

LA RHEOLOGIE

Définition

La Rhéologie est la science de l'écoulement et de la déformation de la matière.

Le rapport entre l'effort et la déformation est une propriété du matériau. Nous pouvons donc définir la rhéologie comme étant l'étude des relations contrainte-déformation. Ces relations fondamentales s'appellent les « équations constitutives»

Cette déformation est dépendante (souvent proportionnelle) à l'intensité de la contrainte appliquée.

Contrainte  **Vitesse de cisaillement**

Exemples

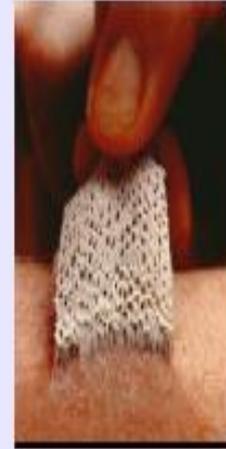
Mélange

Le mélange est une combinaison des déformations de cisaillement et d'extension



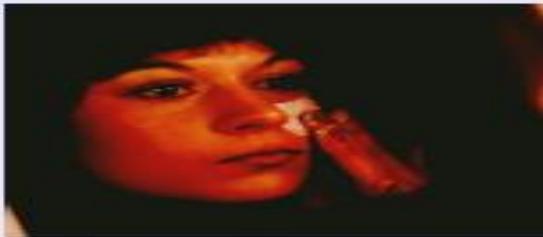
Bande adhésive médicale

L'arrachement, l'épluchage, le décollement, etc.. peut être ajusté par la rhéologie



Crème Cosmétique

L'étalement, la texture, etc... sont des critères d'exécution déterminés par la rhéologie



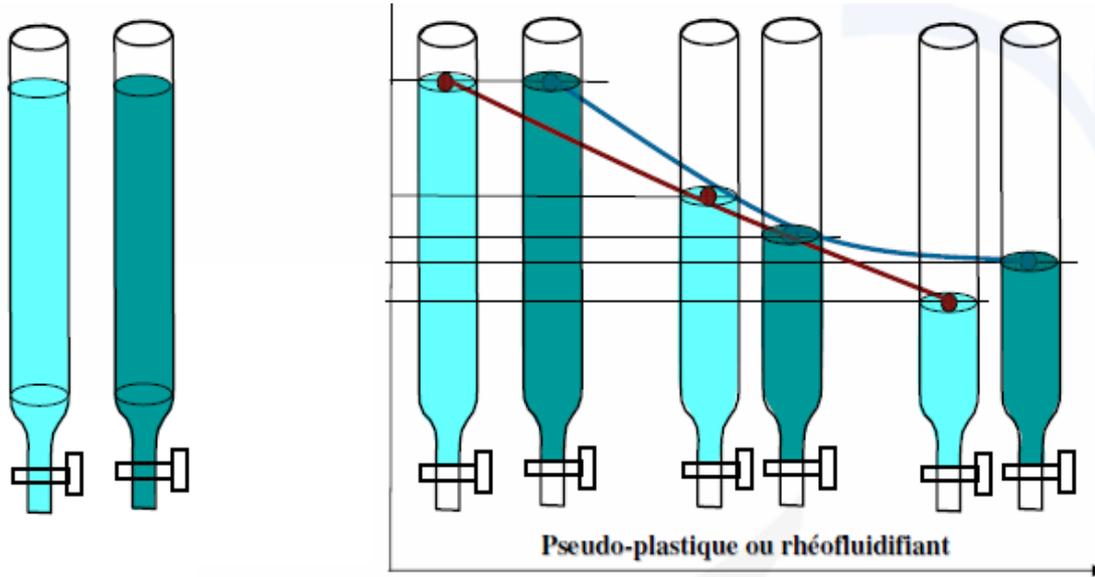
Pneu

La plupart des critères de performance sont régis par la rhéologie



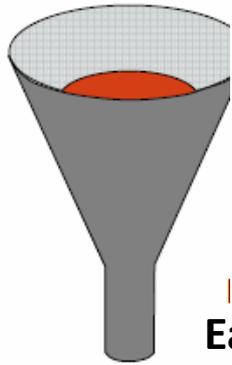
pomper, vaporiser, étaler, extruder, injecter, enduire, mélanger... alors la rhéologie est importante

Phénomènes d'écoulement



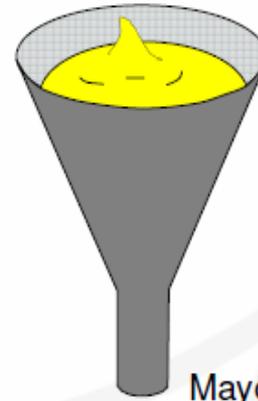
Effet de la gravité :

- Dans un premier temps le fluide vert foncé coule plus rapidement, à cause de sa plus faible viscosité, mais après quelques instants l'écoulement ralentit fortement et finalement le fluide vert clair atteint le bas de la colonne plus rapidement.
- Pour le fluide vert foncé, la viscosité n'est pas constante pendant tout le temps du test. La viscosité est ici fonction de la pression (poids du fluide dans la colonne). Sa viscosité baisse lorsque la pression diminue. Ce comportement se nomme : pseudo plastique ou rhéofluidifiant.



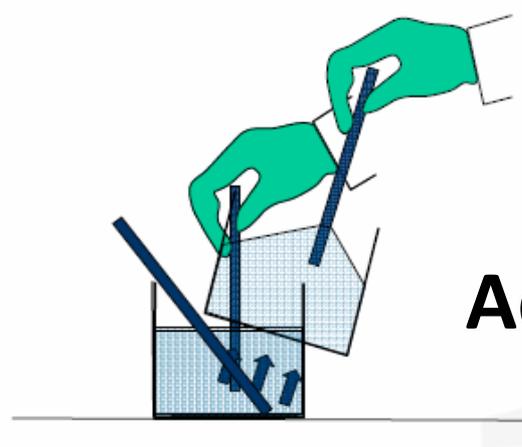
Eau

Fluide Newtonien



Mayonnaise

Ecoulement non linéaire

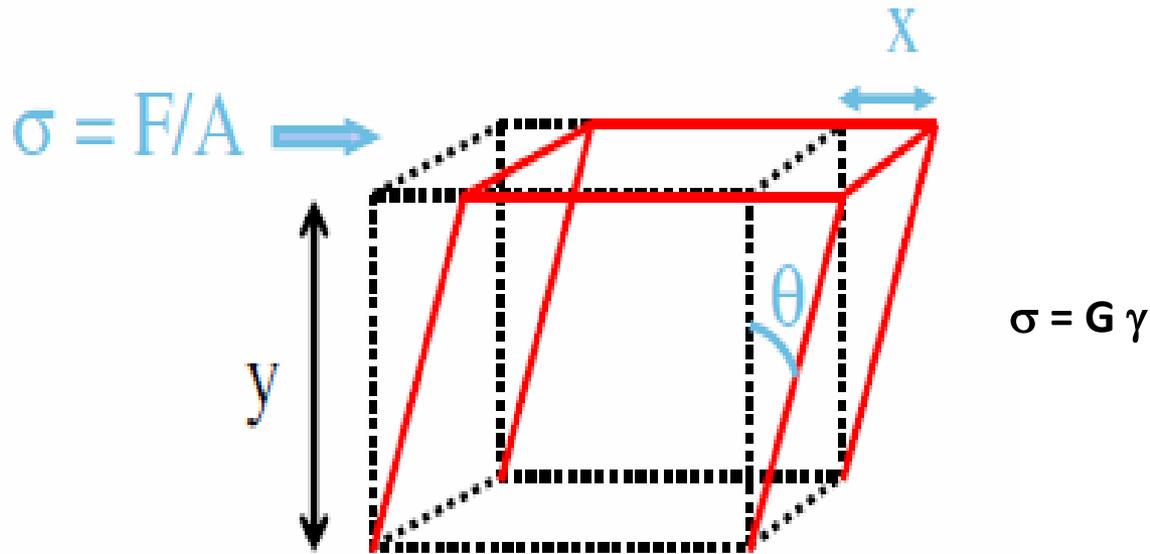


Adhésion

Paramètres rhéologiques

Vitesse de cisaillement	Vitesse de déplacement
Déformation	Déplacement
Contrainte de cisaillement	Force

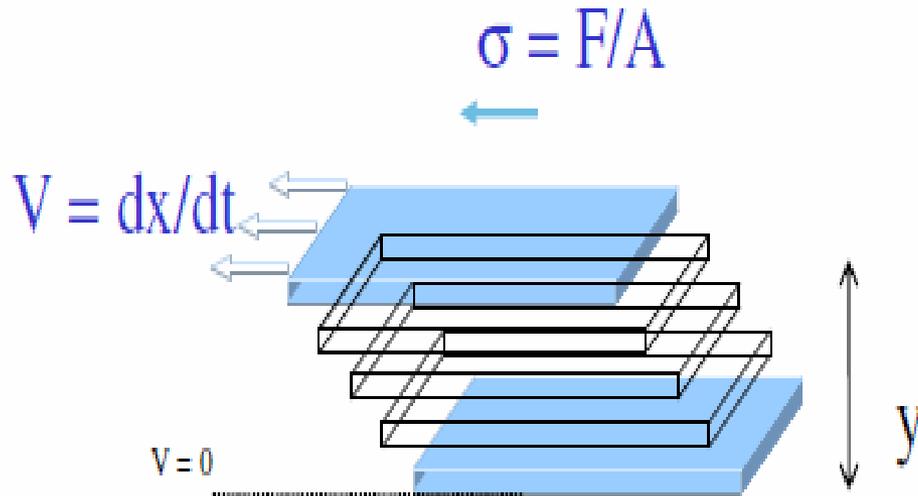
Matériau 100% élastique



La Loi de Hooke décrit un comportement mécanique idéal utilisant une eq. constitutive dans laquelle la contrainte et la déformation sont reliées par une constante proportionnelle (module de cisaillement G).

- si l'on double la contrainte, on double la déformation.
- à contrainte nulle, l'échantillon retrouve sa forme initiale.

Matériau 100% visqueux



Vitesse de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = d\gamma/dt = \frac{1}{y} \frac{dx(t)}{dt}$$

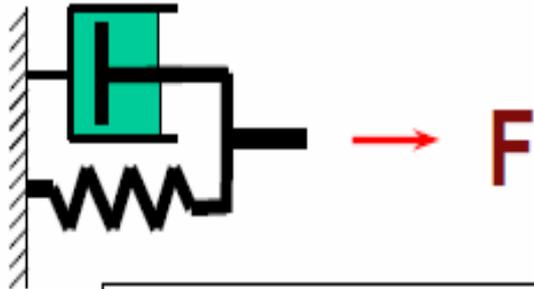
La loi de Newton : $\sigma = \eta \dot{\gamma}$

La Loi de Newton décrit un comportement idéal à l'écoulement utilisant une eq. constitutive dans laquelle la contrainte et le taux de cisaillement sont reliés par la constante proportionnelle (la viscosité η).

- si l'on double la contrainte, on double le gradient de la vitesse de cisaillement par 2.

- à contrainte nulle, l'échantillon reste déformé

Matériau visco – élastique



Modèle de Kelvin (Voigt)



Modèle de Maxwell

Matériaux
Visco-élastiques



La Force dépend à la fois de la déformation et de la vitesse de déformation

Principe de mesure

Un rhéomètre applique une contrainte ou une vitesse à un échantillon, par l'intermédiaire d'une géométrie.

Il a, ensuite, la capacité de suivre son écoulement :

- **soit en mesurant un déplacement**
→ **Vitesse de cisaillement.**
- **soit en mesurant un couple**
→ **Contrainte**



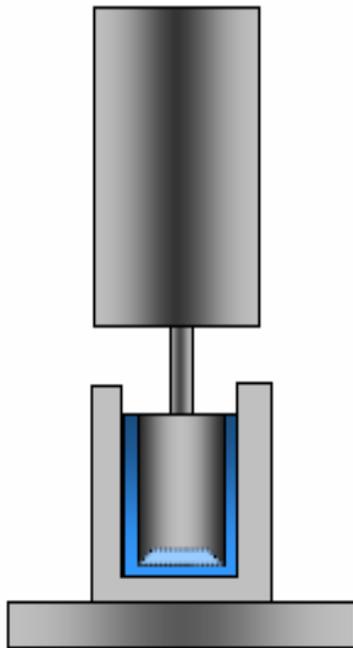
Types de rhéomètre :

Un rhéomètre à déformation imposée : permet d'appliquer une déformation, ou une vitesse de déformation, et de mesurer la contrainte résultante transmise par l'échantillon.

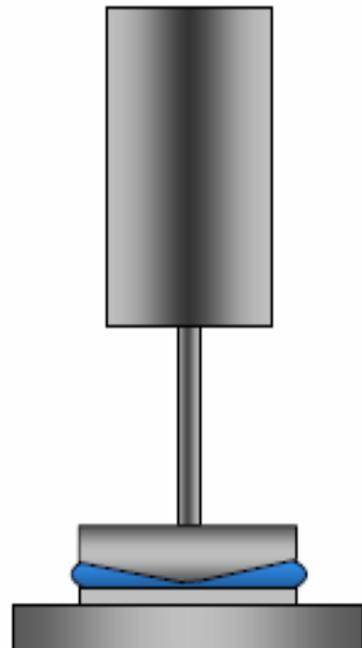
Un rhéomètre à contrainte imposée : permet sur un échantillon d'appliquer et de contrôler une contrainte (cisaillement simple) et de mesurer la déformation résultante.

Géométrie de mesure

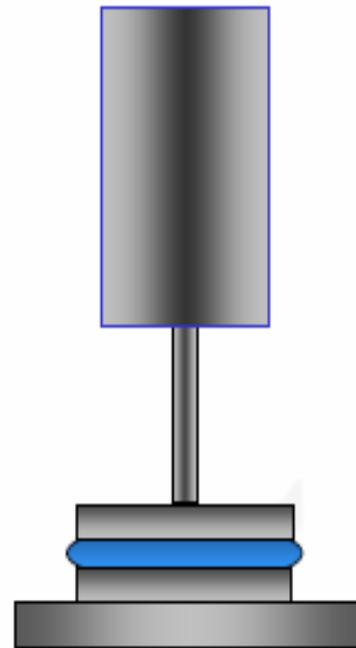
Cylindres
Concentriques



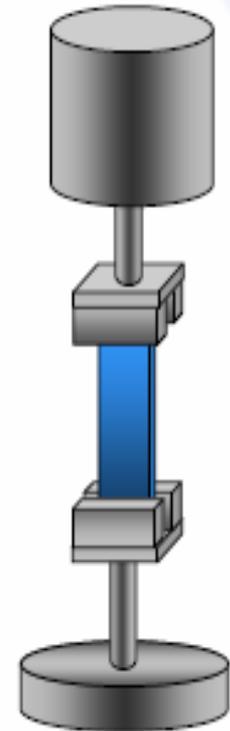
Cone / Plan



Plan Parallèle



Torsion
Rectangulaire



De très fluide



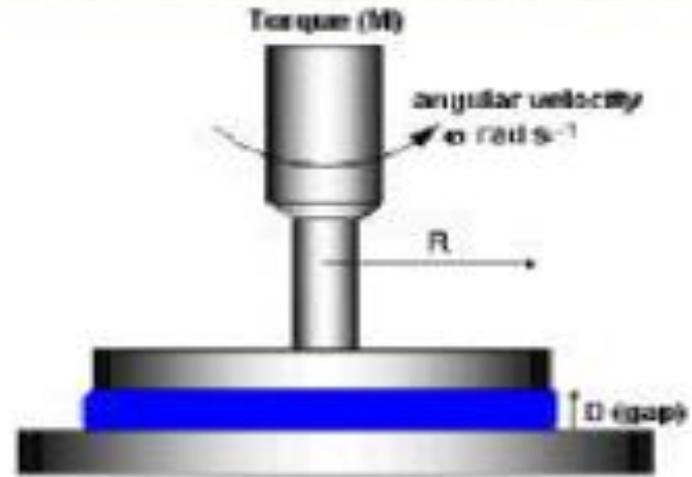
à



très solide

Plans parallèles

Géométrie Plan-Plan



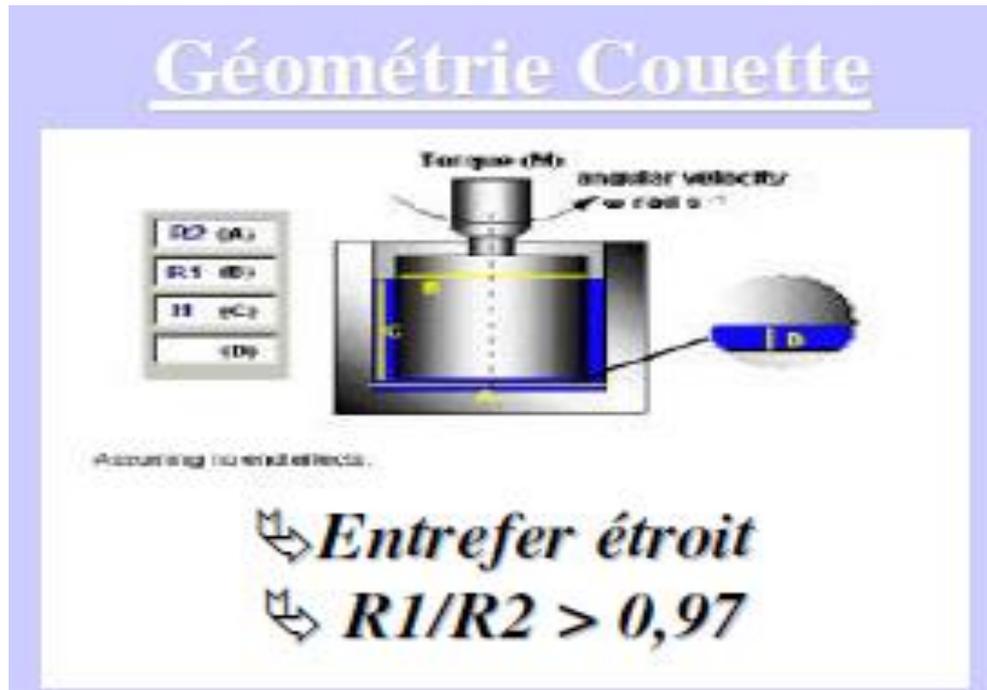
- épaisseur variable d'échantillon (0.5 - 2mm)
- limites de taux de cisaillement réglables en changeant l'entrefer ou le diamètre du plan
- préparation facile d'échantillon surtout pour haute viscosité
- Utilisé pour des viscosités $> 10\text{mPas}$
- Les problèmes de glissement peuvent être surmontés en utilisant les plats striés/sablés

Cône - plan



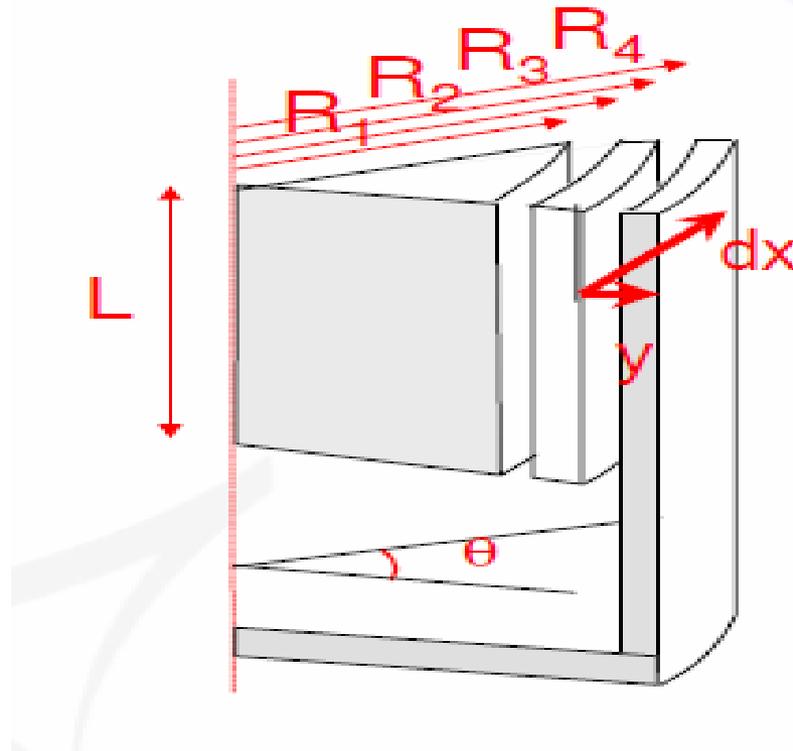
- Cisaillement, taux de cisaillement et contrainte homogènes dans l'entrefer
- Viscosité $> 10\text{mPas}$
- Cependant il est non approprié pour les dispersions avec de grosses particules (aussi grandes que l'entrefer par exemple).

Géométrie Couette



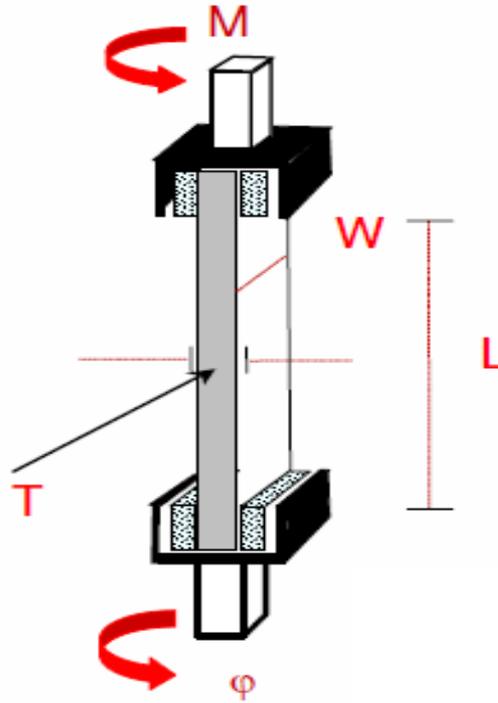
A utilisé pour les fluides de basse viscosité
(< 10 mPas)

Le Double entrefer



pour des viscosité très basses du type de l'eau (<1mPas)

Torsion rectangulaire



Echantillons avec module élevé

Géométries	Applications	Avantages	Inconvénients
Cône/plan	fluides, fondus viscosité > 10mPas	viscosité vraies	rampe de température difficile
Plan Parallèle	fluides, fondus viscosité > 10mPas	manipulation facile, rampe de température	les échantillons non newtoniens doivent être corrigés
Couette	échantillons de basse viscosité < 10 mPas	vitesse de cisaillement élevé	grand volume d'échantillon
Double Entrefer	échantillons de très faible viscosité < 1mPas	vitesse de cisaillement élevé	nettoyage difficile

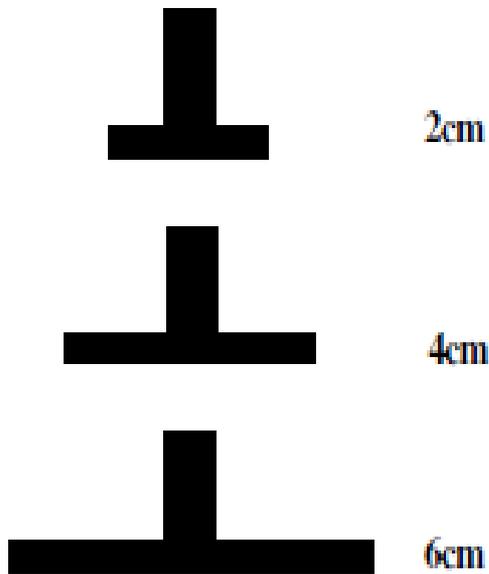
Choix des diamètres

- Pour les faibles viscosités, utiliser une géométrie de type 6 cm
- En viscosité moyenne, utiliser un diamètre de 4 cm
- En viscosité élevée, utiliser un diamètre de 2 cm
- Si l'échantillon est mobile dans son contenant, la viscosité est "basse", ex : une huile, une peinture, une sauce...
- Si l'échantillon bouge peu quand le contenant est remué, la viscosité est "moyenne", ex : un ketchup*
- Si l'échantillon est quasiment immobile, et qu'une ride peut être observée quelques secondes à la surface, la viscosité est "élevée", ex : les graisses, la mayonnaise...

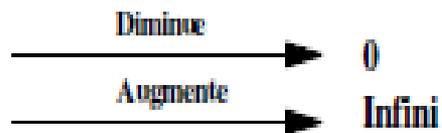
Cône ou Plan

- En règle générale, utiliser un cône à moins que des particules de grande taille soient présentes
- Avec un cône, l'entrefer doit être à la troncature de la géométrie.
- Avec un plan, la vitesse de cisaillement est calculée au bord de la géométrie, et n'est pas constante au travers de l'échantillon.
- Choisir un entrefer de dimension dix fois supérieure au diamètre des particules les plus grandes

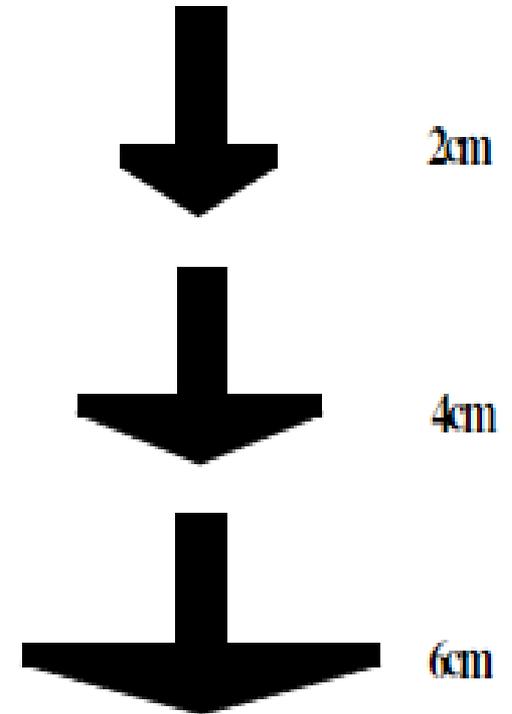
Contrainte de Cisaillement



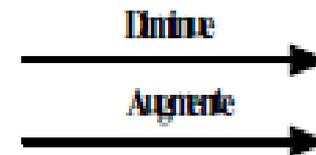
Entrefer
Vitesse de
Cisaillement



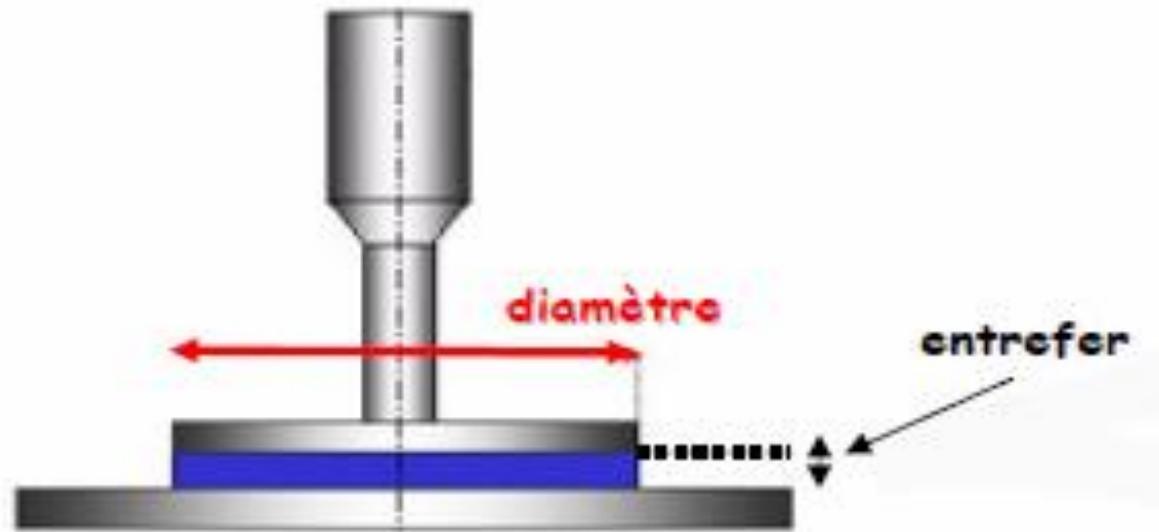
Contrainte de Cisaillement



Angle
Vitesse de
Cisaillement



Mise en place sur un Plan/plan :



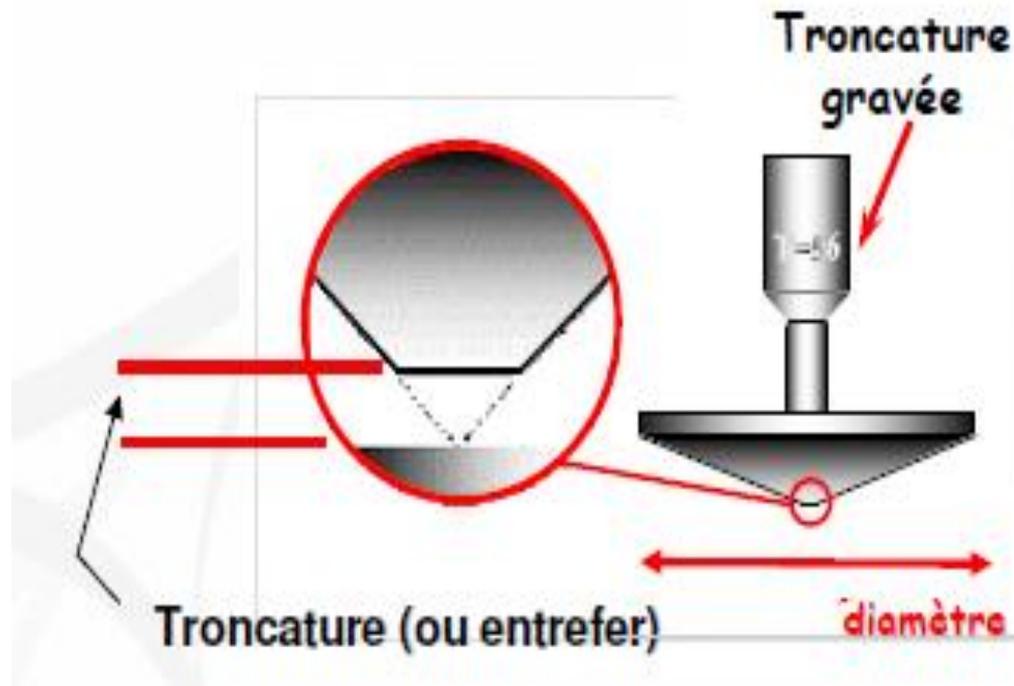
L'entrefer peut être aussi grand que :

$$(\text{Diamètre du plan}) / 10.$$

– Soit plan/plan de 40mm, entrefer max 4 mm

- Les plan/plan sont des géométries adéquates pour les dispersions et les gels car il est possible d'utiliser le plus large entrefer

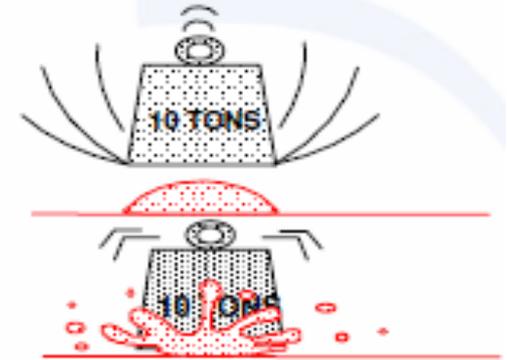
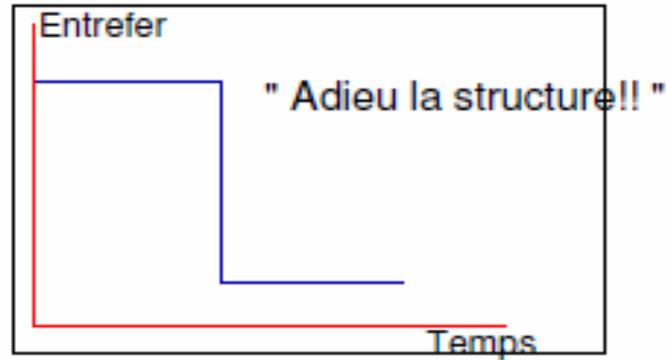
Mise en place sur un Cône/plan :



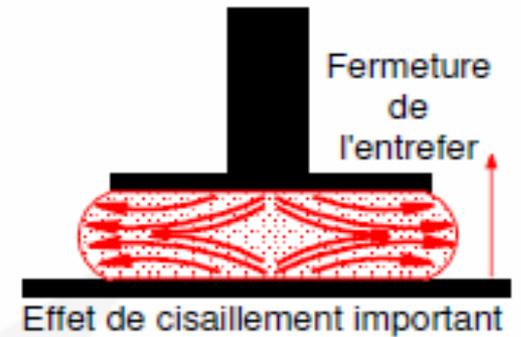
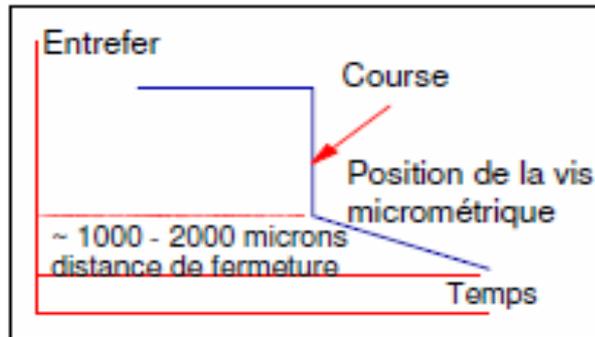
L'entrefer est fixe pour un cône, c'est la taille de la troncature

- Difficile de mettre en place les échantillons rigides
- Meilleurs résultats pour de vraie vitesse de cisaillement et de contrainte en écoulement

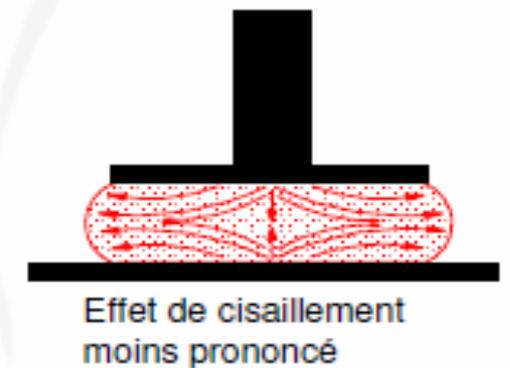
Fermeture standard de l'entrefer



Fermeture linéaire de l'entrefer



Fermeture exponentielle de l'entrefer



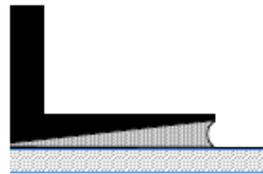


En mettre plus que nécessaire

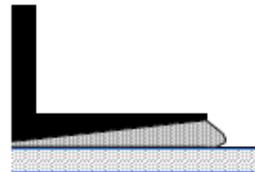


Araser l'excédant

Effets de bord



Sous chargement



Sur chargement



Chargement correct

La viscosité :

une résistance à l'écoulement, synonyme de frictions internes « un manque de glissement » [Pascal.seconde (Pa.s)]

La viscosité est affectée par :

- Taux de cisaillement**
- Temps de sollicitation**
- Température**
- Pression**

- La Viscosité est une courbe pas un point**

Fluides Non-Newtoniens :

Rhéofluidifiants :

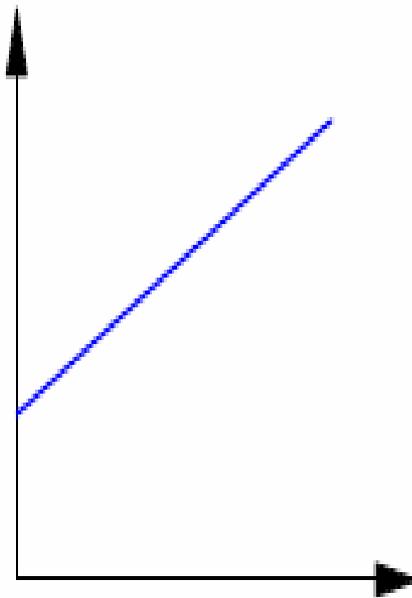
Une diminution de la viscosité lorsque le taux de cisaillement augmente. Appelés également fluides Pseudoplastiques.

Rhéopaisissants :

Une augmentation de la viscosité avec le taux de cisaillement. Appelés également fluides Dilatants.

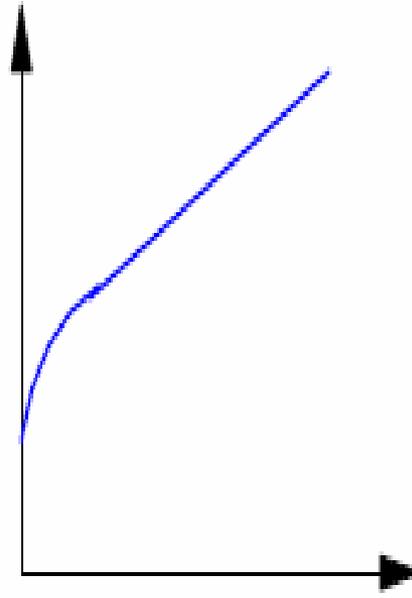
Modèles de la rhéologie :

Model	Equation
Newtonian	$\sigma = \eta_0 \dot{\gamma}$
Bingham	$\sigma = \sigma_0 + \eta_0 \dot{\gamma}$
Casson	$\sigma^{1/2} = \sigma_0^{1/2} + \eta_0^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2}$
Power Law	$\sigma = K \dot{\gamma}^c$
Herschel Bulkley	$\sigma = \sigma_0 + K \dot{\gamma}^c$
Sisko	$\eta = \eta_\infty + K \dot{\gamma}^{n-1}$
Williamson	$\eta = \eta_0 / (1 + (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_0)^c)$
Cross	$(\eta - \eta_\infty) / (\eta_0 - \eta_\infty) = 1 / (1 + (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_0)^d)$
Ellis	$(\eta - \eta_\infty) / (\eta_0 - \eta_\infty) = 1 / (1 + (\sigma / \sigma_0)^d)$
Carreau	$(\eta - \eta_\infty) / (\eta_0 - \eta_\infty) = 1 / (1 + (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_0)^2)^{d/2}$



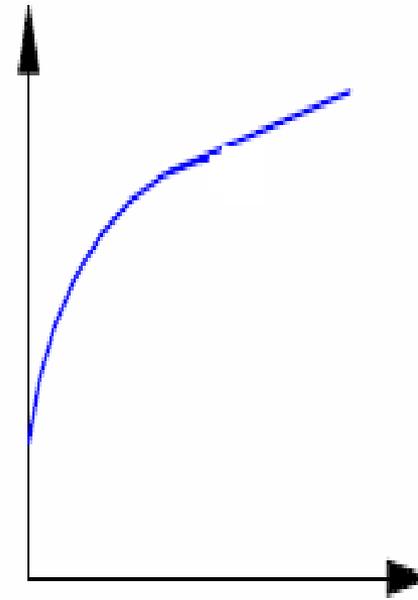
Bingham

$$\tau = \tau_B + \eta_B \cdot \dot{\gamma}$$



Casson

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \eta_c \cdot \sqrt{\dot{\gamma}}$$



Herschel - Bulkley

$$\tau = \tau_h + m \cdot \dot{\gamma}^p$$

Cas d'un fluide thixotrope

Caractère rheofluidifiant, mais avec une diminution de la viscosité lors de la montée.

- Le cisaillement induit une déstructuration qui se manifeste de façon différée ; si bien que la courbe descente est située en dessous de la courbe montée
- On ne parle de thixotropie que si le liquide considéré ne régénère sa structure initiale qu'après un temps de repos suffisant. Cette restructuration (que l'on appelle de façon abusive « reprise de thixotropie ») ne se produit pas instantanément mais, la encore, de façon différée dans le temps. En jouant sur ces temps de restructuration, les liquides thixotropes permettent de nombreuses applications (peintures, vernis à ongles, ...)

