprété comme le produit du déplacement relatif entre les différentes couches du fluide. En d'autres termes, le glissement entre ces couches entraîne des vitesses variables.

Chaque couche de fluide présente une vitesse variable en fonction de la distance z . La force de frottement, symbolisée par \vec{F} et agissant tangentiellement à la surface de séparation entre ces deux couches de fluide, s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Cette force est directement proportionnelle à la différence de vitesse entre les couches, notée dv , ainsi qu'à la surface de contact S . Elle est inversement proportionnelle à la différence de distance dz . Le coefficient de proportionnalité μ représente le coefficient de viscosité dynamique du fluide, exprimant la facilité ou la difficulté de l'écoulement du fluide. La viscosité dynamique donnée en Pa.s, est calculée en utilisant la relation suivante :

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

En divisant les deux membres de l'équation précédente par la surface de frottement S , nous obtenons :

$$\frac{F}{S} = \tau = \mu S \frac{\Delta v}{\Delta z} \quad (1.7)$$

La grandeur τ est exprimée en unité de pression (Pa). Cependant, elle ne représente pas une pression car elle n'agit pas normalement sur la surface S . Il s'agit plutôt de la contrainte de cisaillement entre les différentes couches du fluide, résultant de deux forces tangentielles opposées : la force de mouvement et la force de frottement. Par conséquent, dans ce contexte, une alternative pour définir la viscosité peut être envisagée. En effet, la viscosité d'un fluide renvoie à sa capacité à contrer les forces tangentes cherchant à induire le déplacement des différentes couches du fluide les unes par rapport aux autres.

i Viscosité cinématique

La viscosité cinématique se définit comme le rapport entre la viscosité dynamique μ du fluide et sa masse volumique. Elle donne une indication sur le temps d'écoulement du fluide. Notée ν , elle est mesurée en $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ selon la formule suivante :

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

TABLE 1.2 Propriétés physiques de quelques fluides usuels

Fluide	Masse volumique $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Viscosité dynamique (10^{-6}) Pa.s	Tension superficielle (10^{-3}) N/m (/Air)
Eau	1000	1002.0	72.8
Air	1.293	18.25	72.8
Huile d'olive	918	100000	30 à 40
Essence	700	1	25
Butane	2.000	6 à 8	14 à 18
Mercure	13600	1.5000	485

Table 1.2 Propriétés physiques de quelques fluides usuels

C. VARIATION DES PROPRIÉTÉS DYNAMIQUES DES FLUIDES

Les caractéristiques des fluides, notamment 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 significatif dans de nombreux phénomènes et processus impliquant les fluides,

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

1. Variation due à la température

Les caractéristiques dynamiques des fluides sont intrinsèquement liées à la température, pouvant subir des variations notables en réaction aux changements thermiques dans leur environnement. Afin de prendre en compte ces fluctuations, les données relatives à certaines propriétés dynamiques des fluides sont spécifiées à des températures de fonctionnement habituelles.

En règle générale, la viscosité d'un fluide diminue à mesure que la température augmente. Les molécules du fluide acquièrent une énergie cinétique accrue à des températures plus élevées, ce qui diminue la cohésion intermoléculaire et facilite le

glissement entre les couches de fluide.

Similairement, la densité d'un fluide a tendance à diminuer avec l'augmentation de la température. Les molécules se dispersent davantage, entraînant une réduction de la compacité du fluide.

2. Variation due à la vitesse

Le mouvement d'un fluide à une vitesse donnée peut entraîner des modifications significatives dans ses propriétés dynamiques. En particulier, des caractéristiques telles que la masse volumique et la viscosité sont particulièrement sensibles à cette vitesse d'écoulement, ce qui introduit les concepts de compressibilité et de rhéologie.

En général, la vitesse a un impact limité sur la densité des fluides. Cependant, dans des situations où la vitesse atteint des niveaux extrêmement élevés, des phénomènes tels que la compression adiabatique peuvent provoquer des variations de densité. Lorsque le fluide se déplace à une vitesse significative, les interactions entre ses molécules sont altérées. En conséquence, il peut subir des changements de densité dus à la pression engendrée par le mouvement rapide des particules. Cela peut être particulièrement notable dans les gaz, où la compression peut induire des variations de densité remarquables.

Simultanément, la vitesse d'écoulement peut également exercer une influence sur la viscosité du fluide, qui représente sa résistance au glissement entre les couches. En effet, les frottements entre les molécules du fluide peuvent varier en fonction de la vitesse, ce qui peut augmenter ou diminuer sa viscosité. Ces fluctuations induisent des modifications significatives dans le comportement d'écoulement du fluide et ont des répercussions importantes sur sa capacité à transmettre les forces et à s'ajuster aux contraintes externes. Dans de tels cas, le fluide est qualifié de non-Newtonien.

3. Variation due à la pression

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

La densité d'un fluide peut changer en réaction à la pression. Dans les gaz, une augmentation de la pression peut conduire à une augmentation de la densité car les molécules se rapprochent. Dans les liquides, bien que la variation de densité avec la pression puisse être moins marquée, elle peut néanmoins avoir un impact non négligeable.

En ce qui concerne la viscosité, qui mesure la résistance interne d'un fluide au mouvement, elle peut également être influencée par la pression. Par exemple, dans certains liquides, la viscosité peut augmenter avec une élévation de la pression.

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 répartis en deux catégories principales selon leur réaction à une pression extérieure : les fluides incompressibles et les fluides compressibles.

a) Fluides incompressibles

Les fluides incompressibles sont caractérisés par une variation de volume négligeable en réaction à des changements de pression. Cela implique que leur densité reste essentiellement constante, indépendamment de la pression exercée. Les liquides, tels que l'eau et les huiles, sont couramment classés comme des fluides incompressibles dans la plupart des situations (Ben Hamouda, 2008 [4]). Ainsi on peut écrire :

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

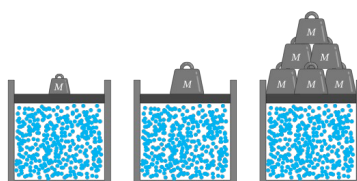


FIGURE 1.6 Fluides incompressibles.

b) Fluides compressibles

Les fluides compressibles se caractérisent par une variation significative de volume en réaction à des changements de pression. Cela implique que leur densité peut subir des changements notables en fonction de la pression exercée. Les gaz sont typiquement considérés comme des fluides compressibles, car les molécules de gaz peuvent être comprimées ou dilatées de manière significative en réponse à la pression appliquée (Ben Hamouda, 2008 [4]).

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



FIGURE 1.7 Fluides compressibles.



Remarque

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 \vec{N} entre le **fluide** et le **milieu extérieur**, voir figure 1.14. 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]).

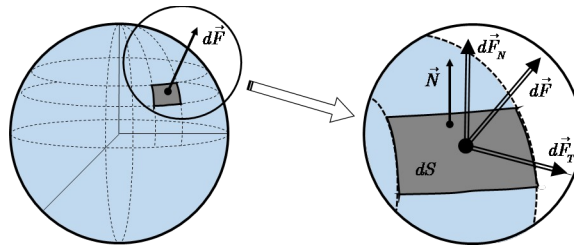


FIGURE 1.8 Force normale et tangentielle

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 (Ben Hamouda, 2008 [4]).

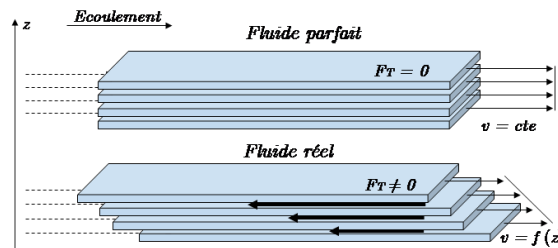


FIGURE 1.9 Couches de fluides parfait et réel lors d'un écoulement.

b) Selon la vitesse de cisaillement

i Fluide Newtonien

Les fluides Newtoniens se caractérisent par une viscosité constante, qui ne dépend pas de la vitesse de cisaillement, c'est-à-dire de la variation de vitesse entre les différentes couches du fluide lors de son écoulement. 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 invariable même en cas de modification de la vitesse d'écoulement. Ces fluides exhibent une relation linéaire entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$, une dépendance qui est communément appelée la **loi de Newton**.

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

ii Fluide non-Newtonien

Les fluides **non-Newtoniens** dits 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** constitue la discipline scientifique se penchant sur le comportement de déformation et d'écoulement de la matière, en particulier des fluides et des matériaux viscoélastiques, soumis à des 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 retrouver sa forme après une déformation) des matériaux. Cette discipline trouve des applications dans divers 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 les principes de cette discipline, les fluides **non-Newtoniens** sont fréquemment regroupés en fonction de la manière dont leurs viscosités apparentes varient avec le temps. On distingue généralement trois catégories : les fluides à **viscosité indépendante du temps**, les fluides à **viscosité dépendante du temps**, et les fluides **viscoélastiques**.

a) Fluides à viscosité indépendante du temps

Les fluides à viscosité indépendante du temps sont des fluides où le taux de cisaillement en un point donné est uniquement déterminé par la valeur de la contrainte de cisaillement en ce point à cet instant précis. Parmi ces fluides, on peut identifier les fluides **pseudoplastiques**, dilatants et **viscoplastiques**.

i Fluides rhéofluidifiants

Les fluides **pseudoplastiques**, également connus sous le nom de **fluidifiants** ou **rhéofluidifiants**, représentent la catégorie la plus répandue parmi les fluides non-Newtoniens indépendants du temps. Ils se distinguent par une viscosité apparente qui décroît avec l'augmentation du taux de cisaillement. Des exemples concrets incluent les solutions et suspensions aqueuses, les pétroles, la pâte à papier, les colles, ainsi que certaines peintures.

ii Fluides rhéoépaississants

Les fluides dilatants, également appelés rhéoépaississants, se caractérisent par une augmentation de leur viscosité apparente en fonction de l'accroissement du taux de cisaillement ; de ce fait, ces fluides sont également désignés comme présentant un épaississement par cisaillement. Ce comportement particulier a été initialement observé dans des suspensions concentrées. On retrouve ce type de réaction dans le cas des solutions aqueuses d'amidon ou de sable, ainsi que du quartz (Koller, 2002 [5]).

iii Fluides viscoplastiques

Les fluides viscoplastiques se démarquent par leur comportement spécifique, marqué par l'existence d'une limite d'élasticité (τ_0) qui doit être surpassée pour que le fluide puisse subir une déformation ou un écoulement .

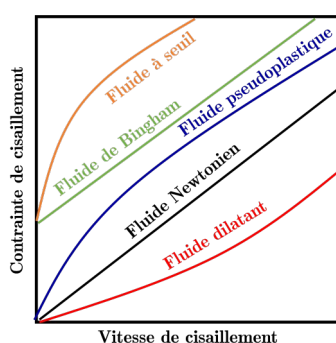


FIGURE 1.10 Les comportements des Différents fluides non-Newtoniens avec une viscosité indépendante du temps.

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 elle ne passera pas par l'origine. Ainsi, en l'absence d'effets de tension superficielle, un tel matériau ne s'aplanira pas sous l'effet de la gravité pour former une surface libre parfaitement plane (Barnes, et al., 1989 [6]). Les exemples les plus courants dans cette catégorie de fluides comprennent les pâtes de fruits et de chocolat, les peintures à l'huile, les graisses, le dentifrice, ainsi que les boues de forage (Koller, 2002 [5]).

b) Fluides à viscosité dépendante du temps

Les fluides à viscosité dépendante du temps sont des substances qui présentent une variation de leur viscosité en fonction du temps. La viscosité d'un fluide est une mesure de sa résistance au mouvement interne ou à l'écoulement. Dans le cas des fluides dont la viscosité dépend du temps, cette propriété peut changer au fil du temps en réaction à des contraintes extérieures, à des changements de température, ou d'autres facteurs.

Dans un fluide à viscosité dépendante du temps, la viscosité peut augmenter ou diminuer en fonction de divers paramètres. Cette variation peut être décrite par des modèles rhéologiques complexes qui prennent en compte les propriétés temporelles

du fluide. Ces modèles peuvent inclure des termes tels que la viscosité initiale, la viscosité à long terme, et d'autres paramètres permettant de caractériser la réponse du fluide au cours du temps.

Parmi ces fluides, on identifie les fluides **thixotropes** et **anti-thixotropes**.

i Fluides thixotropes

Les fluides thixotropes sont des fluides dont la viscosité diminue sous l'influence d'une contrainte de cisaillement appliquée, et qui retrouvent ensuite leur viscosité initiale au repos. Autrement dit, ces fluides exhibent une diminution temporaire de leur viscosité lorsqu'ils sont soumis à une contrainte de cisaillement, comme le mouvement ou l'agitation, et cette diminution est réversible lorsque la contrainte cesse (Nguyen et Uhlherr, 1983 [7]). Les exemples les plus courants sont : le ketchup, le yaourt, les peintures et revêtements, les gels cosmétiques.

ii Fluides anti-thixotropes

Les fluides anti-thixotropes, également appelés fluides rheopectiques, sont des substances dont la viscosité augmente sous l'effet d'une contrainte de cisaillement appliquée et qui conservent cette viscosité accrue même après le retour à un état de repos. Contrairement aux fluides thixotropes qui réduisent leur viscosité lorsqu'ils sont soumis à une force de cisaillement, les fluides anti-thixotropes montrent une augmentation de leur viscosité sous l'effet de la déformation et maintiennent cette viscosité accrue au repos.

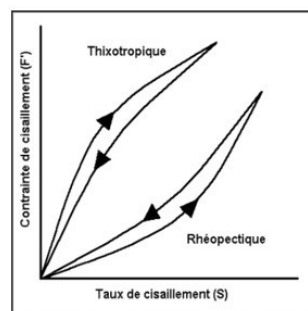


FIGURE 1.11 Comparaison entre un comportement thixotrope et anti-thixotrope.

Ces fluides exhibent un comportement dilatant temporel, se caractérisant par un épaississement lorsqu'ils sont soumis à une agitation. Des exemples de tels fluides, on peut citer certaines suspensions colloïdales sous certaines conditions, où la viscosité du fluide augmente en réponse à une agitation ou une déformation, et reste élevée même après la cessation de la force externe (Steg et Katz, 1965 [8]).

c) Fluides viscoélastiques

Les fluides viscoélastiques sont des substances qui combinent des caractéristiques de fluidité et d'élasticité. Contrairement aux fluides newtoniens qui présentent une viscosité constante, les fluides viscoélastiques exhibent des propriétés visqueuses et élastiques qui varient en fonction des conditions auxquelles ils sont soumis. La viscosité d'un fluide viscoélastique dépend du taux de déformation ou de cisaillement auquel il est soumis. À des taux de déformation faibles, le fluide peut se comporter de manière visqueuse, montrant une résistance à l'écoulement. Cependant, à des taux de déformation élevés, le fluide peut manifester des propriétés élastiques, se déformant et se remettant ensuite à sa forme initiale. (Chhabra et Richardson, 1999 [9]). Un exemple courant de fluide viscoélastique est la gélatine.

2. Lois de comportement

En mécanique des fluides, les lois de comportement des fluides non-newtoniens décrivent comment ces fluides réagissent aux contraintes de cisaillement, et elles diffèrent de celles des fluides newtoniens. Les fluides non-newtoniens présentent une viscosité qui dépend du taux de cisaillement ou de déformation appliqué, ce qui signifie que leur comportement visqueux n'est pas constant.

a) Fluide sans contrainte seuil

La relation entre la contrainte de cisaillement (force de déformation par unité de surface) et le taux de cisaillement (vitesse de déformation) pour un fluide non-newtonien sans seuil peut souvent être représentée par une ligne droite sur un graphique à double échelle logarithmique. Cette représentation est couramment utilisée pour analyser le comportement rhéologique des fluides non-newtoniens dans des conditions spécifiques.

Lorsque la relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement peut être approximée par une ligne droite sur une plage limitée de taux de cisaillement, cela suggère que le fluide suit une loi de puissance. En d'autres termes, la variation entre la contrainte et le taux de cisaillement suit une relation de puissance, souvent exprimée par une équation mathématique. Le modèle d'Ostwald de Wael est mentionné comme un exemple de loi de puissance qui peut être appliqué dans ces situations. Il est exprimé par l'expression de la forme suivante :

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1.15)$$

Par conséquent, la viscosité apparente pour un fluide décrit par la loi de puissance, également connue sous le nom de loi d'Ostwald de Wael, est exprimée de la manière suivante :

$$\mu_{app} = K|\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (1.16)$$



Fondamental

- 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.

Les équations mettent en avant les paramètres empiriques d'ajustement de courbe K et n , désignés respectivement comme le coefficient de consistance du fluide et l'indice de comportement de l'écoulement, dans le cadre du modèle d'Ostwald de Wael. Bien que largement utilisé en génie des procédés, ce modèle présente des limitations, s'appliquant uniquement dans une plage restreinte de taux de cisaillement, ce qui influe sur les valeurs ajustées de K et n . De plus, il ne permet pas de prédire les viscosités pour des taux de cisaillement nuls ou infinis. Malgré ces défauts, il reste prédominant dans la littérature.

b) Fluide avec contrainte seuil

Les fluides à seuil sont des fluides dont le comportement viscoélastique est caractérisé par la nécessité d'une contrainte de cisaillement minimale, appelée contrainte seuil ($\tau < \tau_0$), pour déclencher leur écoulement. En d'autres termes, ces fluides ne commencent à se déformer et à s'écouler que lorsque la contrainte de cisaillement appliquée atteint ou dépasse une valeur **seuil spécifique**. En dessous de cette contrainte seuil, le fluide se comporte comme un solide rigide, avec une incapacité à s'écouler.

F. FLUIDE AVEC MULTI-CONSTITUTIONS

La variété des fluides dans notre environnement va au-delà des classifications traditionnelles basées sur la compressibilité et la rhéologie. Elle englobe la composition chimique et la structure des fluides, donnant lieu à une diversité de fluides complexes. Ces fluides peuvent manifester des comportements variés, qu'ils soient non homogènes et anisotropes ou homogènes et isotropes. Ces comportements résultent de mélanges subtiles de différentes substances fluides, y compris des particules solides, dans des configurations telles que les solutions, les suspensions et les émulsions.

1. Solutions

Dans le contexte chimique, une solution fluide se réfère à un mélange homogène de deux substances ou plus, où l'une est dissoute dans l'autre, créant ainsi une phase unique. Le composé dissous est appelé le soluté, tandis que la substance qui dissout le soluté est appelée le solvant. Les solutions fluides peuvent adopter divers états tels que liquide, gaz, voire solide dans certaines situations. Dans la vie quotidienne, le terme "solution fluide" peut également être employé de manière plus générale pour décrire une approche ou une réponse qui se déroule naturellement et facilement pour résoudre un problème ou répondre à une situation donnée. Considérons un fluide de base (ou liquide) contenant n types de solutés liquides totalement miscibles, notés 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 majorité des cas usuels, déterminer la viscosité d'un mélange de fluides va au-delà de la simple moyenne des viscosités individuelles des constituants. Cette propriété dépend intrinsèquement de la structure moléculaire, des interactions entre les molécules, ainsi que d'autres facteurs complexes, rendant sa détermination délicate sans des données spécifiques. Néanmoins, une formule empirique connue sous le nom de loi de mixage d'Einstein [11] (1906) offre une estimation approximative de la viscosité d'un mélange binaire (deux fluides) dans 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 un mélange hétérogène composé de particules solides ou liquides dispersées dans un fluide, généralement un liquide. Dans une suspension, les particules dispersées ne sont pas dissoutes, mais plutôt suspendues dans le fluide et peuvent éventuellement se déposer au fond si le mélange repose pendant un certain temps. La taille des particules dans une suspension peut varier de manière significative, allant de particules microscopiques à des particules plus grandes et visibles à l'œil nu. Les suspensions peuvent être rencontrées dans de nombreux contextes, tels que les peintures, les médicaments liquides, les boues et les matériaux de construction, où la stabilité de la suspension peut être cruciale pour assurer une distribution uniforme des particules. La masse volumique et la viscosité dynamique des suspensions sont souvent calculées 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 des particules par :

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

Quant à la viscosité dynamique selon Brinkman (1952) [10], elle est calculée par :

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

Ou encore selon Einstein (1906) [11] :

$$\mu_{suspension} = \mu_f(1 + 2.5\phi) \quad (1.22)$$

S'il s'agit d'une suspension hybride en n espèce de particule p_1, p_2, \dots, p_n dans fluide f , la fraction volumique ϕ sera la somme de toutes les fractions volumiques de chaque espèce et est définie par :

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

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

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

3. Émulsions

Une émulsion est un mélange homogène de deux liquides non miscibles, tels que l'eau et l'huile, stabilisé par l'ajout d'un agent émulsifiant. Dans une émulsion, les gouttelettes d'un liquide (la phase dispersée) sont dispersées dans un autre liquide (la phase continue). L'agent émulsifiant aide à stabiliser l'émulsion en empêchant les gouttelettes de se regrouper et de se séparer. Les émulsions peuvent être de

deux types principaux : les émulsions, huile dans eau, où l'huile est dispersée dans l'eau, et les émulsions eau dans huile, où l'eau est dispersée dans l'huile (*voir : Miscibilité des liquides*³). Les émulsions sont couramment utilisées dans de nombreux produits, tels que les vinaigrettes, les crèmes, les lotions, et divers produits cosmétiques et pharmaceutiques

G. CONCLUSION

À travers cette exploration approfondie des propriétés des fluides, nous avons acquis une compréhension détaillée de leurs caractéristiques physiques et de leurs variations sous l'influence de divers paramètres. Parmi les notions essentielles assimilées, nous retenons que les fluides se démarquent par des propriétés dynamiques clés telles que la densité, la viscosité, et la tension superficielle, ces aspects influant significativement sur leur comportement face aux forces et aux mouvements.

Un élément essentiel de notre étude a été la distinction entre les fluides compressibles et incompressibles, basée sur leur réaction à la compression. De même, nous avons discerné les fluides réels des fluides parfaits, ce dernier représentant un état théorique simplifié. L'impact de la viscosité a également été exploré, conduisant à la différenciation entre les fluides Newtoniens, caractérisés par une viscosité constante, et les fluides non-Newtoniens, qui exhibent des comportements complexes en réaction aux variations de vitesse de cisaillement.

En outre, notre exploration a embrassé des fluides plus complexes tels que les suspensions et les émulsions, révélant des compositions mixtes et des comportements particuliers. Ces fluides hybrides illustrent la diversité des propriétés que les fluides peuvent manifester, transcendant les classifications fondamentales. En somme, cette étude approfondie nous a permis de saisir la complexité et la richesse des propriétés des fluides, fondamentales dans de nombreux domaines scientifiques et industriels.

H. Exercice

Exercice : Calcul de la masse volumique et de la viscosité dynamique de la suspension

Pour une application de refroidissement d'un équipement électronique, une suspension nanométrique (nanofluide) hybride composée de nanoparticules d'alumine (Al_2O_3) et d'Oxyde de cuivre (CuO) est préparée à l'aide de l'agitation ultrasonique. Pour ce faire, deux volumes : 3.015 cm^3 en Al_2O_3 et 2.01 cm^3 de CuO sont suspendus dans 1 litre d'eau pure. Les propriétés physiques de chaque espèce de la suspension sont montrées dans la table 2. (cf. Propriétés de la suspension p 21)

Substance	Masse volumique (kg/m^3)	Viscosité dynamique (Pa.s)
Eau pure	997.1	0.001003
Alumine (Al_2O_3)	3970	-
Oxyde de cuivre (CuO)	6500	-

Propriétés de la suspension

Question

[Solution n°1 p 23]

— Calculer la masse volumique et la viscosité dynamique de la suspension.

3 - https://m.youtube.com/watch?v=2Sp-K_jQigg

Solution des exercices

> Solution n°1 (exercice p. 21)

Nous sommes demandés de calculer la masse volumique et la viscosité de la suspension hybride. Calculons la fraction volumique de chaque espèce de nanoparticules :

$$\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{V_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{V_{\text{eau}} + V_{\text{Al}_2\text{O}_3} + V_{\text{CuO}}} = \frac{3.015 \times 10^{-6}}{3.05 \times 10^{-6} + 2.01 \times 10^{-6} + 1 \times 10^{-3}} = 0.003 \quad (1)$$

$$\rho_{\text{CuO}} = \frac{V_{\text{CuO}}}{V_{\text{eau}} + V_{\text{Al}_2\text{O}_3} + V_{\text{CuO}}} = \frac{2.01 \times 10^{-6}}{3.05 \times 10^{-6} + 2.01 \times 10^{-6} + 1 \times 10^{-3}} = 0.002 \quad (2)$$

La fraction volumique des nanoparticules hybride est :

$$\rho = \rho_{\text{Al}_2\text{O}_3} + \rho_{\text{CuO}} = 0.005 \quad (3)$$

La masse volumique des nanoparticules est :

$$\varphi_p = \frac{\varphi_1 \rho_{\text{Al}_2\text{O}_3} + \varphi_2 \rho_{\text{CuO}}}{\varphi} = \frac{(0.03 \times 3970) + (0.002 \times 6500)}{0.005} = 4982 \text{ Kg/m}^3 \quad (4)$$

La masse volumique de la suspension :

$$\rho_{\text{nf}} = \varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_{\text{eau}} = (0.005 \times 4982) + (1 - 0.005) \times 997.1 = 1017 \text{ Kg/m}^3 \quad (5)$$

Viscosité de la suspension

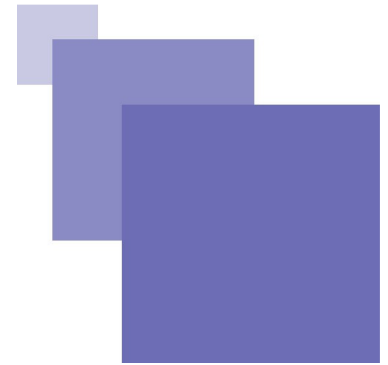
Selon Brinkmann. [10] [10] [10] [10] [10] [10] [10] [10]

$$\mu_{\text{nf}} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} = \frac{0.001003}{(1 - 0.005)^{2.5}} = 0.00101056 \text{ Pa.s} \quad (6)$$

Selon Einstein [11] :

$$\mu_{\text{nf}} = \mu_f (1 + 2.5\varphi) = 0.001003 (1 + 2.5 \times 0.005) = 0.0010155 \text{ Pa.s} \quad (7)$$

Bibliographie



- [1]** White, F. M. (2016). Fluid Mechanics. McGraw-Hill Education. ISBN: 978-0073398273.
- [2]** Kundu, P. K., Cohen, I. M., & Dowling, D. R. (2011). Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. Academic Press. ISBN: 978-0123821003.
- [10]** Brinkman, H. C. (1952). The viscosity of concentrated suspensions and solutions. Journal of Chemical Physics, 20, 571–581. <https://doi.org/10.1063/1.1700493>
- [11]** Einstein, A. (1906). Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. Annalen der Physik, 324(2), 289-306.
- [3]** Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2015). *Fundamentals of Fluid Mechanics. Wiley. ISBN: 978-1119080701.
- [4]** Ben Hamouda, R. (2008). Notions de Mécanique des Fluides. Centre de Publication Universitaire.
- [5]** Koller, E. (2002). Transport et Stockage des Fluides dans l'Industrie : Technique et Ingénierie. Dunod Industrie et Technologie.
- [6]** Barnes, H., Hutton, J., & Walters, K. (1989). An Introduction to Rheology. Elsevier Sciences Publisher.
- [7]** Nguyen, Q., & Uhlherr, P. (1983). Proc, 3rd Nat. Conf. on Rheol. Melbourne, Australia.
- [8]** Steg, I., & Katz, D. (1965). Rheopexy in some polar fluids and in their concentrated solutions in slightly polar solvents. Journal of Applied Polymer Science, 9, 3177.
- [9]** Chhabra, R., & Richardson, J. (1999). Non-Newtonian Flow in the Process Industries. Butterworth-Heinemann.