

Rhéologie

UE : Mécanique des Fluides

jean fréjus konan
jean@jeankonan.com

PLAN DU COURS

1. Définitions et Lois Générales
2. Typologie des différents modes d'écoulement et applications
3. Viscoélasticité
4. Principe et description de différents rhéomètres
5. Applications :
Ecoulement de fluides réels dans des conduites
Analyse de la texture des Aliments

PREMIERE PARTIE:

Définitions et Lois générales

1.1. Définitions de la rhéologie

« *Tous les corps s'écoulent ou se déforment* »

Rhéologie



Discipline qui étudie l'écoulement et la déformation des matériaux sous l'action de contraintes;

ou encore



Science des relations entre contraintes et déformations (ou vitesses de déformation) d'un élément de volume.



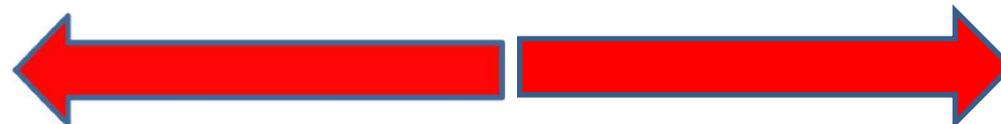
Domaine d'application étendu faisant appel à des notions de mécanique, de physico-chimie, de biochimie....

RHEOLOGIE

Description des déformations et des écoulements de la matière



Loi de Newton



Loi de Hooke

1. Définitions et généralités

1.1. Définitions de la rhéologie

Le nombre de Deborah

$$De = \frac{t}{t_{obs}}$$

Temps de relaxation du fluide suite à une déformation – propriété intrinsèque de la matière

Temps de réarrangement de la matière

Temps d'observation entre 10^{-2} et 10^3 secondes

A l'échelle humaine:

Temps de relaxation \gg temps d'observation ► SOLIDE

Temps de relaxation \ll temps d'observation ► LIQUIDE

Eau : $t \sim 10^{-12}$ s \rightarrow $De \ll 1$

Polymères, tensioactifs: $t \sim 10^{-2}$ s \rightarrow $De \sim 1$

Systèmes vitreux (verres colloïdaux): $t > 10^3$ s \rightarrow $De \gg 1$

1.2. Champs d'application de la rhéologie dans le domaine alimentaire

Opérations unitaires

*calcul des phénomènes d'écoulement,
dimensionnement des pompes....*

Caractérisation des produits

*tout au long de la chaîne de fabrication
(réception, production, qualité et R&D)*

1.3. Contraintes, Déformations et vitesse de cisaillement

En mécanique, on distingue:

- Les grandeurs physiques **dynamiques** :
force, couple...donnent naissance au mouvement.
- Les grandeurs physiques **cinématiques**:
vitesse, accélération...décrivent géométriquement le mouvement.

En rhéologie, on distingue:

- **Contrainte et Contrainte de cisaillement (τ)**

qui est responsable du mouvement laminaire de cisaillement

= grandeur **dynamique fondamentale**;

- **Déformation et Vitesse de cisaillement**

qui décrivent le mouvement du matériau dans l'espace, au cours du temps ,
indépendamment des contraintes qui lui ont donné naissance

= grandeurs **cinématiques fondamentales**.

1.4. Mouvements laminaires de cisaillement, contraintes de cisaillement

◆ Mouvements laminaires de cisaillement

➤ **Mouvement** au cours duquel le matériau présente une **structure en lamelles, en couches adjacentes**, d'épaisseurs infiniment minces;

➤ La déformation du matériau s'effectue par un **glissement relatif des différentes couches les unes sur les autres, sans de transfert de matière** d'une couche à l'autre;

➤ Mouvement strictement **ordonné et stratifié** qui se produit sans brassage du matériau et sans variation de son volume.

1. Définitions et généralités

- ◆ Exemples de mouvements laminaires de cisaillement.
Hypothèse de la couche limite

Exemple de rhéomètres: rhéomètres de type Couette:

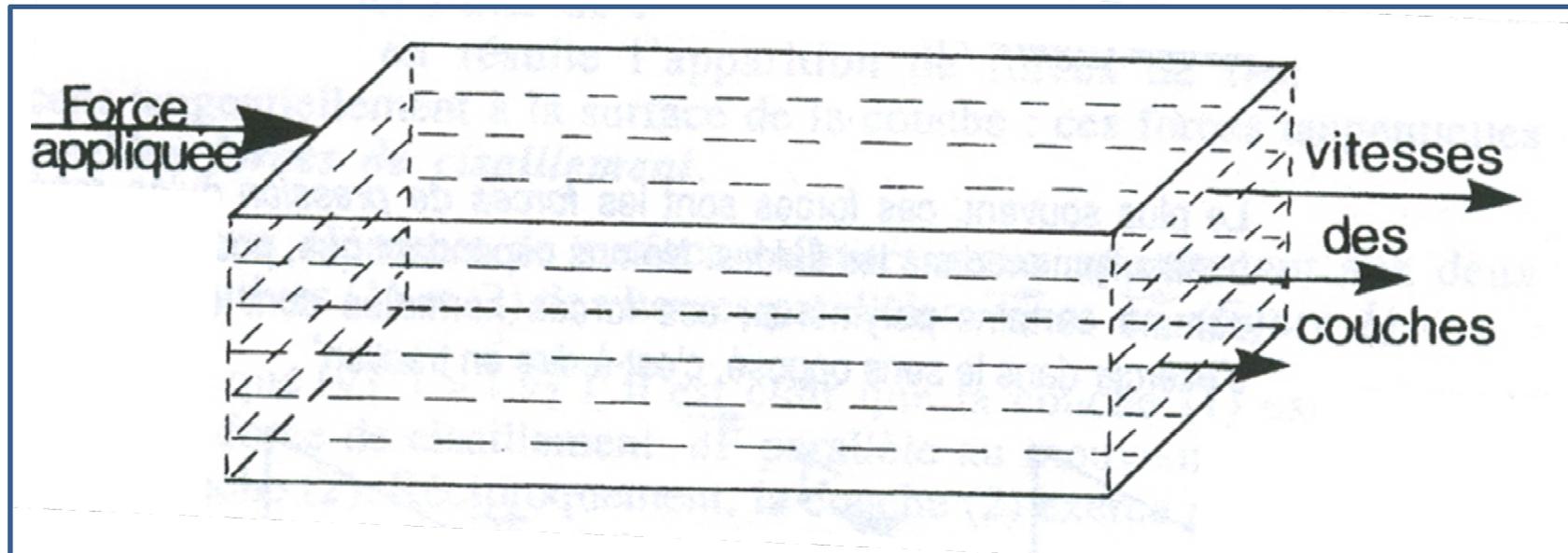
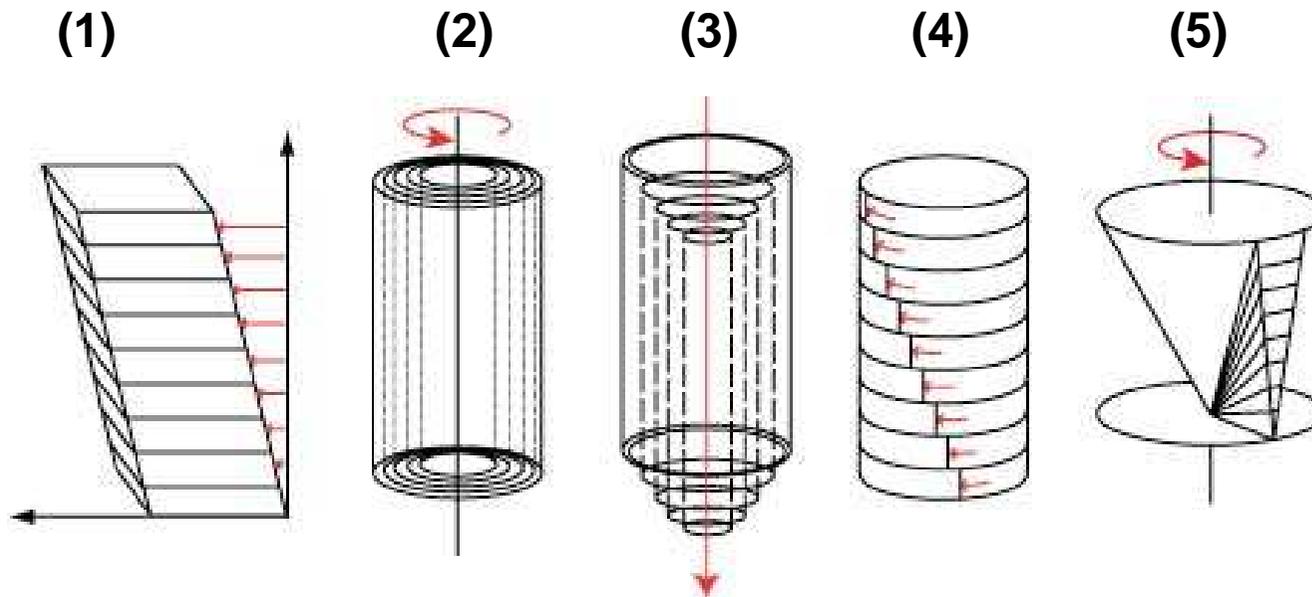


Figure 1: Principe du rhéomètre de type Couette

- ◆ La substance est emprisonnée entre deux surfaces solides, l'une mobile, l'autre immobile.

1. Définitions et généralités

- (1) cisaillement plan**
- (2) cisaillement de couette (viscosimètre)**
- (3) cisaillement télescopique (viscosimètre capillaire)**
- (4) cisaillement de torsion entre plan (viscosimètre)**
- (5) cisaillement entre cône et plan (viscosimètre)**



1. Définitions et généralités

◆ Contrainte de cisaillement (τ , shear stress)

Apparition de forces de frottement entre 2 couches successives en contact

→ forces tangentiellement à la surface de la couche = forces de cisaillement (dF)

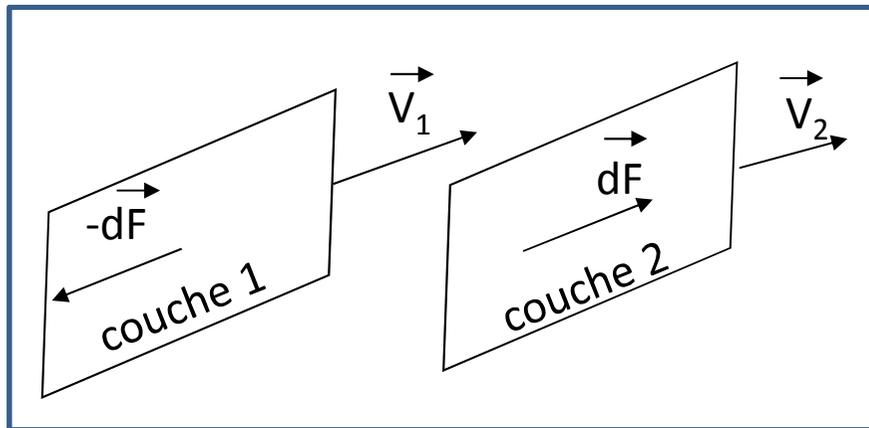


Figure 2

7

Contrainte de cisaillement (τ)

$$\tau = \frac{dF}{dS}$$

Unités de τ = force par unité de surface

- pascals (Pa) ou newton/m² (MKSA)
- dynes/cm² (CGS)

1. Définitions et généralités

◆ Contrainte de cisaillement (τ , shear stress)

Remarque 1:

τ est une fonction définie en tout point du matériau et varie en général d'une couche à l'autre (le plus souvent reste constante en tout point d'une même couche).

Remarque 2:

Les forces de cisaillement ne sont pas les seules forces présentes au sein du matériau! Les couches exercent également les unes sur les autres des **contraintes normales qui agissent perpendiculairement à leur surface**. Exemples: **forces de pression** (fluides) ou **forces de traction** (polymères).

L'influence de ces forces sur le comportement rhéologique seront négligées. Cependant dans certains cas ces forces normales peuvent induire des effets non linéaires très remarquables

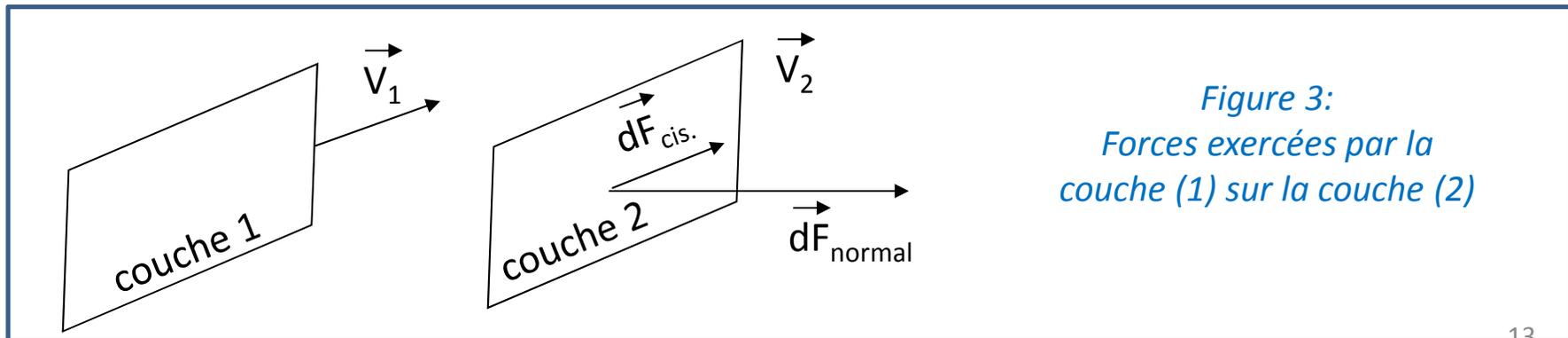
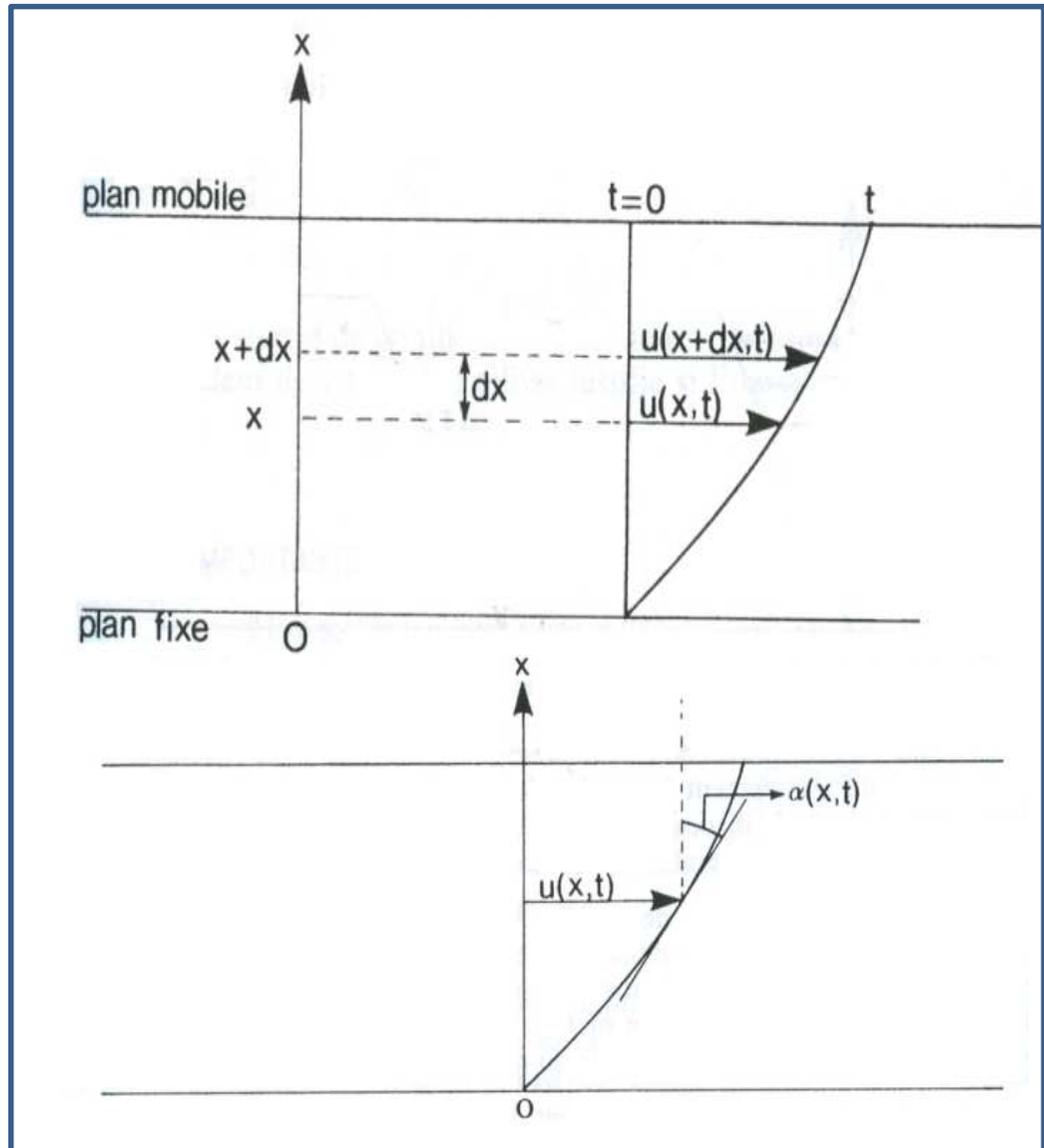


Figure 3:
Forces exercées par la
couche (1) sur la couche (2)

◆ Déformation de cisaillement (ε , shear strain)



Déformation de cisaillement (ε)

$$\varepsilon(x, t) = \frac{du(x, t)}{dx}$$

ou encore

$$\varepsilon(x, t) = \operatorname{tg} \alpha(x, t)$$

Grandeur sans dimension

◆ Vitesse de cisaillement ($\dot{\varepsilon}$, shear strain)

Vitesse de cisaillement ($\dot{\varepsilon}$)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

= dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement (ε)

Unités = inverse d'un temps (s^{-1})

ou encore pour la symétrie plane

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d}{dt} \frac{du}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{du}{dt} \right) = \frac{dv(x,t)}{dx}$$

Vitesse $v(x,t)$ de la couche x
à l'instant t

Remarque:

*En toute rigueur, les relations de $\dot{\varepsilon}$ et ε ne s'appliquent qu'au cas de la symétrie plane!
Cependant elles fournissent une très bonne approximation dans un grand nombre de cas
ne présentant pas la symétrie plane.*

1.5. Equation rhéologique d'état, rhéogrammes

Tout système mécanique obéit à une **équation fondamentale** qui établit une relation entre les **grandeurs dynamiques** responsables du mouvement, et les **grandeurs cinématiques** décrivant ce mouvement



En **rhéologie**, il existe donc une relation entre la contrainte de cisaillement (τ) et la déformation de cisaillement (ε), relation qui dépend des propriétés et de la nature du matériau:

$$\varepsilon = f[\tau]$$

Equation rhéologique d'état

Détermine toutes les propriétés rhéologiques du matériau
Détermination expérimentale à l'aide de rhéomètres

Rhéogrammes = courbes qui traduisent graphiquement l'équation rhéologique d'état

Les rhéogrammes les plus fréquemment utilisés (voir exemple après) sont:

- ✦ les graphes τ, ε à P et T extérieures constantes;
- ✦ les graphes τ, ε à P et T extérieures constantes;
-
- ✦ les graphes ε, t , traduisant l'évolution de ε au cours du temps à P et T extérieures constantes - la contrainte appliquée à l'instant initial $t = 0$ est maintenue constante (expérience de fluage));
- ✦ les graphes τ, t traduisant l'évolution de τ au cours du temps à P et T extérieures constantes- la déformation imposée à l'instant $t = 0$ est maintenue constante (expérience de relaxation);

1.6. Viscosités

◆ Viscosité dynamique ou viscosité apparente (μ)

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\varepsilon}}$$

Unités = la poise (P) (CGS)
le pascal seconde (Pa.s) (MKSA)
ou le Poiseuille (PI)

$$1 \text{ Pa.s} = 1 \text{ PI} = 10 \text{ P}$$

μ est fonction: de la température T , de la pression P extérieures
de la contrainte de cisaillement τ et de la vitesse de cisaillement $\dot{\varepsilon}$

◆ Viscosité cinématique (ν)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

avec ρ = la masse volumique du matériau

Unités = cm^2/s appelé stokes (St) (CGS)
 m^2/s (MKSA)

Quelques valeurs de viscosité de substances usuelles à température ambiante

(ordre de grandeur)

Substance	Viscosité (Pa.s)
Air	10^{-5}
Eau	10^{-3}
Huile d'olive	10^{-1}
Glycérine	10^0
Miel	10^1
Polymères fondus	10^3
Bitume	10^8

1. Définitions et généralités

◆ Paramètres influençant la viscosité

La température

- pour les gaz : augmentation faible
Ex: air à 1 atm $\mu = 1,72 \cdot 10^{-5}$ Pa.s à 20°C et $\mu = 2,29 \cdot 10^{-5}$ Pa.s à 100°C
- Pour les liquides : diminution **importante** avec la température
Pour les liquides purs (eau, huile, alcool,...) elle suit une exponentielle croissante
$$\mu = A \exp(B/T)$$

Ex: Eau: $\mu = 1,008 \cdot 10^{-3}$ Pa.s à 20°C et $\mu = 0,660 \cdot 10^{-3}$ Pa.s à 40°C
Miel : si on augment T de 1°C, μ est divisée par 10



Régulation de la température pour les mesures expérimentales

La pression

- pour les liquides : influence négligeable;
- Pour les gaz : augmentation faible

Ex: air à 20°C $\mu = 1,72 \cdot 10^{-5}$ Pa.s sous 1 atm et $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5}$ Pa.s sous 20 atm

1. Définitions et généralités

◆ Cas des solutions et dispersions:

Dans l'étude des solutions (des dispersions), afin de déterminer les influences respectives du soluté et du solvant dans le comportement rhéologique ont utilisé les coefficients de viscosité suivants:

$$\text{Viscosité relative} = \mu_{\text{rel}} = \frac{\mu}{\mu_s}$$

$$\text{Viscosité spécifique} = \mu_{\text{sp}} = \frac{\mu - \mu_s}{\mu_s} = \mu_{\text{rel}} - 1$$

$$\text{Viscosité réduite} = \mu_{\text{red}} = \frac{\mu_{\text{sp}}}{C}$$

$$\text{Viscosité intrinsèque} = [\mu] = \limite \left[\frac{\mu_{\text{sp}}}{c} \right]$$

avec μ = la viscosité dynamique de la solution

μ_s = la viscosité dynamique du solvant

c = la concentration en soluté de la solution en g/cm³

μ_{rel} et μ_{sp} sans dimension
[μ] inverse d'une concentration