

LE TEMPS, ARBITRE DU COMPORTEMENT SOLIDE OU LIQUIDE D'UN MATÉRIAU

INTRODUCTION :

On a tendance à vouloir classer les choses. Communément, un matériau est liquide ou solide, et on a du mal à imaginer qu'il puisse être entre les deux. Pourtant, le dentifrice s'écoule quand on appuie sur le tube (plutôt liquide?), mais garde sa forme de petit boudin sur la brosse (plutôt solide?). Mais laissé dans cet état pendant une heure, il finit par couler entre les poils de la brosse. L'expérience prouve donc que, toute chose égale par ailleurs, un matériau peut exhiber un comportement solide ou liquide. Comment le temps intervient-il dans ce comportement? Après avoir mis en évidence un rôle prépondérant du temps, nous verrons comment on peut mesurer en quelque sorte la viscoélasticité. Enfin, nous nous attacherons à comprendre l'origine moléculaire du phénomène.

PLAN :

I. Observations

A. PDMS, intervention du temps?

- i. Observation de phénomènes qui interrogent sur une classification habituelle solide/liquide
- ii. Un matériau qui rebondit mais qui s'écoule, qui se brise ou qui coule
- iii. Comportement solide aux temps courts, liquide si on lui laisse le temps



B. Critère qualitatif, le nombre de Déborah

- i. On remarque que le temps de sollicitation/observation intervient
- ii. Nombre de Déborah : un rapport caractéristique mais purement qualitatif et expérimental de deux temps : $De = \frac{\lambda}{T}$; λ : temps de relaxation
 T : temps de sollicitation
- iii. Comportement solide : soit parce que temps que met le matériau à réagir est trop long, soit parce que la durée d'observation est trop courte
- iv. $De = \infty$: solide parfait
 $De = 0$: liquide parfait

II. Viscoélasticité et rhéométrie

A. Grandeurs en rhéologies, solide, liquide

- i. Rhéologie : branche de la mécanique qui étudie le comportement des matériaux liés aux contraintes et aux déformations
- ii. Une contrainte $\tau = \frac{F}{S}$; $[\tau] = Pa$
- iii. Déformation γ ; $[\gamma] = \emptyset$ //allongement du ressort
- iv. Vitesse de déformation ou de cisaillement $\dot{\gamma}$; $[\dot{\gamma}] = s^{-1}$
- v. Elasticité
- vi. Loi de Hooke : $\tau = G \times \gamma \Leftrightarrow \gamma = J \times \tau$
- vii. Viscosité : traduit la plus ou moins grande facilité avec laquelle le fluide peut s'écouler

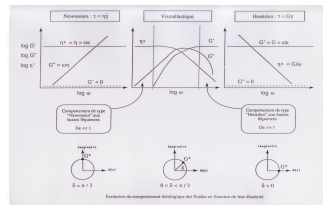
viii. Loi de Newton : $\tau = \eta \times \dot{\gamma}$

B. Mesures dynamiques en viscoélasticité

- i. Intérêt de la mesure : rapide, non destructive, permet d'envisager la réalité car par linéarité des expressions, on peut faire la transformée de Fourier des fonctions de contrainte
- ii. Ce qu'on en déduit d'un matériau, *composantes* liquide et solide

C. Interprétation des courbes

- i. Courbes de balayage en amplitude à une fréquence donnée
- ii. Courbe de balayage en fréquence à une amplitude donnée
- iii. Courbe pour un solide hookéen, pour un liquide newtonien, pour un liquide viscoélastique



III. Origines moléculaires du phénomène

A. Contact avec GEMICO

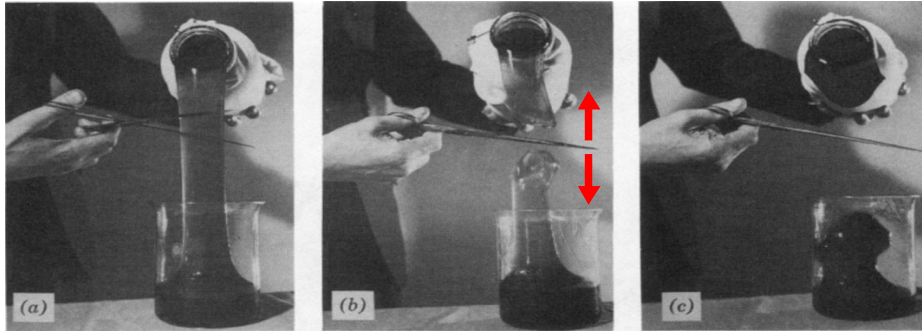
- i. La rhéologie : un domaine de la physique qu'on n'a pas étudié durant notre scolarité : nécessité d'avoir recours aux explications de professeurs spécialisés. Prise de contact avec C.Prost
- ii. Ancien chercheur à l'ENSIC, C.Prost m'a mis en relation avec le Pr. P.Marchal du laboratoire GEMICO, qui m'a donné de plus amples informations sur le phénomène, notamment au niveau moléculaire, et m'a donné le matériel nécessaire à la réalisation d'expériences

B. Illustration de l'origine moléculaire sur des exemples

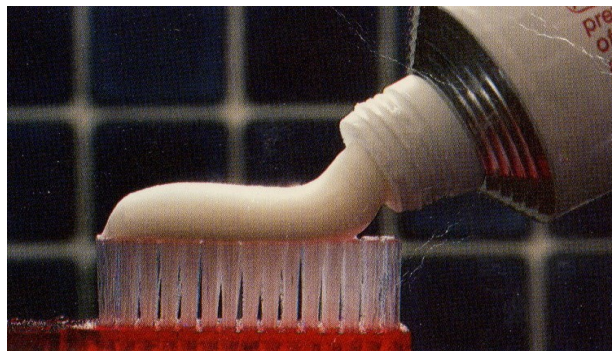
- i. La maïzena, les bétons coulants et autres pâtes granulaires. Elles peuvent s'écouler parce que les grains peuvent se déplacer les uns par rapport aux autres : dynamique propre du système. Sollicitées rapidement, ils y a création de réseau (arches pérennes). Analogie avec une foule,
- ii. Le syphon sans tube, le PDMS : enchevêtrement de polymères qui peuvent se déplacer lentement les uns par rapport aux autres (tel un noeud de vipère). Soumis à l'agitation brownienne, si on leur laisse le temps il y a désenchevêtrement, sinon il y a rupture des chaînes

CONCLUSION :

CES problèmes de viscoélasticité n'interrogent pas seulement les chercheurs. Il ont des applications (choix de matériel, mise en place de procédés,...) dans de nombreux domaines comme les cosmétiques, l'agroalimentaire, les peintures, et intéressent les industriels pour qui l'utilisation de matériaux viscoélastiques peuvent constituer une sorte de frein à la productivité.



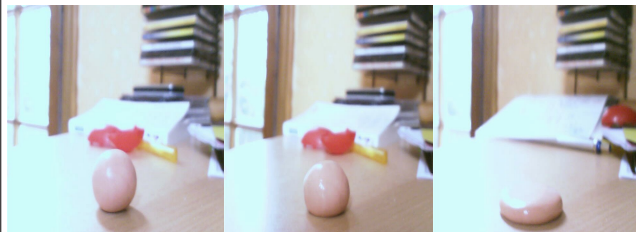
LE TEMPS, ARBITRE DU COMPORTEMENT SOLIDE OU LIQUIDE D'UN MATÉRIAU



Est-ce un SOLIDE ?

Est-ce un LIQUIDE ?

- Des idées préconçues sur ce qui est solide / liquide
- Des matériaux qui interrogent déjà à l'échelle d'observation humaine
 - Exemple : PDMS (polydiméthilsiloxane) ou « bouncing putty »

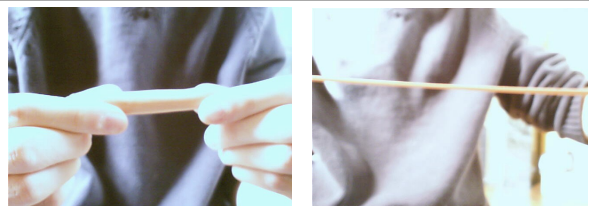


Le matériau rebondit ↔ Solide

Le matériau se répend ↔ Liquide

Δt court

Δt long



Le matériau casse ↔ Solide

Le matériau s'étire ↔ Liquide

► Le nombre de DEBORAH

$$De = \frac{\lambda}{T} \quad \begin{array}{l} \lambda : \text{temps de relaxation} \\ T : \text{temps de sollicitation} \end{array} ; \quad [De] = 1$$

- Permet une classification sommaire mais qualitative :
 - ✓ De très **grand** : plutôt **solide**
 - ✓ De très **petit** : plutôt **liquide**

► La viscoélasticité : un problème de rhéologie

→ Qu'est ce que la RHEOLOGIE ?

→ Qu'est ce qu'une contrainte ?

$$\tau = \frac{F}{S} \quad F : \text{force appliquée} \quad ; \quad [\tau] = Pa$$

S : Surface d'application

→ Qu'est-ce qu'une déformation ?

$$\gamma \quad ; \quad [\gamma] = 1$$

→ On a ainsi la vitesse de déformation, aussi appelée vitesse de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad ; \quad [\dot{\gamma}] = s^{-1}$$

► Solide élastique : Loi de Hooke

→ La loi de Hooke donne une modélisation élastique du solide :

La **loi de Hooke** traduit la légère élasticité du solide:

$\tau = G \times \gamma$; $[G] = Pa$, où G est le module d'Young, propre au solide considéré.

► Liquide visqueux : Loi de Newton

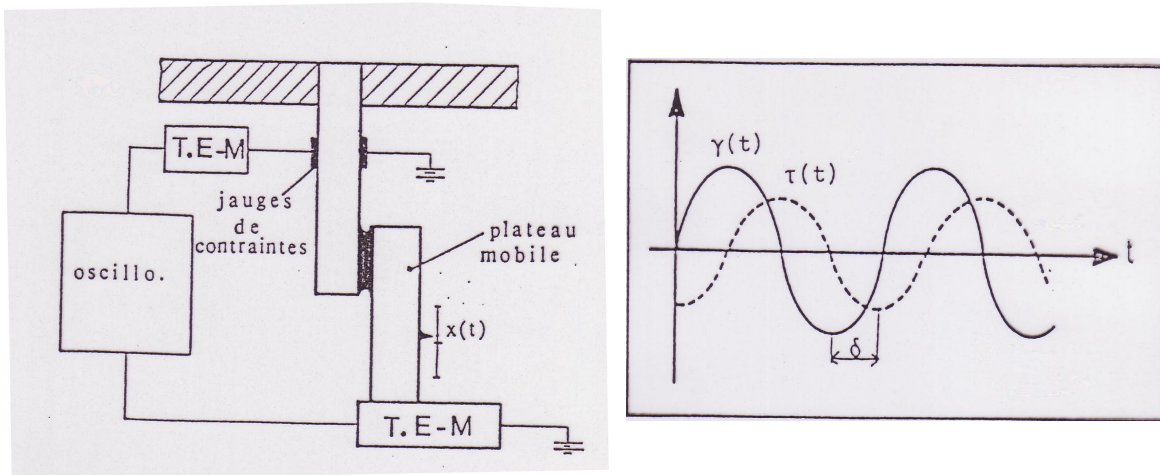
→ La viscosité d'un liquide traduit la plus ou moins grande facilité avec laquelle il s'écoule ou peut être pompé .

→ On définit alors la viscosité η par $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$; $[\eta] = Pa \cdot s$

Pour les liquides dits newtonniens : $\tau = \eta \times \dot{\gamma}$; $\eta = C^{ste}$ (**Loi de Newton**).

► Mesures en régime dynamique

→ On applique une déformation sinusoïdale $\gamma(t) = \gamma_0 \cos(\omega t)$, et on mesure la contrainte qu'il faut appliquer $\tau(t) = \tau_0 \cos(\omega t + \varphi)$.



→ On passe dans le domaine complexe :

$$\underline{\gamma}(t) = \gamma_0 e^{j\omega t}$$
$$\underline{\tau}(t) = \tau_0 e^{j(\omega t + \varphi)}$$

→ On introduit la grandeur

$$\underline{G} = \frac{\underline{\tau}}{\underline{\gamma}} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} e^{j\varphi} = G' + j \cdot G''$$

où

G' : module de conservation (composante élastique)

G'' : module de perte (composante visqueuse)

→ Pour le solide hookéen :

$$\tau = G \cdot \gamma \Rightarrow \underline{G} = G \Rightarrow \begin{matrix} G' = G \\ G'' = 0 \end{matrix} \text{ et } \varphi = 0$$

→ Pour le liquide newtonnien :

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} = j \cdot \eta \cdot \omega \cdot \gamma \Rightarrow \underline{G} = j \cdot \eta \cdot \omega \Rightarrow \begin{matrix} G' = 0 \\ G'' = \eta \cdot \omega \end{matrix} \text{ et } \varphi = \frac{\pi}{2}$$

→ Pour un matériau viscoélastique :

$$\begin{matrix} G' = f(\omega) \\ G'' = g(\omega) \end{matrix} \text{ et } \varphi \in [0, \frac{\pi}{2}]$$

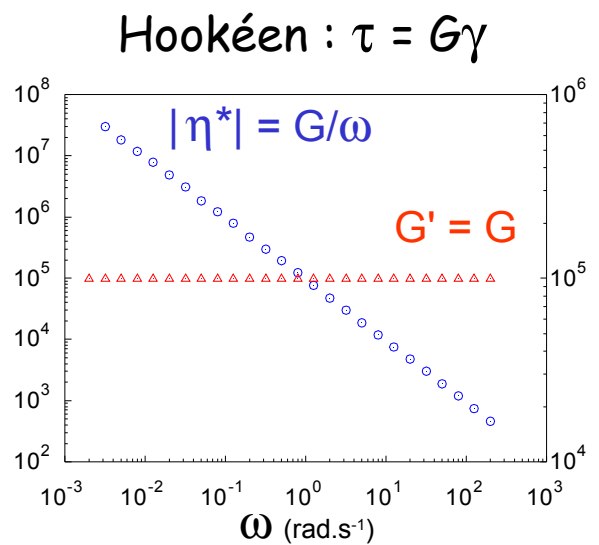
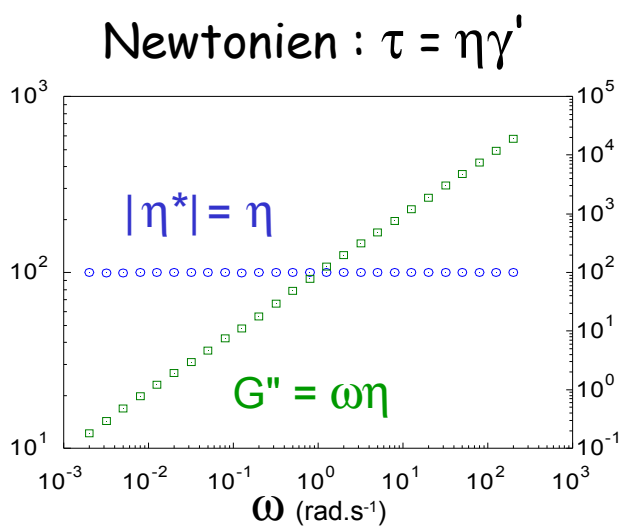
→ Intérêts de la mesure :

- Rapide
- Non destructive
- Permet de suivre l'évolution des propriétés du produit en fonction du temps de sollicitation, mais aussi de la température, de l'ajout d'additifs

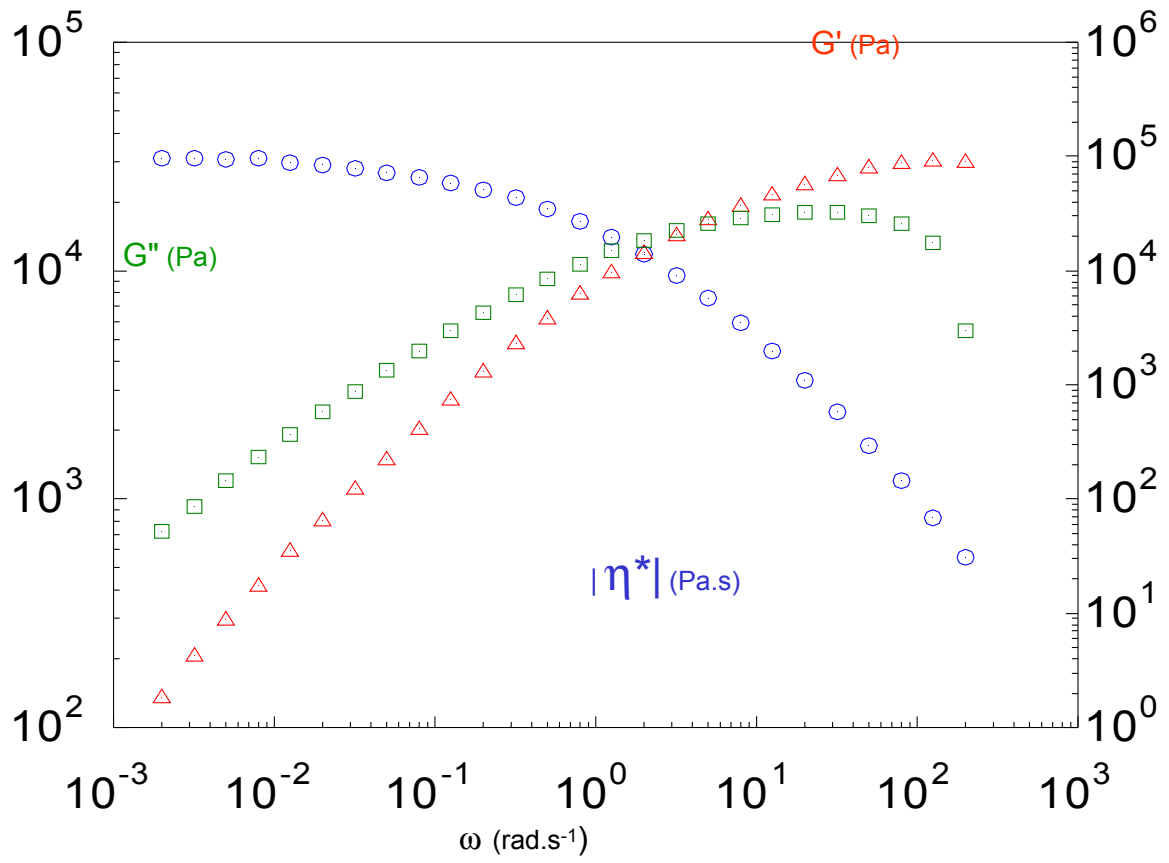
► Interprétation des courbes obtenues

- Balayage en fréquence pour une amplitude donnée
- intéressant pour voir la dépendance des grandeur par rapport au temps

→ Courbes obtenues :



→ Et pour le PDMS :



► Contact avec le laboratoire GEMICO de l'ENSIC à Nancy



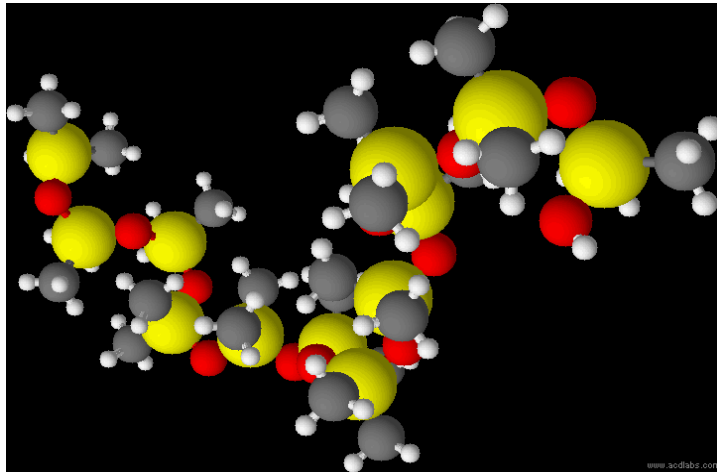
→ Nécessité d'avoir des explications sur ce domaine de la physique qui n'est pas abordé en cours.

→ Contact avec le Pr. Christian Prost, ancien professeur de l'IUT de Nancy, puis avec le Pr. Philippe Marchal, ingénieur CNRS à l'ENSIC



► Origines moléculaire

→ Souvent, ce sont des polymères qui sont à l'origine de la viscoélasticité.



Partie d'une molécule de PDMS

→ Ces polymères enchevêtrés peuvent se déplacer les uns par rapport aux autres

- Soumis à l'agitation brownienne entre autres, il y a **désenchevêtrement** si on leur *laisse le temps*. **Le matériau apparaît liquide.**
- Sinon, il y a **rupture des chaînes** : le matériau exhibe un **comportement solide.**

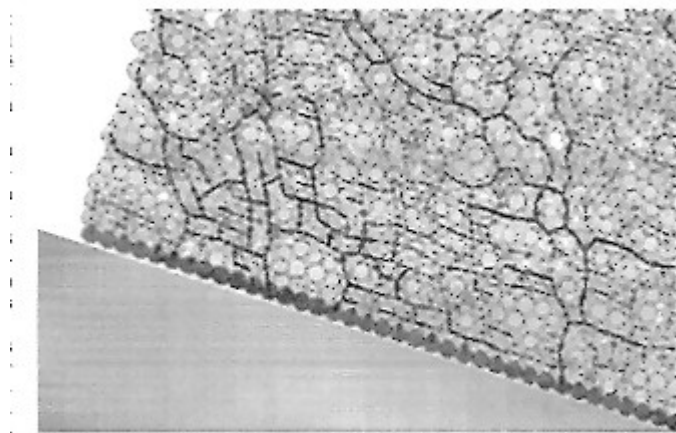


Polymère

→ Pour des exemples comme la maïzena, les bétons coulants et les autres pâtes granulaires :

Les grains se déplacent les uns par rapport aux autres avec une dynamique propre au système : elle peuvent **s'écouler**.

Mais **sollicitées rapidement** il y a création de réseau entre les grains : **apparence solide**.



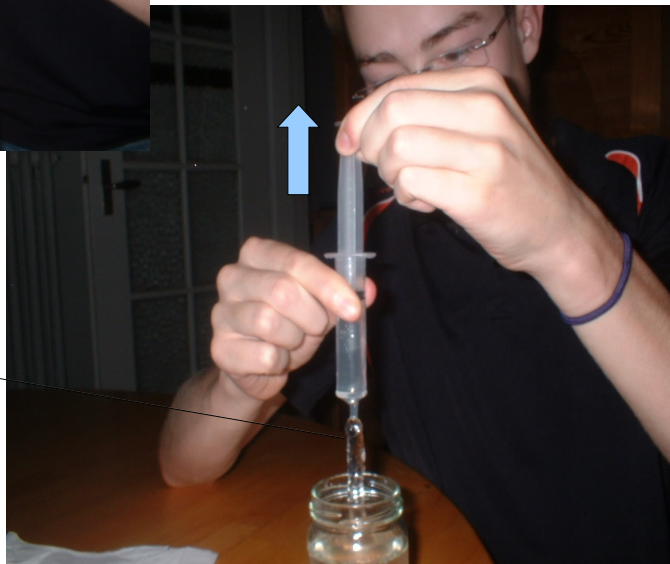
3 SIMULATION D'UN ÉCOULEMENT DE DISQUES sur un plan incliné. L'intensité des forces entre les disques est représentée par des lignes d'interaction connectant les disques.

► Un exemple de mise en évidence de polymères enchevêtrés :
Le siphon sans tube



Siphon amorcé

Le siphon fonctionne sans tube!



Réalisé à partir d'un mélange 50% d'eau + 50% de glycérine auquel on a ajouté 1% en masse de polyacrylamide