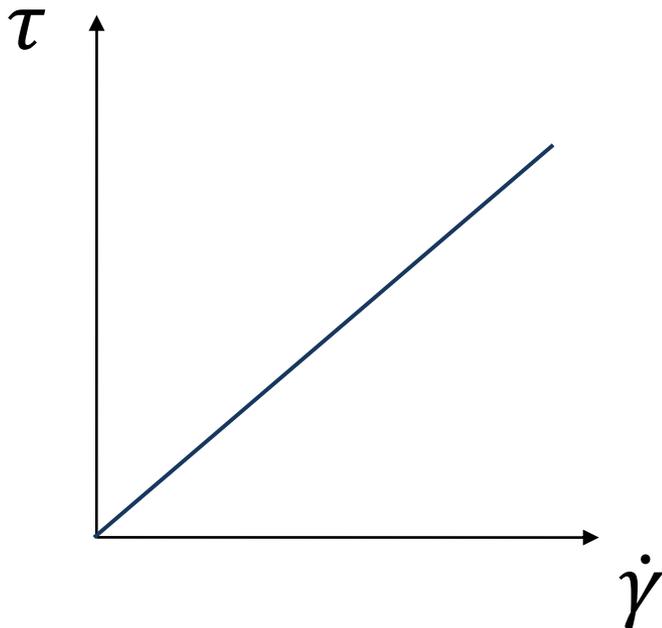


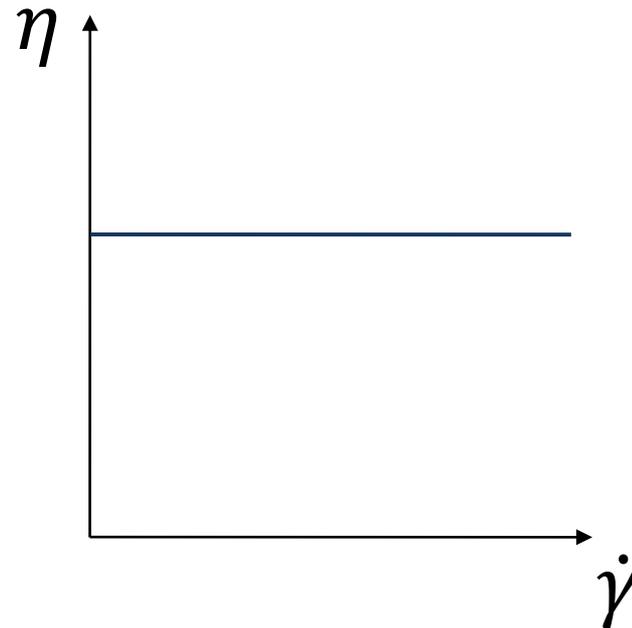
Classification des écoulements

Pour un fluide newtonien, la viscosité ne dépend pas de la contrainte ou du taux de cisaillement.

Courbe d'écoulement



Courbe de viscosité



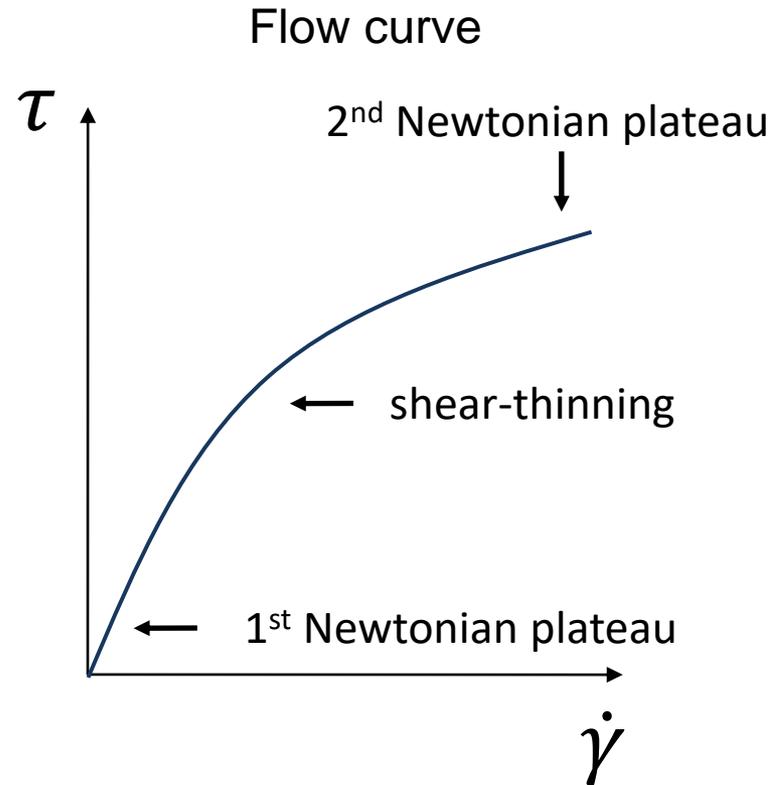
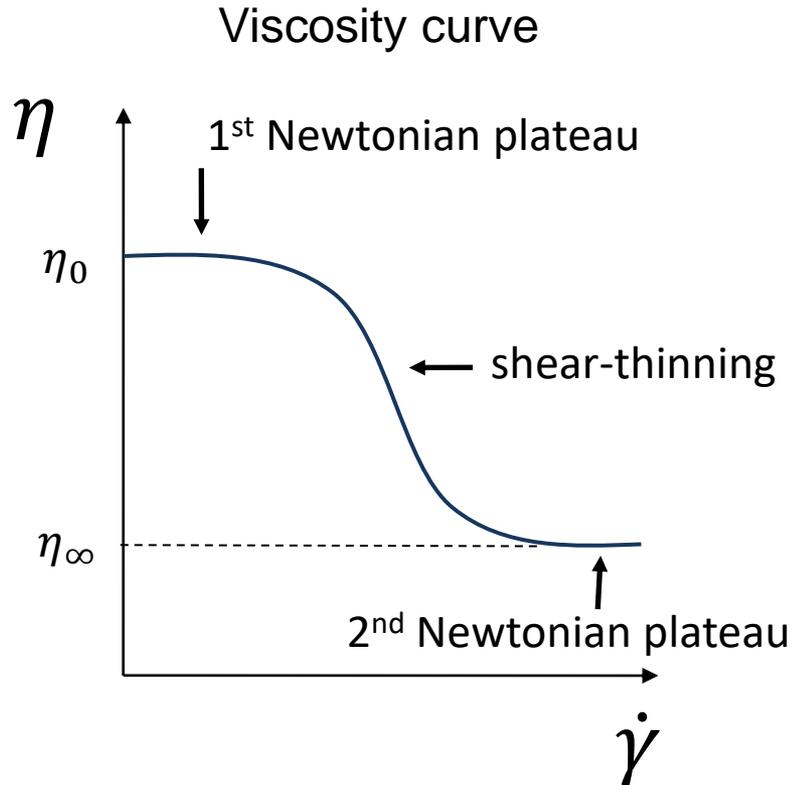
Exemples : eau, miel liquide, glycérol, éthanol, acétone, huile de silicone, etc.

$$\eta = f(T, P)$$

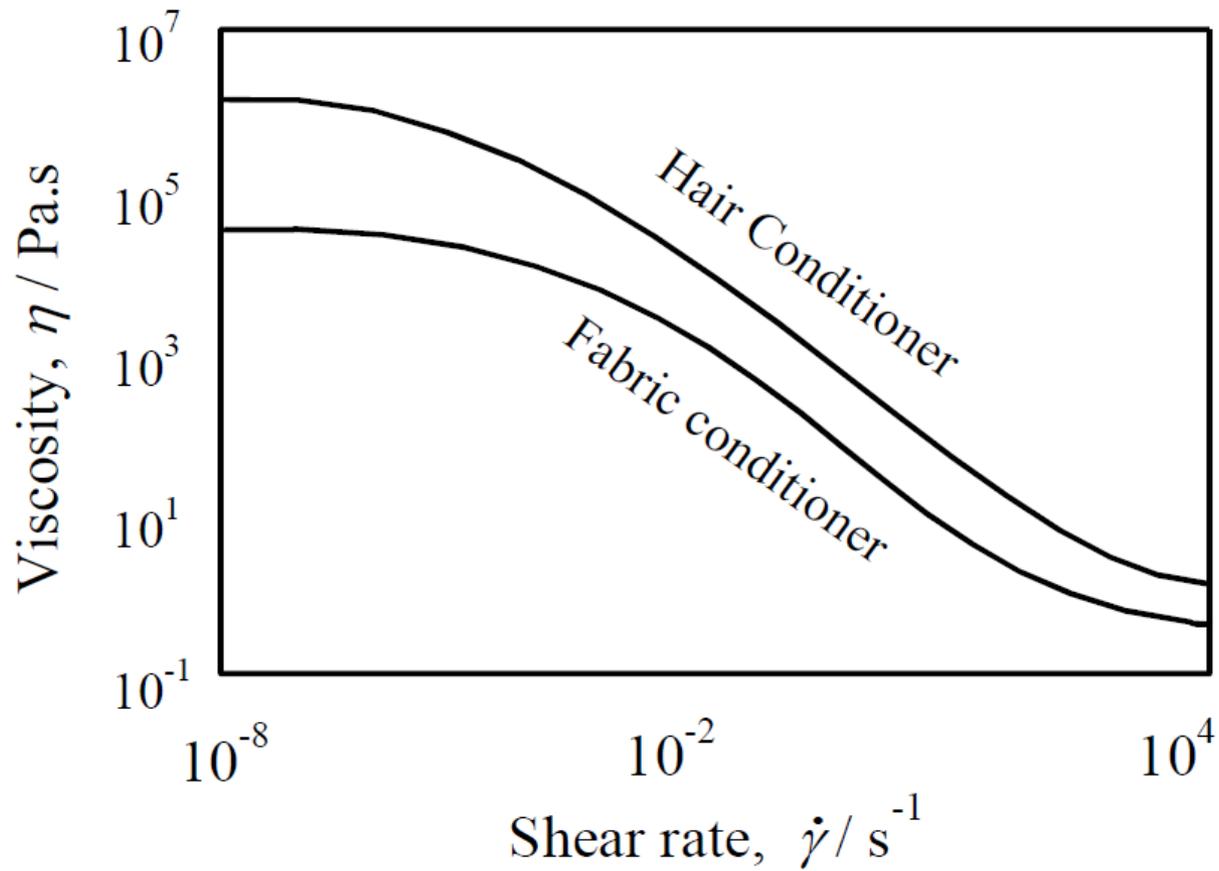
Fluides rhéofluidifiants (shear-thinning fluids)

Non-Newtonian fluids: shear-thinning

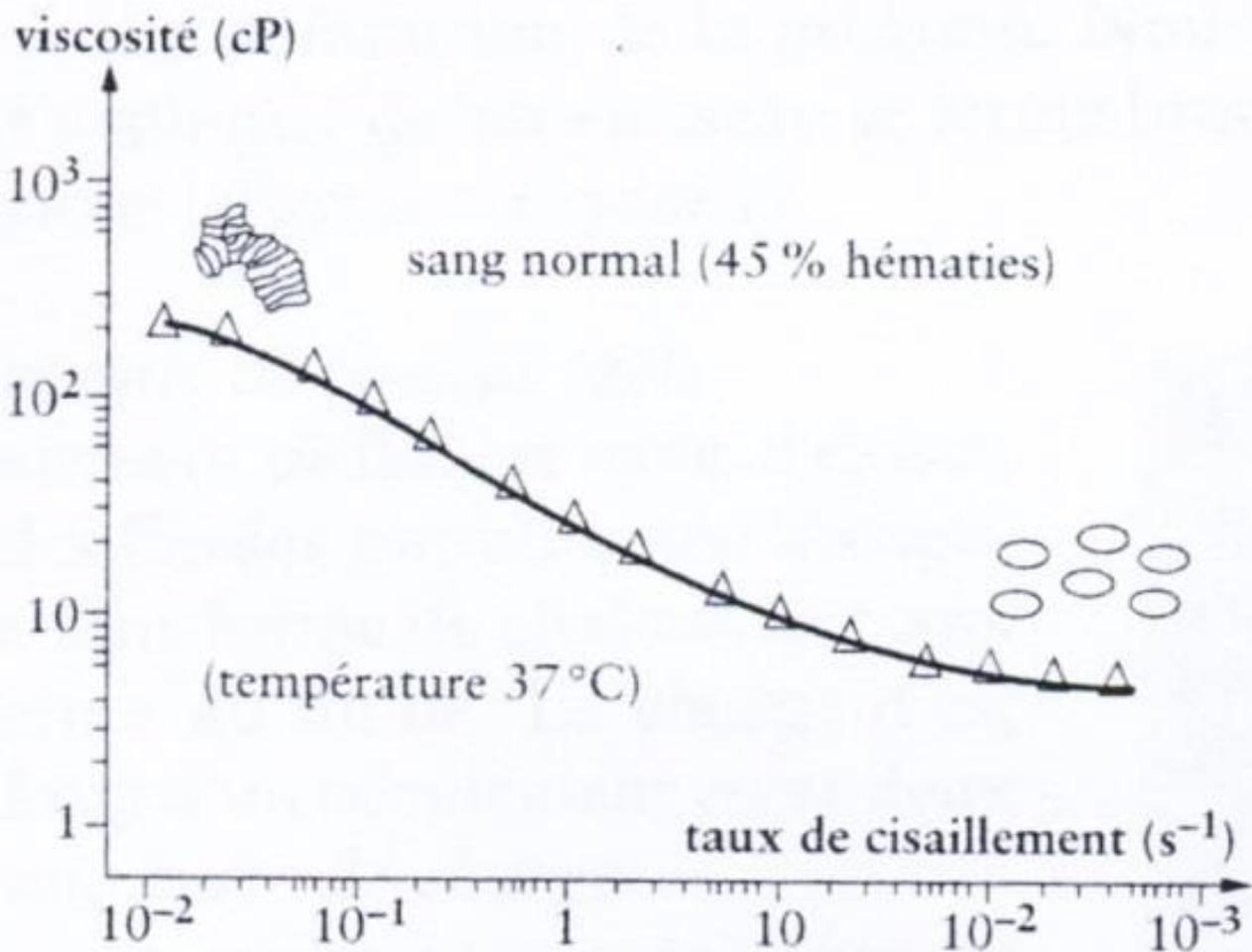
The viscosity of a shear-thinning fluid decreases with increasing shear rate or shear stress.



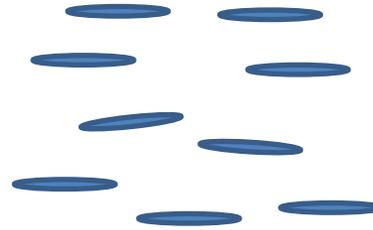
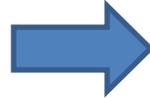
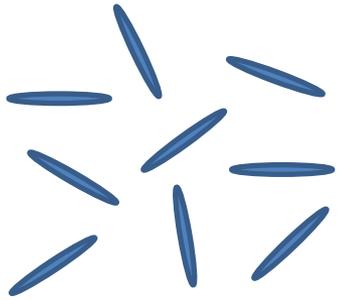
Examples: emulsions, suspensions, gels, etc., such as pharmaceuticals and cosmetics creams, shampoo, mayonnaise, blood, ...



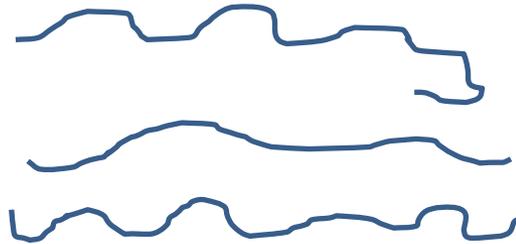
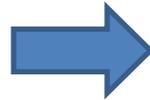
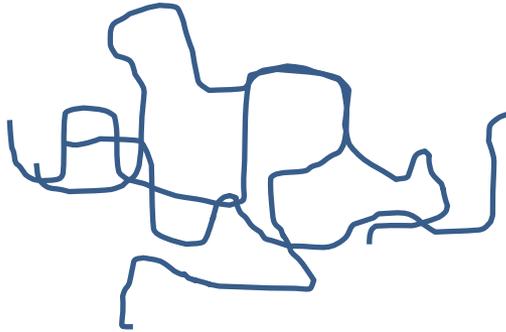
Rhéofluidification pour un après-shampooing (hair conditioner) et un adoucissant (fabric conditioner)



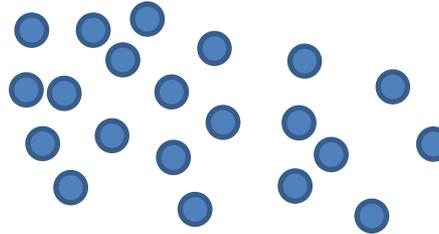
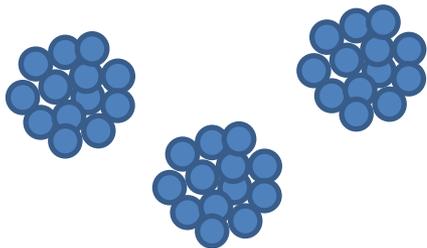
Exemples d'interprétations structurelles



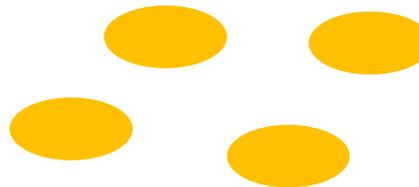
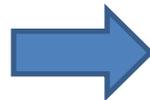
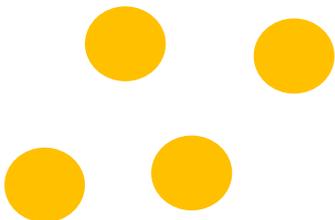
Orientation des particules anisotropes dans le sens de l'écoulement



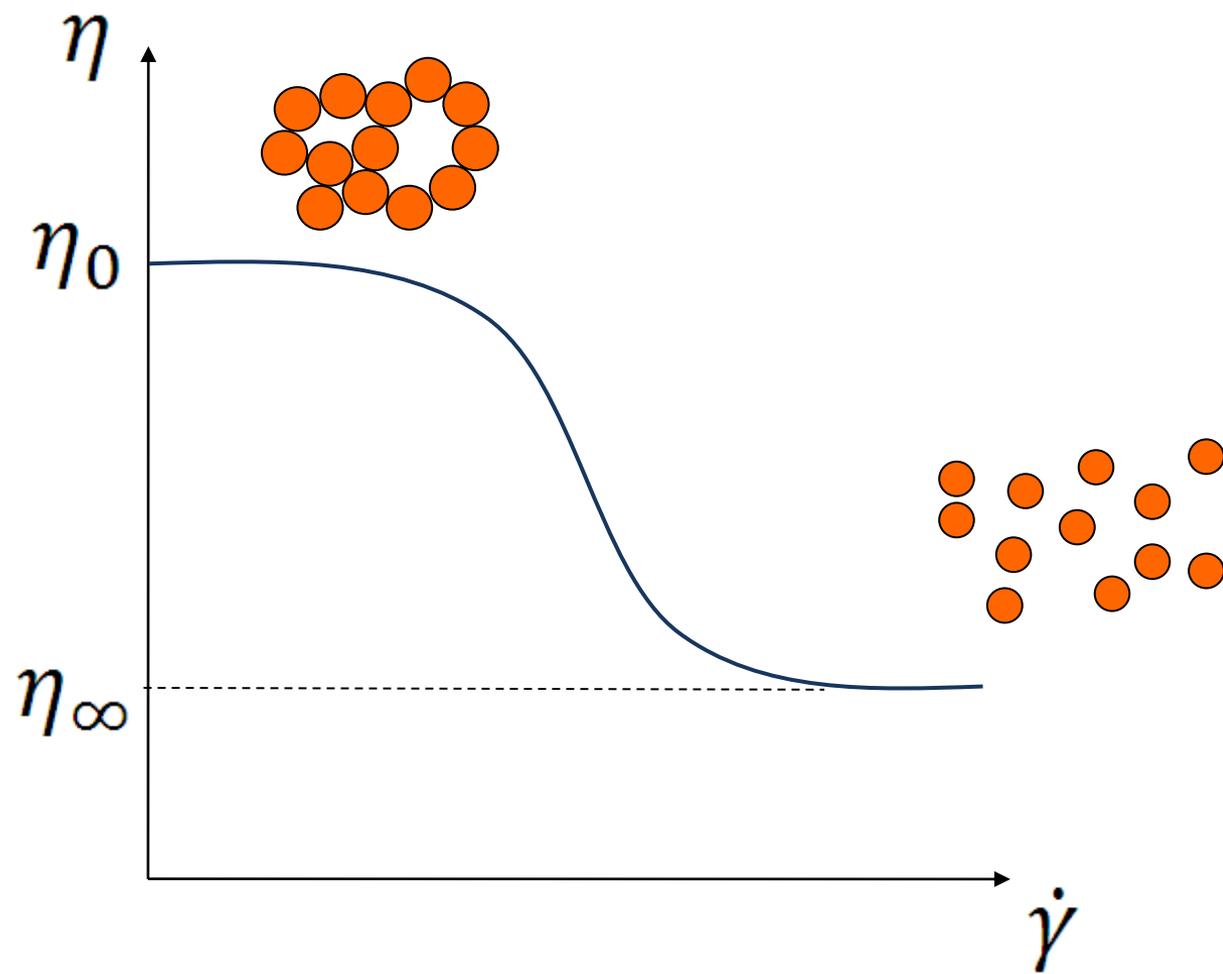
Désenchevêtrement des polymères



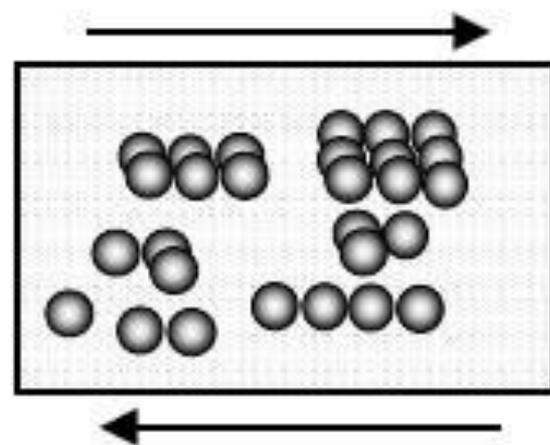
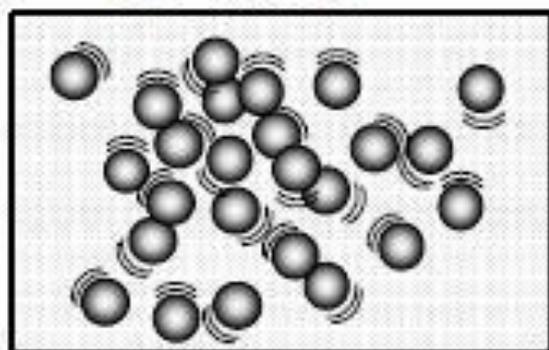
Rupture des agrégats



Déformation des gouttelettes dans le sens de l'écoulement



no shear



Modèles d'ajustement de courbes

Carreau-Yasuda

(Carreau si $a = 2$)

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = [1 + (\tau\dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}}$$

Cross

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (C\dot{\gamma})^n}$$

$\log \eta$

Williamson

η_0

$$\eta = \eta_0 - k\dot{\gamma}^{n-1}$$

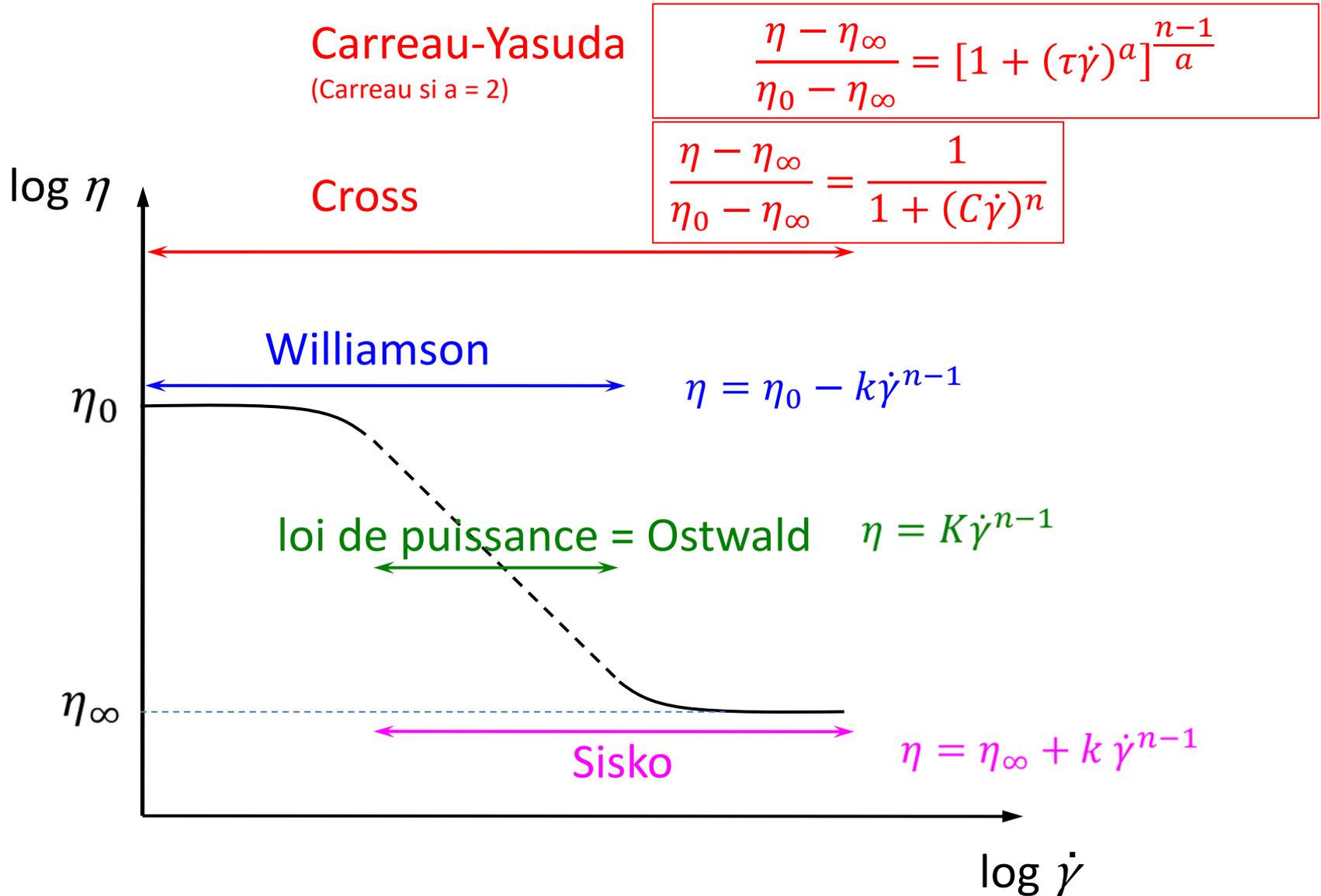
loi de puissance = Ostwald $\eta = K\dot{\gamma}^{n-1}$

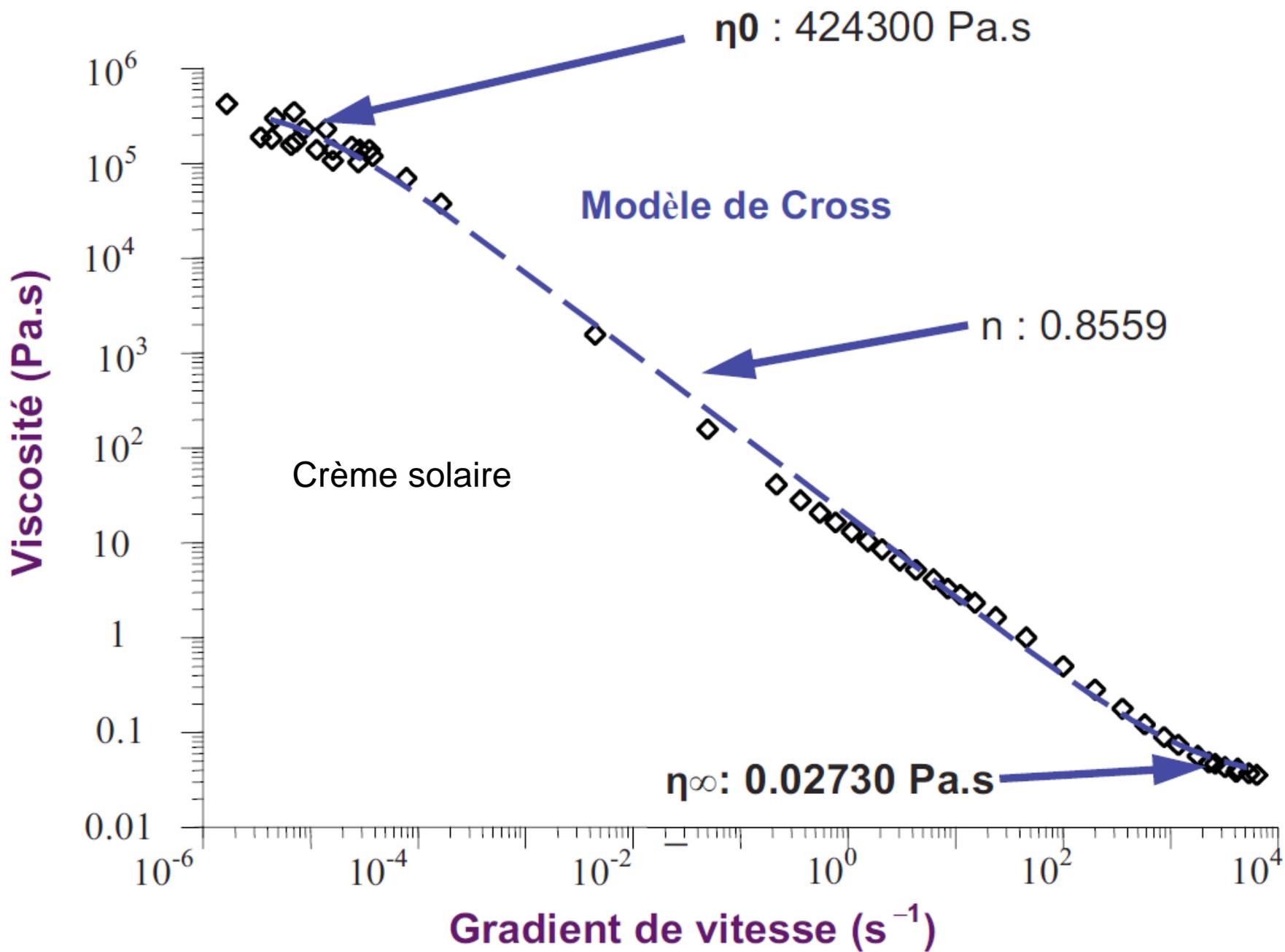
η_{∞}

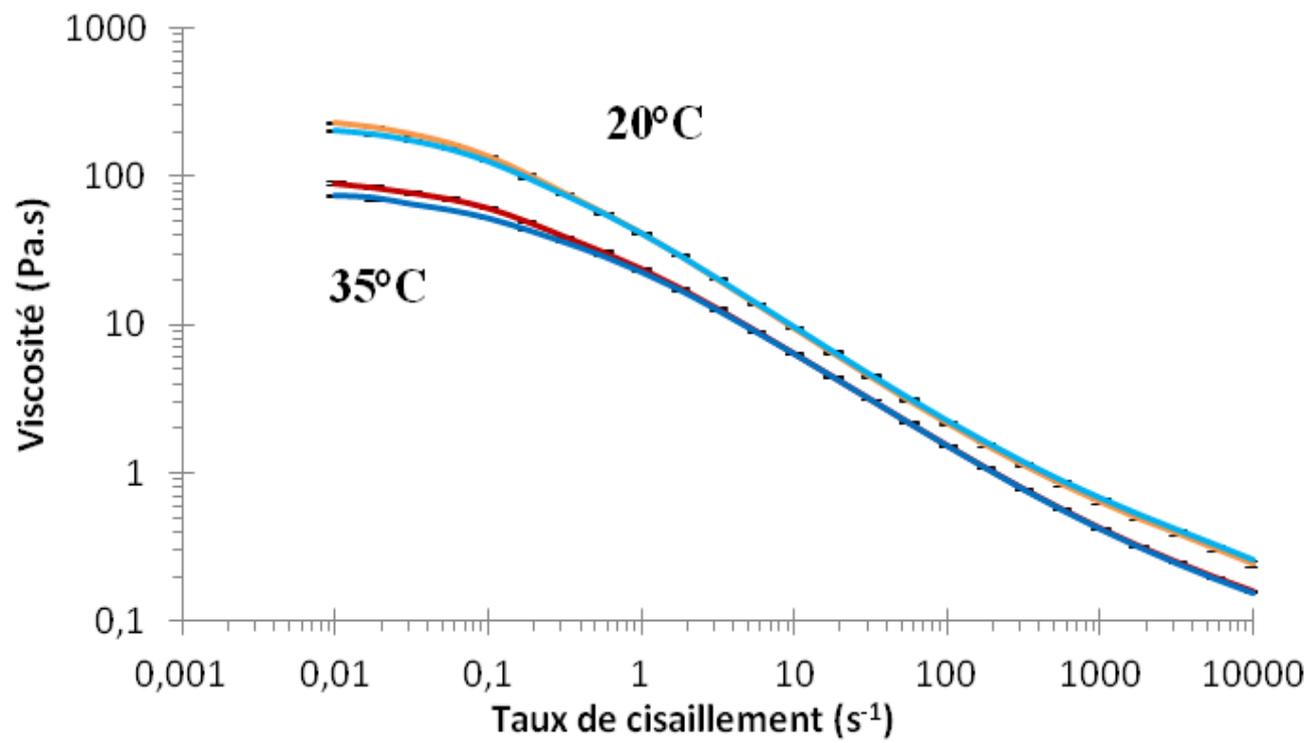
Sisko

$$\eta = \eta_{\infty} + k\dot{\gamma}^{n-1}$$

$\log \dot{\gamma}$





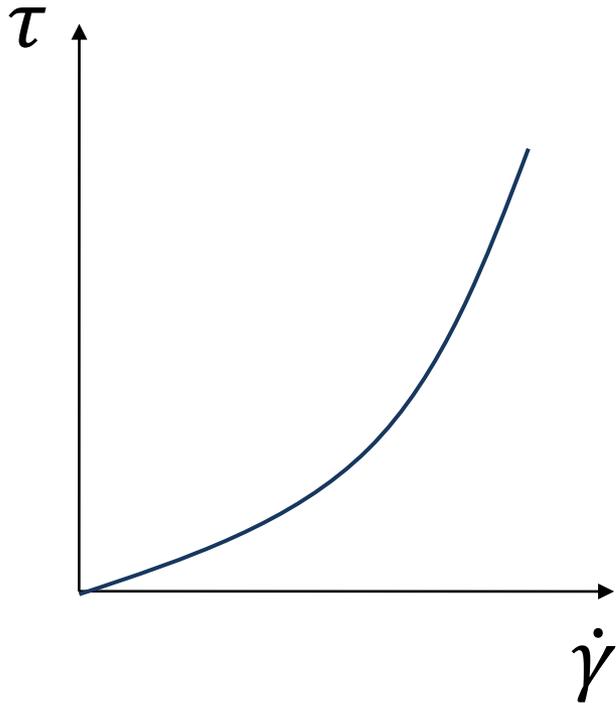


Gel pharmaceutique

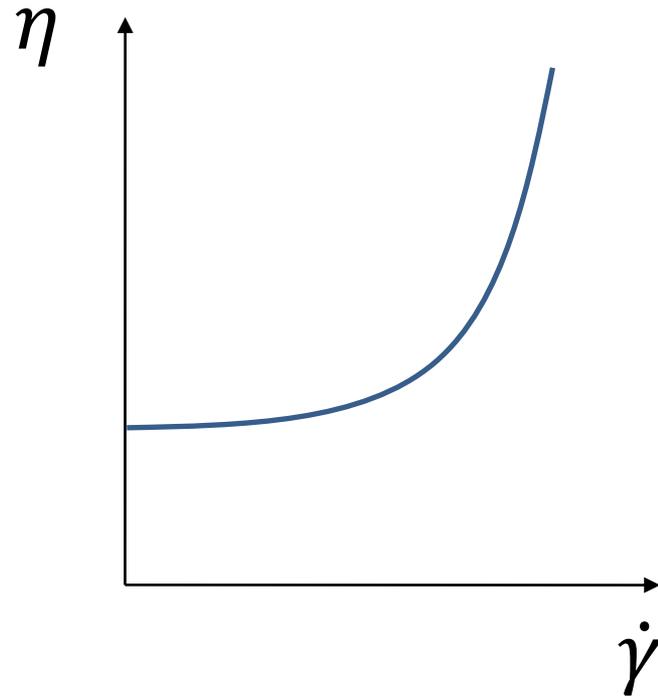
Fluides rhéoépaississants (shear-thickening fluids)

Pour un fluide rhéoépaississant, la viscosité augmente lorsque la contrainte ou le taux de cisaillement augmente.

Courbe d'écoulement

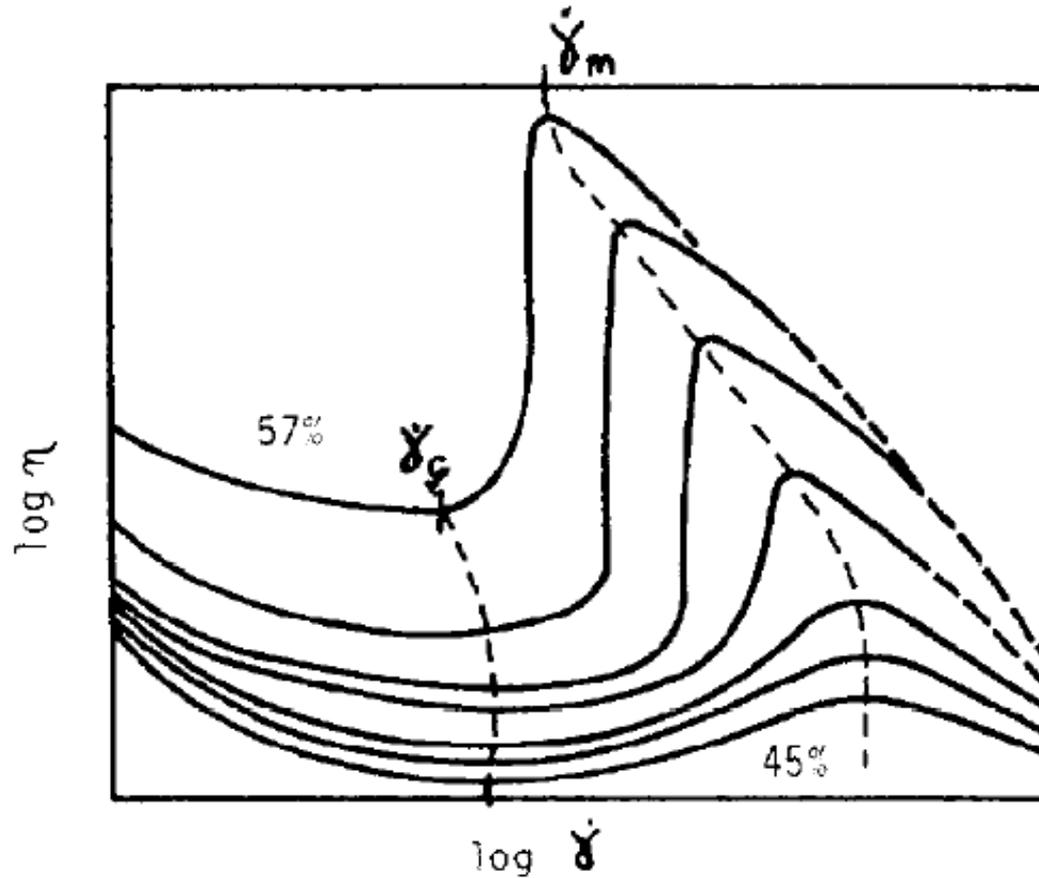


Courbe de viscosité



Exemples : suspensions concentrées, maïzena

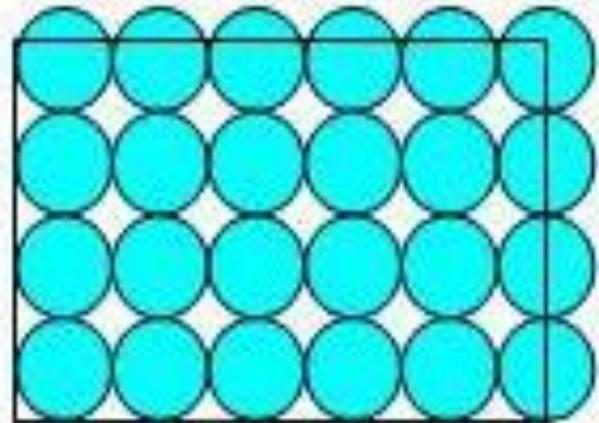
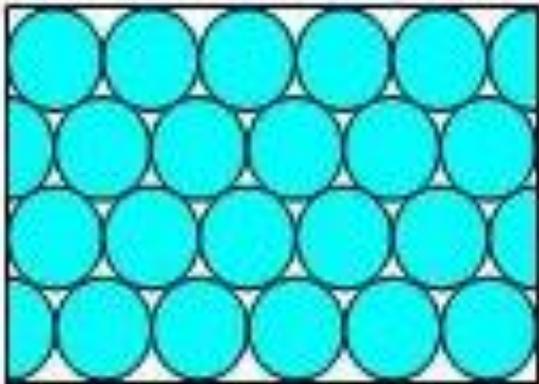
Exemples pour une suspension concentrée de particules solides



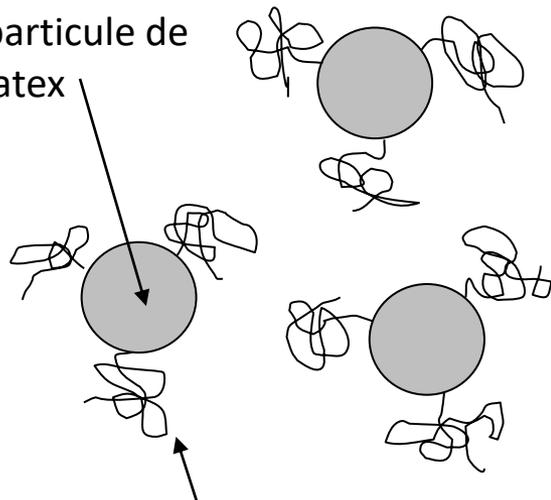
Les différentes courbes correspondent à des fractions volumiques de particules variant entre 45 et 57 %. Les échelles sont logarithmiques.

$\dot{\gamma}_c$ est le taux de cisaillement critique au-delà duquel la viscosité commence à augmenter ; $\dot{\gamma}_m$ marque la fin de l'augmentation de la viscosité.

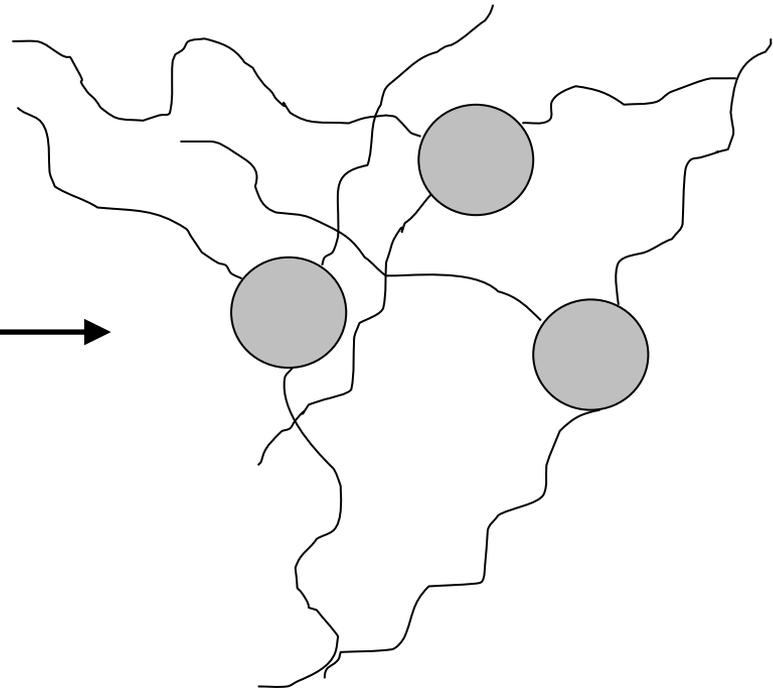
Dilatance de Reynolds

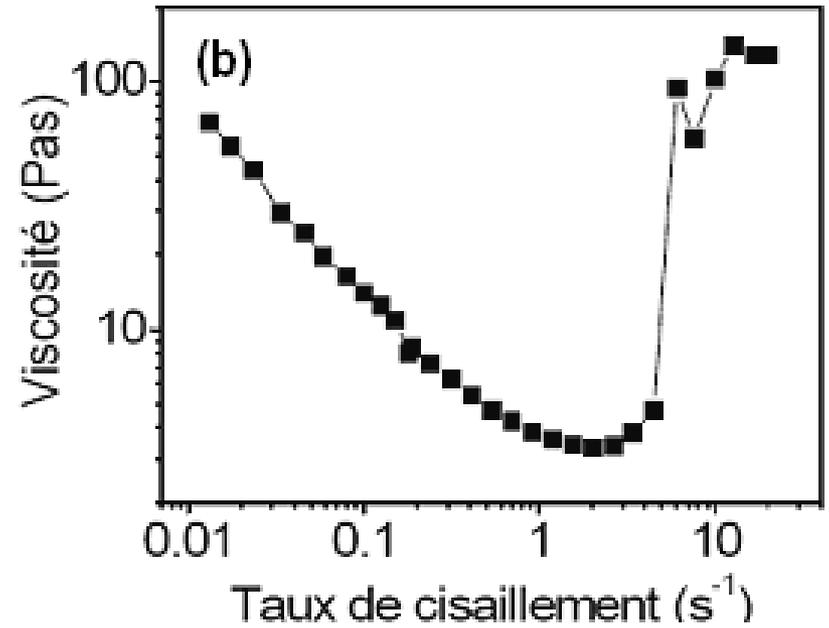
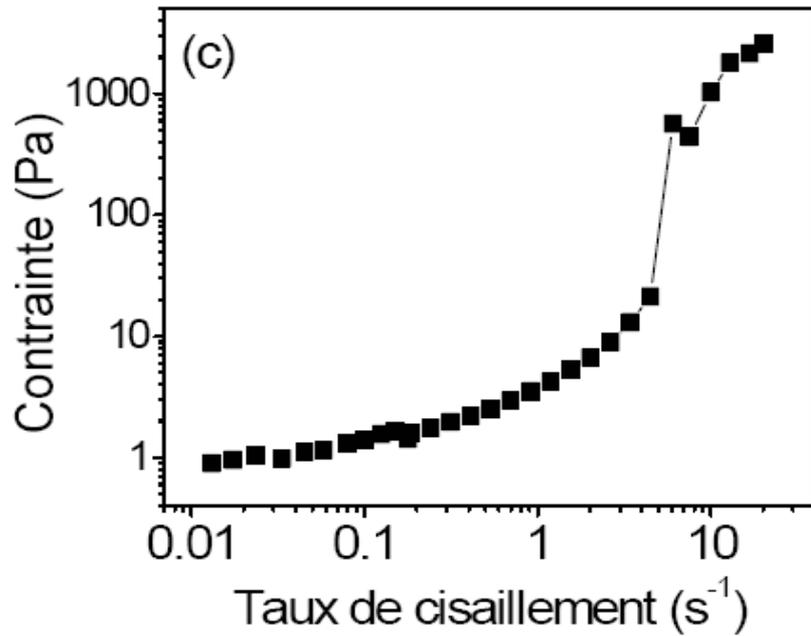


particule de latex



chaîne de polymère

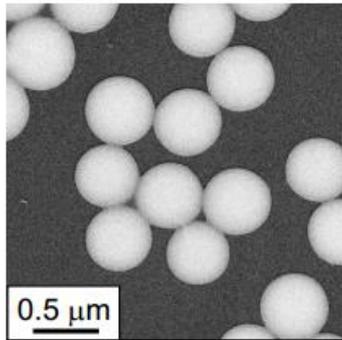




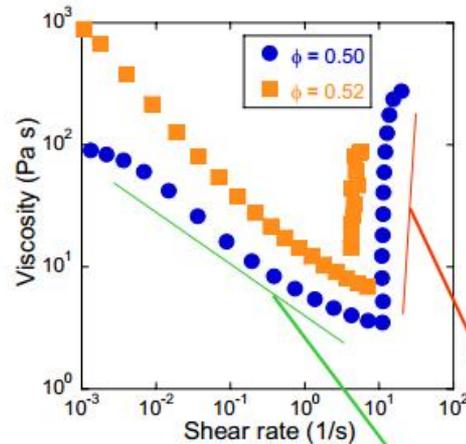
**Suspension concentrée de maïzena
(expérience en Couette)**



Shear Thickening Fluid (STF)



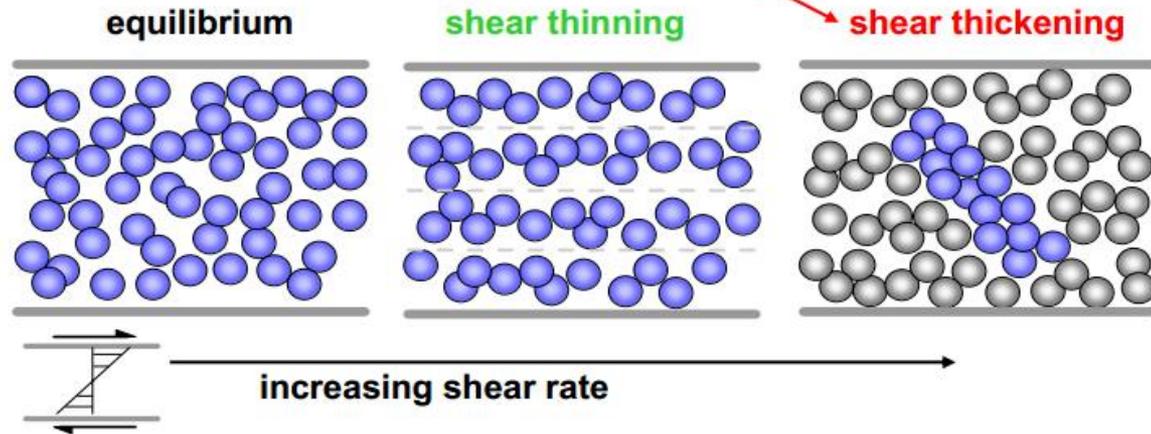
colloidal silica particles



- Liquid phase **highly filled** with rigid, **colloidal** particles
- At high shear rates, hydrodynamic forces overcome repulsive interparticle forces, and **hydroclusters** form
- Particles collide, material becomes macroscopically rigid



shear-thickening fluid



Wagner *et al.*, 2003

Fluides à seuil (yield stress fluids)

Pourquoi avoir un seuil d'écoulement ?



- Pour éviter la sédimentation ou le crémage. Exemple : boue de forage.
Remarque : une forte viscosité ne stoppe pas la sédimentation ou le crémage, mais ne fait que le ralentir.
- Pour éviter l'écoulement du fluide au repos ou faiblement sollicité (vibrations, etc.).
Exemple : dentifrice.

Semi-solide ?

Définition FDA :

“A semisolid is not pourable; it does not flow or conform to its container at room temperature. It does not flow at low shear stress and generally exhibits plastic flow behavior.”

Fluide à seuil (“yield stress fluid”, anciennement “plastic fluid”) :

fluide qui s'écoule s'il est soumis à une contrainte supérieure à une contrainte seuil.

« Quantifier le low shear stress »

→ mesurer la contrainte seuil

Mesure du seuil d'écoulement

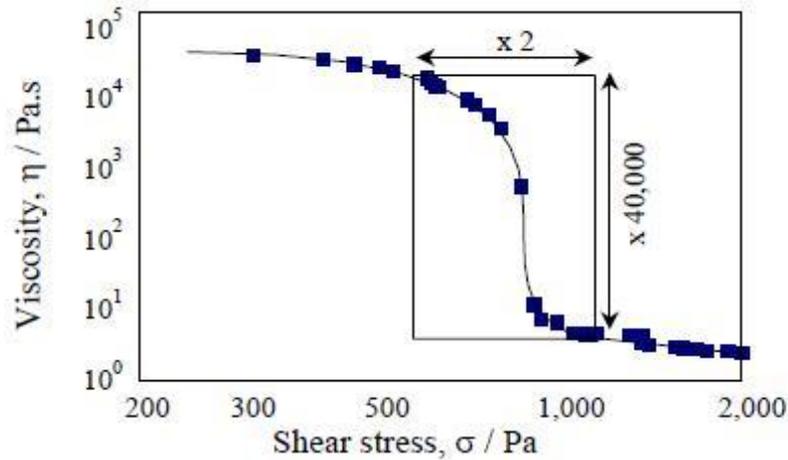


Figure 7: Flow curve of a flocculated ink.

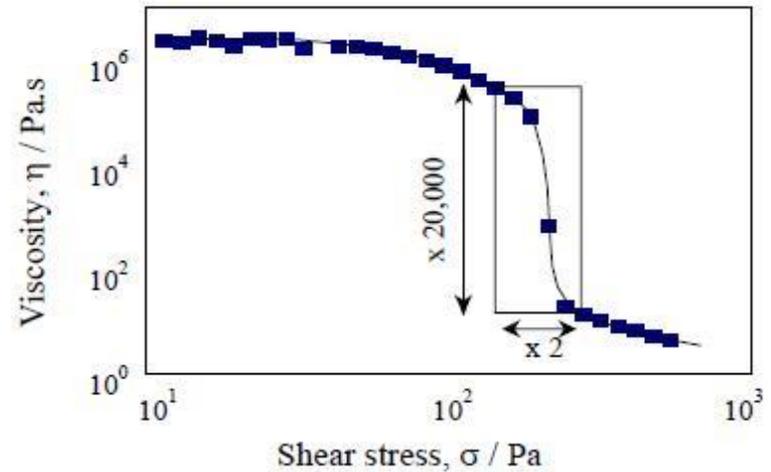


Figure 8: Flow curve of a toothpaste.

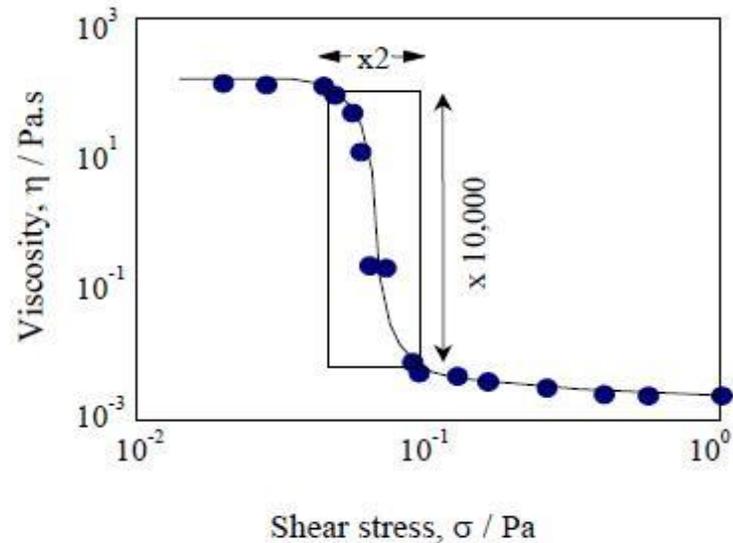


Figure 9: Flow curve of saliva at room temperature.

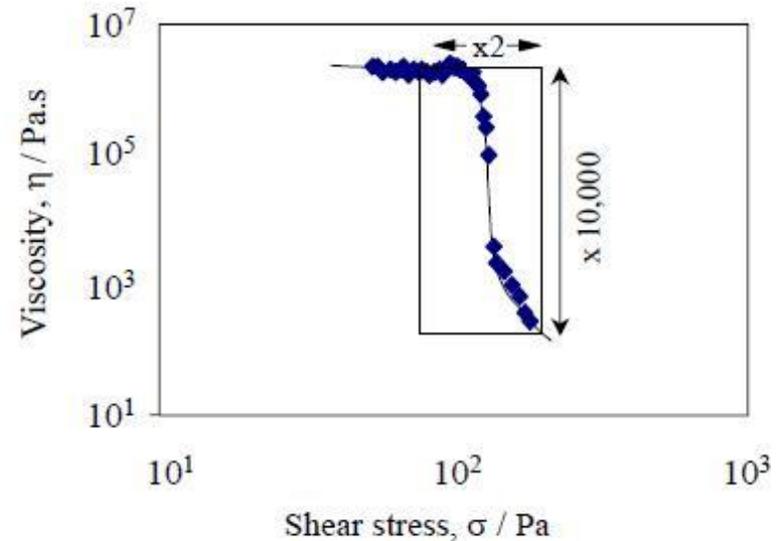
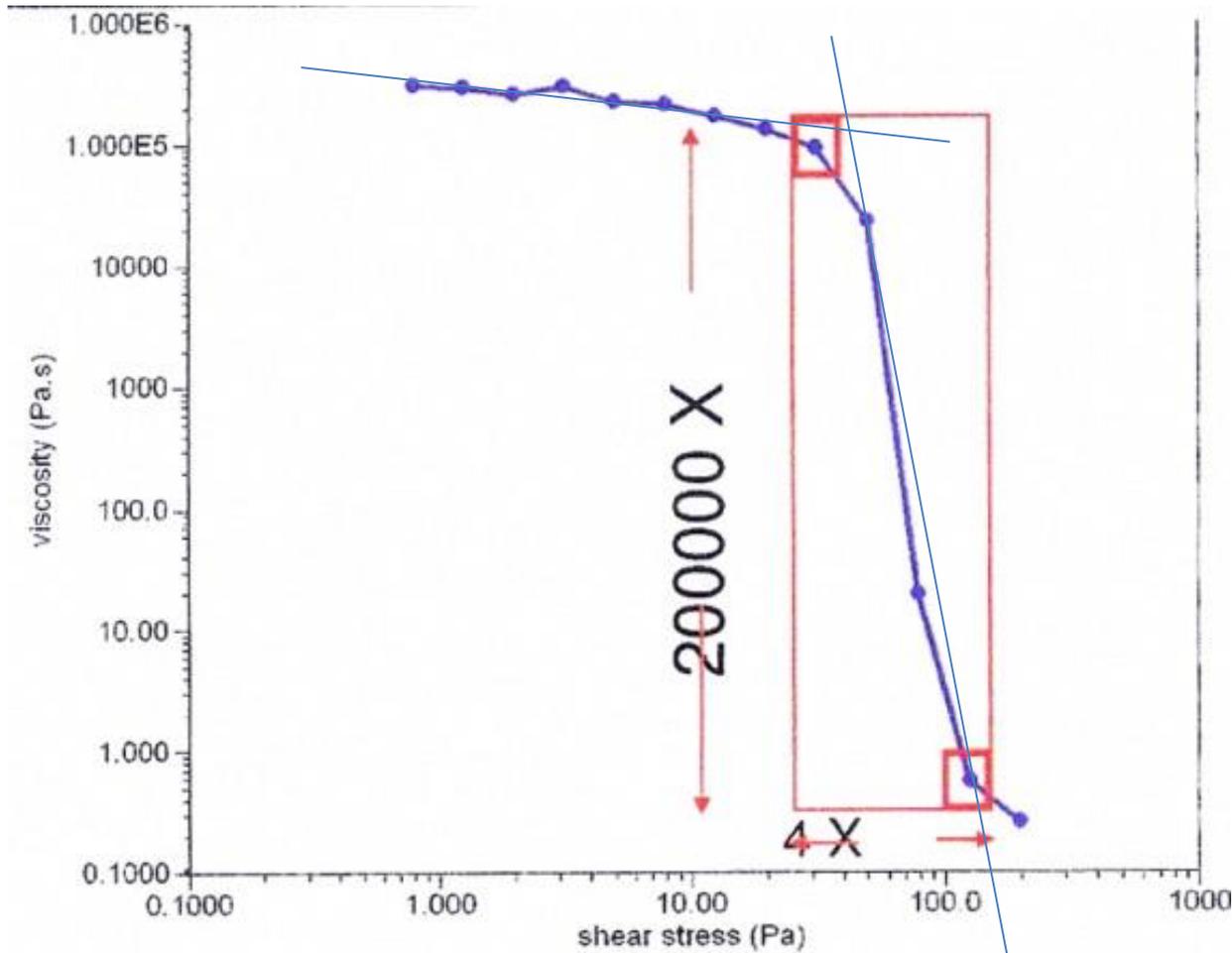


Figure 10: Flow curve of tomato paste at room temperature.

Mesure du seuil d'écoulement

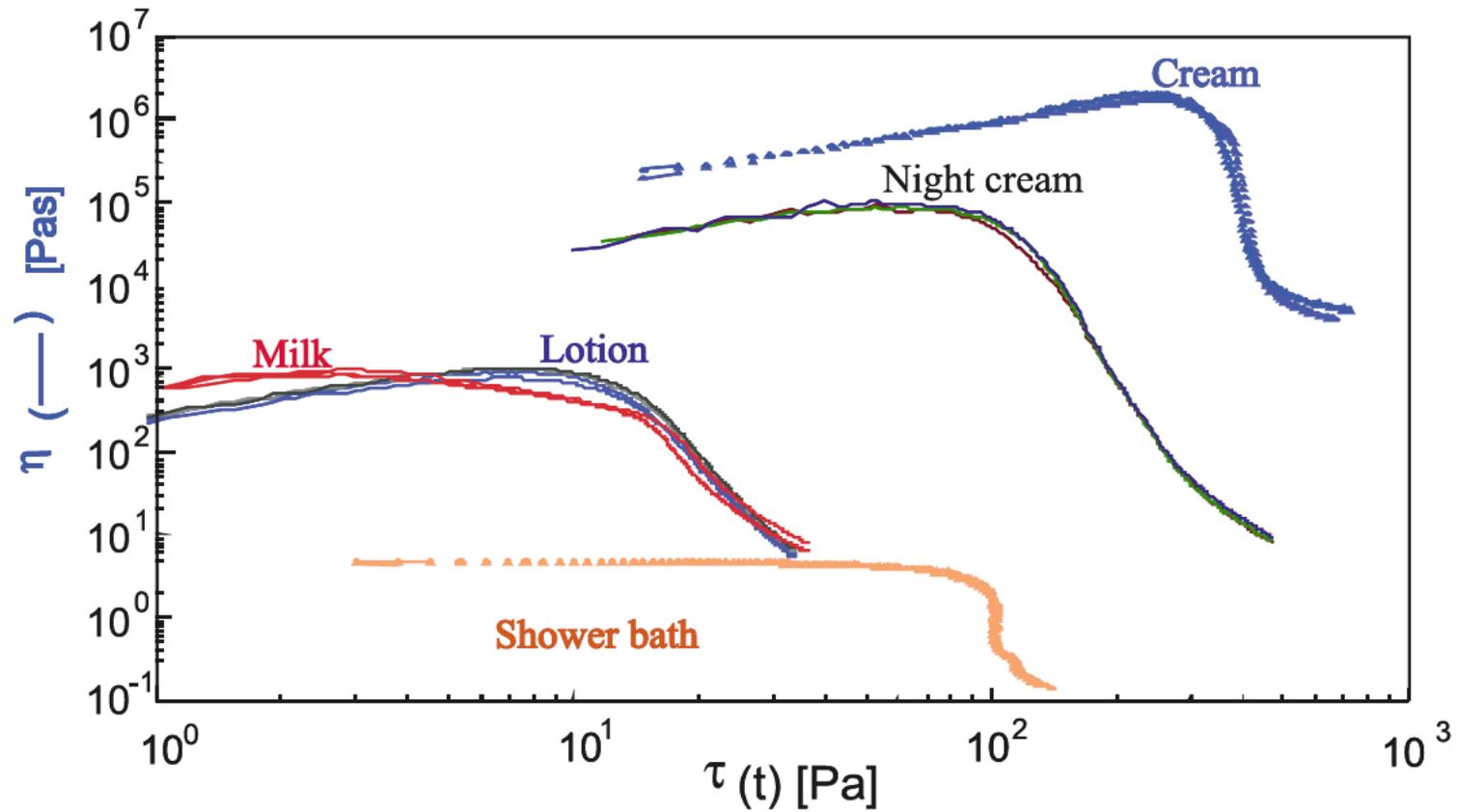


Lotion
cosmétique

Chute brusque
de la viscosité
(plusieurs
décades) sur
une faible
gamme de
contrainte de
cisaillement

Plusieurs
mesures du seuil
possibles suivant
le critère choisi

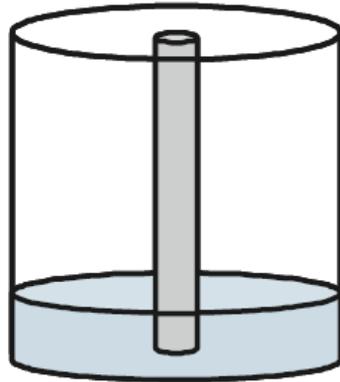
Mesure du seuil d'écoulement



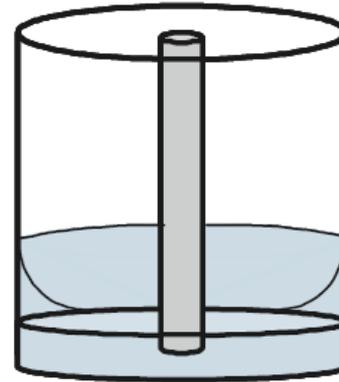
Mesure du seuil d'écoulement

Problème de conditionnement

Conditionnement en pompe ou en spray



échantillon avec bon
vidange du reliquat



échantillon avec
mauvais vidange du
reliquat

Mesure du seuil d'écoulement

Problème de conditionnement

Comparaison de 5 produits cosmétiques

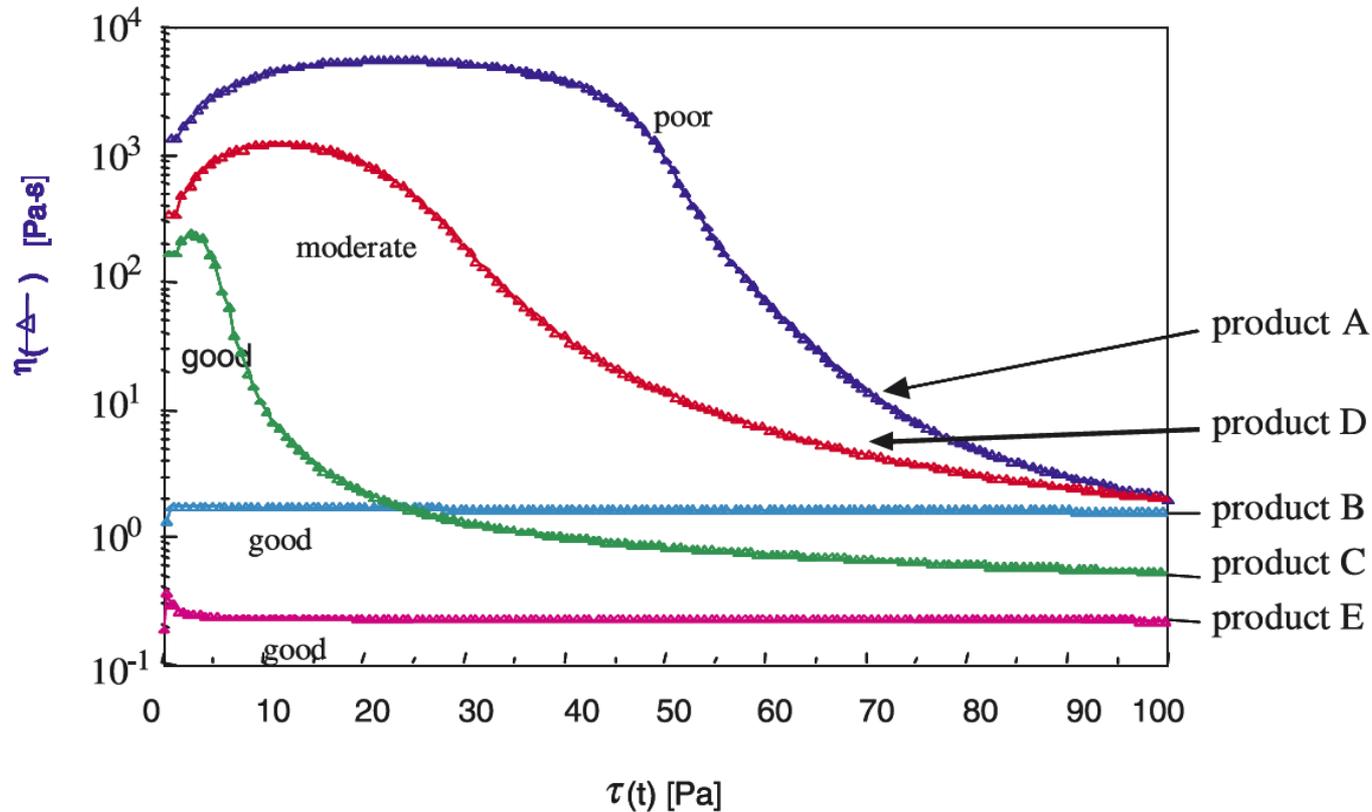
Echantillon	Vidange du reliquat (observation)	Viscosité (Pa.s) à 25 °C et 10 s ⁻¹ (mesure)
Produit A	Mauvais	7
Produit B	Bon	6
Produit C	Bon	2
Produit D	Modéré	1,5
Produit E	Bon	0,25



Corrélation ?

Mesure du seuil d'écoulement

Problème de conditionnement



Produits B et E : quasi-newtonien.

Produit C : faible seuil d'écoulement (remarque : ordonnée à mettre en log pour observer la chute brusque)

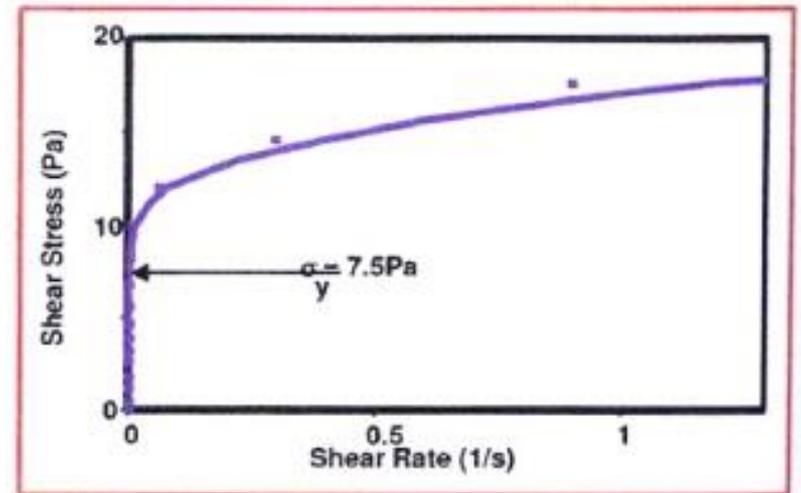
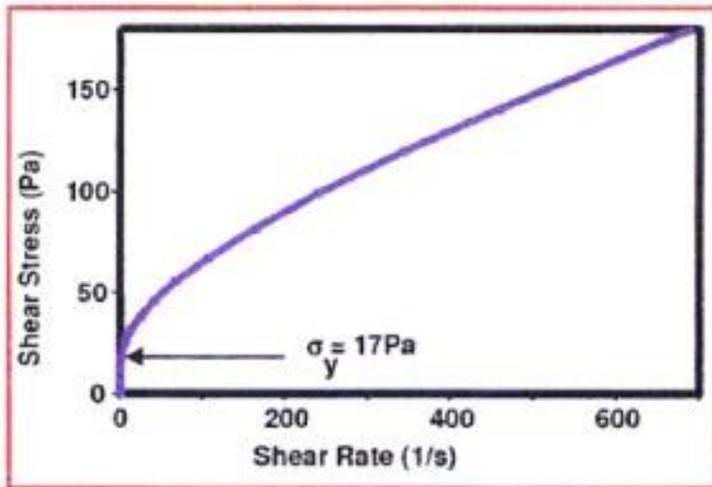
Produit D : seuil d'écoulement modéré

Produit A : seuil d'écoulement élevé

La courbe entière permet de corréliser correctement les mesures rhéologiques avec les observations.

Mesure du seuil d'écoulement

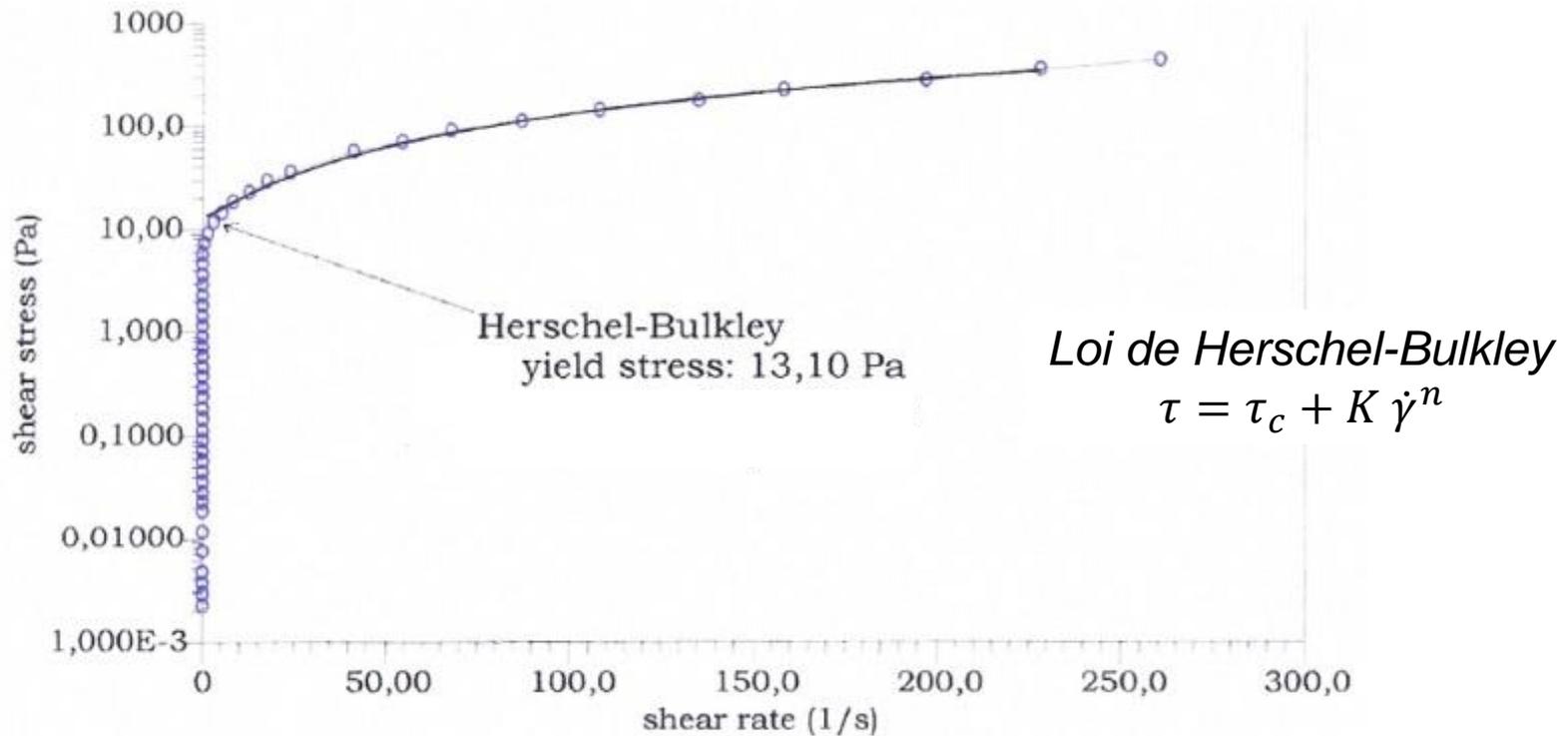
Détermination du seuil à partir de la courbe d'écoulement



Attention : il faut s'approcher le plus possible du taux de cisaillement nul ! Sinon, risque de surestimation du seuil d'écoulement.

Mesure du seuil d'écoulement

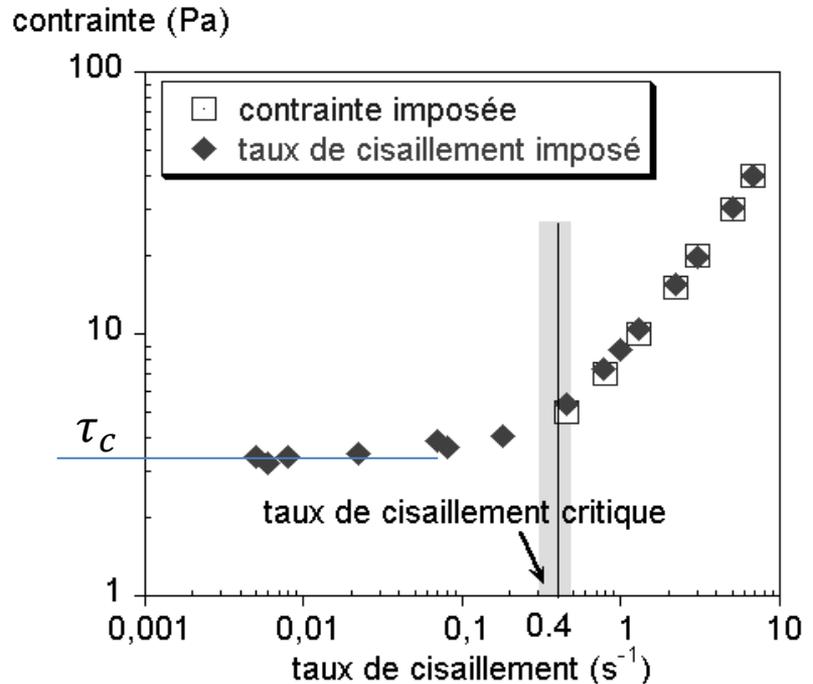
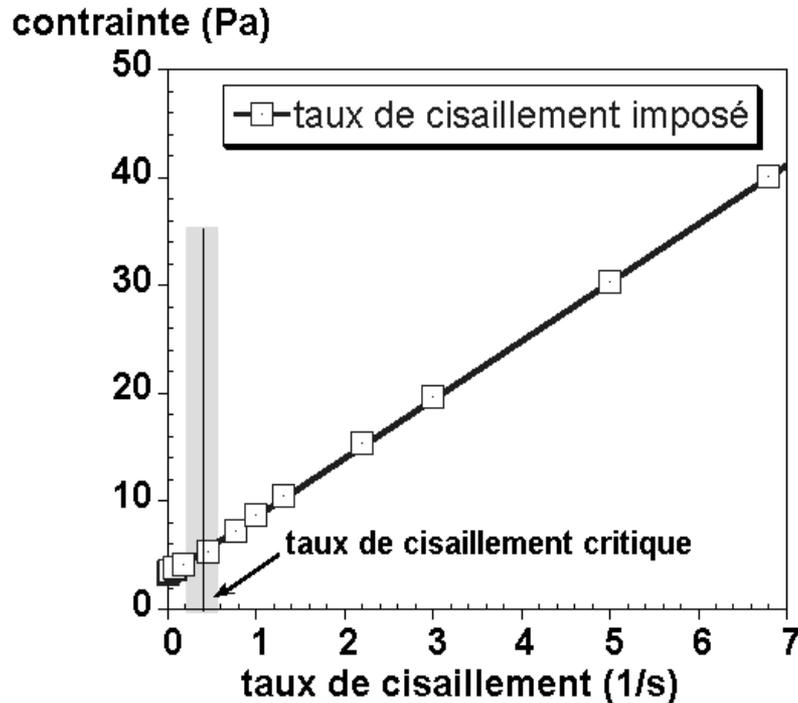
Détermination du seuil d'écoulement par extrapolation de la courbe d'écoulement, en utilisant une loi d'ajustement



Solution de xanthane

Mesure du seuil d'écoulement

Détermination du seuil à partir de la courbe d'écoulement



Suspension fortement concentrée de billes de polystyrène

En dessous du taux de cisaillement critique, l'écoulement n'est plus homogène dans tout l'entrefer : il y a localisation de l'écoulement.

Mesure du seuil d'écoulement

Détermination du seuil à partir de la courbe d'écoulement

Loi de Casson : $\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{\eta \dot{\gamma}}$

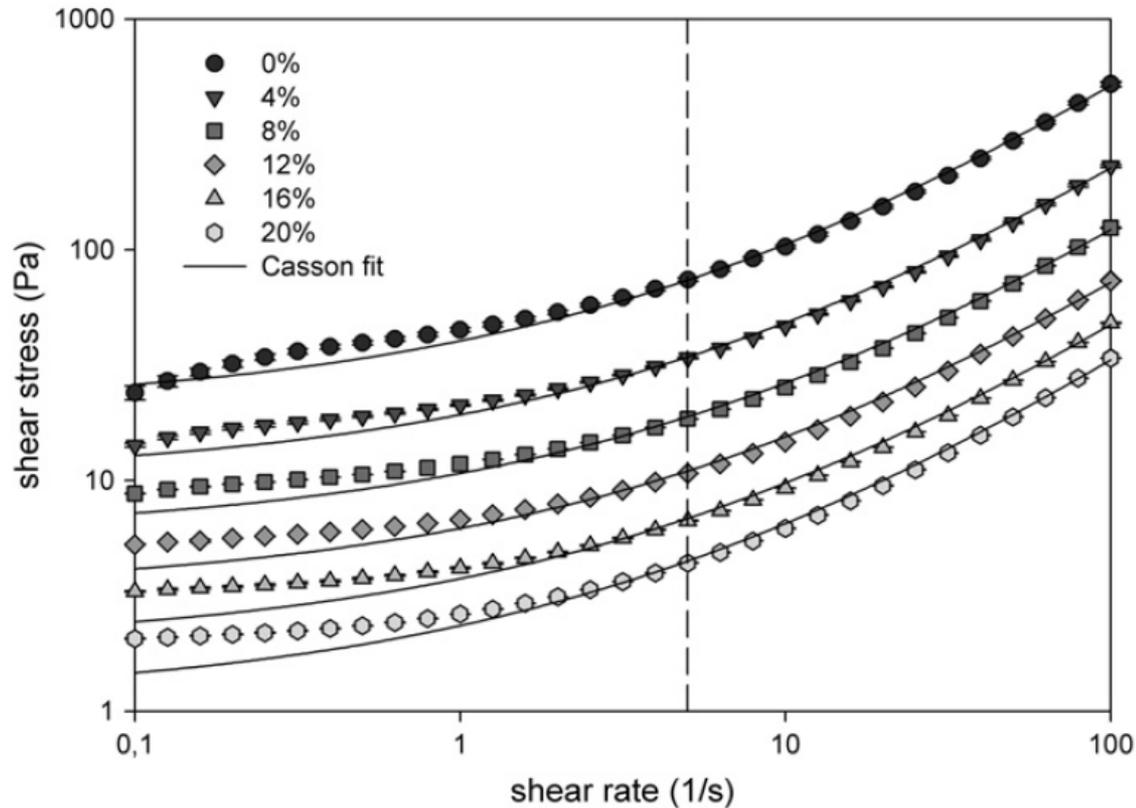
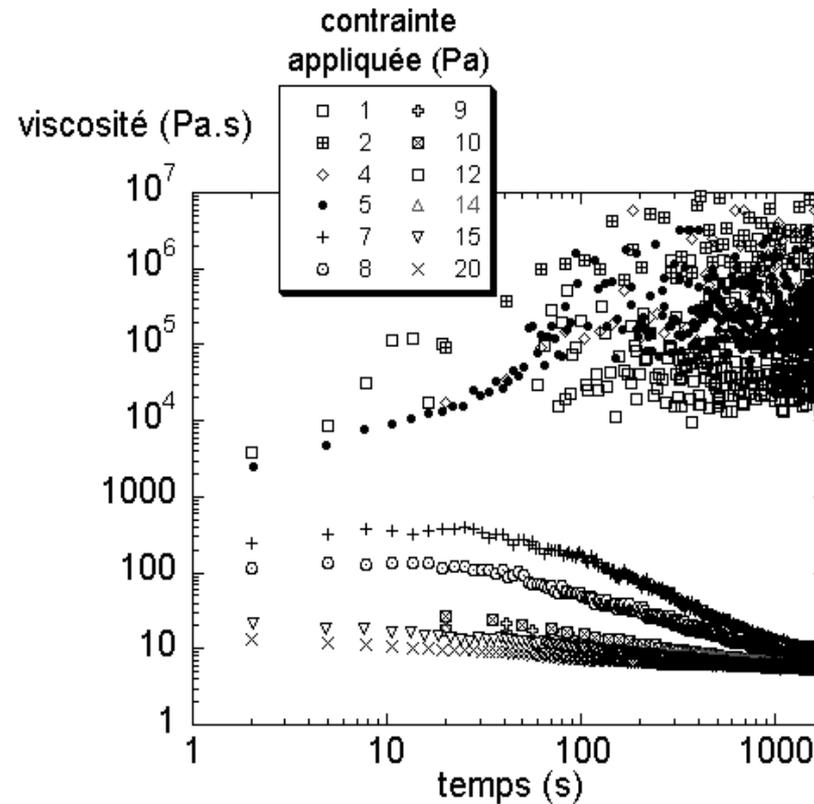


Fig. 2. Flow curves of chocolate samples with increasing fat content (legend: % of added fat) (average of three measurements). The Casson fit to the data is also included.

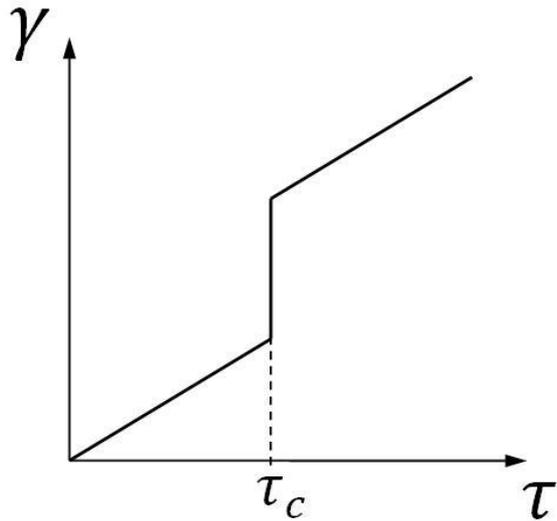
Mesure du seuil d'écoulement



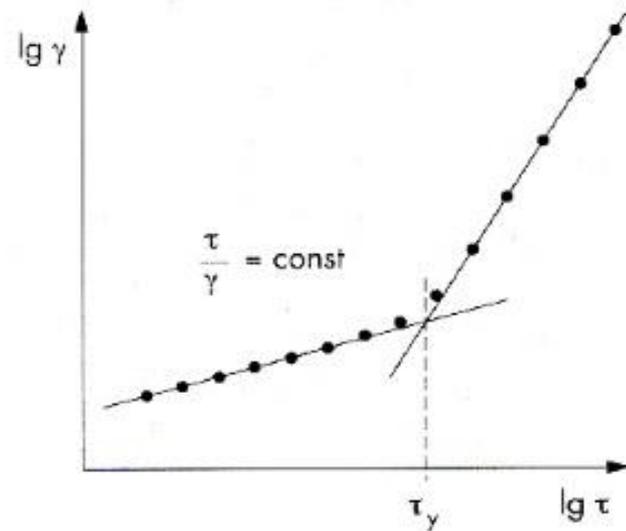
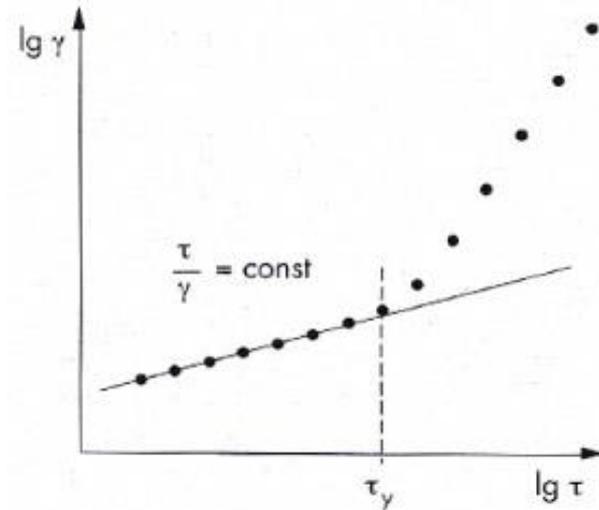
Suspension fortement concentrée de billes de polystyrène

Il y a « bifurcation de viscosité ».

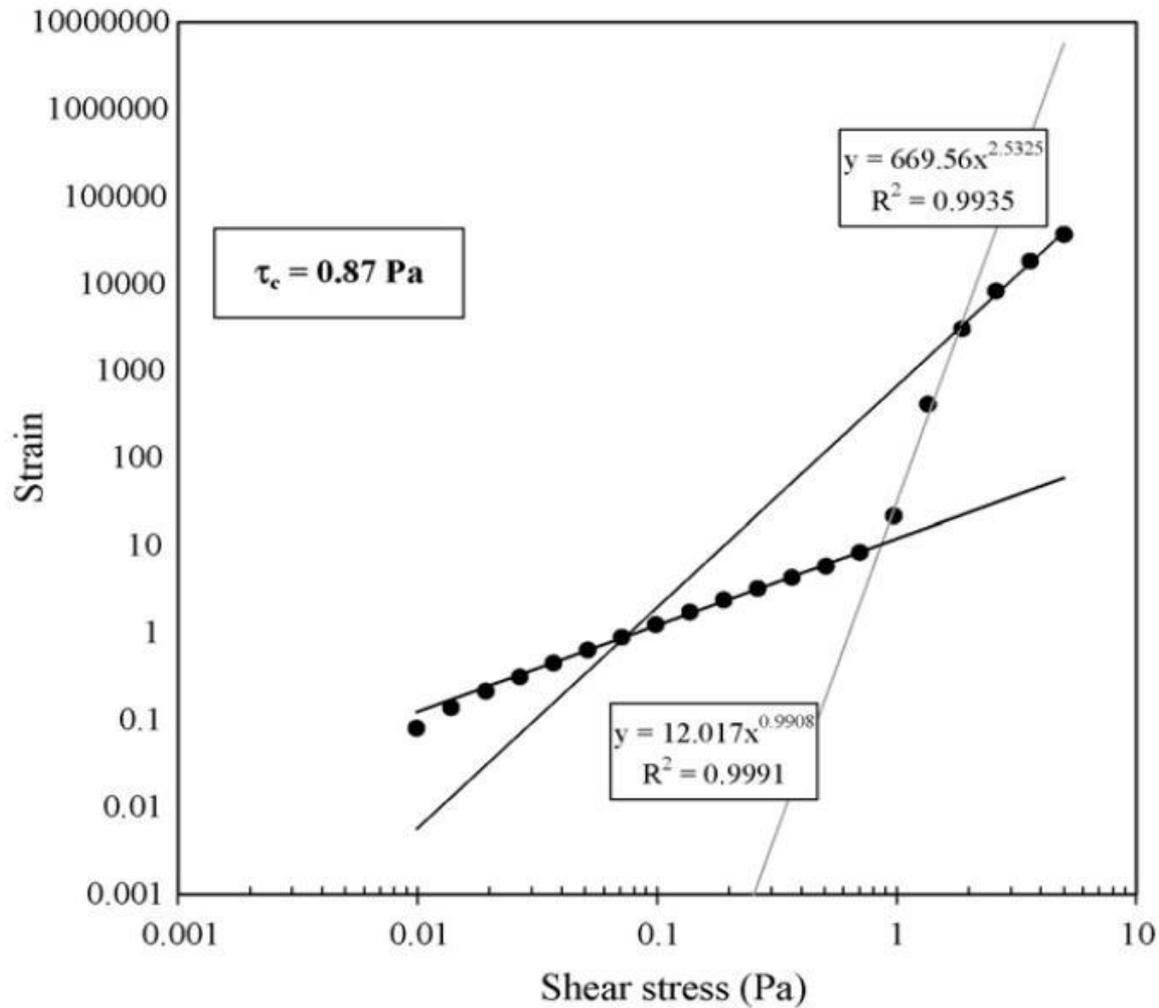
Mesure du seuil d'écoulement



Courbe $\gamma = f(\tau)$ idéale pour un fluide à seuil



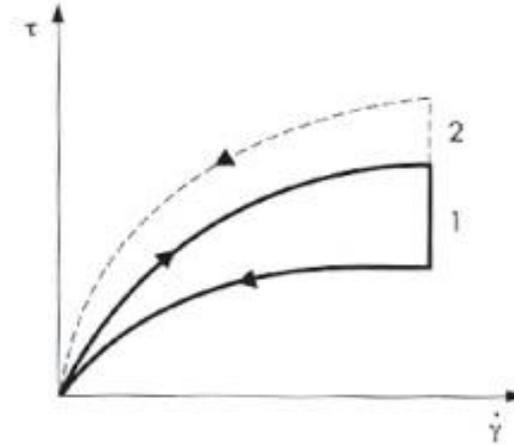
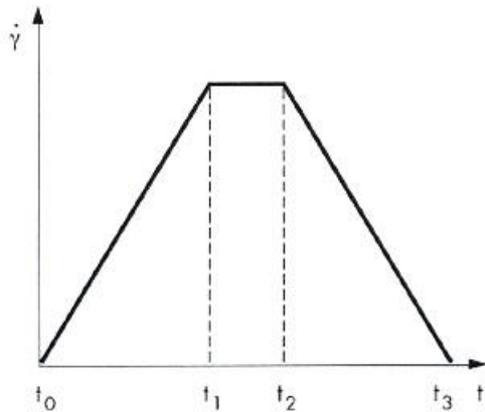
Mesure du seuil d'écoulement



Mélange xanthane/gomme de caroube en solution

Fluides thixotropes et anti-thixotrope
(thixotropic and anti-thixotropic fluids)

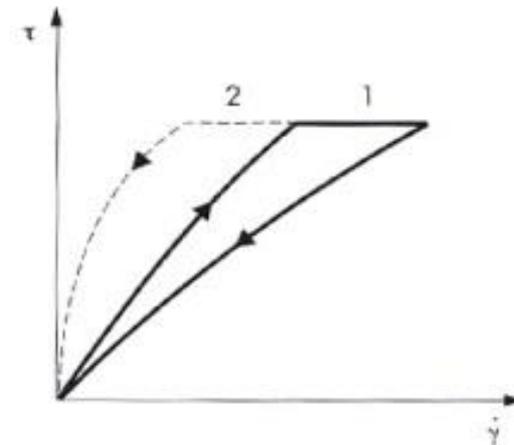
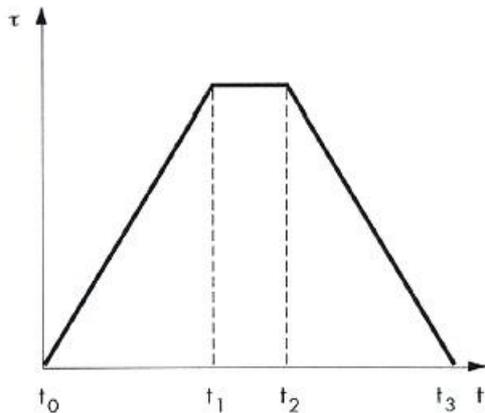
Mesure de la thixotropie



1 : thixotropie
2 : anti-thixotropie

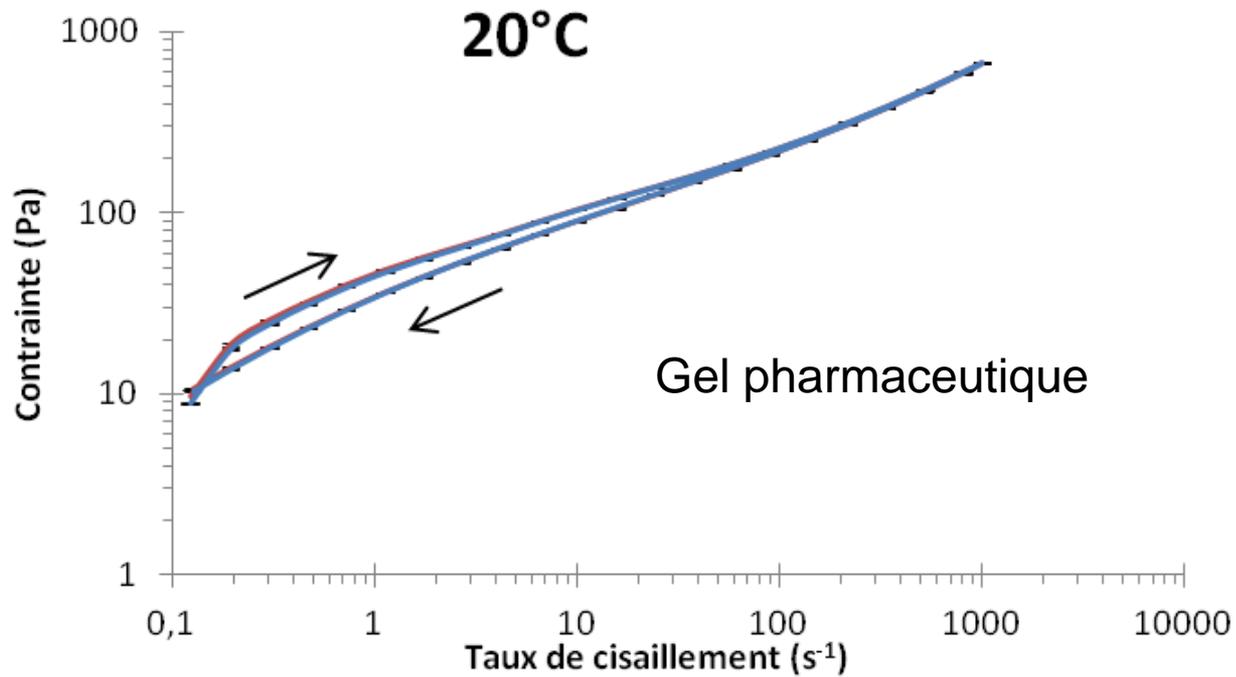
Balayage continu de $\dot{\gamma}$ ou de τ

On observe une boucle d'hystérésis en traçant les courbes aller et retour de $\tau = f(\dot{\gamma})$. Plus le matériau est thixotrope, plus l'aire entre les deux courbes est grande.



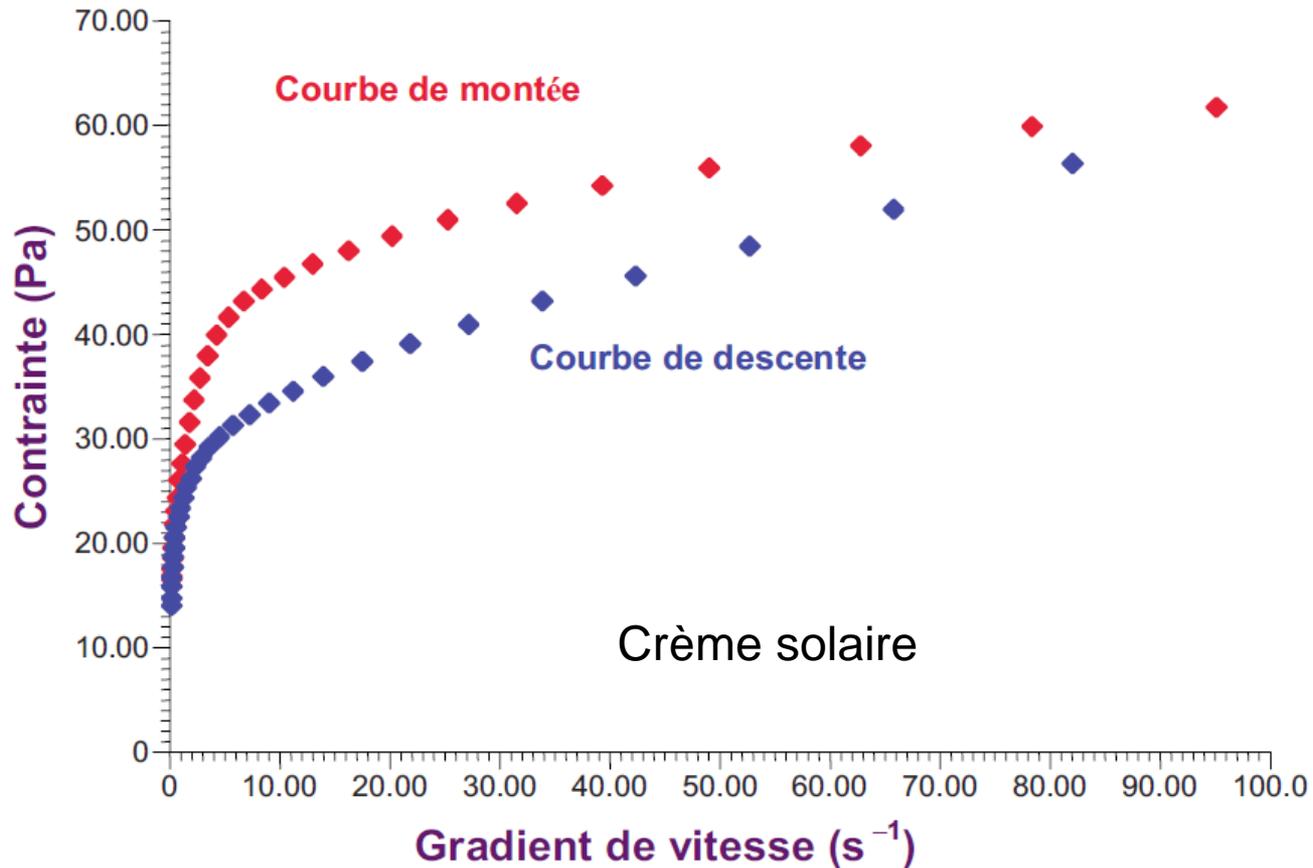
1 : thixotropie
2 : anti-thixotropie

Mesure de la thixotropie



Le gel est faiblement thixotrope à bas taux de cisaillement.

Mesure de la thixotropie

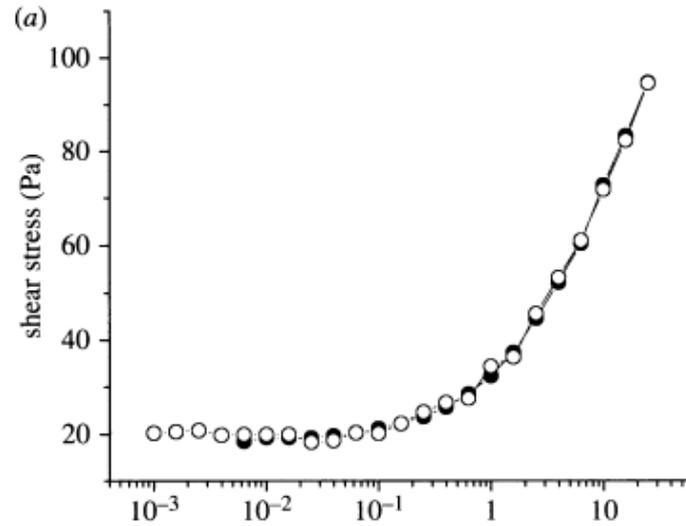


La crème est thixotrope en dessous de 100 s⁻¹ et reprend sa structure initiale rapidement.

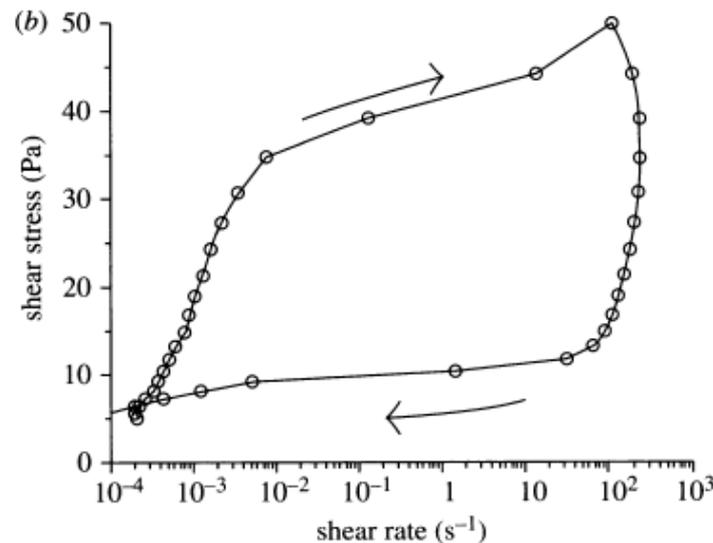
Mesure de la thixotropie

Møller *et al.*, 2008

Rampes de contrainte



Solution de carbopol à 0,1 %

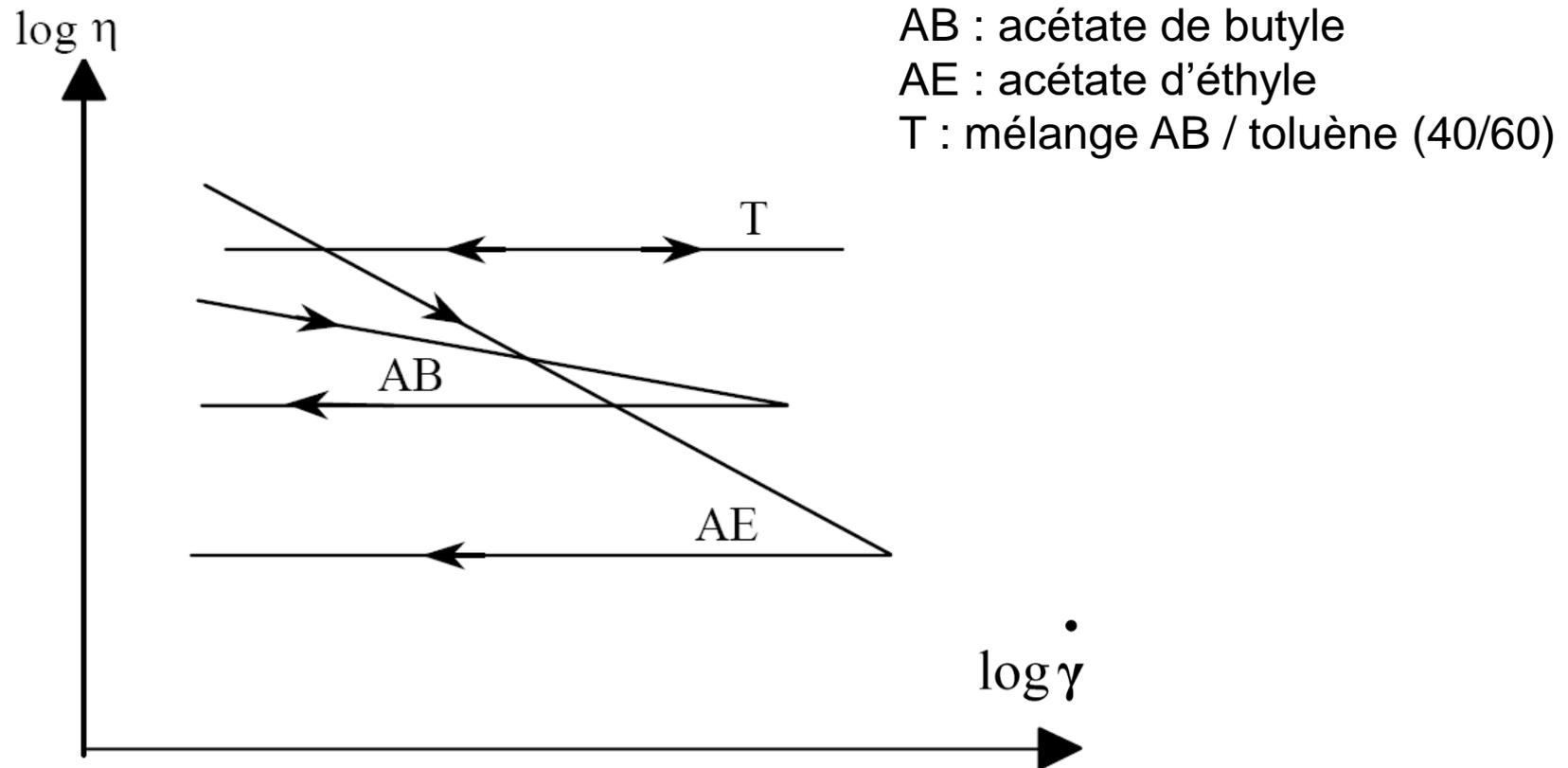


Solution de bentonite à 10 %

Figure 1. (a) The behaviour of 0.1% carbopol under increasing and decreasing shear stresses clearly shows that this material is non-thixotropic (filled circle, up; open circle, down). (b) Thixotropy of a 10% bentonite solution under an increasing and then decreasing stress ramp.

Mesure de la thixotropie

Rhéogrammes types d'un rouge à lèvres pour différents solvants organiques

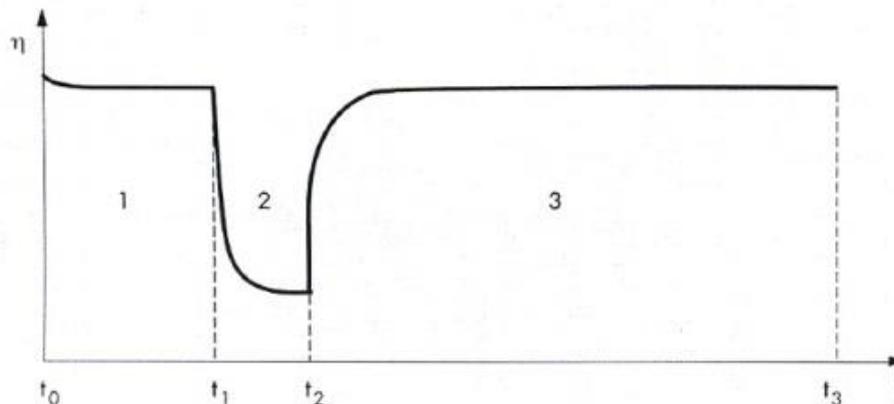
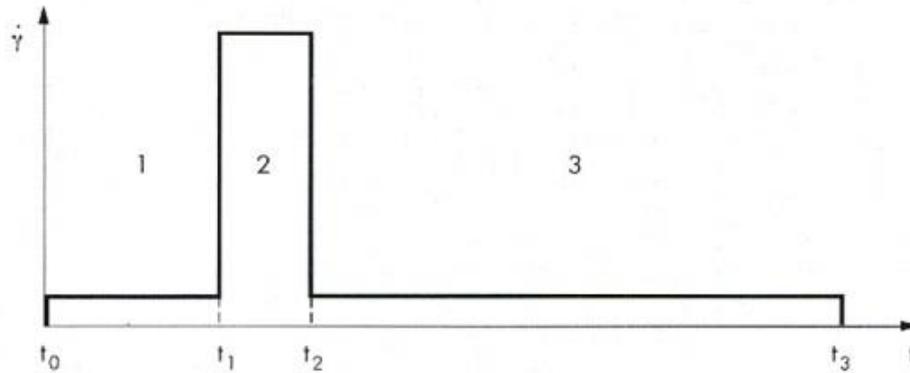


Mesure de la thixotropie

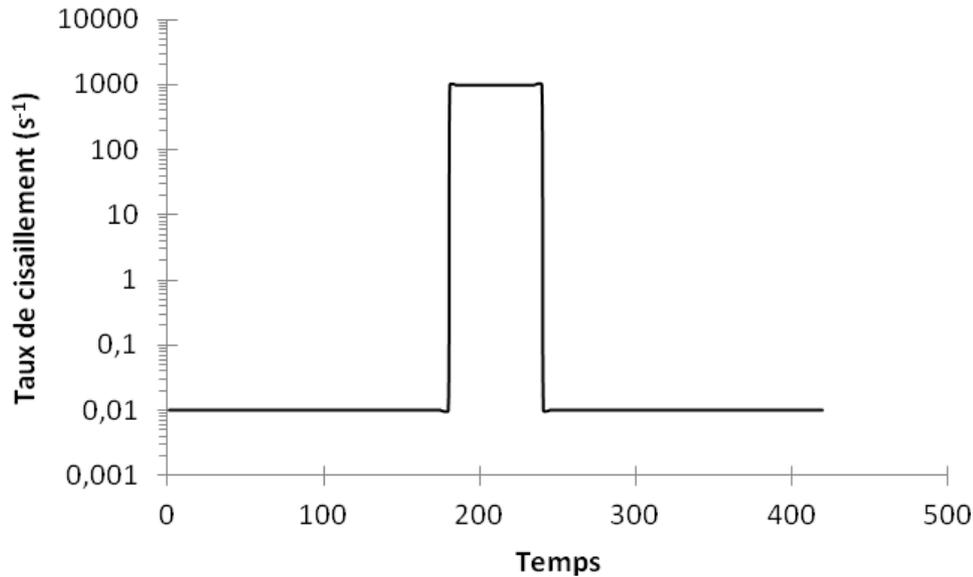
Etapes :

- 1) Rotation à faible taux de cisaillement
- 2) Rotation à fort taux de cisaillement
- 3) Rotation à faible taux de cisaillement

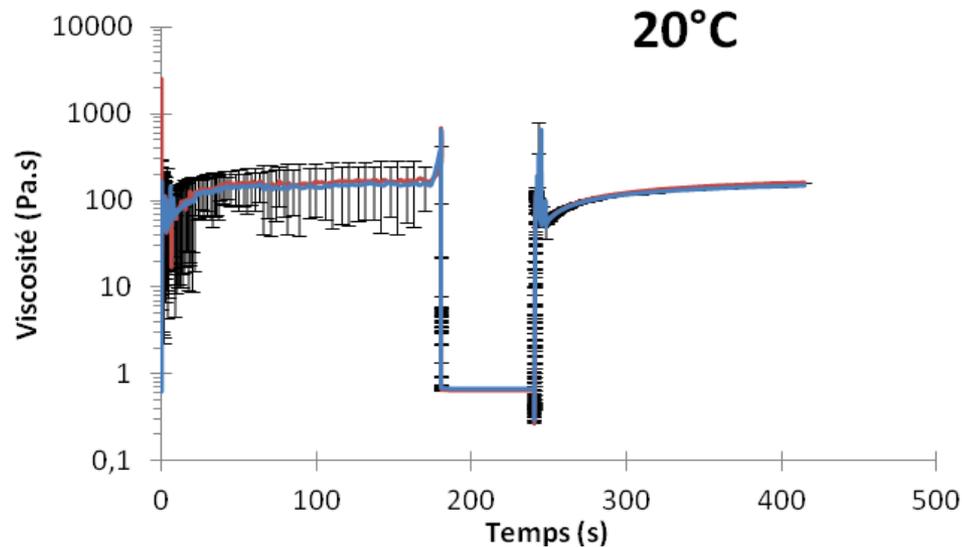
On mesure alors la restructuration pendant l'étape 3 (temps nécessaire pour obtenir la même viscosité qu'à l'étape 1).



Mesure de la thixotropie



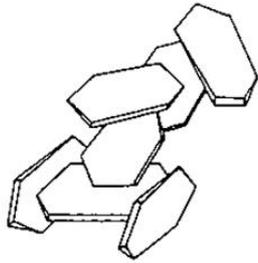
Créneau
de taux de cisaillement



Mesure de la reprise de
thixotropie (restructuration)
d'un gel pharmaceutique

L'échantillon est faiblement
thixotrope.

Un effet thixotropique : l'avalanche de l'argile



Structure de l'argile :
empilement de plaquettes (environ
quelques nm d'épaisseur et une
centaine de nm de diamètre) en
« château de cartes »

Argile sur un plan incliné (l'inclinaison ne change pas
au cours du temps)



L'argile ne s'écoule que lorsque le plan est
suffisamment incliné (fluide à seuil). Il s'écoule
d'abord lentement, puis brusquement au fur et à
mesure de la destruction de la structure de l'argile :
effet d'avalanche.