Propriétés rhéologiques des aliments

(Partie 1)

- ✓ Masters 1 & 2 Technologie Alimentaire
- ✓ Doctorants LMD Technologie Alimentaire

2019-2020

Pr. BENATALLAH Leila

Laboratoire GéniAAl / INATAA-UFMC1

Plan

1- Qu’est ce que la rhéologie avec ses applications

2- Typologie des modes d’écoulement

- Fluides dont le comportement est indépendant du temps
- Fluides dont le comportement est dépendant du temps

Introduction

croustillant, craquant

Tartinabilité

Extensibilité, collant

Dureté, friabilité, tendreté

Elasticité, viscosité

Ecoulement

Qu’est ce que la Rhéologie ?

- ✓ **1929: Bingham (chimiste): naissance de la rhéologie (du grec « rheô » couler et « logia » théorie)**

- ✓ **Discipline née de l’incapacité de la mécanique des fluides de prédire au XIXème siècle le comportement de certains matériaux : verre, bois, …..**

Qu’est ce que la Rhéologie ?

- ✓ **Discipline qui étudie l’écoulement et la déformation des matériaux sous l’action de contraintes et déformations (ou vitesses de déformation) d’un élément de volume**

- ✓ **Domaine d’application étendu, faisant appel à des notions de mécanique, de physique, de chimie de biochimie, …..**

Domaines d'application ?

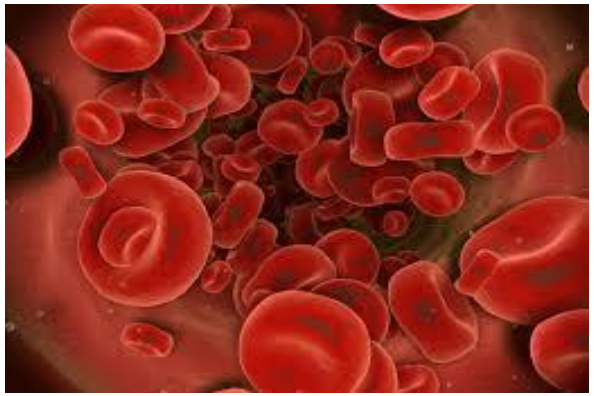
Géophysique:

Laves volcaniques,

Avalanches

Coulées de boue

Biologie



Ecoulement du sang

Sève d'une plante

liquide visqueux des animaux

Domaines d’application ?

Industrie Agro-Alimentaire :

Collant d’un fromage

Fondant d’un chocolat

Jutosité et tendreté d’une viande

Tartinabilité d’un beurre

Onctuosité d’un yaourt

Craquant des chips

Qu’est ce que la Rhéologie ?

"Tous les corps s’écoulent ou se déforment"

Visqueux

Visco-élastique

Elastique

Loi de NEWTON

Loi de HOOKE

Qu’est ce que la Rhéologie ?

Les montres molles, Salvador Dali

Qu'est ce que la Rhéologie ?

Nombre de DEBORAH
(REINER M., Physics Today, 1964)

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

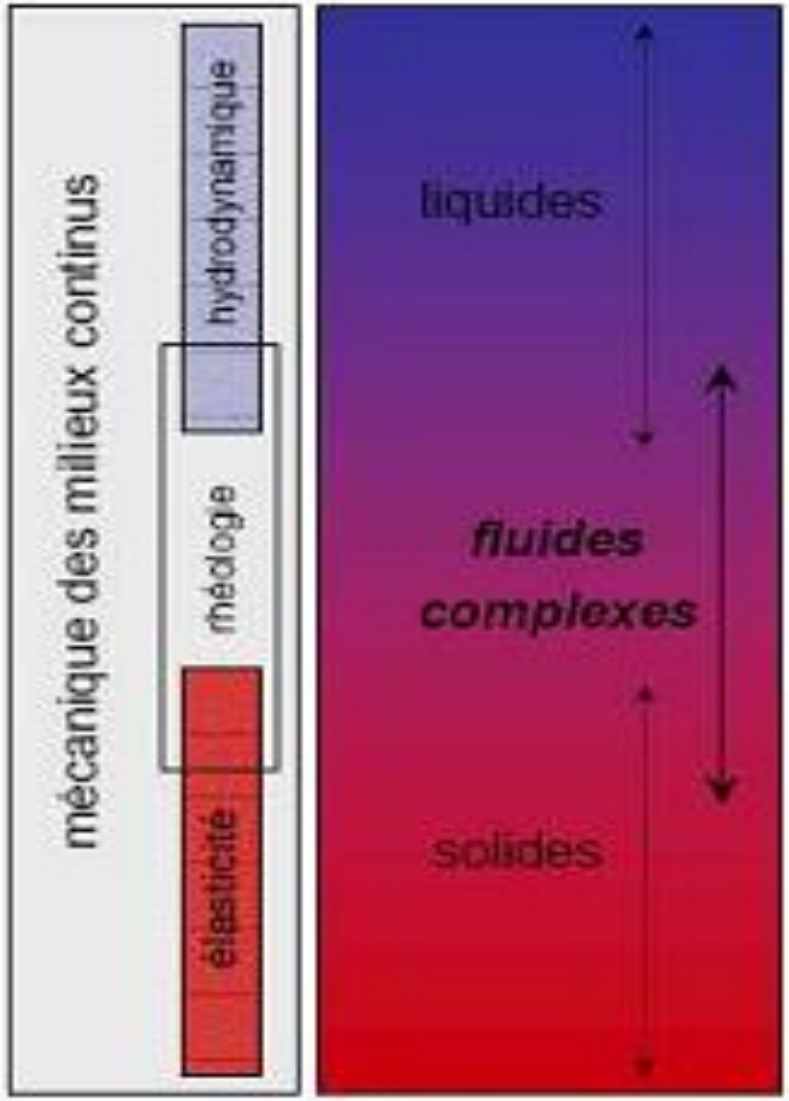
Temps d'observation entre 10^{-2} et 10^{3} secondes

A l'échelle humaine :

Temps de relaxation >> temps d'observation => **Solide**
Temps de relaxation << temps d'observation => **Liquide**

Eau : $t \approx 10^{-12}$ s => De << Polymères, tensioactifs : $t \approx 10^{-2}$ s => De ≈ 1
Systèmes vitreux (verres colloïdaux) : $t > 10^{3}$ s => De >> 1

Tentative de classification des fluides complexes



	"mémoire"	exemples
liquide parfait (inviscide $\eta = 0$)		∅
liquide visqueux linéaire (newtonien $\eta > 0$)		eau alcools
liquide visqueux non-linéaire		huiles polymères dilués suspensions diluées
matériau viscoélastique		tensioactifs polymères concentrés suspensions concentrées plastiques
solide élastique non-linéaire		caoutchouc
solide élastique linéaire (hookéen)		métaux minéraux
solide indéformable ($G = \infty$)		∅

PONCET S. 2013

Typologie des modes d’écoulement

Comportement des matériaux alimentaires

1 - Fluides dont le comportement est indépendant du temps

2 - Fluides dont le comportement est dépendant du temps

Comportement des matériaux alimentaires

1 -

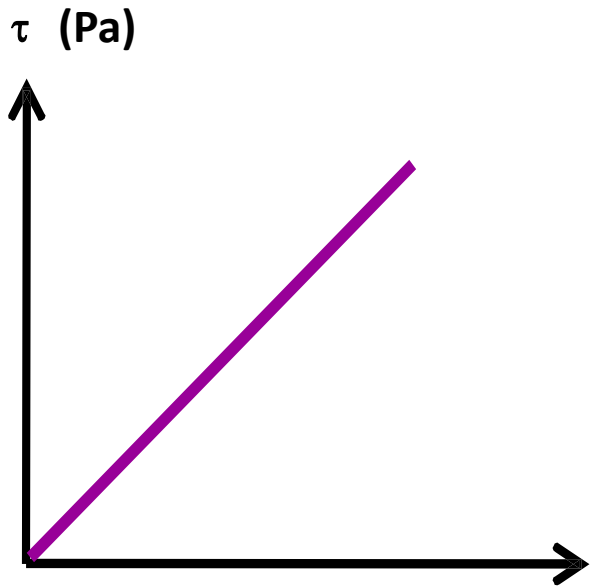
Fluides dont le comportement est indépendant du temps

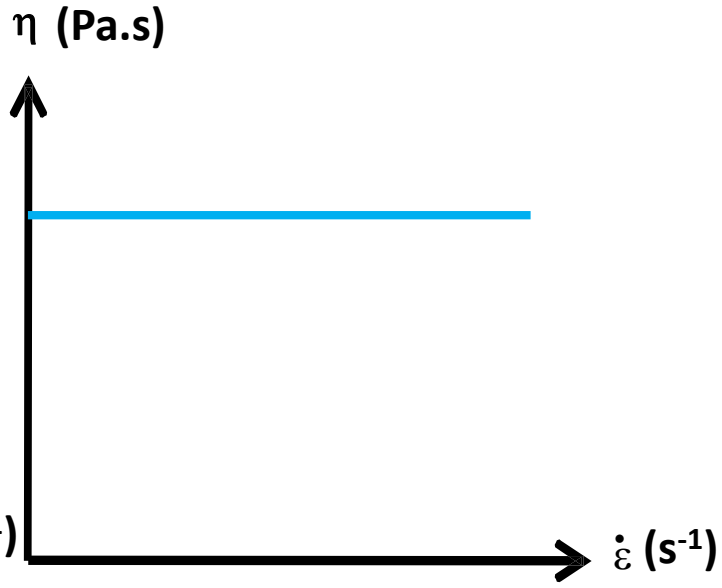
- **Fluides Newtoniens**
- **Fluides Non Newtoniens**
  - **Fluide rhéofluidifiant ou pseudo plastique**
  - **Fluide rhéoepaississant ou dilatant**
  - **Fluide rhéofluidifiant à seuil d'écoulement**
  - **Fluide de Bingham ou plastique**
  - **Fluide rhéoépaississant (dilatant) à seuil d'écoulement**

2 - Fluides dont le comportement est dépendant du temps

- Fluides thixotropes
- Fluides antithixotropes
- Fluides rhéopexes

1. Les liquides Newtoniens

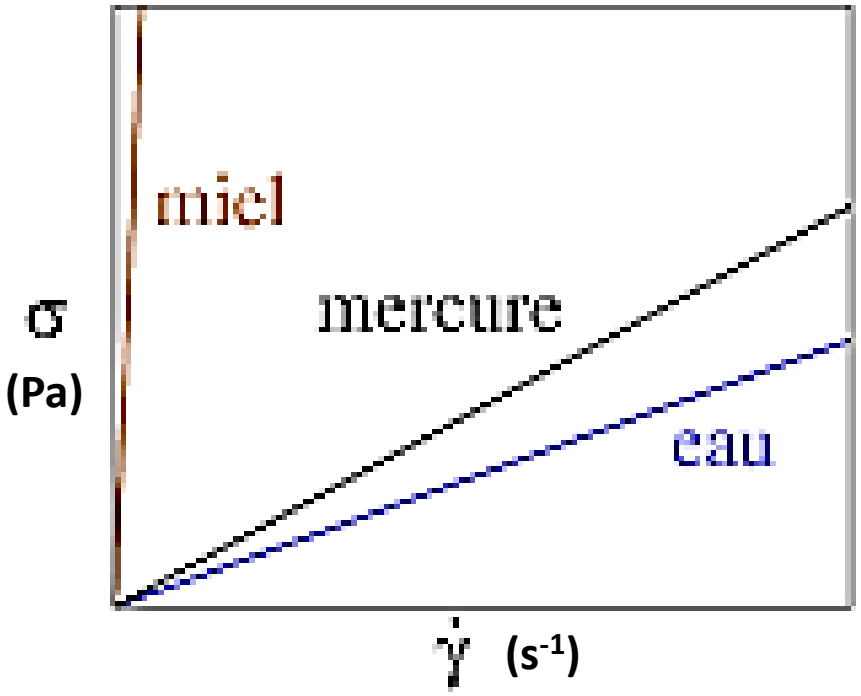


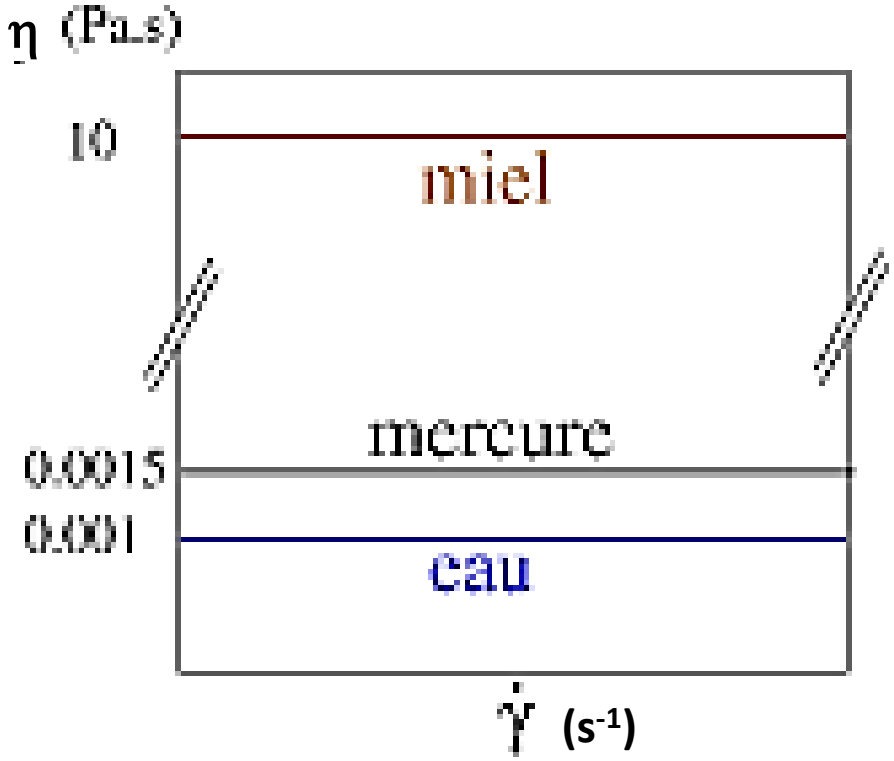


- La viscosité est constante et indépendante de la contrainte et du temps
- Elle dépend uniquement de la température et de la pression

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

Fluides dont le comportement est indépendant du temps





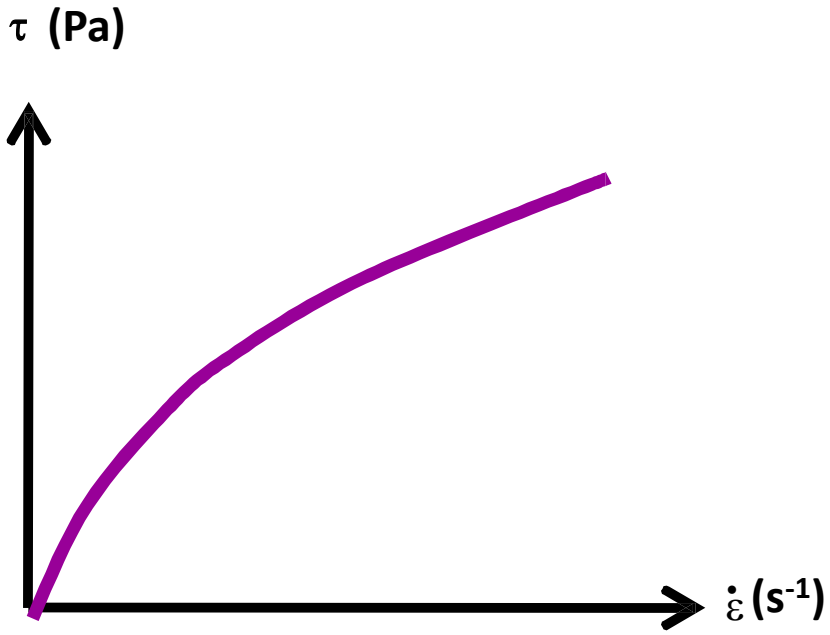
Comportement fréquent

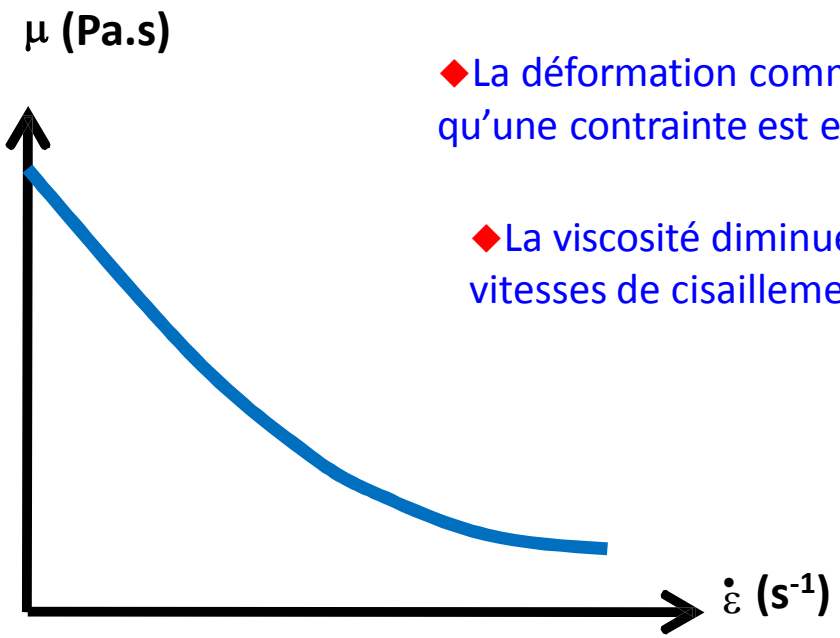
Pour certains fluides alimentaires:

Eau, solution ou dispersions très diluées, huile, eau, miel, mercure

2. Les liquides non Newtoniens (Complexes)

➢ **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 structurelles (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

Fluides dont le comportement est indépendant du temps

Moutarde

Jus de fruits concentrés

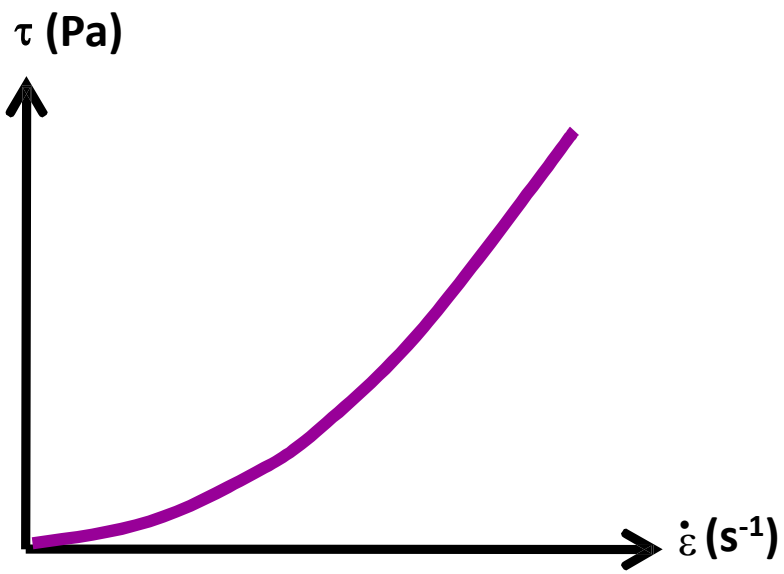
Purées de fruits

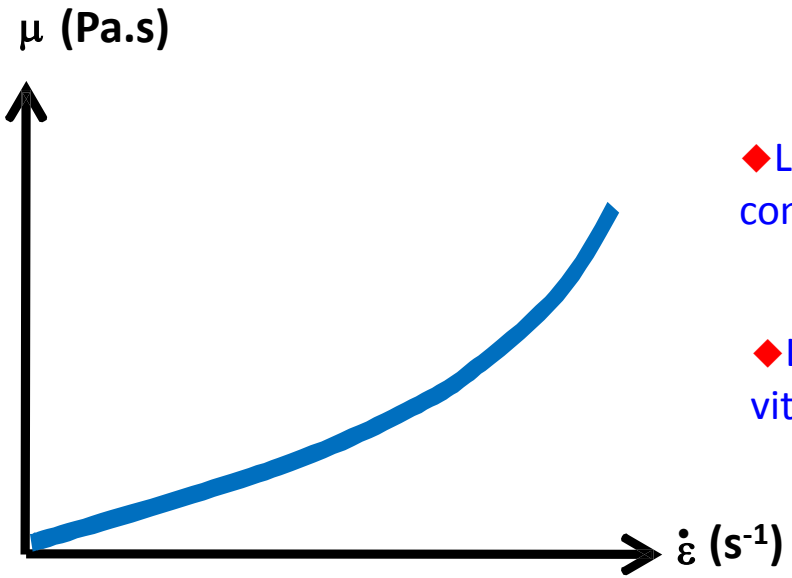
Comportement fréquent chez les fluides alimentaires: **émulsions peu chargées, suspensions, dispersions**

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

Fluides dont le comportement est indépendant du temps

➢ Fluides rhéoépaississants (shear thickening)



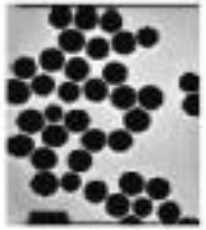


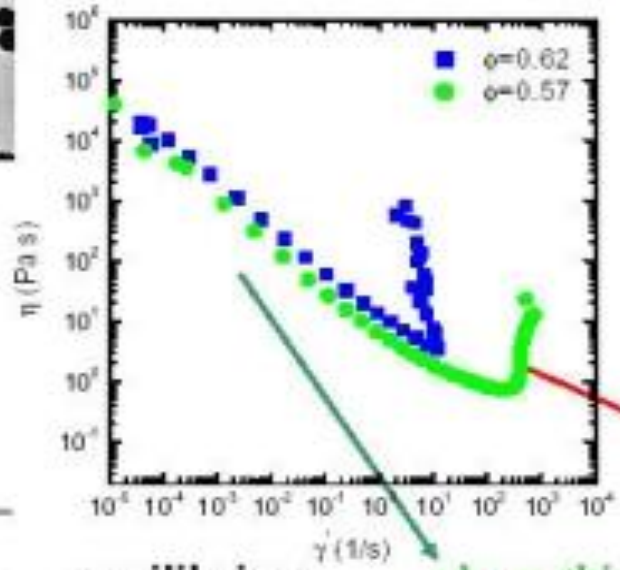
- La déformation commence dès qu'une contrainte est exercée.
- La viscosité augmente pour des vitesses de cisaillement croissantes

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

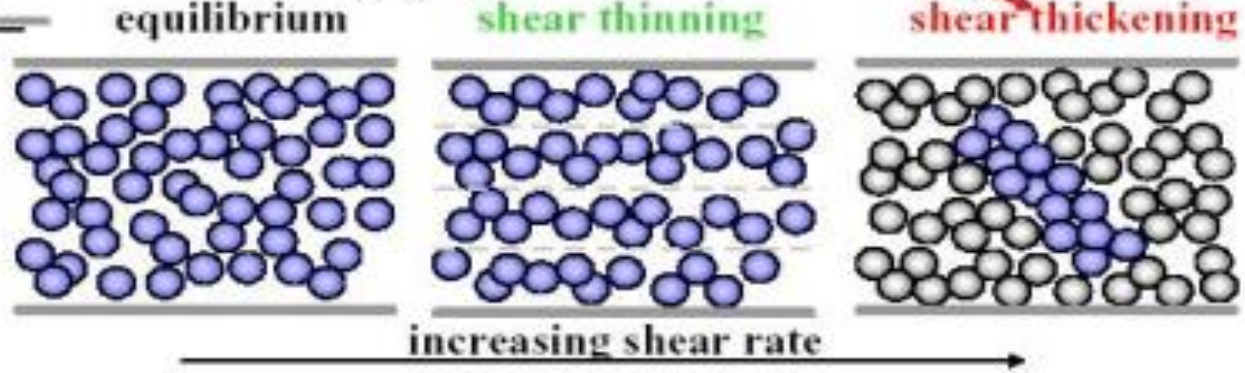
Interprétations moléculaires diverses, redistribution du solvant (lubrifiant) au niveau des particules, après gonflement de la phase liquide.

Shear Thickening Dispersions





- Hydrodynamic phenomenon
- Occurs prominently at higher ϕ
- Can be predicted and *controlled* through colloid and fluid properties.



Comportement rare dans les liquides alimentaires:
suspensions à concentration élevée (> 50%)

Exemples: empois d'amidon, huiles polymériques

Piscine avec une suspension d’amidon à concentration élevée (> 50%)

Fluides dont le comportement est indépendant du temps

Modélisation des fluides Newtoniens, rhéofuidifiants et rhéoépaississants

n = indice d'écoulement

Loi de puissance (Ostwald)

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

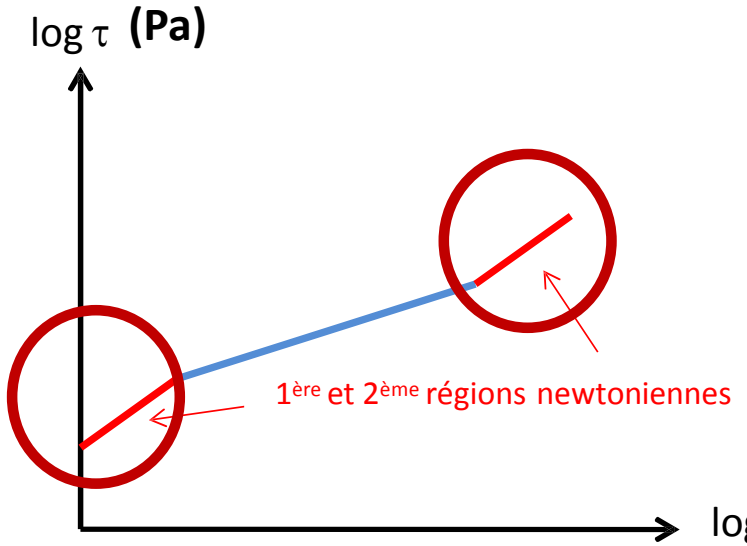
K = indice de consistance

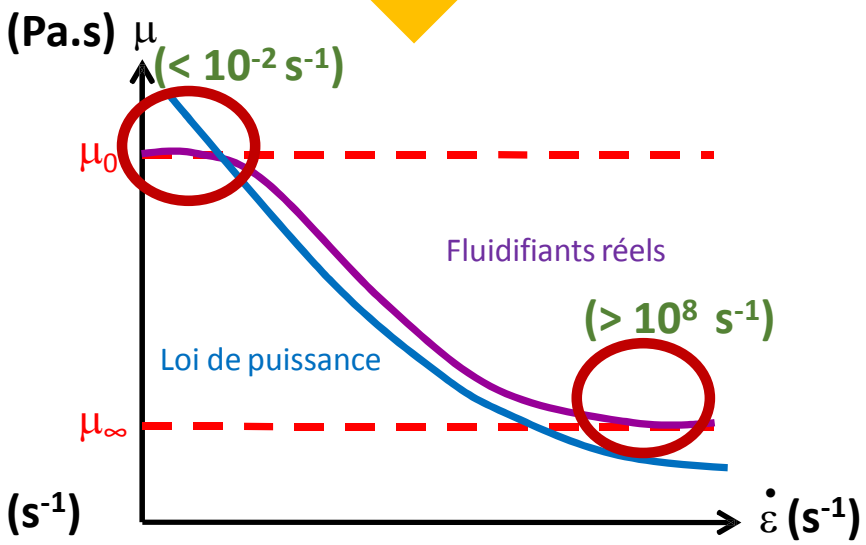
n = 1 ⇒ fluide newtonien avec $\eta = K$
n < 1 ⇒ fluide rhéofluidifiant
n > 1 ⇒ fluide rhéoépaississant

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

Fluides dont le comportement est indépendant du temps

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



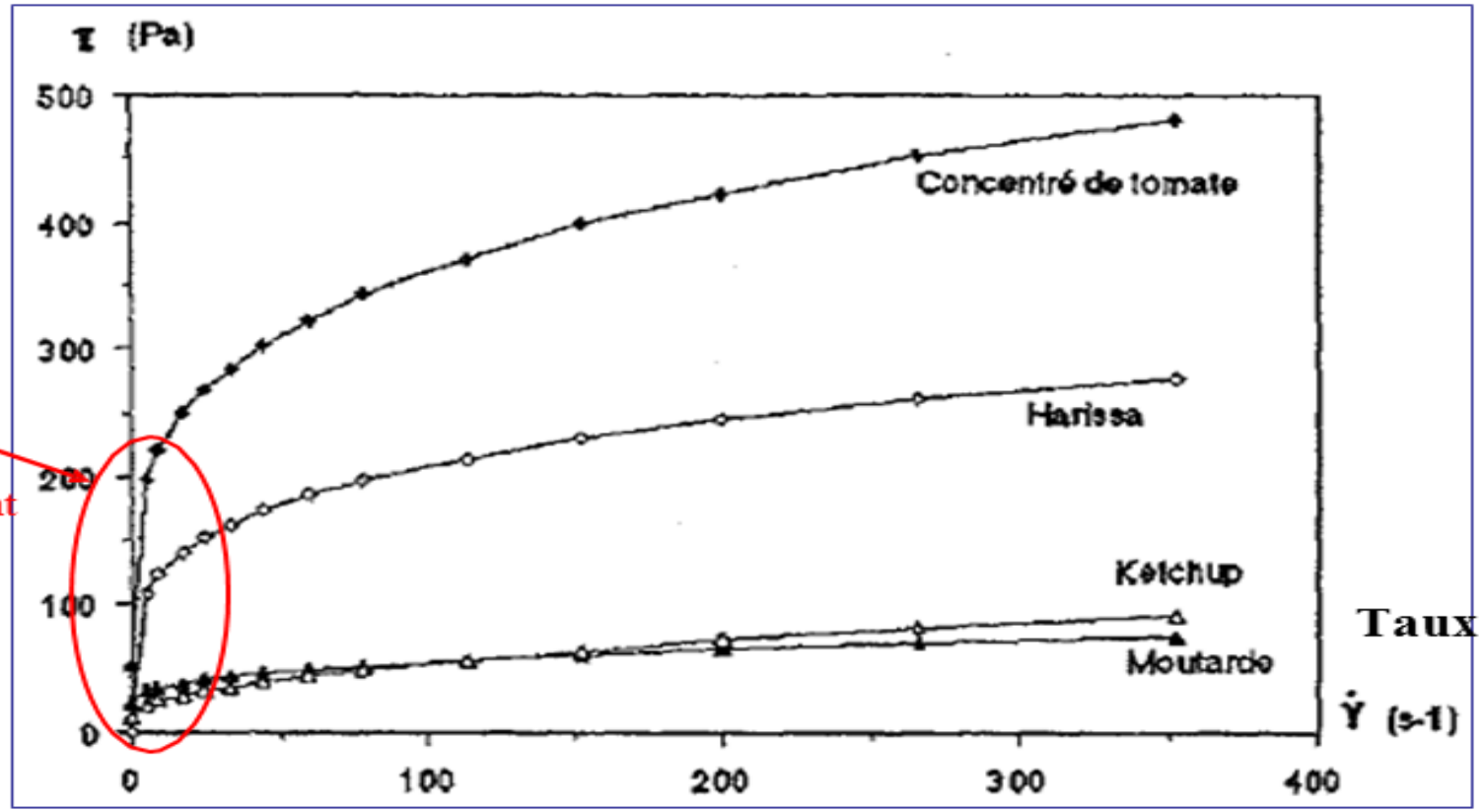


- Les rhéogrammes de la plupart des corps fluidifiants possèdent une à deux régions où la viscosité apparente est indépendante de la vitesse de cisaillement.

- 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)

Exemples de rhéogramme pour quelques produits alimentaires

contrainte



Taux de cisaillement

Zone linéaire restreinte (comportement newtonien)

D'après A. Hamza-Chaffai, Sciences des Aliments, 11, 1991.

Modèle d'Ellis pour prendre en compte la zone linéaire pour μ_0 (même chose pour μ_∞ avec le modèle de Sisko)

Produit	Temps (°C)	Vitesse (s^{-1})	Modèle	τ_0 (Pa)	K ($Pa \cdot s^n$)	n	
Concentré de tomate	26	5,59- 352	Herschel-Bulkley	51,3	103,2	0,21	Présent travail *
	25	5,59- 352	Loi en puissance	-	100	0,26	Rao *et al.*, 1981 *
	23	1 -1600	Herschel-Bulkley	43	93,9	0,26	Barbosa-Canovas et Peleg, 1983 *
	-	-	-	120-123	-	-	Kaltunc-Cancer et Peleg, 1984 *

τ_0: contrainte seuil

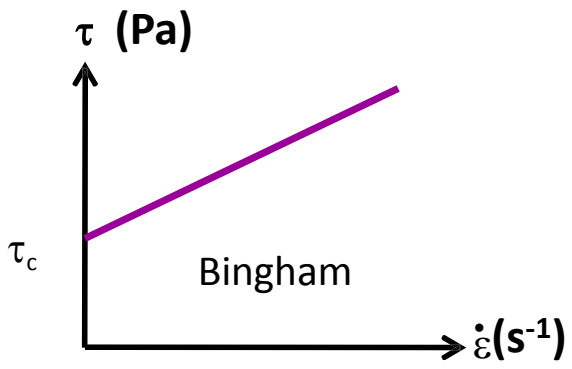
K: Indice de consistance

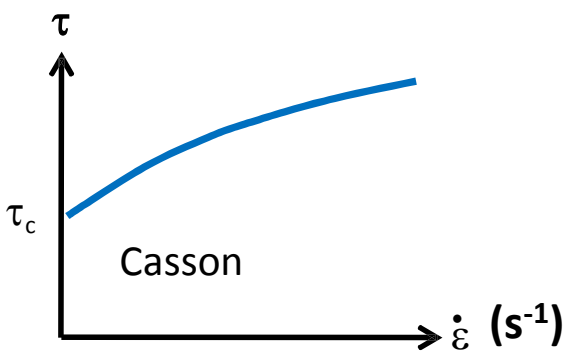
n: Indice d'écoulement

Résultats dépendant du mode opératoire (types de rhéomètres), de la température

Fluides dont le comportement est indépendant du temps

➢ corps plastiques





◆La déformation ne commence qu'à partir d'une certaine valeur de la contrainte :

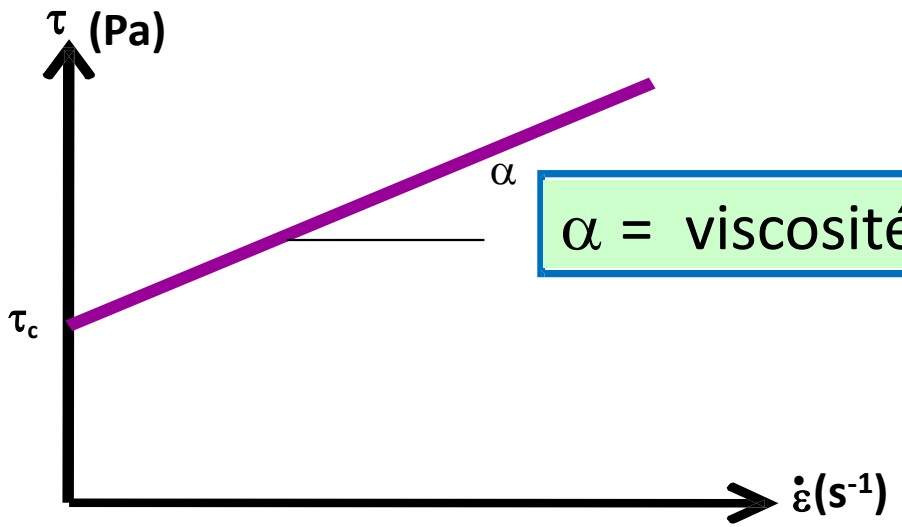
τ_c = **seuil d'écoulement** (yield value)

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 τ-τ_c

Fluides dont le comportement est indépendant du temps

1) Liquides de Bingham



α = viscosité plastique

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

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

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

Fluides dont le comportement est indépendant du temps

Mayonnaise

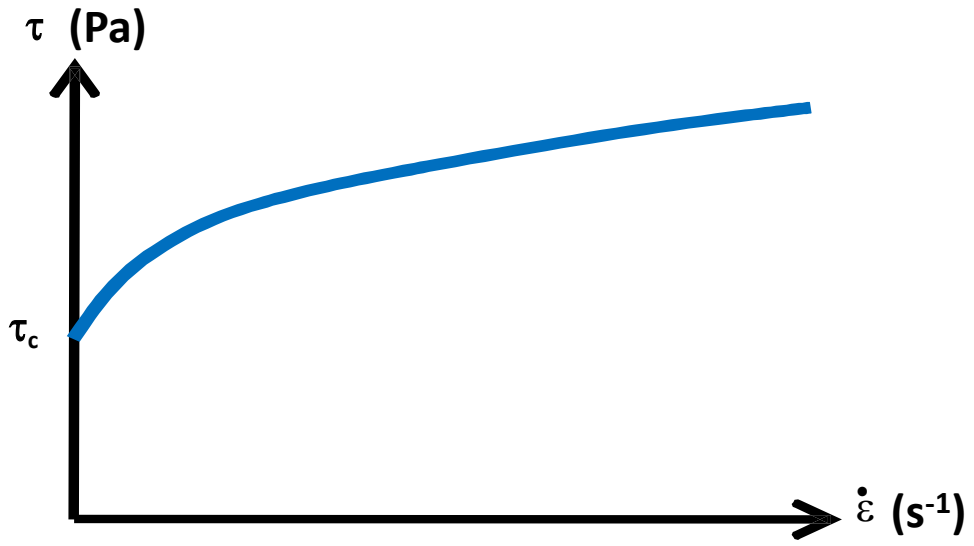
Beurre

les peintures à l'huile

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

Fluides dont le comportement est indépendant du temps

2) Liquides de Casson



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

Equation de Casson

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

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

avec β = viscosité plastique

Equation de Herschel - Bulkley

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

$$\tau > \tau_c \quad \rightarrow \quad \tau = \tau_c + K \cdot \varepsilon^n$$

Fluides dont le comportement est indépendant du temps

Boue

Dentifrice

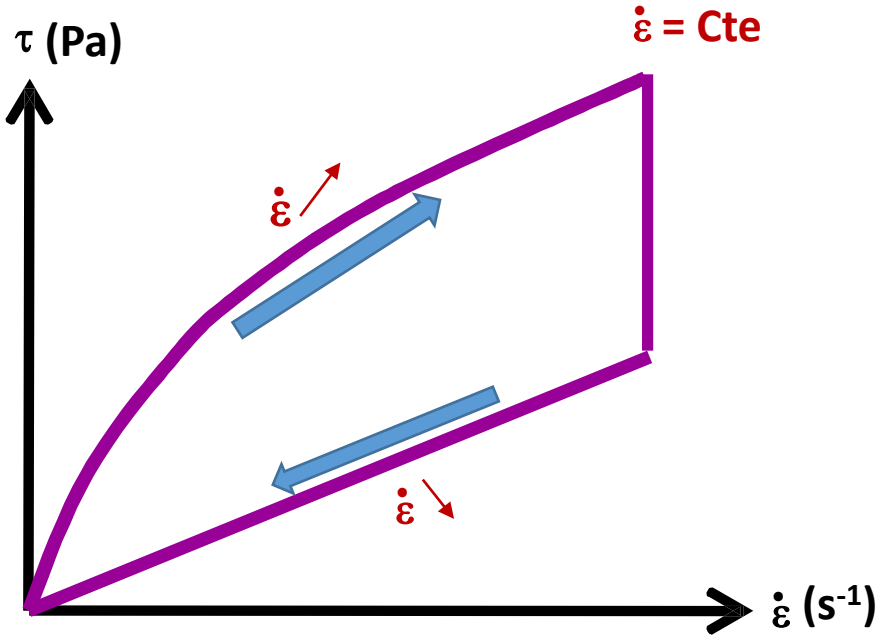
Pâte à pain

Chocolat

2 - Fluides dont le comportement est dépendant du temps

- Fluides thixotropes
- Fluides antithixotropes
- Fluides rhéopexes

Fluides dont le comportement est dépendant du temps



Boucle d'hystérésis d'un gel fluidifiant
(effet mémoire)

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.*

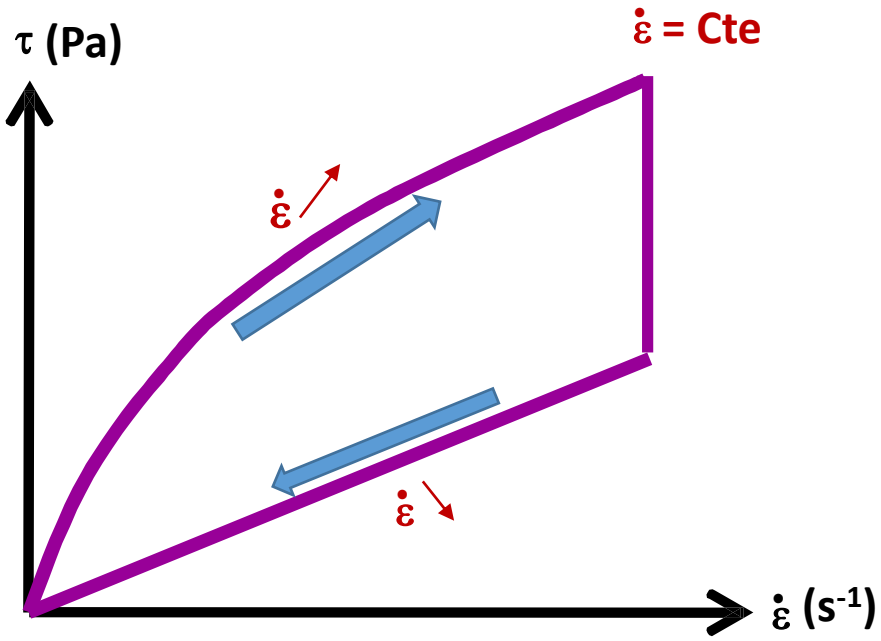
- *Il est possible d'évaluer le degré de thixotropie d'un fluide en calculant , par exemple, la surface de la courbe d'histérésis qui représente l'énergie nécessaire pour détruire la structure thixotrope.*

Fluides dont le comportement est dépendant du temps

Thixotropie (1)

Les fluides thixotropes ont une **viscosité qui diminue avec le temps** quand on leur applique **une contrainte constante**. Après suppression de cette contrainte, on ne retrouve la viscosité initiale qu'après un certain temps plus ou moins long. C'est un phénomène réversible. Tous les fluides sont plus ou moins **thixotropes.**

Ex.: moutarde, ketchup, yahourt, peintures, boues de forage, pâte de gypse, certains polymères.



Boucle d'hystérésis d'un gel fluidifiant
(effet mémoire)

Le **caractère thixotrope de certaines peintures** est exploitée en **ajustant le temps de restructuration** en fonction des besoins. Ces peintures **ne doivent pas couler au repos avant séchage** mais on doit pouvoir les étaler facilement. Cette propriété est obtenue en ajoutant de fines particules d'argile le plus souvent. Au repos, cela forme des agrégats et cela permet d'ajuster la cinétique de **re-/destructuration**.

Fluides dont le comportement est dépendant du temps

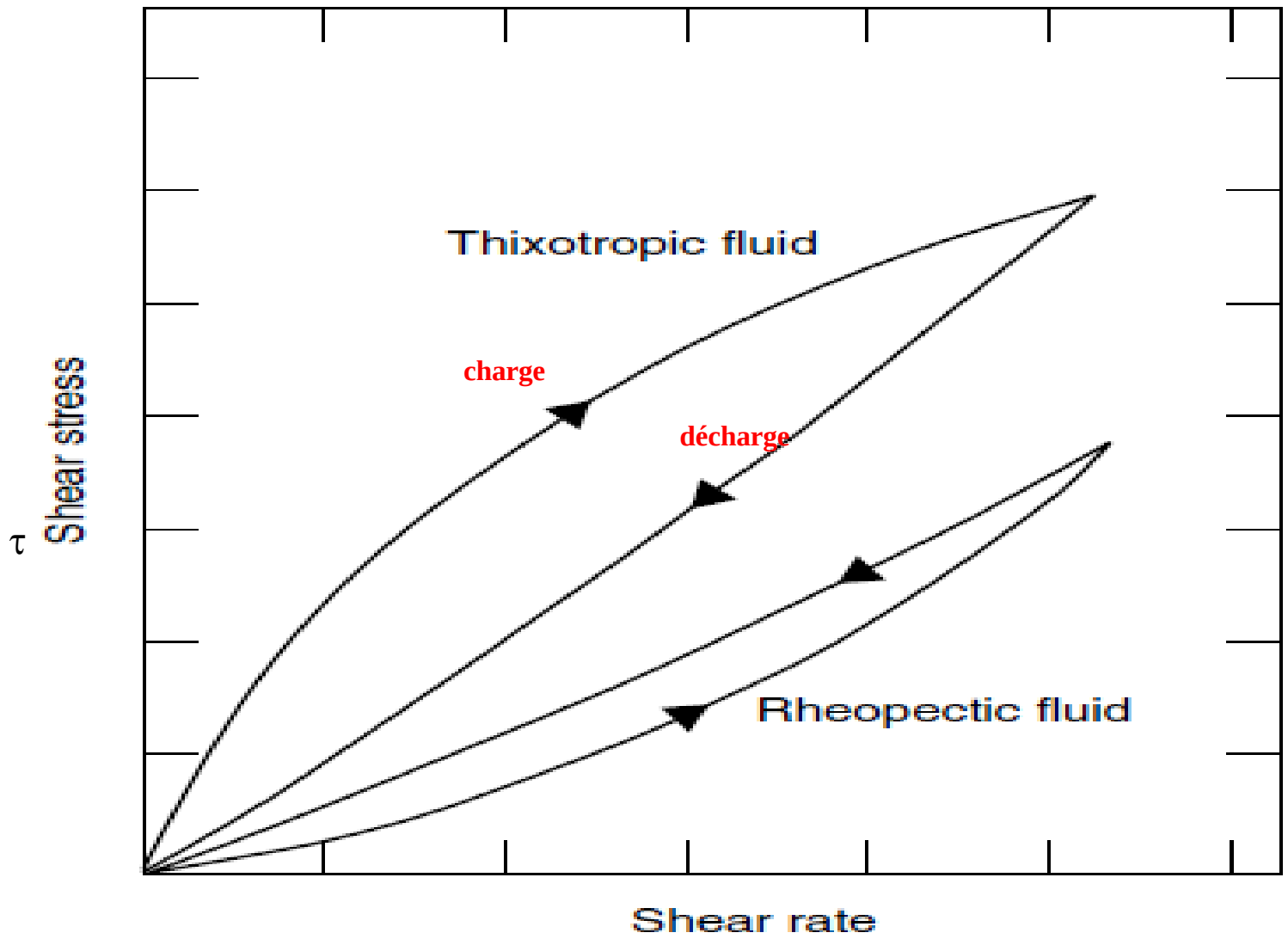
L'antithixotropie (2)

L'antithixotropie caractérise la propriété qu'ont certains fluides non newtoniens de voir leur **viscosité** **augmenter** avec le temps lorsqu'ils sont soumis à un gradient de vitesse (ou à une contrainte de cisaillement) **constant(e)** ;
le fluide revenant à son état initial après un temps de repos variable (réversibilité de la propriété).
Exemple : Les fluides antithixotropes sont rares (exemple : crème fouettée, mayonnaise).

La rhéopexie (3)

La rhéopexie est un phénomène comparable à l'antithixotropie, elle caractérise plutôt **la solidification** progressive d'un fluide (qualifié de rhéopexique, rhéopectique) par agitation.

Fluides dont le comportement est dépendant du temps



Références bibliographiques

1- G. COUARRAZE et J.L. GROSSIORD, 1991. Initiation à la rhéologie, Tech & Doc Lavoisier, France.

NA/969 à NA/971

2- A.C. ROUDOT, 2002. Rhéologie et analyse de texture des aliments, Tech & Doc Lavoisier, France.

NA/4303