

DEUXIEME PARTIE:

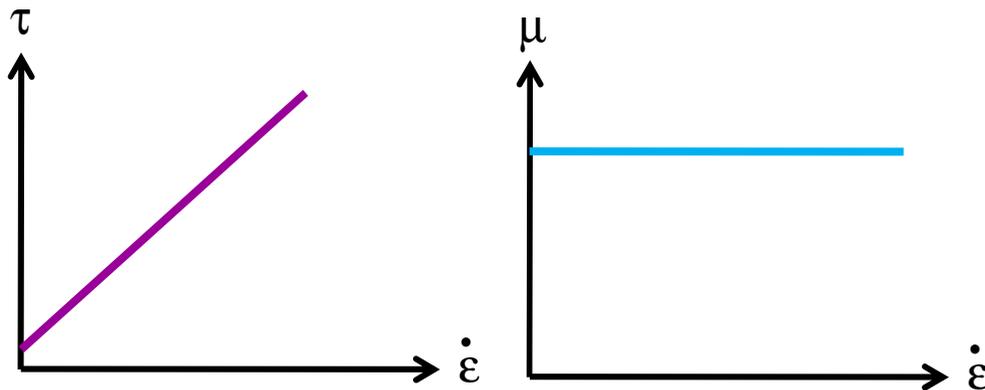
Typologie des différents modes d'écoulement

2. Typologie des différents modes d'écoulement

2.1. Les liquides newtoniens

$$\eta = \text{viscosité absolue} = \frac{\tau}{\dot{\varepsilon}} = \text{constante}$$

Fluides newtonien



◆ La viscosité est constante et indépendante de la contrainte et du temps (elle dépend de la température et de la pression)

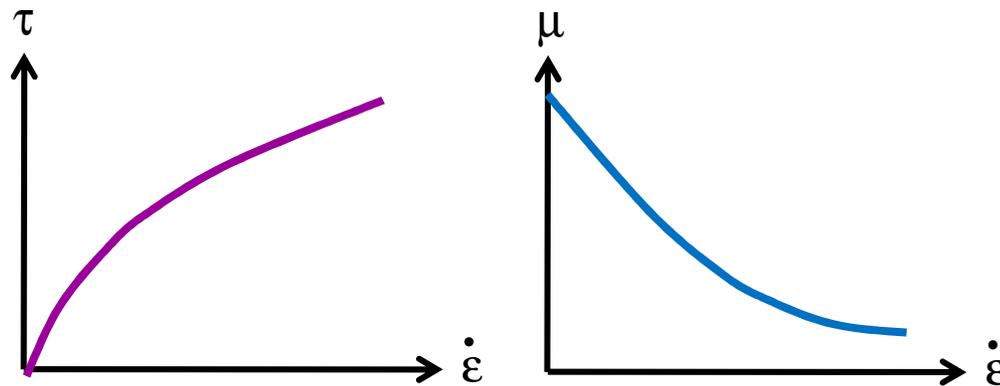
Comportement fréquent chez certains fluides alimentaires:

eau, solution ou dispersions très diluées dans des solvants newtoniens, huile

2. Typologie des différents modes d'écoulement

2.2. Les liquides non newtoniens au comportement indépendant du temps

Fluides rhéofluidifiants (shear thinning, softening)



- ◆ La déformation commence dès qu'une contrainte est exercée.
- ◆ La viscosité diminue pour des vitesses de cisaillement croissantes

Interprétation moléculaire: alignement progressif des unités structurales (ou molécules) dans le sens de l'écoulement au fur et à mesure que la vitesse de cisaillement augmente, favorisant ainsi l'écoulement des différentes couches de liquides

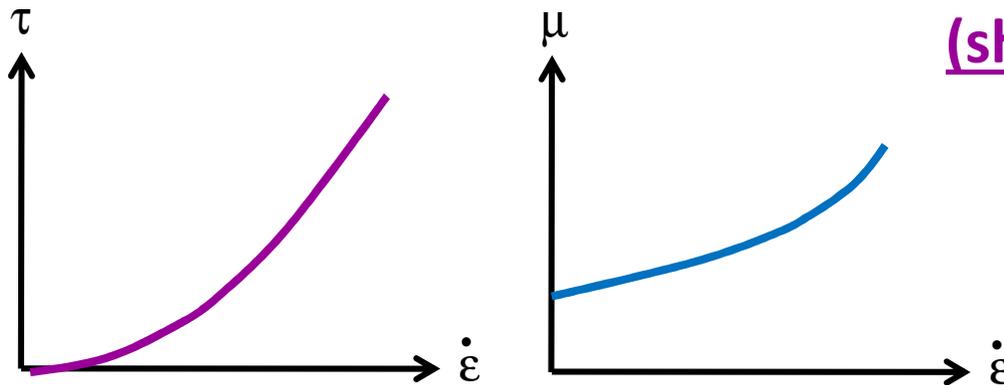
Comportement fréquent chez les fluides alimentaires:

émulsions peu chargées, suspensions, dispersions

Exemples: jus de fruits concentrés, moutarde, solutions de gommes, purée de fruits, concentré de protéines...

2. Typologie des différents modes d'écoulement

2.2. Les liquides non newtoniens au comportement indépendant du temps



Fluides rhéoépaississants (shear thickening)

- ◆ La déformation commence dès qu'une contrainte est exercée.
- ◆ La viscosité augmente pour des vitesses de cisaillement croissantes

Un grand nombre de fluides rhéoépaississants sont également **dilatants**:
soumis à une déformation, leur volume augmente

Interprétations moléculaires diverses, redistribution du solvant (lubrifiant) au niveau des particules, après gonflement de la phase liquide.

Comportement rare chez les fluides alimentaires:
suspensions à concentration élevée (> 50%)

Exemples: empois d'amidon, huiles polymériques

2. Typologie des différents modes d'écoulement

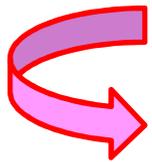
Modélisation des fluides rhéofluidifiants et rhéoépaississants

Loi de puissance (Ostwald)

$$\tau = K \cdot \dot{\epsilon}^n$$

n = indice d'écoulement
 $n = 1 \rightarrow$ fluide newtonien avec $\eta = K$
 $n < 1 \rightarrow$ fluide rhéofluidifiant
 $n > 1 \rightarrow$ fluide rhéoépaississant

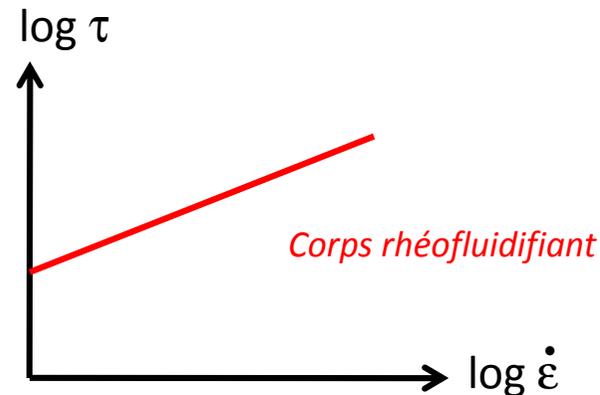
K = indice de consistance



$$\mu = \frac{K}{\dot{\epsilon}^{(1-n)}}$$



$$\log \tau = \log K + n \cdot \log \dot{\epsilon}$$



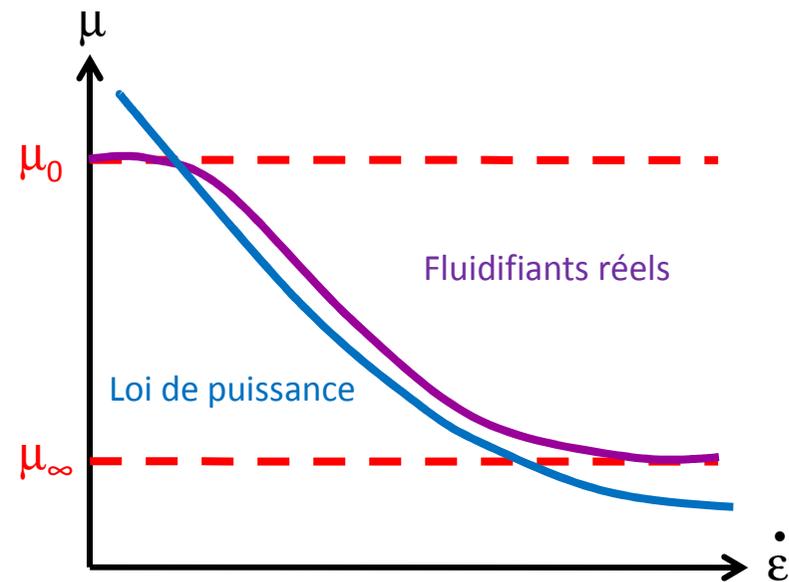
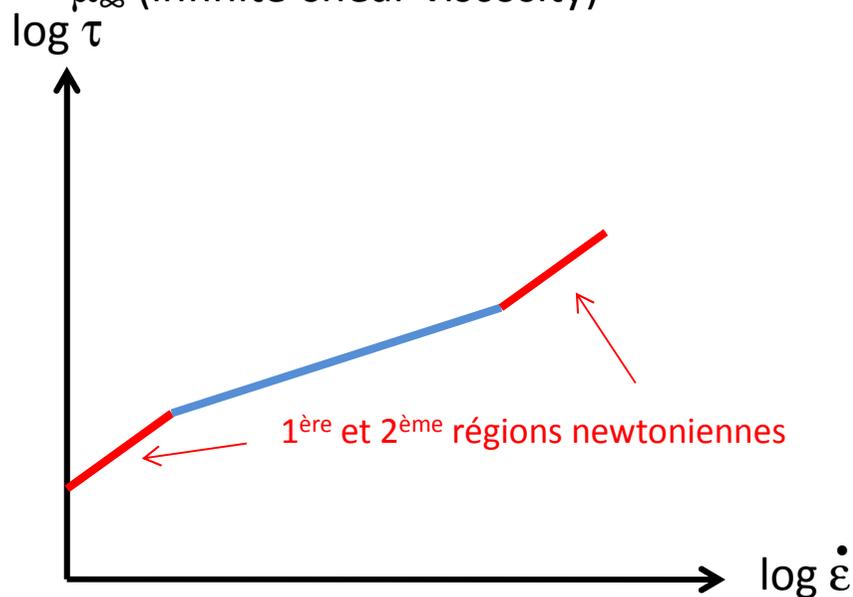
2. Typologie des différents modes d'écoulement

Limites de la loi de puissance (Ostwald) (cas des polymères)

Les rhéogrammes de la plupart des corps fluidifiants possèdent une deux régions où la viscosité apparente est indépendante de la vitesse de cisaillement.

Ces deux zones de variations correspondent aux valeurs de vitesse de déformation très faibles ($< 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) et très élevées ($> 10^8 \text{ s}^{-1}$).

Ces 2 régions dites **de première et deuxième région newtonienne**, sont caractérisées par des coefficients de viscosité newtonienne: μ_0 (zero-shear viscosity) et μ_∞ (infinite-shear viscosity)



2. Typologie des différents modes d'écoulement

« zero-shear » viscosité des polymères

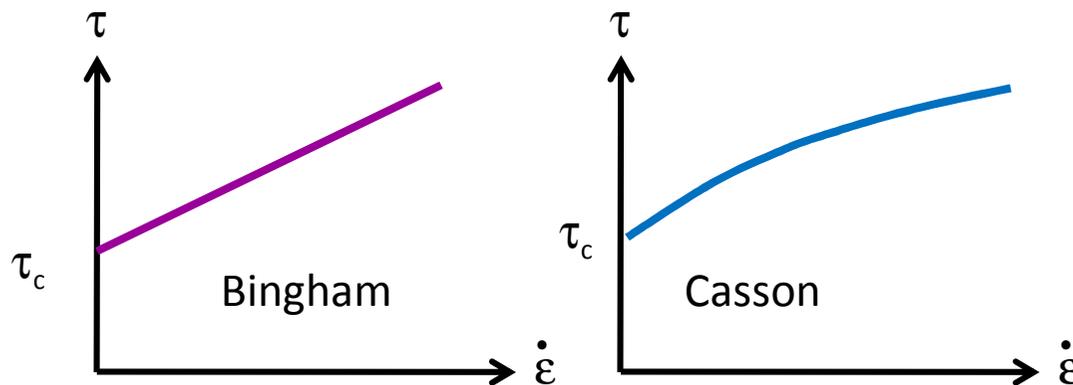
Superposition de 2 phénomènes:

- 1) Orientation des macromolécules sous l'effet de la contrainte de cisaillement
 - dés-enchevêtrement des chaînes de polymères
 - la viscosité diminue
- 2) Ré-enroulement des macromolécules du à leur propriétés viscoélastiques
 - re-enchevêtrement des chaînes de polymères
 - la viscosité augmente

Au final : Aux faibles valeurs de cisaillement il n'y a pas de changement global de la viscosité = η_0

2. Typologie des différents modes d'écoulement

Fluides plastiques



◆ La déformation ne commence qu'à partir d'une certaine valeur de la contrainte :
 $\tau_c =$ seuil d'écoulement (yield value)

Interprétation moléculaire: au repos, le matériau possède une structure tridimensionnelle rigide représentée par exemple par un ensemble de « particules » emboîtées les unes dans les autres ou floculées. Le seuil d'écoulement correspond à la force de nécessaire pour les séparer, vaincre les forces de cohésion du type Van der Waals, et provoquer l'écoulement. Au-delà de ce seuil, la structure rigide est détruite et l'écoulement s'effectue sous l'effet de la contrainte effective $\tau - \tau_c$

Exemples: chocolat fondu, certaines graisses, margarines

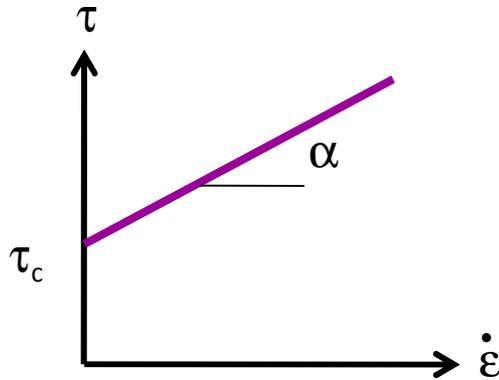
On distingue 2 types de liquides plastiques:

- 1) les liquides de Bingham
- 2) Les liquides de Casson

2. Typologie des différents modes d'écoulement

Fluides plastiques

1) Liquides de Bingham



- ◆ Au-delà du seuil d'écoulement τ_c le liquide se comporte comme un liquide newtonien

$$\alpha = \text{viscosité plastique}$$

$$\tau < \tau_c \rightarrow \dot{\varepsilon} = 0$$

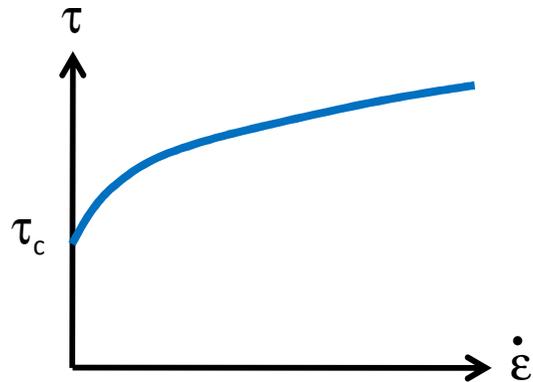
$$\tau > \tau_c \rightarrow \tau = \tau_c + \alpha \cdot \dot{\varepsilon}$$

Exemple de liquide de Bingham: les peintures à l'huile:

- Etalement facile et pas de traces de pinceaux = faible viscosité sous contrainte
- Pas de coulure = forte viscosité au repos

2. Typologie des différents modes d'écoulement

Fluides plastiques



2) Liquides de Casson

- ◆ Au-delà du seuil d'écoulement τ_c le liquide se comporte comme un liquide plastique fluidifiant

Equation de Casson

$$\tau < \tau_c \rightarrow \dot{\epsilon} = 0$$

$$\tau > \tau_c \rightarrow (\tau)^{0,5} = (\tau_c)^{0,5} + (\beta \cdot \dot{\epsilon})^{0,5}$$

avec β = viscosité plastique

Equation de Herschel - Bulkley

$$\tau < \tau_c \rightarrow \dot{\epsilon} = 0$$

$$\tau > \tau_c \rightarrow \tau = \tau_c + K \cdot \dot{\epsilon}^n$$

Exemple de liquide de Casson:

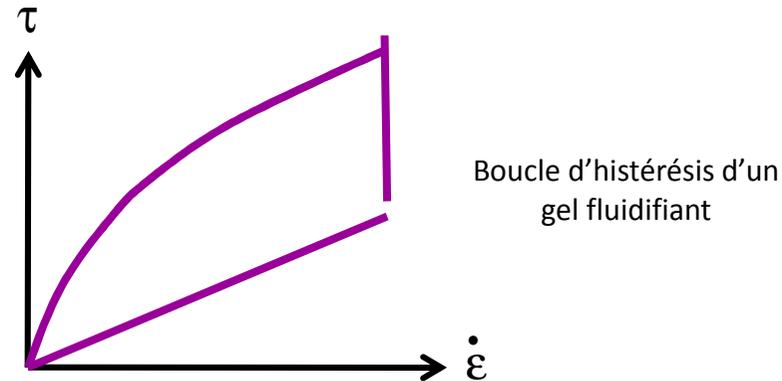
les boues, les pâtes dentifrice, la pâte à pain, des matières grasses...

2. Typologie des différents modes d'écoulement

2.3. Les liquides non newtoniens au comportement dépendant du temps

Notion d'hystérésis:

Lorsqu'on obtient toujours le même rhéogramme quel que soit le temps mis pour atteindre les différentes contraintes ou vitesse de déformation, on dit que ces corps ne présentent pas d'**hystérésis** (pas d'histoire).



La thixotropie

*Tout corps dont la viscosité apparente a tendance à décroître dans le temps quand on lui applique une contrainte (ou une vitesse de cisaillement) constante, est dit **thixotrope**; pourvu qu'après suppression du cisaillement et un temps de repos suffisant, sa structure initiale se régénère.*

Il est possible d'évaluer le degré de thixotropie d'un fluide en calculant, par exemple, la surface de la courbe d'hystérésis qui représente l'énergie nécessaire pour détruire la structure thixotrope.

Exemple de liquides thixotropes:

Mayonnaise et blanc d'œuf frais, crèmes cosmétiques ...