



Lycée Louis Le Grand



Par Dalia Barkley, Alice Galliger, Justine Saint-Hilaire.

## LES FLUIDES QUI N'EN FONT QU'A LEUR TETE.

### ABSTRACT

Chacun de nous a pu rencontrer dans son quotidien des fluides au comportement étrange. La pâte "silly putty" rebondit comme une balle lorsqu'on la lance mais peut aussi s'étaler et changer de forme comme un liquide. Le ketchup, qui paraît liquide, ne fait pourtant pas de flaque dans notre assiette. Tout cuisinier sait que lorsque l'on mélange de la Fleur de Mais Maïzena® et de l'eau, la pâte obtenue est liquide lorsque l'on enfonce doucement une cuillère et devient immédiatement solide si on la tape avec. Plus spectaculaire encore, savez-vous ce qui arrive lorsqu'on fait tourner une tige dans des blancs d'oeufs?

De nombreux fluides ne répondent pas aux propriétés des "fluides newtoniens" tels que l'eau. En se basant sur nos expériences et leur modélisation, notre projet tente d'expliquer ces phénomènes étonnants, caractéristiques des fluides dits "non newtoniens".

Our daily life is filled with examples of fluids that display strange behaviors. Silly putty bounces like a ball when you throw it, but it can also spread like a liquid. Although ketchup seems quite liquid, it does not spread in our plates. As any cook knows, the mixture of cornstarch and water is liquid when you push it gently but immediately becomes solid when you bang on it. More spectacular still, do you know what happens when you spin a rod in egg whites?

Many fluids do not follow the properties of "Newtonian fluids" like water. Our project, which is based on experiments and models, aims to explain these surprising phenomena exhibited by "non newtonian fluids".

## INTRODUCTION

Pourquoi le dentifrice ne coule-t-il pas hors de son tube lorsqu'on le retourne ? Pourquoi y-a-t-il des petit lacets de miel qui se dessinent dans le pot quand on fait couler un filet de miel ? Pourquoi doit-on secouer la crème chantilly, ou le ketchup pour qu'ils coulent ? Notre quotidien est encore plein de mystères comme nous le prouvent ces fluides aux comportements étranges. Ils réagissent de façon tout à fait particulière sous l'effet d'une contrainte. Selon les cas, ils peuvent sous l'effet de contraintes externes, se liquéfier ou se solidifier. Ces fluides étranges ont été regroupés sous l'appellation de « fluide non newtoniens » par opposition à l'appellation des « fluides newtoniens », tels que l'eau, qui ont des comportements indépendants des contraintes externes.

Un tel comportement entre fluide et solide s'étudie en physique dans le domaine de la « rhéologie » qui désigne la science des écoulements de la matière. L'étude de ces fluides est un domaine très actif en physique et c'est, avant tout, une spécialité française. Par exemple, Pierre-Gilles de Gennes, prix Nobel de physique de l'année 1991, fut l'un des premiers à avoir valorisé l'étude de la « matière molle ».

Ces fluides aux manifestations étonnantes ont suscités en nous une telle curiosité que nous avons décidé d'en étudier le comportement. Le but de notre étude sera donc de mettre en évidence certains comportements propres à ces fluides non newtoniens, en nous basant sur des expérimentations qui démontreront que les cuisines font de bons laboratoires de physique .

Nous chercherons ainsi à montrer d'une part comme le dit Pierre-Gilles de Gennes « que pour défendre la nature, il faut d'abord la comprendre », et d'autre part « que la science n'est pas forcément construite sur des calculs compliqués, mais plutôt sur des idées simples ». Nous aimerions donc à travers notre étude, qui a pour but d'être à la portée de tous, sensibiliser des personnes de tout âge et ainsi transmettre notre goût de la physique et des sciences.

Nous exposerons dans un premier temps, les notions clés pour comprendre ces fluides, à savoir comment calculer la viscosité des fluides et comment différencier ceux qui sont newtoniens des non newtoniens.

Puis à partir de ces principes généraux, nous manipulerons ces fluides pour mettre en évidence de façon expérimentale la dépendance de leur viscosité vis-à-vis de 2 paramètres :

- leur taux de cisaillement
- le temps

Pour chaque paramètre, nous commencerons par l'étude expérimentale pour finir par l'explication théorique des expériences.

## **SOMMAIRE**

### **Introduction (page 2)**

### **I) Des notions clés pour comprendre les fluides (page 3)**

**A) Viscosité**

**B) Fluides newtoniens et non newtoniens**

### **II) Fluides dont la viscosité dépend du taux de cisaillement (page 7)**

**A) Quantifier le comportement non newtonien**

✓ manipulation n°1

✓ manipulation n°2

**B) La Fleur de Mais Maïzena® : un fluide rhéoépaississant**

**C) Face aux vibrations**

### **III) Fluides dont la viscosité dépend du temps (page 16)**

**A) Trois catégories de fluides dont la viscosité dépend du temps**

**B) Qu'est-ce que la viscoélasticité ?**

✓ manipulation n°3

**C) Un effet viscoélastique : Weissenberg.**

✓ manipulation n°4

### **Conclusion (page 22)**

## I) Des notions clés pour comprendre les fluides

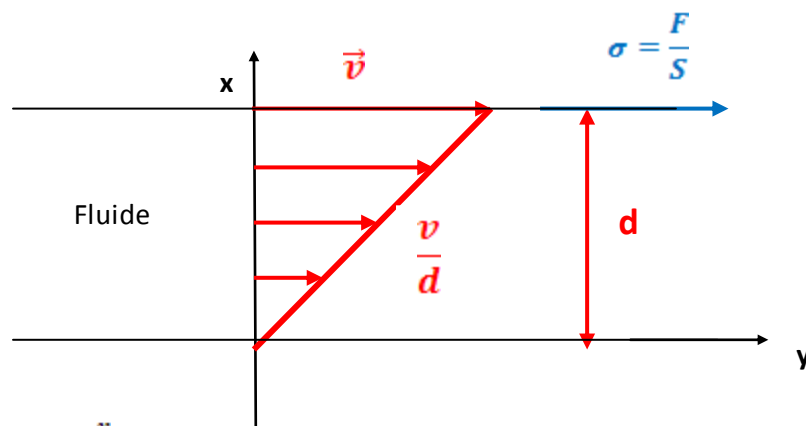
Afin d'expliquer tous ces phénomènes surprenants, il nous a d'abord fallu comprendre des notions élémentaires sur les fluides.

### A) La viscosité

Certains fluides s'écoulent plus facilement que d'autres : ainsi, un récipient rempli d'eau se vide plus facilement qu'un récipient rempli de miel, plus épais ; pourtant ces deux fluides ont des masses volumiques voisines. Le mouvement d'un fluide dépend donc d'une caractéristique intrinsèque à ce fluide : la viscosité.



Pour définir la notion de viscosité, on peut considérer deux couches de fluide, séparée par une distance  $d$  remplie d'une substance homogène. On suppose que les couches, d'une surface  $S$ , sont étendues, de sorte que l'on puisse ignorer les effets au contact de parois. La plaque inférieure est fixée, et on applique une force  $F$  sur la plaque supérieure. Si cette force fait que la substance entre les couches « se déplace » à une vitesse  $v$ , alors la substance est appelée fluide.



On a alors :  $F = \eta S \frac{v}{d}$  [1]

où  $\eta$  est le coefficient de proportionnalité appelé viscosité dynamique. C'est une caractéristique du fluide considéré.

On pose :  $\sigma = \frac{F}{S}$  [2].  $\sigma$  est la contrainte par unité de surface appliquée sur la couche supérieure, appelée contrainte de cisaillement ; son unité est le Pascal.

La déformation  $\gamma$  est le rapport entre la longueur  $l(t)$  parcourue par un élément de liquide du plan supérieur et l'épaisseur  $d$  entre les deux plaques :  $\gamma = \frac{l(t)}{d}$ . La déformation est fonction du temps  $t$ .

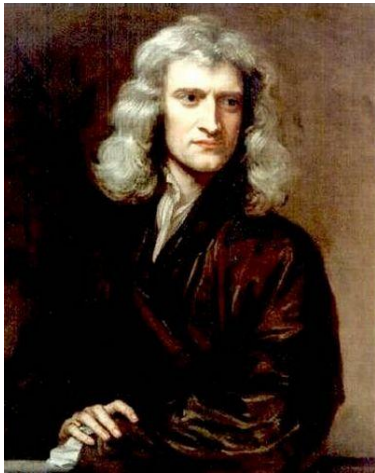
À la place de la déformation, on va plutôt s'intéresser à une grandeur physique plus pertinente : la déformation par unité de temps  $dy/dt$ , notée  $\dot{\gamma}$ , appelée taux de déformation ou taux de cisaillement. L'unité SI est le  $s^{-1}$ . Le taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  est donc la variation de la vitesse du plan supérieur en fonction de l'épaisseur  $d$  : il s'agit donc également du gradient de vitesse. On a :

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{d} \quad [3]$$

On obtient en introduisant [2] et [3] dans [1] :  $\sigma = \eta \dot{\gamma}$

La viscosité est donc une grandeur qui traduit la résistance d'un liquide au cisaillement, c'est-à-dire au glissement des couches du fluide les unes par rapport aux autres (caractérisé par la variation de la vitesse  $v$  dans une direction transverse à l'écoulement). Les forces  $F$  par unité de surface correspondantes (les contraintes de cisaillement  $\sigma$ ), sont proportionnelles au gradient de vitesse  $v/d$  qui correspond aux taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$ , et sont nulles dans un écoulement uniforme.

Voici quelques ordres de grandeur : la viscosité dynamique de l'eau à 20 °C est de 1 mPa.s, soit 1 cP (centipoise). L'air est à peu près 100 fois moins visqueux ; sa viscosité est de  $1,8 \cdot 10^{-5}$  Pa.s. La viscosité de l'huile d'olive à 20 °C est d'environ 80 mPa.s.



## B) Fluides newtoniens et non newtoniens

C'est ainsi qu'Isaac Newton exprime de façon intuitive l'idée de viscosité pour un liquide visqueux dans son œuvre *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* en 1726.

Les vérifications expérimentales n'arrivent que bien plus tard, avec les travaux de Poiseuille en 1856 et de Couette en 1890. L'équation de proportionnalité  $\sigma = \eta \dot{\gamma}$  est ainsi vérifiée pour de nombreux liquides, que l'on qualifie alors de « newtonien ».


Un liquide newtonien est donc un liquide dont la viscosité ne varie pas suivant le gradient de vitesse. Cela implique que :

- La viscosité de cisaillement  $\eta$  est indépendante du taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  ;
- Dans un écoulement de cisaillement simple, les seules contraintes créées par l'écoulement sont des contraintes de cisaillement  $\sigma$ .
- La viscosité est indépendante du temps et les contraintes s'annulent immédiatement lorsque l'écoulement est arrêté. Si on reprend le cisaillement ultérieurement, la viscosité doit être la même que précédemment.

Ainsi, un grand nombre de fluides suit le modèle newtonien. Mais des que le comportement d'un fluide diverge de ce modèle, il est alors regroupé dans une autre catégorie appelée « modèle non newtonien ».

Voici différents types de fluides non newtoniens :

<b>Fluides dont la viscosité dépend du taux de cisaillement</b>		
Fluides rhéofluidifiants (« shear-thinning fluid » en anglais)	Sa viscosité diminue  lorsque le taux de cisaillement augmente	sang, shampooing, jus de fruit concentré, encres d'imprimerie, solutions de polymères  de masse moléculaire élevée, suspensions de particules solides...
Fluides rhéoépaississants « shear-thickening fluid » en anglais)	Sa viscosité augmente  avec le taux de cisaillement	suspensions de particules micrométriques d'argile, de craie, de quartz, ou de cellules du sang dans du plasma, d'amidon de maïs...
Fluides à seuil	Un fluide qui ne s'écoule que lorsque la contrainte $\sigma$ qui lui est appliquée dépasse un certain seuil	Le dentifrice, la mousse à raser, le ciment frais, les peintures, les boues de forage...
<b>Fluides dont la viscosité dépend du temps</b>		
Les fluides thixotropes	Leur viscosité diminue avec le temps lorsqu'ils sont soumis à une contrainte constante. À l'arrêt du cisaillement, la viscosité augmente avec le temps, ce qui indique une réversibilité (au moins partielle) du phénomène	peintures, encres, suspensions d'argile,  crèmes cosmétiques, yaourts, sauce tomate concentrée, sang...
Les fluides rhéopectiques	Leur viscosité augmente lorsqu'ils sont soumis à une contrainte constante	La crème chantilly
Les fluides viscoélastiques	Un solide ou un fluide viscoélastique présente des caractéristiques tantôt d'un solide, tantôt d'un liquide, selon le temps de sollicitation auquel le matériau est soumis. Sous cisaillement ou élongation, ces matériaux subissent une première déformation instantanée comme un solide élastique, puis continuent à se déformer de manière continue comme un liquide visqueux. À l'arrêt du cisaillement ou de l'élongation, le matériau reprend en partie sa forme	Silly Putty

	initiale	
---	----------	--

## II) Fluides dont la viscosité dépend du taux de cisaillement

Commençons par une expérience que chacun rencontre au quotidien. Tout le monde a déjà remarqué que lorsqu'on retourne une bouteille de ketchup, rien ne tombe dans l'assiette. On remarque que, si on veut du ketchup dans ses frites, il faut agiter la bouteille. De cette expérience, on peut en déduire que lorsqu'on applique une certaine contrainte au ketchup, ici les secousses, il se fluidifie, c'est à dire que sa viscosité diminue.

Nous avons réalisé un mélange d'eau et de Fleur de Maïs Maïzena®. Lorsque nous posons notre main sur le mélange, elle s'enfonce doucement. Si maintenant on frappe la surface du mélange, on constate que la main ne s'enfonce pas, et que le mélange semble solide. On déduit de cette expérience que lorsqu'on applique une certaine contrainte sur le mélange, ici la force de notre main, il a tendance à se solidifier, c'est-à-dire que sa viscosité augmente.

Ainsi, afin d'expliquer de tels comportements, nous pouvons faire une première expérience.

### A) Quantifier le comportement non newtonien.

#### Manipulation n°1 : SERINGUES

##### Protocole expérimental

On cherche à montrer que pour un fluide non newtonien, le temps d'écoulement n'est pas proportionnel à la contrainte de cisaillement, c'est à dire au poids appliqué.

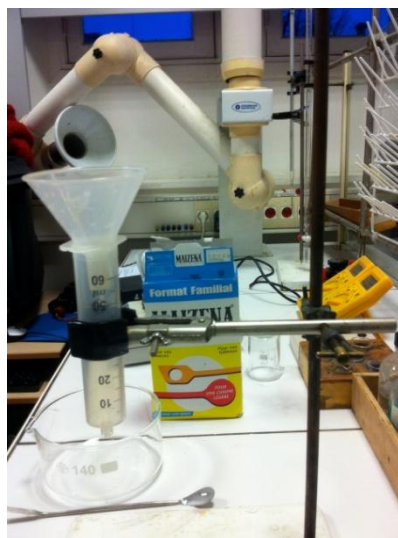
##### **a) Préparation de la solution**

On prépare une solution aqueuse de concentration  $C=1,11\text{g/ml}$  de Fleur de Maïs Maïzena®.

##### **b) Préparation du système**

On réalise le montage suivant à l'aide de :

- Une seringue de 60ml
- Un cristalliseur
- Un support à pinces pour la seringue





### c) Mesure du temps

On verse le mélange dans la seringue  
 On mesure le temps que met le liquide à s'écouler entre 50ml et 0ml, en faisant varier les poids que l'on pose sur le piston de la seringue.

### d) Résultats

	A	B	C
1	m	tketchup	tmaizena
2	500	373.7	
3	1300	100.6	
4	1500	16.2	
5	2000	4.5	44
6	3000		33
7	3500		30.6
8			

Avec m en grammes et tketchup et tmaizena en s.

*(Pour des poids trop faibles, le mélange eau-maizena ne coule pas hors de la seringue, ce qui explique l'absence de certains résultats)*

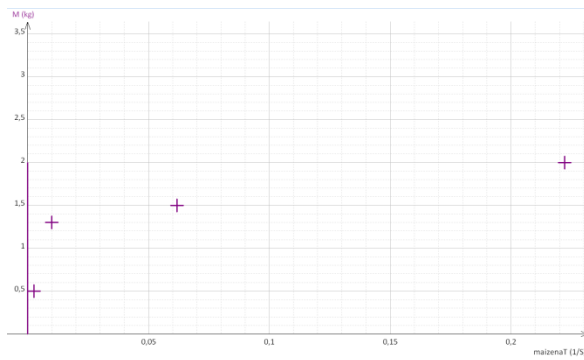
#### **Exploitation et interprétation :**

Afin de mettre en évidence les différentes viscosités des fluides, traçons pour chacun d'eux la courbe correspondant à  $\sigma = f(\dot{\gamma})$ . D'après l'équation  $\sigma = \eta \dot{\gamma}$ , on aura ainsi la viscosité du fluide en coefficient directeur. Sachant que  $\sigma = \frac{\text{Force}}{\text{surface}} = \frac{m \times g}{\text{surface}}$  g et la surface étant constants, on obtient que  $\sigma$  et m sont proportionnels.

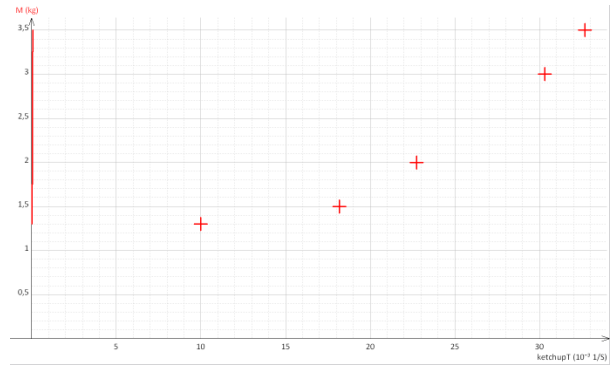
De plus nous avons vu dans le I) que  $\dot{\gamma}$  est sans unité donc  $\dot{\gamma}$  correspond à  $1/t$

On trace donc  $m=f(1/t)$  et on obtient donc les graphes suivants :

M g	maïzena S	ketchup S	eau S	maïzena 1/S	ketchup 1/S	EAU 1/S
0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-
500,0	373,7	0,000	19,00	0,002676	-	0,05263
1300	100,6	100,0	15,00	0,00994	0,0100	0,06667
1500	16,20	55,00	12,00	0,06173	0,01818	0,08333
2000	4,500	44,00	9,000	0,2222	0,02273	0,1111
3000	0,000	33,00	5,000	-	0,0303	0,2000
3500	0,000	30,60	4,000	-	0,03268	0,2500



Pour la Fleur de Mais Maïzena®



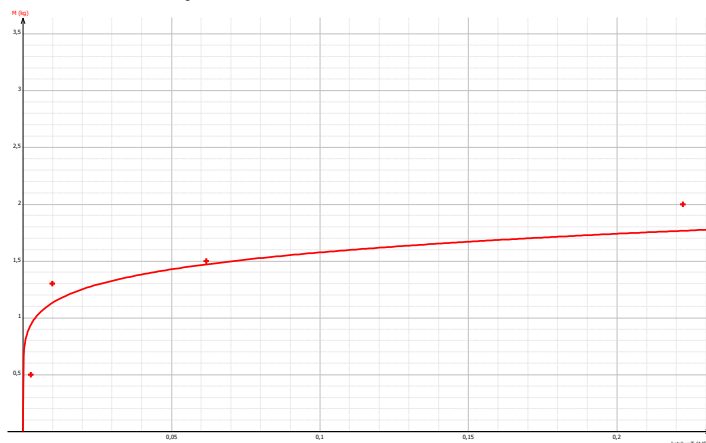
pour le ketchup

Une modélisation par un modèle linéaire ne convient pas pour les courbes correspondant au ketchup et à la maïzena, mais convient pour la courbe correspondant à l'eau.

On en déduit que le modèle linéaire  $\sigma = \eta \dot{\gamma}$  où ici  $m = a/t$ , c'est-à-dire le modèle newtonien, ne convient pas à la Fleur de Mais Maïzena® et au ketchup, c'est pourquoi ils sont dits non newtoniens.

Essayons de modéliser ces fluides à l'aide d'une loi de puissance, c'est à dire selon  $m = a(\frac{1}{t})^b$ . C'est le physicien Wilhelm Ostwald qui le premier proposa pour modèle de puissance  $\sigma = K \dot{\gamma}^n$  pour décrire les fluides même newtoniens.

### Pour le Ketchup :



Expression du modèle

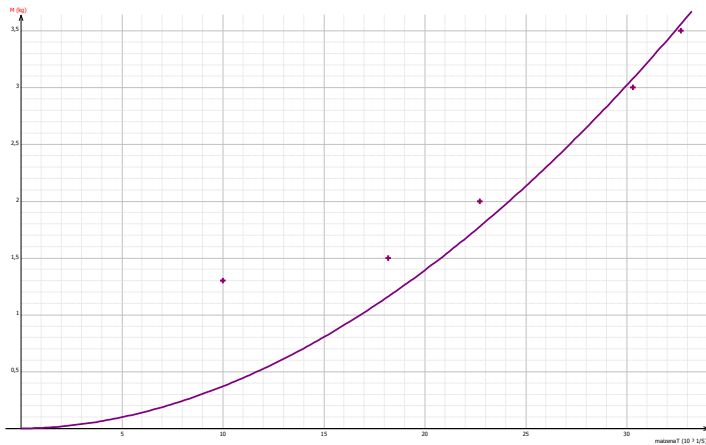
$M(\text{ketchupT}) = a * \text{ketchupT}^b$

Ajuster  Tracé auto.

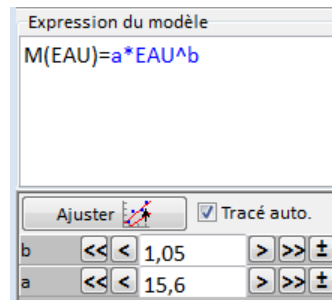
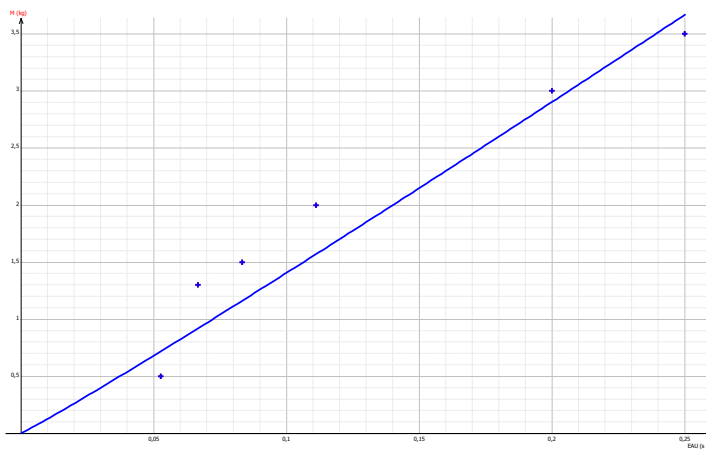
b <<< 0,143 >>>

a <<< 2,19 >>>

### Pour le mélange eau-Fleur de Mais Maïzena® :



**Pour l'eau :**



Ces modèles correspondent de façon satisfaisante.

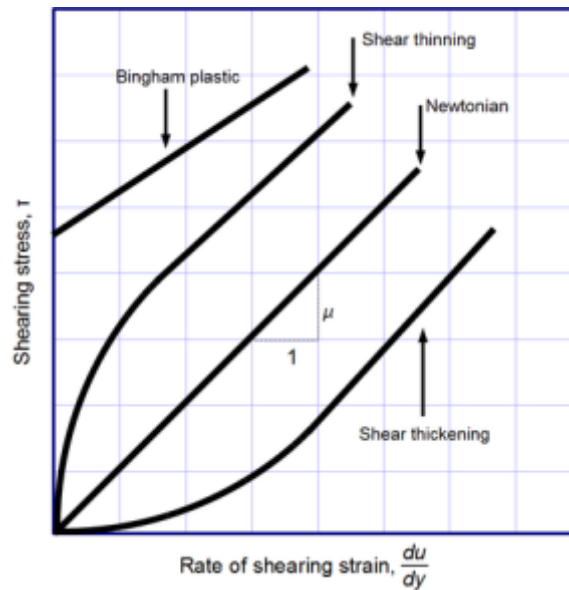
Le modèle d'Oswald nous permet de déterminer de quel type de fluides non newtoniens il s'agit. En effet, si l'on insère la formule  $\sigma = K\dot{\gamma}^n$  dans la définition de la viscosité  $\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}}$  on obtient le formule suivante :  $\eta = K\dot{\gamma}^{n-1}$ .

Ainsi, si  $n > 1$ , la viscosité augmente avec le taux de cisaillement : c'est donc un fluide rhéoépaississant. Pour la Fleur de Mais Maïzena®, nous avons trouvé un exposant  $b = 1,91 > 1$ . On en déduit que c'est un fluide rhéoépaississant.

Si  $n < 1$ , la viscosité diminue avec le taux de cisaillement : c'est donc un fluide rhéofluidifiant. Pour le ketchup, nous avons trouvé un exposant  $b = 0,143 < 1$ . On en déduit que c'est un fluide rhéofluidifiant.

Si  $n = 1$ , la viscosité est constante : c'est un fluide newtonien. Pour l'eau, nous avons trouvé un exposant  $b = 1,05$  ce qui confirme la validité de notre expérience.

En réalité, l'évolution de la viscosité se fait de façon progressive, comme le montre le graphe ci-dessous.



On peut donc dire que la viscosité de ces fluides dépend du taux de cisaillement. De ux comportements sont possibles :

- Le comportement rhéofluidifiant. La viscosité  $\eta$  diminue lorsque le taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  augmente.
- Le comportement rhéoépaississant. La viscosité  $\eta$  augmente lorsque le taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  augmente.

Plus le comportement d'un fluide non newtonien s'éloigne du modèle newtonien, plus le rapport  $\theta = \frac{\eta_1}{\eta_2}$  s'éloigne de  $\theta_{\text{newtonien}} = 1$ .

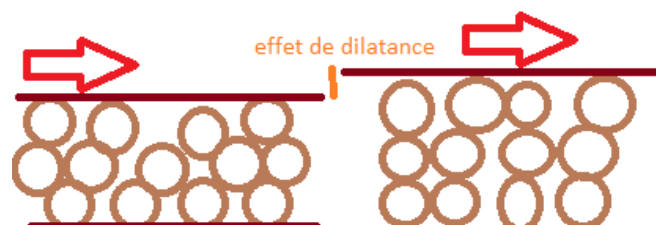
On peut ainsi « quantifier » le caractère non newtonien d'un fluide.

## B) La Fleur de Mais Maïzena® : un fluide rhéoépaississant.

Etant sponsorisées par Unilever, nous avons décidé d'étudier en particulier le comportement de la Fleur de Mais Maïzena®.

### Pourquoi la Fleur de Mais Maïzena a un tel comportement différent de la farine normale ?

Avec de la farine de blé



Sous l'effet d'une contrainte de cisaillement, les grains circulaires roulent les uns sur les autres et le volume augmente : le mélange se déforme.

Avec de la Fleur de Mais Maïzena®



Sous l'effet d'une contrainte de cisaillement brutale, les grains anguleux de Fleur de Mais Maïzena® ne peuvent rouler les uns sur les autres et restent bloqués : le mélange se solidifie. On peut ainsi frapper sur le mélange sans s'enfoncer.

Si la contrainte appliquée est moins forte, les particules vont lentement se mettre les unes sur les autres : le mélange se déforme. C'est pourquoi on peut enfoncer notre main doucement dans le mélange.

### **Manipulation n°2 : Mesure de la viscosité à l'aide d'un teslamètre.**

On peut quantifier le caractère non newtonien d'un fluide par rapport à une certaine contrainte  $\sigma_1$  (nous poserons une masse  $m_1 \propto \sigma_1$ ).

On pose

$\eta_1$  La viscosité pour  $\sigma < \sigma_1$

$\eta_2$  La viscosité pour  $\sigma > \sigma_1$

On peut calculer le rapport  $\frac{\eta_1}{\eta_2}$ , plus ce rapport s'éloigne de 1, plus le fluide est non newtonien.

On cherche maintenant à calculer la viscosité du mélange eau-Fleur de Mais Maïzena® à l'aide de la vitesse limite.

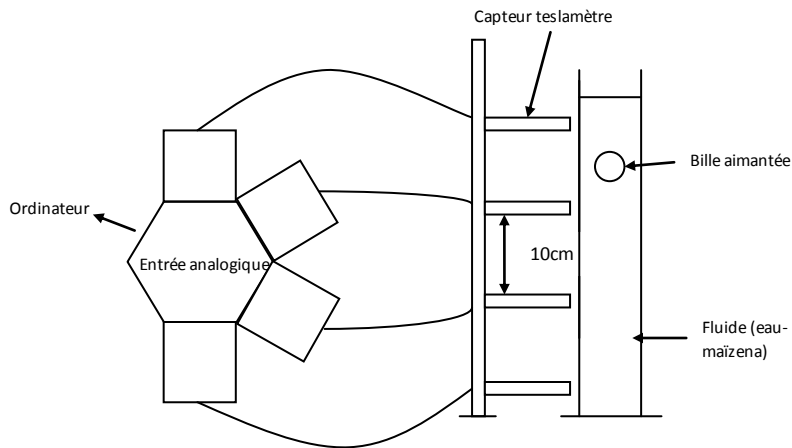
#### **a) Préparation de la solution**

Préparer une solution aqueuse de concentration  $C=1,00$  g/L de maïzena

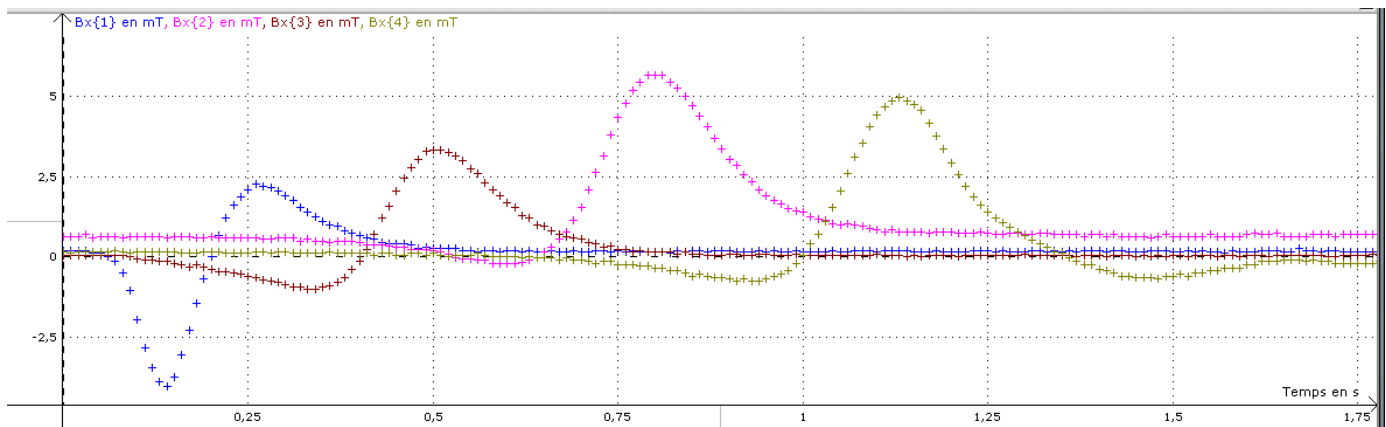
#### **b) Préparation du système**

- Burette graduée
- Quatre teslamètre
- Logiciel LatisPro
- Une bille aimantée

On réalise le montage suivant :



Le fluide étudié étant opaque, on utilise un teslamètre et une bille aimantée pour suivre l'évolution de la bille dans le fluide. En effet, le teslamètre détecte les variations de champ magnétique lors du passage de la bille aimantée. Ces variations sont ensuite représentées sous la forme d'une courbe sur le logiciel LatisPro. Le teslamètre enregistre le champ magnétique dans les plans xy et xz ; cependant, nous nous intéresserons uniquement au plan xy. On obtient donc les courbes suivantes (chaque pic correspond à un passage de la bille devant un des quatre capteurs) :



### c) Exploitation des résultats

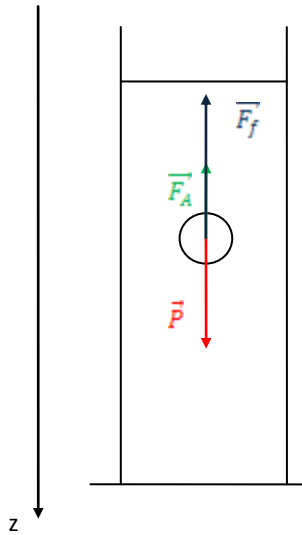
Avec l'aide du réticule, on mesure les durées écoulées au niveau de chaque pic. On obtient les mesures suivantes :

- Pic 1 : 0,26s }  $\rightarrow t_1=0,26$  s
- }  $\rightarrow t_2=0,25$  s
- Pic 2 : 0,51s }  $\rightarrow t_3=0,30$  s
- }  $\rightarrow t_4=0,31$  s
- Pic 3 : 0,81s }
- Pic 4 : 1,12s }

On sait que les capteurs sont espacés de  $d=10\text{cm}$  deux à deux. De plus, on remarque que le temps écoulé entre le passage de la bille devant deux capteurs est presque constant ( $t \approx 0,30\text{s}$ ). On peut ainsi trouver la vitesse limite atteinte par la bille dans la solution de maïzena. On a :

$$v_{lim} = \frac{t}{d} = \frac{0,30}{0,10} = 3,0\text{m/s}$$

A l'aide de cette vitesse limite, nous allons pouvoir trouver la viscosité de notre mélange eau-maïzena.



Inventaire de forces appliquées à la bille :

- Poids :  $\vec{P} = m\vec{g} = \rho_b V \vec{g}$
- Poussée d'Archimède :  $\vec{F}_A = -\rho_L V \vec{g}$
- Force de frottement fluide :  $\vec{F}_f = -6\pi\eta r \vec{v}$

$\rho_b$  : masse volumique de la bille

$V$  : volume de la bille

$\rho_L$  : masse volumique du fluide

$\eta$  : viscosité du fluide

$r$  : rayon de la bille

D'après la relation fondamentale de la dynamique :

$$m\vec{a} = \vec{P} + \vec{F}_A + \vec{F}_f$$

$$\rho_b V \vec{a} = \rho_b V \vec{g} - \rho_L V \vec{g} - 6\pi\eta r \vec{v}$$

En projetant l'équation selon l'axe Oz on obtient :

$$V(\rho_b - \rho_L)g - 6\pi\eta r \frac{dz}{dt} = \rho_b V \frac{dv}{dt}$$

$$\rho_b V \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_b}\right)g - 6\pi\eta r \frac{dz}{dt} = \rho_b V \frac{dv}{dt}$$

On pose  $g_a = 1 - \frac{\rho_L}{\rho_b}$ . On a :  $g_a - \frac{6\pi\eta r}{\rho_b V} v = \frac{dv}{dt}$

$$\frac{dv}{dt} = 0 \rightarrow v_{lim} = \frac{\rho_b g_a}{6\pi\eta r}$$

On pose  $\tau = \frac{6\pi\eta r}{\rho_b V}$ . On a :  $\frac{dv}{dt} + \frac{v}{\tau} = g_a$

Solution particulière de cette équation différentielle :  $v = g_a \tau$

On a donc :  $v = A\tau + g_a \tau$

A  $t=0$  on a  $v=0$  d'où :  $A = -g_a \tau$

$$\rightarrow v(t) = g_a \tau (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Lorsque  $t$  tend vers  $+\infty$ ,  $v$  tend vers  $g_a \tau$ .

Donc  $v_{lim} = g_a \tau$ . Soit :  $v_{lim} = \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_B}\right) \left(\frac{6\pi\eta r}{\rho_B V}\right)$

$$v_{lim} = \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_B}\right) \frac{\rho_B \frac{4}{3} \pi r^3}{2 \times 36\pi\eta r}$$

$$v_{lim} = \rho_B \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_B}\right) \frac{2r^2}{9\eta}$$

$$v_{lim} = (\rho_B - \rho_L) \frac{2r^2}{9\eta}$$

Donc :  $\eta = 2 \frac{r^2(\rho_B - \rho_L)}{g_a V t}$

On sait que :

- $r = 1,7 \cdot 10^{-3}$  m
- $\rho_B = 7,3$  kg/L
- $\rho_L = 467 \cdot 10^{-3}$  kg/L
- $v_{lim} = 3,0$  m/s

On a donc :

$$\eta = 2 \times \frac{1,7^2 (7,3 - 467 \times 10^{-3})}{9 \times 3} = \mathbf{1,463 \text{ Pa.s}}$$

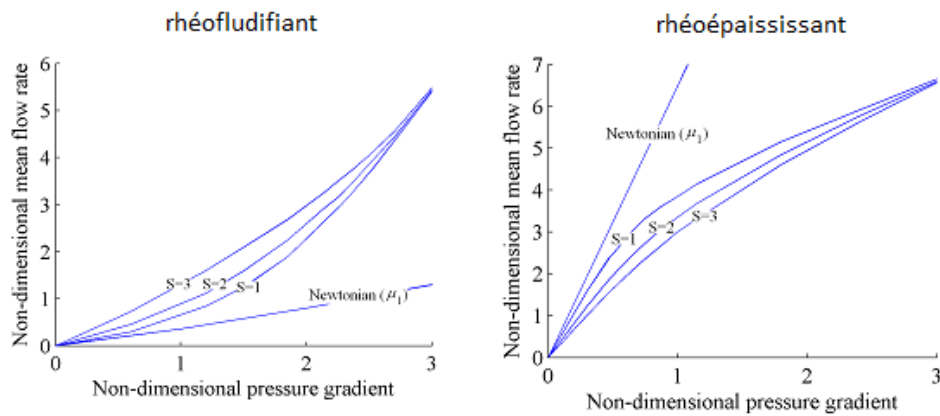
Nous avons calculé la viscosité  $\eta_1$ . Il suffit de calculer  $\eta_2$  pour trouver le rapport qui nous permettra de quantifier le caractère non-newtonien du mélange eau-maïzena.

### C) Face aux vibrations

Les vibrations permettent de visualiser simplement la réponse d'un fluide à une contrainte. En effet, les vibrations peuvent jouer le rôle de contrainte.

On fait donc cette fois vibrer le ketchup et le mélange eau-Fleur de Maïs Maïzena® dans des hauts parleurs en contrôlant la fréquence à l'aide du logiciel Audacity. On remarque que plus l'amplitude des vibrations est élevée, plus le ketchup se liquéfie tandis que la Fleur de Maïs Maïzena® se solidifie. L'amplitude des vibrations a donc un effet différent pour les deux types de fluides. Cela s'explique par le caractère non-newtonien des ces deux fluides.

En effet, des chercheurs de Washington State University ont établi les courbes suivantes :



Le « Non-dimensional mean flow rate » correspond au taux de cisaillement et le « non-dimensional pressure gradient » correspond à la contrainte. S correspond à l'amplitude des vibrations appliquées au fluide.

Pour le fluide newtonien, le taux d'écoulement moyen ne varie pas avec l'amplitude des oscillations.

Pour le fluide rhéofluidifiant, on constate que, pour une contrainte donnée, plus l'amplitude est élevée, plus le taux d'écoulement moyen est élevé. On peut donc dire que la viscosité diminue avec l'amplitude.

Pour le fluide rhéoépaississant, on constate que, pour une contrainte donnée, plus l'amplitude est élevée, plus le taux d'écoulement moyen est faible. On peut donc dire que la viscosité augmente avec l'amplitude.

C'est bien ce que nous avons constaté avec les exemples du ketchup et de la Maizena.

### III ) Les Fluides dont la viscosité dépend du temps



#### A) Fluides dont la viscosité dépend du temps

On peut les classer dans trois catégories :

-Les fluides thixotropes :

On définit la thixotropie comme la propriété de la matière de changer d'état selon l'énergie que l'on va lui communiquer. Un matériau qui devient de moins en moins visqueux au cours du temps, alors qu'il est soumis à une contrainte constante, est un fluide thixotrope.

-Les fluides rhéopectiques :

C'est le contraire des fluides thixotropes. Un matériau qui devient de plus en plus visqueux au cours du temps, alors qu'il est soumis à une contrainte constante, est un fluide rhéopectique.

-Les fluides viscoélastiques :

Le fluide viscoélastique, à une contrainte constante, peut avoir un comportement visqueux ou élastique en fonction du temps.

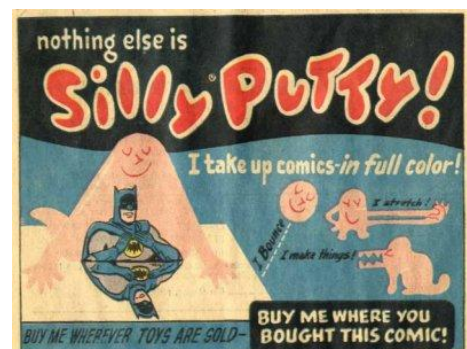
C'est à cette dernière catégorie de fluide que nous nous intéresserons. Ainsi nous pourrions expliquer et comprendre les causes des effets constatés lors de nos expériences.

#### B) Qu'est ce que la viscoélasticité ?

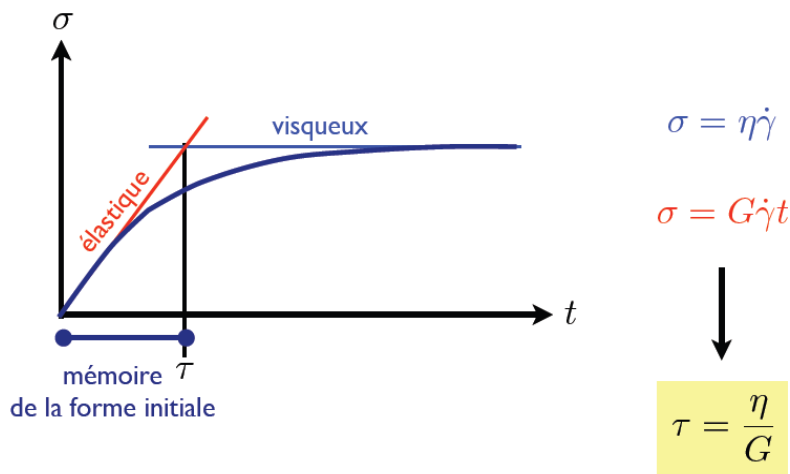
Pendant la première guerre mondiale, un ingénieur américain rechercha une alternative moins chère au caoutchouc. Il conçut une mixture qui s'étirait et rebondissait mieux que le caoutchouc mais qui était trop lisse et trop molle pour en faire des pneus. Un jour, le propriétaire d'un magasin de jouets aperçut quelqu'un en train de jouer avec la mixture. Il trouva ça amusant et le commercialisa. C'est ainsi que naquit le « Silly Putty ».

Si on fait tomber une balle de « silly – putty », elle rebondit. Si à l'inverse, on laisse reposer cette même balle, elle va, au bout d'un certain temps, s'étaler comme un fluide.

Dans le premier cas, le temps de sollicitation est inférieur à un temps seuil, spécifique au matériau. Les composants élémentaires du matériau n'ont donc pas le temps de se déformer de façon importante : la réaction à la contrainte est dite « élastique ». Dans le second cas, le temps de sollicitation est supérieur au temps seuil du matériau. Les composants élémentaires ont donc le temps de se déformer : la réaction à la contrainte est dite « visqueuse ».



On obtient donc le schéma ci-dessous, où  $\sigma$  est la contrainte,  $\gamma$  est la déformation,  $\eta$  est la viscosité,  $G$  est le module d'élasticité donné pour chaque matériau :

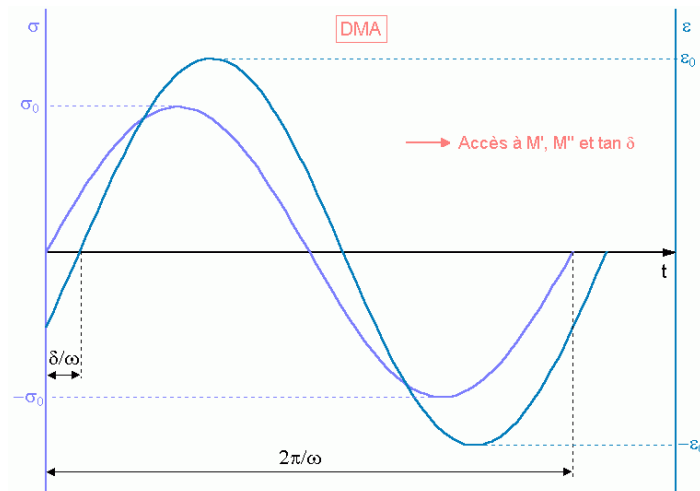


On définit le temps de relaxation caractéristique du matériau :

$$\tau = \frac{\eta}{G}$$

Nous avons cherché ce temps  $\tau$  qui est caractéristique de chaque matériau viscoélastique. Pour cela, nous avons d'abord examiné les deux types de comportements.

Il apparaît deux types de réponses qui sont décalées dans le temps : la déformation visqueuse a lieu en même temps que la contrainte, tandis que la déformation élastique est décalée. En soumettant un fluide élastique à un cisaillement oscillant :  $\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t)$ , on obtient donc deux contraintes en déphasage :



On définit alors le module élastique :  $G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \varphi$  et le module visqueux :  $G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \varphi$ .

Pour de faibles amplitudes,  $G' \gg G''$  : la réponse visqueuse est prépondérante.

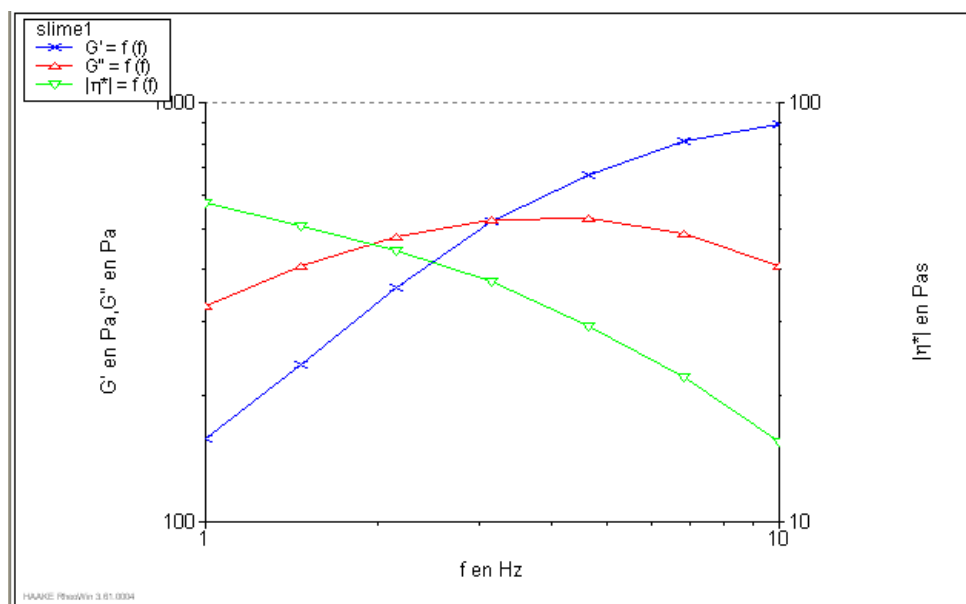
Pour de grandes amplitudes,  $G'' \gg G'$  : la réponse élastique est prépondérante.

A  $t = \tau$ , les modules visqueux et élastiques sont égaux donc  $G' = G''$ .



### Manipulation n°4 : Le rhéomètre

L'ESPCI nous a donné accès à un rhéomètre « plan/plan oscillant ». Il nous a permis de mesurer l'évolution de  $G'$  et  $G''$  en fonction de la fréquence  $f$  d'oscillations.



	t en s	t seq en s	f en Hz	G' en Pa	G'' en Pa	η*  en Pa·s	γ en -
1   1	11,63	6,877	1,000	157,9	326,4	57,70	0,552
1   2	37,22	32,47	1,468	236,1	406,1	50,93	0,426
1   3	63,39	58,64	2,154	363,3	481,0	44,53	0,332
1   4	88,09	83,34	3,162	523,2	526,1	37,34	0,270
1   5	112,8	108,1	4,642	673,7	531,0	29,41	0,233
1   6	136,9	132,1	6,813	810,5	485,3	22,07	0,212
1   7	159,6	154,9	10,00	887,8	408,1	15,55	0,205

Nous avons constaté expérimentalement que :

$$G' = G'' \Leftrightarrow f = 3,2 \text{ Hz}$$

$$G' = G'' \Leftrightarrow \tau = \frac{1}{3,2} = 0,31s$$

### C) Explication d'un effet viscoélastique : Weissenberg

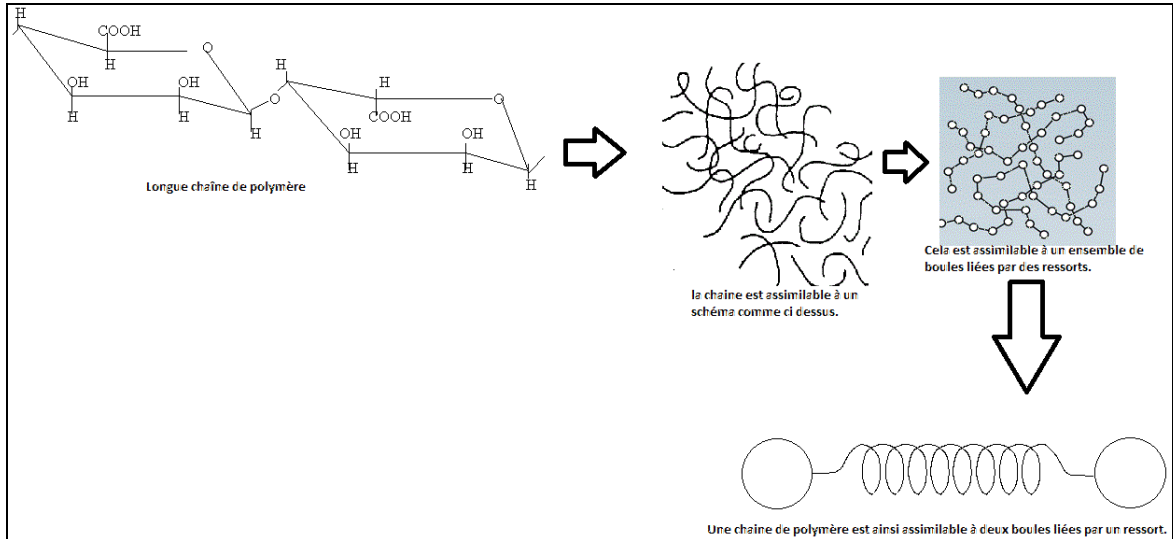


#### Manipulation n° 5 :

On considère un fluide viscoélastique, par exemple la « Silly-Putty ». Si l'on fait tourner une tige dans ce fluide, on pourrait penser que ce fluide subit un effet centrifuge. Mais il aura au contraire tendance à grimper le long de la tige. Comment expliquer ce phénomène ?

#### Interprétation :

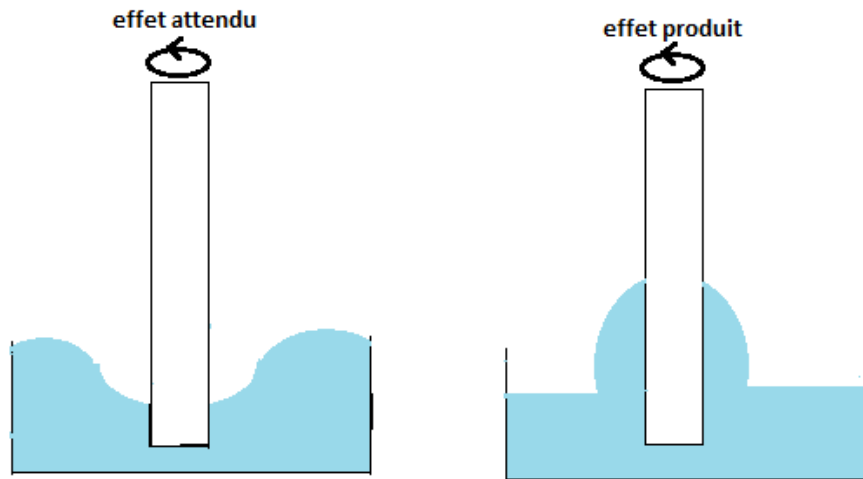
Pour expliquer ce phénomène, il nous faut tout d'abord considérer le modèle de Maxwell qui permet de définir le comportement liquide d'un fluide viscoélastique en le simplifiant de la façon suivante :



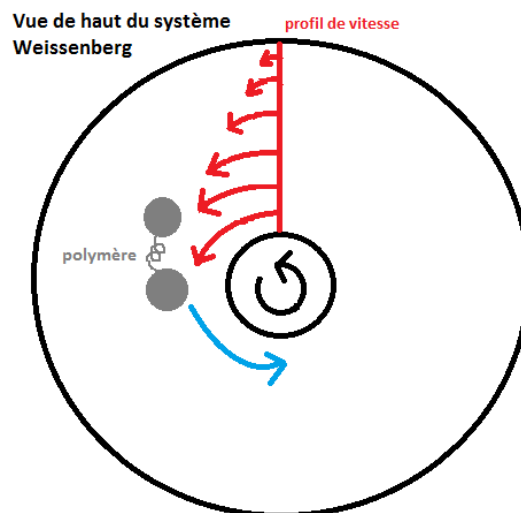
On assimilera donc une chaîne de polymère à un système constitué de deux boules reliées d'un ressort.

On peut maintenant expliquer l'effet constaté.

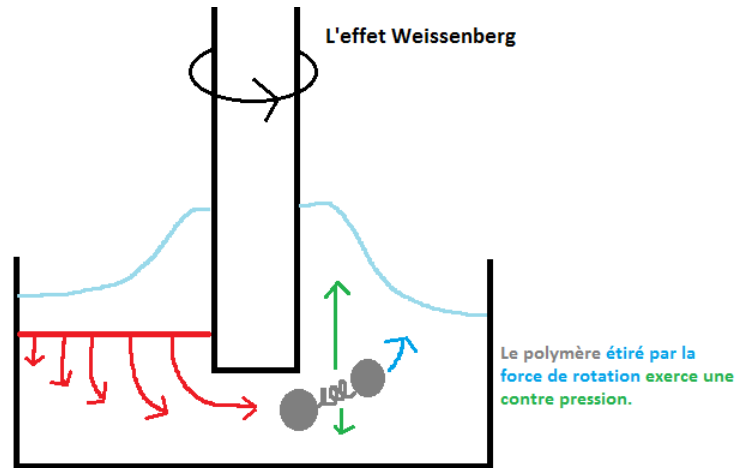
Lorsqu'une tige est en rotation dans un fluide, l'effet attendu est tout d'abord celui qui se produit avec l'eau, c'est-à-dire l'effet centrifuge. Mais lorsque la tige tourne dans notre fluide viscoélastique, celui-ci a tendance à grimper le long de la tige.



Comme nous l'avons expliqué, une solution de polymère peut être apparentée à un système constitué de deux boules (modèle de Maxwell) reliées par un ressort. Lorsqu'elle est soumise à un cisaillement fort, ce système se déforme, le ressort est étiré vers le sens de cisaillement. Le ressort cherche donc à rétablir sa forme initiale et exerce une contre pression. La vitesse est plus grande autour de la tige qu'aux extrémités du cristallisateur. Les polymères situés autour de la tige sont donc étirés.



Le polymère est étiré, c'est-à-dire que le ressort est étiré. Ainsi, le ressort exerce une contre pression vers le haut et vers le bas. La pression exercée vers le bas est arrêtée par le fond du cristallisateur, alors que la pression exercée vers le haut entraîne la montée du fluide autour de la tige.



La masse du fluide détermine la hauteur qu'atteint le fluide avant de retomber. En effet, dès que le poids exercé sur le fluide devient supérieur à la pression exercée par le polymère, le fluide retombe.

## Conclusion :

Ainsi, toutes ces manifestations qui défient l'intuition, sont le résultat de propriétés physiques propres aux fluides non newtoniens pour lesquels la viscosité varie selon différents paramètres.

Nous avons ainsi mis en évidence et expliqué le comportement de fluides non newtoniens qui ont ou auront un impact sur notre vie :

Par exemple, le ketchup liquide sous l'effet d'une agitation peut sortir de son tube et redevient compact pour nous permettre de manger nos frites-ketchup sans nous salir !

De plus, en nous intéressant à ces différents comportements, nous avons eu l'occasion de nous confronter à la rigueur d'une démarche scientifique. En se basant sur nos recherches que nous avons confrontées à nos propres constatations, et avec l'aide de plusieurs chercheurs, nous avons réussi à expliquer ces différents phénomènes. Ce travail, en plus de nous permettre de comprendre les phénomènes résultants des propriétés de ces étonnants fluides, nous a donc ouvert les yeux sur le métier de chercheur, leur démarche, ainsi que sur l'efficacité du travail de groupe et ses avantages.

Mais certains comportements des fluides non newtoniens sont encore loin d'être compris à ce jour. On peut constater des phénomènes encore plus étranges lorsque l'on soumet des fluides à une fréquence avoisinant les 60 Hz.

Il reste donc encore beaucoup de choses à découvrir dans le domaine de la rhéologie !

## Remerciements à :

**José Bovi**, chercheur à l'ESPCI, spécialiste des fluides-liquides qui a éclairé sur les effets des fluides visco-élastiques.

**Laurette Tuckerman**, chercheuse à l'EPSCI, spécialiste de la modélisation des fluides.

**Anke Lindner**, chercheuse à l'ESPCI, spécialiste des phénomènes newtoniens et non newtoniens.

**Daniel Bonn**, chercheur à l'ENS, spécialiste des comportements des fluides.

**Nawal Quennouz**, doctorante sur les fluides à l'ESPCI et assistante de TP.

**Foi Lahmidani**, Responsable Travaux pratiques en classe préparatoire à Louis le Grand.

**Michel Faye**, notre professeur de physique-chimie qui nous a encouragées tout au long du projet.

**Les préparateurs de physique-chimie** du Lycée Louis le Grand.

## SOURCES :

### **Bibliographie :**

*Ce que disent les fluides*, d'Etienne Guyon, Jean Pierre Hulin et Luc Petit, Edition Belin

*Panorama de la physique*, de Gilbert Pietryk, Edition Belin

*Atlas de la physique*, de Hans Breueur, Edition Encyclopédies d'aujourd'hui

*Une introduction à la dynamique des fluides*, de Michel Rieuford, édition Masson

*Histoire générale des sciences partie 2: La science moderne*, de René Taton, Edition Presses Universitaires de France.

*La naissance de la science classique au XVIIe siècle* de Michel Blay, Edition Nathan Université

### **Sites internet :**

<http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/fr/Viscoelasticity>

<http://iopscience.iop.org/1742-5468/2006/07/P07007/fulltext>

[http://iopscience.iop.org/0143-0807/30/6/S03/pdf/0143-0807\\_30\\_6\\_S03.pdf](http://iopscience.iop.org/0143-0807/30/6/S03/pdf/0143-0807_30_6_S03.pdf)

[http://www.sgm.univ-savoie.fr/cours/RAN\\_meca\\_LF.pdf](http://www.sgm.univ-savoie.fr/cours/RAN_meca_LF.pdf)

<http://math.univ-lyon1.fr/~chupin/ANIMATIONS/animations.html> (vidéos)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Non-Newtonian\\_fluid](http://en.wikipedia.org/wiki/Non-Newtonian_fluid)

<http://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity>

[hal.archives-ouvertes.fr/docs/.../Nicolas\\_Huang\\_-\\_These.pdf](http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/.../Nicolas_Huang_-_These.pdf)