

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

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.

RHEOLOGIE

Description des déformations et des écoulements de la matière



Loi de Newton



Loi de Hooke

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.

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

Exemple de rhéomètres: rhéomètres de type Couette:

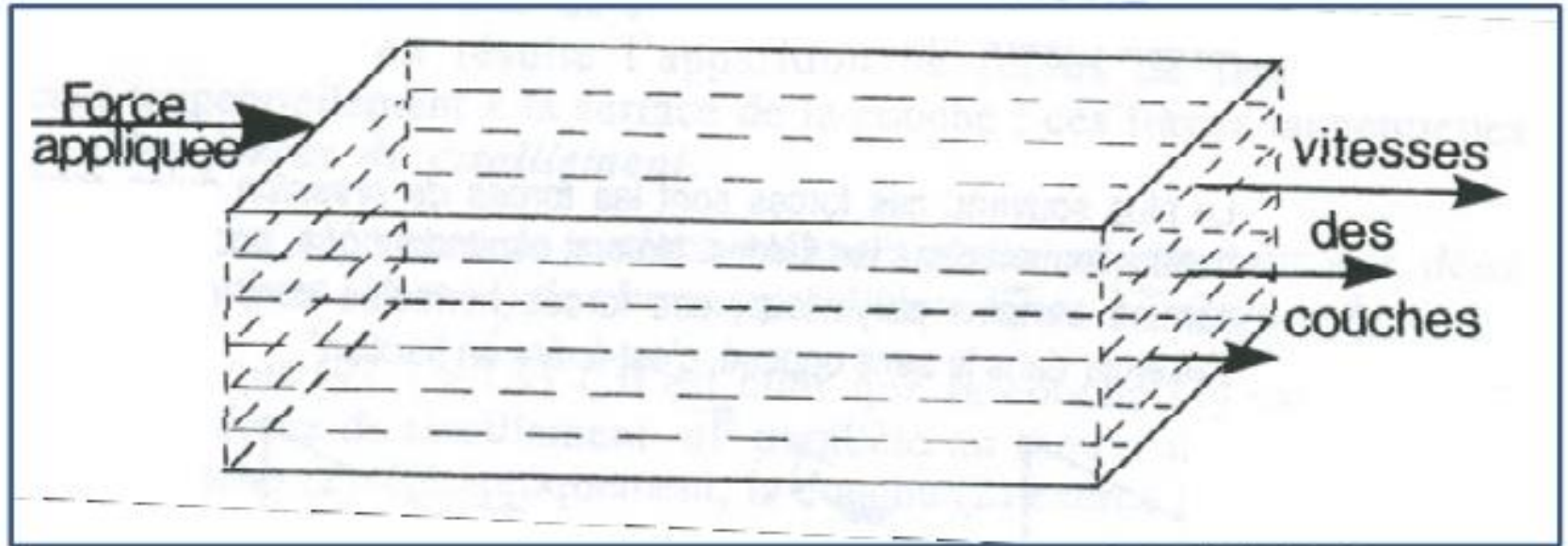
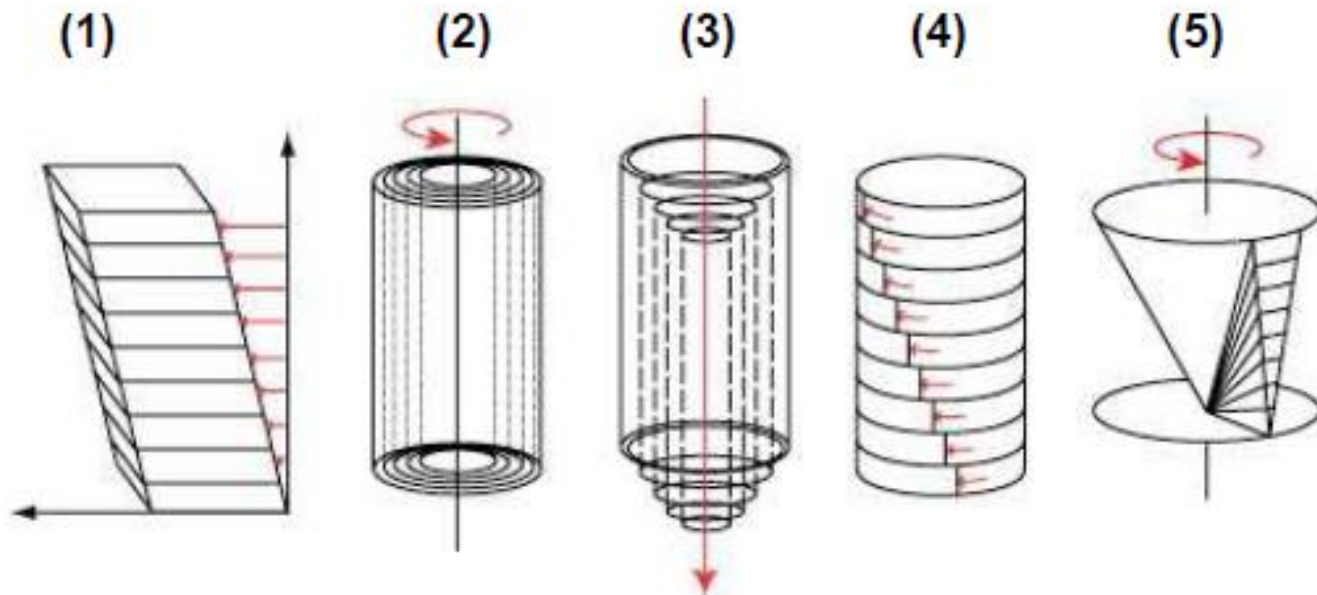


Figure 1: Principe du rhéomètre de type Couette

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

- (1) 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)



◆ 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 (\vec{dF})

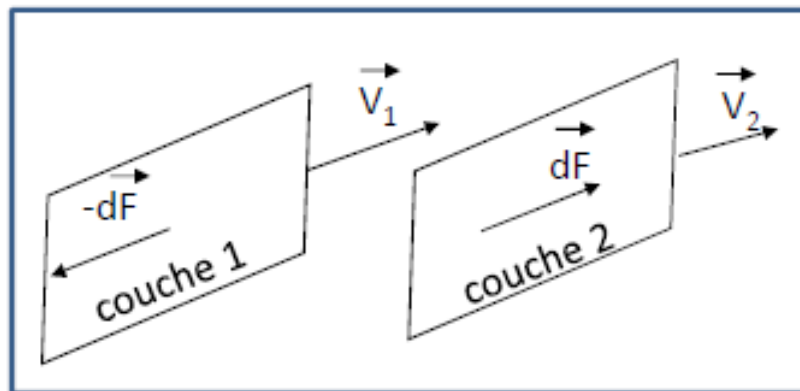


Figure 2

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)

◆ 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

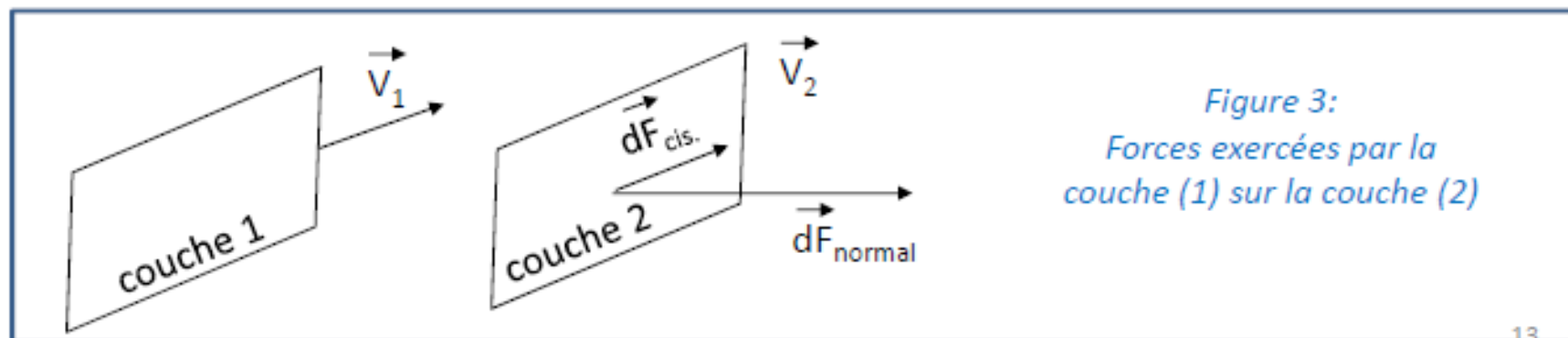
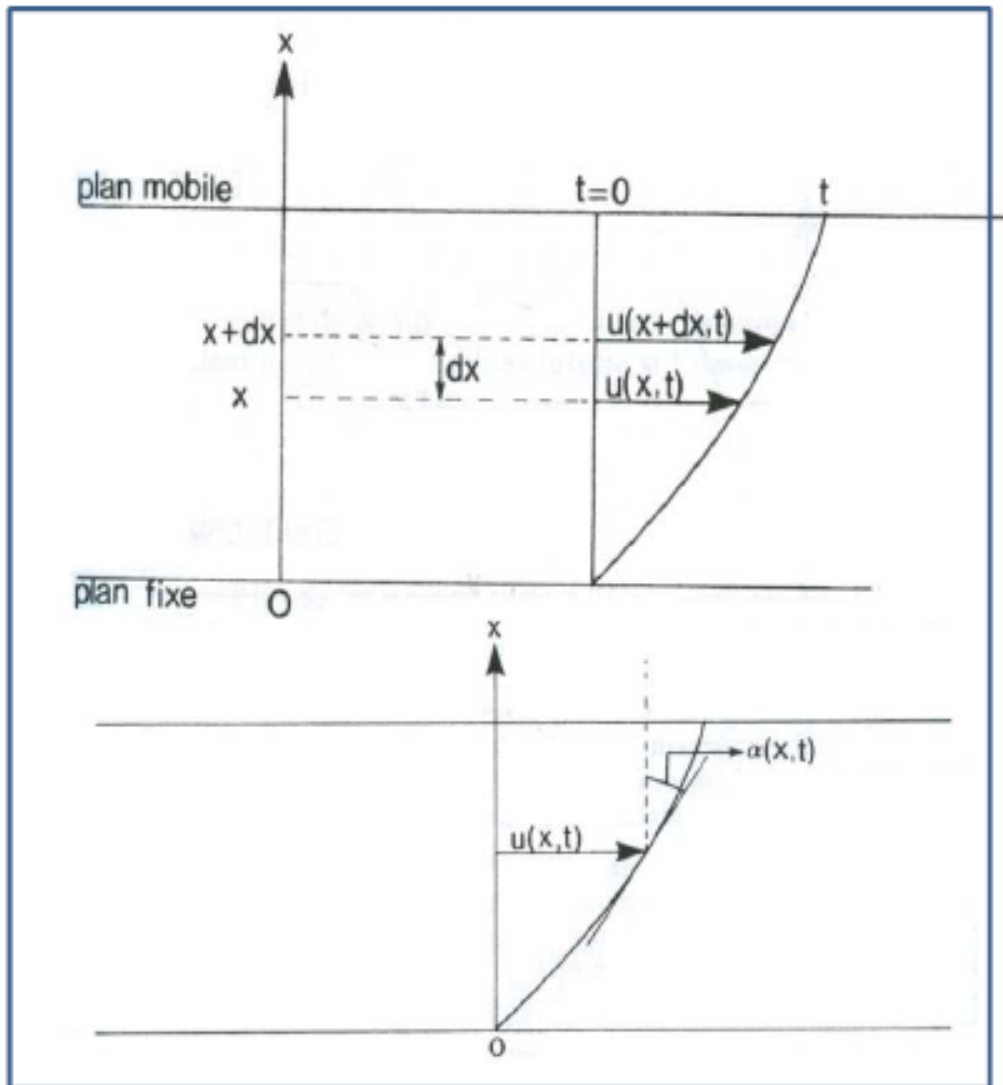


Figure 3:
Forces exercées par la
couche (1) sur la couche (2)

◆ Déformation de cisaillement (ϵ , shear strain)



Déformation de cisaillement (ϵ)

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

ou encore

$$\epsilon(x, t) = \text{tg } \alpha(x, t)$$

Grandeur sans dimension

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

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

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

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

Unités = inverse d'un temps (s^{-1})

ou encore pour la symétrie plane

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


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

Remarque:

*En toute rigueur, les relations de $\dot{\epsilon}$ 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)

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

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

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

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

◆ 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

◆ 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