

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION

1. L'histoire de la rhéologie
2. Définition de la Rhéologie
3. Déformation et l'écoulement de la matière (Liquide ou Solide)
4. Pourquoi la Rhéologie?

II. Comportement rhéologique

1. Comportement viscoélastique
2. Les fluides Newtoniens
3. Les fluides non-Newtoniens

III. Appareillages utilisés dans les mesurés rhéologique

1. Rhéomètre
2. Viscosimètre

IV. Domaine d'étude et Application

V. Rappel sur la mécanique de fluide

VI. Conclusion

I. Introduction

Généralités

La rhéologie: Branche de la physique qui étudie les rapports entre la **viscosité**, la **plasticité** et l'**élasticité** de la matière, ainsi que le comportement de celle-ci sous l'influence des pressions. Elle est la science qui étudie les déformations et l'écoulement de la matière. Elle a pour objet d'analyser les comportements mécaniques des substances et d'établir leurs lois de comportement.

La rhéologie englobe de nombreuses disciplines fondamentales telles que la **résistance** des matériaux, la mécanique des fluides, la plasticité...

Il est possible de classer les matériaux en fonction de leur comportement :

- il existe des corps très déformables ou fluides qui prennent une déformation finie sous l'effet d'une pression hydrostatique, et un écoulement indéfini sous l'effet d'une contrainte de cisaillement même faible.
- il existe des corps peu déformables ou solides qui ont une déformation finie quelle que soit la nature de la contrainte, au moins jusqu'à un certain seuil de contrainte.
- il existe des matériaux (les plus courants) qui sont compris entre ces deux extrêmes (les matériaux à comportement élastique, **plastique**, visqueux, viscoplastique..).

I.1 L'histoire de la rhéologie

- Première utilisation du mot rhéologie en 1929 attribuée à Pr. Eugène Cook Bingham (1878-1945)
- Origine étymologique : Grec **Ta panta rhei** (tout s'écoule), phrase attribuée au Philosophe Heraclitus (536-470 av JC),
Le mot a été francisé en « **Rhéologie** » en 1943. [1]

I.2 La Rhéologie

Science de la déformation et de l'écoulement de la matière

Façon dont les matériaux répondent à une contrainte ou à une déformation.

Etat de la matière :

Il y a trois états de la matière (voir figure 1.1) pour un corps simple :

- solide : matériau a faible température ;
- liquide : matériau a température moyenne et pression suffisamment élevée ;
- gaz : matériau a température suffisamment élevée et a faible pression. [8]

Figure 1: représentation idéalisée des trois états de la matière



I.3 Déformation et l'écoulement de la matière

Déformation: toute action qui change forme, dimension et localisation d'un corps d'un état initial à un état final Comparaison de 2 états à 2 temps différents à la différence de la contrainte qui décrit 1 condition à 1 temps donné.

L'écoulement d'un fluide : est le mouvement du fluide comme continuum.



Figure 2 : tout s'écoule, même les montagnes déformation

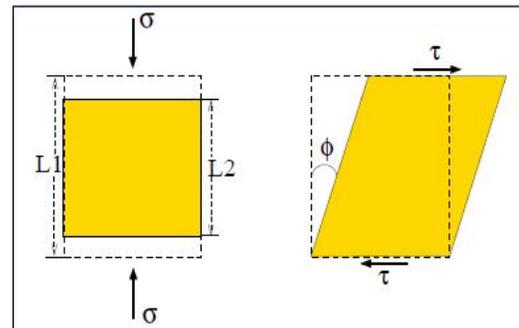


Figure 3 : schéma présenter la

Type de solide

-Solide parfait : est un matériau indéformable comme « Spinelle , NaCl,.. »

-Solide élastique : est un matériau déformable comme les plastiques [7]



NaCl



Spinelle (rouge saphir)



plastique

Type de liquide

Liquide très fluide : Eaux, solvant organiques, solutions, dispersions diluées

Fluide plus visqueux : Écoulement d'un tas de suspension d'argile sur un plan incliné



Figure 4 : écoulement d'une argile

Type des déformations

-Déformations élastique et plastique

▪ **Comportement élastique:** déformation réversible de la roche

- relation linéaire entre σ et ϵ
- matériaux élastiques accumulent une déformation qu'ils restituent quand la contrainte est relâchée

▪ **Comportement plastique:** déformation non réversible de la roche

- pas de relation linéaire entre σ et ϵ
- matériaux plastiques ne restituent pas la déformation après relaxation des contraintes

▪ **Fluage:** déformation à contrainte constante [6]

-Déformation cassante et ductile

▪ **Roche cassante:** se déforme de manière élastique voir même un peu plastiquement avant la rupture

- déformation discontinue, froide et rapide
- caractérisée par une direction et un sens de mouvement

▪ **Roche ductile:** subit de grandes déformations sans rupture

- déformation continue et chaude
- caractérisée par des déplacements de blocs aux limites du domaine

- **Roche ductile-cassante:** certaines roches ont un comportement ductile avant rupture

=> Température, pression et vitesse de déformation font varier la limite cassant/ductile

Tout est une question de temps d'observation

Écoulement instantané: Eaux, solvant organiques, solutions, dispersions diluées

Écoulement sur plusieurs heures: écoulement des substances pâteuses ou semi solides..

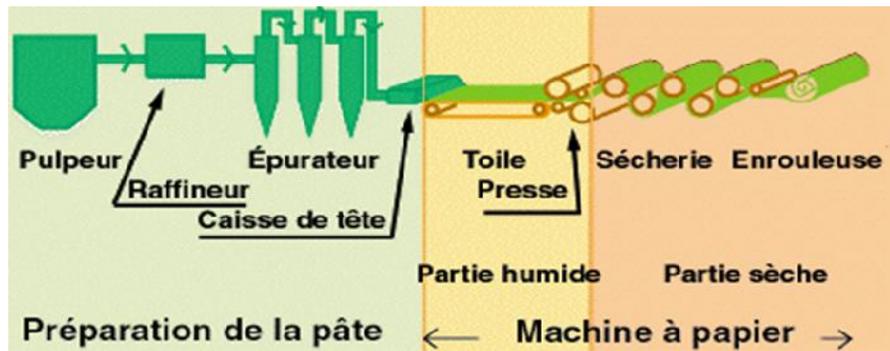
I.4 Pourquoi la Rhéologie?

Étymologiquement, la rhéologie est une discipline qui traite de l'écoulement, des déformations des matériaux sous l'action de contraintes. [3]

La rhéologie a été développée pour décrire les propriétés de matériaux au comportement mal défini et intermédiaire entre celui du solide élastique parfait et celui du fluide Newtonien

Toutes les matières ont des propriétés rhéologique

Nombreux secteurs concernés



II/ Comportement rhéologique

II.1 Comportement viscoélastique

Le comportement rhéologique d'un fluide traduit la réponse mécanique de celui-ci, c'est-à-dire la relation entre les déformations du fluide et les contraintes appliquées. [4]

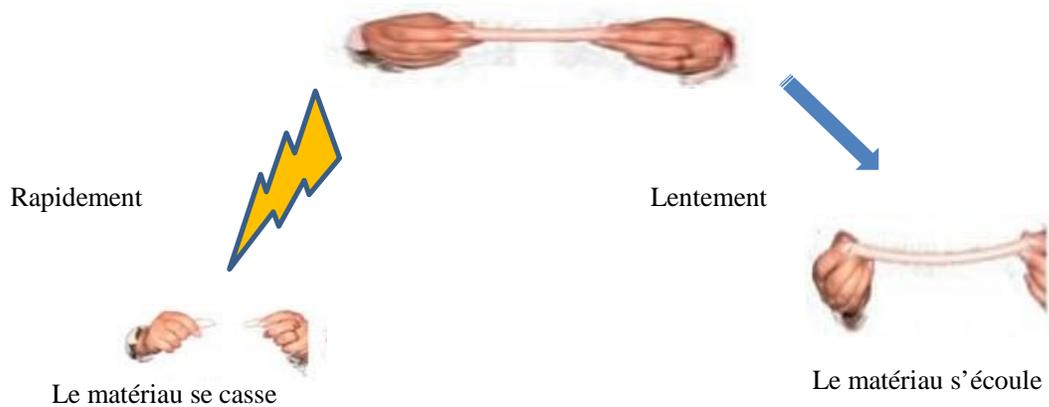
De manière générale, elle s'exprime par une équation constitutive reliant le tenseur des contraintes et le tenseur des taux de déformation.

Il existe une grande variété de comportements rhéologiques, depuis une simple relation linéaire entre contraintes et taux de déformation, jusqu'à des comportements complexes, pouvant dépendre des vitesses de déformation, de l'histoire du fluide ou des conditions d'écoulement. [4]

Dualité de comportement des matériaux

Comportement élastique (comme un solide) \longleftrightarrow Viscoélasticité \longleftrightarrow Comportement visqueux (comme un liquide)

Solide idéal \longleftrightarrow Fluide idéal



Importance du temps d'observation

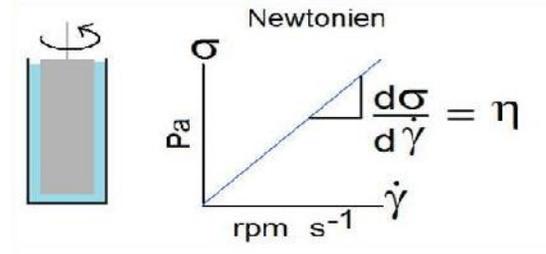
II.2 Classes des fluides

Les fluides sont classés en deux grandes catégories :

II.2 Les fluides Newtoniens :

Ont la particularité d'avoir une viscosité indépendante de la contrainte appliquée.

On parle alors de fluide parfait ou linéaire



II.3 Les fluides Non Newtoniens :

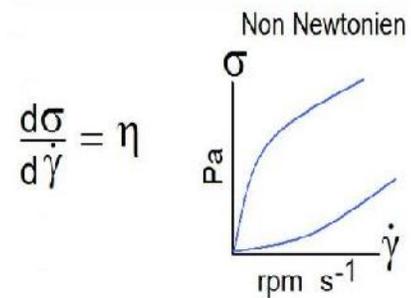
On distingue deux types de fluides:

- **Les fluides rhéofluidifiants:**

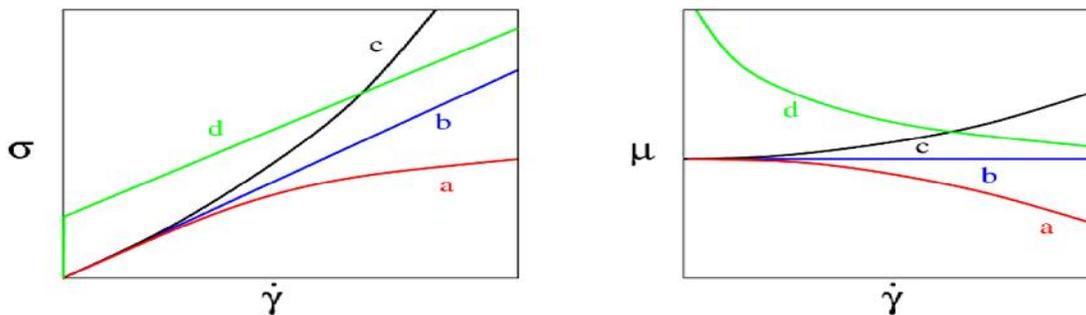
Leur viscosité diminue si la contrainte augmente (C'est le cas du sang, des polymères liquides à longue chaîne, des jus de fruits, des pâtes à papier, des colles et des ciments).

- **Les fluides rhéoépaississants:**

Leur viscosité s'accroît lorsque la contrainte augmente. (C'est le cas de certains amidons dans l'eau).



Courbes d'écoulement pour des fluides complexes



(a) rhéo-fluidifiant, (b) newtonien, (c) rhéo-épaississants et (d) à seuil.

Les viscosités correspondantes ne sont plus constantes mais dépendent du taux de cisaillement.

III. Appareillages utilisés dans les mesurés rhéologique

III.1 Rhéomètre :

Est un appareil de laboratoire capable de faire des mesures relatives à la rhéologie d'un fluide. Il applique un cisaillement à l'échantillon. Généralement de faible dimension caractéristique (très faible inertie mécanique du rotor), il permet d'étudier fondamentalement les propriétés d'écoulement d'un liquide, d'une suspension, d'une pâte, etc., en réponse à une force appliquée. [16]



Les rhéomètres MCR d'Anton Paar avec logiciel RheoCompass

Viscosimètre :

Est un appareil destiné à mesurer la viscosité des fluides.

Il existe deux types de viscosimètre :

-Les viscosimètres de « process » ;

-Les viscosimètres de laboratoire. [16]



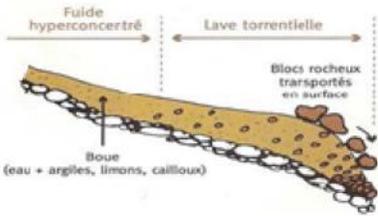
IV/ Domaine d'application :

- * **Géologie:** les glissements de terrain, l'écoulement de la lave et du magma
- * **Plastiques;**
- * **Polymères et composites;**
- * **Peintures et pigments;**
- * **Médecine, Biotechnologie:** le comportement du sang et l'hémodynamique ;
- * **Cosmétiques ;**
- * **Agro-alimentaire:** le comportement des fruits et légumes sous une contrainte d'écrasement ;

La plupart des produits de grande consommation sont aujourd'hui des produits formulés, c'est à dire des mélanges complexes de constituants , avec des applications qui se situent dans des domaines très variés tels que *l'agro-alimentaire, la cosmétique, la pharmacie, la détergence,...*

La diversité des propriétés fonctionnelles de ces constituants, et les procédés industriels mis en œuvre pour leur préparation permettent de préparer une gamme de produits formulés dont les propriétés d'usage répondent à la demande des consommateurs.

De ce fait, la rhéologie est un outil central dans le contexte de l'élaboration de ces produits complexes. [5]

Matériaux naturels géologiques	Dépôt laissé par la Crue à Brigue (1993)
	
Application de peintures à la brosse	Application des bitumes
	
Application aux produits cosmétiques	Préparation et mise en œuvre des bétons
	

V. Rappel sur la mécanique de fluide :

V.1. Définition d'un fluide :

Un fluide est un corps physique sans rigidité dont une de principales propriétés est de subir de grandes déformations non élastiques sous l'action de forces extérieures faibles.

Cette propriété que l'on appelle fluidité, est due à une grande mobilité de particules fluides.

Les fluides sont considérés comme des milieux déformables et continus dont n'importe quel volume infiniment petit possède les mêmes propriétés qu'un volume aux dimensions finies.

Un liquide, par exemple l'eau, est un fluide pratiquement incompressible, tandis qu'un gaz, par exemple l'air, est un fluide compressible. [2]

V.2. La mécanique des fluides :

Est l'étude du comportement des fluides (liquides et gaz) et des forces internes associées. C'est une branche de la mécanique des milieux continus qui modélise la matière à l'aide de particules assez petites pour relever de l'analyse mathématique mais assez grandes par rapport aux molécules pour être décrites par des fonctions continues. [16]

Elle se divise en deux parties :

- **la statique des fluides** : Est l'étude des fluides au repos, qui se réduit pour l'essentiel à l'hydrostatique .
- **la dynamique des fluides** : L'étude des fluides en mouvement.

la dynamique des fluides est un domaine actif de la recherche avec de nombreux problèmes non résolus ou partiellement résolus. Elle utilise systématiquement des méthodes numériques appelées « **mécanique des fluides numérique** ».

Dans certains problèmes particuliers, faute de modélisation numérique correcte des phénomènes, des modèles réduits sont utilisés. Pour cette raison, et aussi pour présenter des lois empiriques, la mécanique des fluides utilise systématiquement des nombres sans dimension. [16]

V.3. Type d'écoulement

L'écoulement d'un fluide est le mouvement du fluide comme continuum.

Un fluide s'écoule, tandis qu'un solide se déplace en bloc.

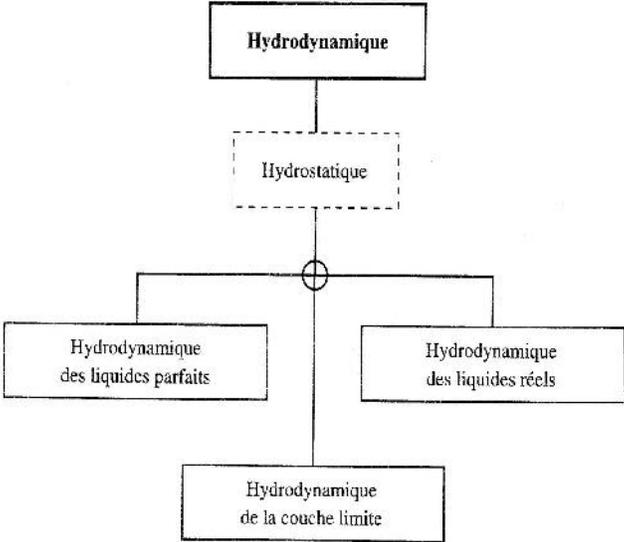
L'écoulement d'un fluide est caractérisé par un *champ de vitesse*, par la *pression* et par certaines propriétés (voir chapitre IA) de ce fluide telles que la *densité* et la *viscosité*; cette dernière est d'une importance particulière dans l'étude des écoulements.

La viscosité est une mesure de la résistance d'un fluide à l'écoulement; elle est due au frottement entre les particules fluides en mouvement.

Un fluide dont la viscosité n'est pas prise en compte lors de l'étude de l'écoulement est dit *non visqueux* ou *parfait* et le mouvement n'est accompagné d'aucune force de frottement; par contre, un fluide dont la viscosité est prise en compte est dit *visqueux* ou *réel*.

La viscosité provoque une dissipation d'énergie cinétique qui est transformée en chaleur

Un cas particulier de l'hydrodynamique est l'*hydrostatique*, qui est : l'étude des liquides au repos



hydrodynamique de la couche limite, lorsque l'écoulement peut être divisé en deux régions :

- i) une zone de faible épaisseur, dite couche limite, qui se situe près d'une surface solide où l'influence de la viscosité est importante et
- ii) une zone au dessus de la couche limite, dite fluide libre, où l'influence de la viscosité est négligeable

L'écoulement d'un fluide réel est dit *laminaire* s'il se déplace en formant des lames ou *couches* entre lesquelles il n'y a pas de mélange.

L'écoulement désordonné d'un fluide réel est dit *turbulent* s'il se déplace en formant des *tourbillons* de tailles différentes accompagnés d'un mélange ou brassage intensif des particules fluides.

Un écoulement est dit *stationnaire ou permanent* si la vitesse ne dépend pas du temps, mais elle peut varier d'un point à l'autre dans l'espace.

En un point fixe, il n'y a pas de changement de vitesse dans le temps.

Un écoulement turbulent, lui-même non permanent, peut être permanent en moyenne.

Un écoulement est dit *uniforme* si la vitesse ne dépend pas de la position dans l'espace.

Par conséquent, dans un écoulement uniforme, les vecteurs vitesse sont parallèles en tout point.

Voir chapitre hydrostatique:

Dérivée particulaire

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \times \overrightarrow{\text{grad}})\vec{v}$$

accélération locale
est nulle pour un écoulement
stationnaire ou permanent

accélération advective
est nulle pour un écoulement *uniforme*

L'écoulement le plus général dépend des trois variables spatiales, x, y, z ; on l'appelle alors écoulement *tridimensionnel*.

Il existe des cas particuliers où les variables sont ramenées à deux; on l'appelle alors l'écoulement *bidimensionnel ou plan*.

Si toutes les quantités d'écoulement dépendent d'une seule variable, l'écoulement est dit *unidimensionnel*.

Dimensions et unités

Toutes les grandeurs physiques sont exprimées par des dimensions et ces dimensions sont quantifiées par des unités. On utilise actuellement le Système International (SI).

Les unités de base utilisées couramment sont

pour la longueur (l, L)	L en mètre [m]
pour le temps (t)	T en seconde [s]
pour la masse (m)	M en kilogramme [kg]
pour la température (T) :	en degré Kelvin [K]

Grandeur	Symbole	Dimension	Unite SI
<i>Vitesse</i>	V	LT^{-1}	$M.S^{-1}$
<i>Accélération</i>	a	LT^{-2}	$M.S^{-2}$
<i>Force</i>	F	MLT^{-2}	N=Kg
<i>Masse volumique</i>		ML^{-3}	Kg M ⁻³
<i>Poids volumique</i>		$ML^{-2}T^{-2}$	Kg M ⁻² S ⁻³
<i>Pression</i>	P	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa= $N.M^{-2}$
<i>Energie, travail</i>	E	$ML^{-2}T^{-2}$	J= $N.m$
<i>Puissance</i>	P	ML^2T^{-3}	W= $N.m.S^{-1}$
<i>Quantité de mov.</i>	mV	LT^{-1}	N.s
<i>Viscosité dynam.</i>	μ	$ML^{-1}T^{-1}$	Kg M ⁻¹ S ⁻¹
<i>Viscosité ciném.</i>		L^2T^{-1}	$M^2 S^{-1}$

V.4. LOIS DE CONSERVATION

Les forces, qui agissent sur le continuum fluide situé à l'intérieur d'un volume quelconque et limité par une surface fermée, sont de deux types

a) *les forces de volume* : en hydrodynamique, ce sont les forces de pesanteur et les forces d'inertie (accélération) :

b) *les forces de surface* : en hydrodynamique des liquides parfaits, ce sont les forces dues à la pression (tensions normales), auxquelles 'ajoutent en hydrodynamique des liquides réels les forces dues au frottement (tensions tangentiellles).

Pour établir les *équations du mouvement* d'un fluide, il faut déterminer la relation entre les différentes forces agissant sur un volume quelconque du fluide.

En appliquant les principes généraux de la mécanique et de la Thermodynamique à un volume de fluide, on obtient les 3 lois suivantes de conservation pour décrire les mouvements d'un fluide :

- a) conservation de la masse (principe de continuité),
- b) conservation de la quantité de mouvement (principe fondamental de la dynamique),
- c) conservation de l'énergie (premier principe de la thermodynamique) .

V.5 PROPRIETES DES LIQUIDES

Tous les fluides possèdent des caractéristiques permettant de décrire leurs conditions physiques dans un état donné. On essaie d'exprimer ces caractéristiques, qu'on appelle propriétés du fluide, au moyen d'un nombre limité d'unités de base.

- Masse volumique $\rho = dm/dV$

où dm est la masse totale de toutes les molécules d'une particule fluide de volume dV . C'est une mesure de la concentration de la matière, exprimée comme une masse, dm , par volume unitaire dV . Les unités dans le système SI sont : $[kg/m^3]$

- Poids volumique $\gamma = \rho g$

correspond à la force de gravité agissant sur la masse par unité de volume.

■ Masse volumique d'un fluide :

Un échantillon de fluide homogène de masse m et occupant un volume V possède la masse volumique. [16]

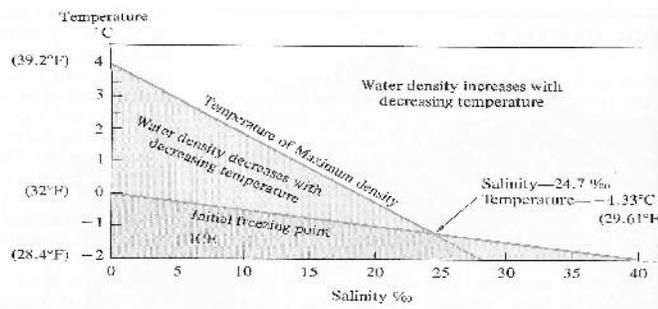
■ Densité

La *densité* d'un fluide est définie comme étant le rapport entre la masse volumique d'un fluide et la masse volumique de l'eau (air pour les gaz) dans des conditions standard ($P_a = 1$ atm, $T = 3.98^\circ C$ pour eau, $T=0^\circ C$ pour air).

C'est un nombre sans dimension, appelé "relative density" en anglais.

Pourquoi les conditions standard sont pour $T= 3.98^\circ C$ et non pas pour $T = 0^\circ C$?

Parce que c'est à cette température que l'eau douce est la plus dense



Pour un liquide monoconstituant, $\rho = \rho(T, p)$ avec T température, p pression

Les fluides géophysiques sont généralement au moins binaires

Ex l'eau est un mélange d'eau douce et de sel $\rho = \rho(T, S, p)$ S salinité

Eau standard $\rho_{st} = 999,975 \text{ kg.m}^{-3}$

est très proche ρ_{st} de donc elle est proche de 1000 en unité SI
(avec au moins deux ou trois décimales importantes)
donc il a été introduit le concept de l'excès de masse volumique :

$$\rho(S, T, p) = \rho_{st}(S, T, p) - 1000 \text{ kg.m}^{-3}$$

Avec cette notation, au lieu d'utiliser la masse volumique avec un chiffre comme

$$\rho = 1025,748 \text{ kg.m}^{-3}$$

, on utilise le terme plus « pratique » : $\sigma = 25,748$

Pour un gaz monoconstituant parfait

l'équation générale des gaz – ou loi des gaz parfaits – relie les quatre variables pression, volume, température absolue (en Kelvin $T = t + 273,15$) et quantité (N nombre de moles) de gaz.

$$pV = NRT$$

où la constante R appelée « constante des gaz parfaits » vaut $8,3144621 \text{ J.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

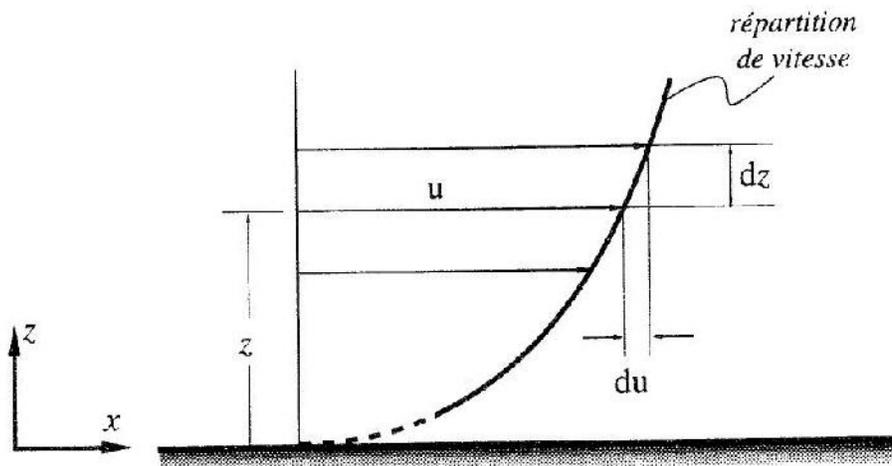
L'air atmosphérique est un gaz binaire: air sec + vapeur d'eau

$\rho = \rho(T, c, p)$ ou c est l'humidité.

VISCOSITE

La viscosité d'un fluide est la mesure de sa résistance à l'écoulement. La viscosité est une propriété qui permet de distinguer un fluide parfait (viscosité nulle) d'un fluide réel.

Dans un fluide, la force de frottement (force tangentielle) par unité de surface ou tension de frottement, est proportionnelle au gradient de vitesse de l'écoulement, du/dz .



Lorsque le fluide se déplace en couches parallèles -écoulement dit *laminaire* -le facteur de proportionnalité est le coefficient de viscosité moléculaire dynamique, μ et la loi de la viscosité de Newton, ou de Stokes, s'exprime ainsi:

$$= \frac{dF}{dS} = \mu \frac{dU}{dZ} \quad \text{1/100 tension de frottement}$$

La force de frottement ralentit les couches les plus rapides
accélère les couches les plus lentes

Retrouver l'unité de μ

$$\mu = \frac{\frac{dF}{dS}}{\frac{dU}{dZ}} \quad [\mu] = \frac{\frac{ML}{T^2 L^2}}{\frac{L}{TL}} = \frac{M}{T^2 L} = \frac{M}{LT}$$

Dans le système SI, la viscosité dynamique, μ , a pour unité: $[kg \cdot M^2 \cdot S^{-1}]$

- Viscosité moléculaire cinématique $\nu = \mu/\rho$ a pour unité: $[M^2 \cdot S^{-1}]$

En général, μ liquides $>$ μ gaz
alors que souvent ν liquides $<$ ν gaz

- ν liquides ne dépend guère de la pression mais varie avec la température

- Les fluides qui obéissent à la loi de Newton sont des *fluides newtoniens*.
ex. eau et d'autres liquides (essence, air, glycérine etc...)

- Certains fluides, tels que les plastiques liquides ou les suspensions concentrées,
Ne se comportent pas selon la loi de Newton et sont donc non newtoniens.

L'étude des propriétés de ces fluides est appelée la rhéologie

▪ la pression :

Si la force pressante F est normale à la surface pressée S et s'exerce uniformément en chaque point de cette surface, la pression s'exprime comme [16]

V.6. Théorème de Bernoulli :

Ce théorème, établi en 1739 par Daniel Bernoulli, exprime *le bilan hydraulique Simplifié d'un fluide dans une conduite*. Il a posé les bases de l'hydrodynamique et, d'une façon plus générale, de la mécanique des fluides.

$$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} = \text{cte}$$

Où v vitesses du fluide en m.s^{-1} , g accélérations de la pesanteur en N.kg^{-1} ou m.s^{-2} .

Z altitudes en m, p pressions dans la conduite en Pa ou N.m^{-2} , ρ masse volumique du fluide en kg.m^{-3} .

Ce théorème suppose un fluide *incompressible* (ρ constant), « *parfait* » (sans viscosité), en régime permanent et sans transfert de chaleur. [16]

VI. Conclusion

** La Rhéologie : est une discipline de la science qui consiste à caractériser l'ensemble des matériaux, que ce soit des liquides ou des solides.*

** La Rhéologie est une méthode expérimentale pertinente pour l'étude des matériaux complexes utilisés dans de nombreux secteurs industriels.*

** En pratique, la rhéologie s'intéresse surtout aux matériaux dits « complexes » dont le comportement se situe entre celui d'un solide élastique et celui d'un liquide visqueux.*

** Aide pour la formulation de produits, simuler des processus industriels, pour une meilleure compréhension des produits dans les conditions d'usage.*

Donc l'importance de la rhéologie sa existe dans des différents domaines par exemple dans le génie civil le plus important (La maniabilité, La consistance est la capacité d'écoulement, La plasticité avec laquelle on peut mouler le béton). Dans le domaine hydraulique pour (MDF), et dans la mécanique des matériaux solides.

Bibliographie :

- [1] **Ancey, C.** « *Introduction to Fluid Rheology* », École Polytechnique Fédérale de Lausanne 2005
- [2] Ancey, C. « Mécanique des fluides », École Polytechnique Fédérale de Lausanne 2015
- [3] Annick Le Blanc, « *Les caractéristiques rhéologiques des pâtes* », ENSMIC Paris, 2008
- [4] Benmounah, A. et al . « *Comportement rhéologique des pâtes cimentaires destinées aux bétons autoplaçants.* », Revue Nature et Technologie. n° 01/Juin 2009. Pages 74 à 88 , Université de Boumerdès, Algérie
- [5] **Bernardin, D.** « *INTRODUCTION A LA RHEOLOGIE DES FLUIDES* ». École de Printemps. (Nancy) 2003
- [6] **Caillette, A.** “*Notions de rhéologie*”.
- [7] **Clark, R.** “*Understanding Rheology* ». Distinguished Research Fellow. San Diego R&D
- [8] Claude , Verdier. « *COURS DE RHEOLOGIE* », Université Joseph Fourier (Grenoble I), France
- [9] CREPIM « *Mesures des caractéristiques rhéologiques des polymères thermoplastiques* »
- [10] **Deepak, D.** « *The origine of rheology* ». Dupont iTechnologies, Wilmington, DE.
- [11] Fleurat, Lessard. « *Chimie du Solide* ». Agrégation de Chimie 2010/2011 Lyon.
- [12] **Guazzelli, E.** « *Rhéologie des fluides complexes* » Octobre 2001.
- [13] LAMURE, A. « *INITIATION A LA RHEOLOGIE DES POLYMERES* ».
- [14] Novák ,Levente. “*Rheology. Definition of viscosity.Non-newtonian behaviour.*” (2012).
- [15] http://www.ig.usp.br/mralcant/About_Rheo.html « *ABOUT RHEOLOGY* »
- [16] Notion rhéologique (wikipédia).