



université  
PARIS-SACLAY

# *Rheology*

**A powerful tool to characterize  
semi-solid pharmaceutical formulations**

Institut Galien Paris-Saclay  
Université Paris-Saclay

**Pr Nicolas HUANG**

**[nicolas.huang@universite-paris-saclay.fr](mailto:nicolas.huang@universite-paris-saclay.fr)**

## **Rhéologie**

**Étude de l'écoulement et de la déformation de la matière**

La rhéologie couvre essentiellement la « matière molle » :  
émulsions, gels, suspensions...



# On the rheology of cats

M.A. Fardin<sup>1,2,3,\*</sup>

<sup>1</sup>*Université de Lyon, Laboratoire de Physique, École Normale Supérieure de Lyon, CNRS UMR 5672, 46 Allée d'Italie, 69364 Lyon cedex 07, France.*

<sup>2</sup>*The Academy of Bradylogists.*

<sup>3</sup>*Member of the Extended McKinley Family (EMF).*

(Dated: July 9, 2014)

In this letter I highlight some of the recent developments around the rheology of *Felis catus*, with potential applications for other species of the felidae family. In the linear rheology regime many factors can enter the determination of the characteristic time of cats: from surface effects to yield stress. In the nonlinear rheology regime flow instabilities can emerge. Nonetheless, the flow rate, which is the usual dimensional control parameter, can be hard to compute because cats are active rheological materials.

## The 2017 Ig Nobel Prize Winners

*The 2017 Ig Nobel Prizes were awarded on Thursday night, September 14, 2017 at the [27th First Annual Ig Nobel Prize Ceremony](#), at Harvard's Sanders Theatre.*

*The ceremony was webcast[we will put a link up here soon].*

**PHYSICS PRIZE [FRANCE, SINGAPORE, USA] — Marc-Antoine Fardin, for using fluid dynamics to probe the question "Can a Cat Be Both a Solid and a Liquid?"**

REFERENCE: "[On the Rheology of Cats](#)," Marc-Antoine Fardin, *Rheology Bulletin*, vol. 83, 2, July 2014, pp. 16-17 and 30.

WHO ATTENDED THE CEREMONY: Marc-Antoine Fardin

## *Rhéologie*

**Étude de l'écoulement et de la déformation de la matière**

La rhéologie couvre essentiellement la « matière molle » :  
émulsions, gels, suspensions...

*Corrélation entre*  
l'écoulement et la déformation de la matière  
et  
la structure de la matière

# Pourquoi la rhéologie ?

- Existence de fluides aux comportements rhéologiques complexes dans de nombreux domaines :

Pharmacie / Cosmétique / Pétrole / Peinture / Agro-alimentaire / ...

- En pharmacie et en cosmétique, la rhéologie est une aide précieuse pour la formulation du produit et pour la mise en œuvre des procédés :

- |                     |   |  |
|---------------------|---|--|
| <i>Le produit</i>   | { | — Caractérisation de la structure du produit                           |
|                     |   | — Aide à la perception sensorielle (subjective)                        |
|                     |   | — Influence de paramètres externes (température, etc.)                 |
| <i>Les procédés</i> | { | — Fabrication (agitation de grands volumes, échanges thermiques, etc.) |
|                     |   | — Conditionnement (lors du pompage, injection, coulage, etc.)          |

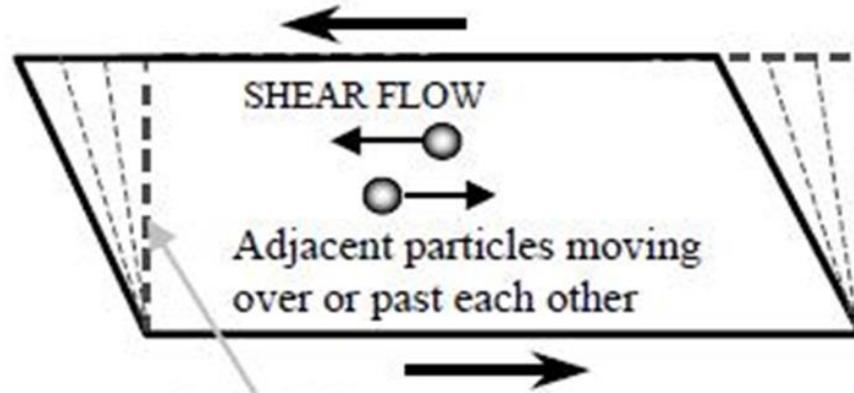
# Deux types de mesures rhéologiques

- Mesure en écoulement :
  - Mesure de la **viscosité**
  - Déformation continue de la structure de l'échantillon→ **Modification potentielle** de la structure due à l'expérimentateur
  
- Mesure en oscillation aux faibles déformations :
  - Mesure de la **viscoélasticité**
  - Étude de la structure de l'échantillon au repos→ **Pas de modification** de la structure due à l'expérimentateur

# Définition de la viscosité de cisaillement

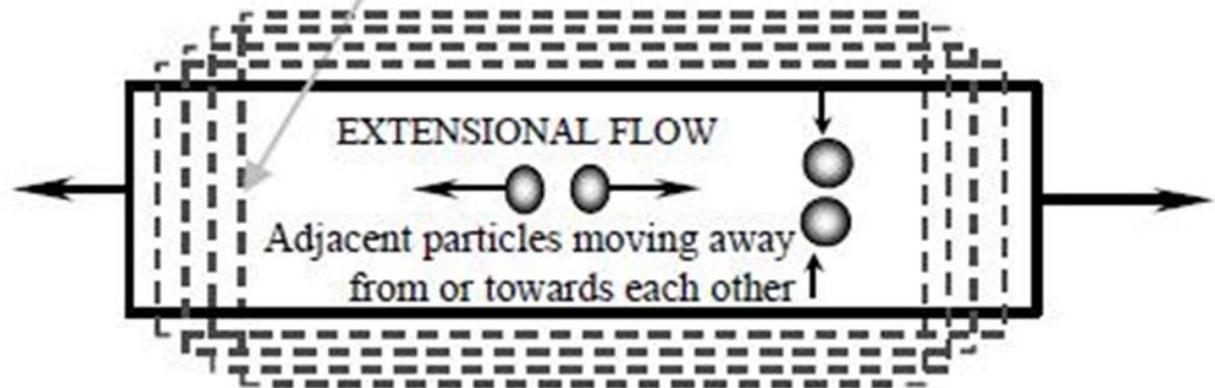
# Qu'est-ce que le cisaillement (shear) ?

Cisaillement



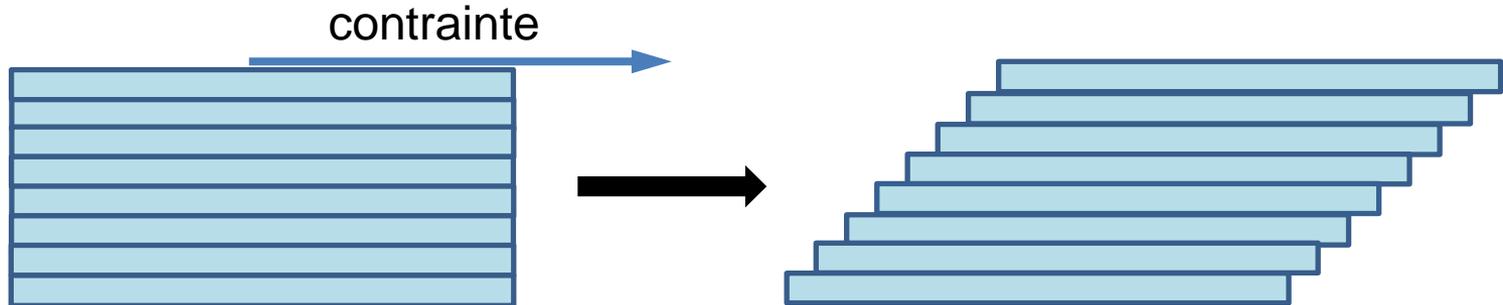
*original shape*

Élongation



# Qu'est-ce que le cisaillement (shear) ?

## Écoulement de cisaillement d'un matériau



*Écoulement engendré par une contrainte (i.e. une force par unité de surface) parallèle au sens de l'écoulement.*

# Qu'est-ce que qu'un régime laminaire ?

On s'intéresse à la mesure de la viscosité lorsque le liquide est soumis à des mouvements laminaires de cisaillement.

*Qu'est-ce qu'un régime laminaire ?* Un régime qui n'est pas turbulent !

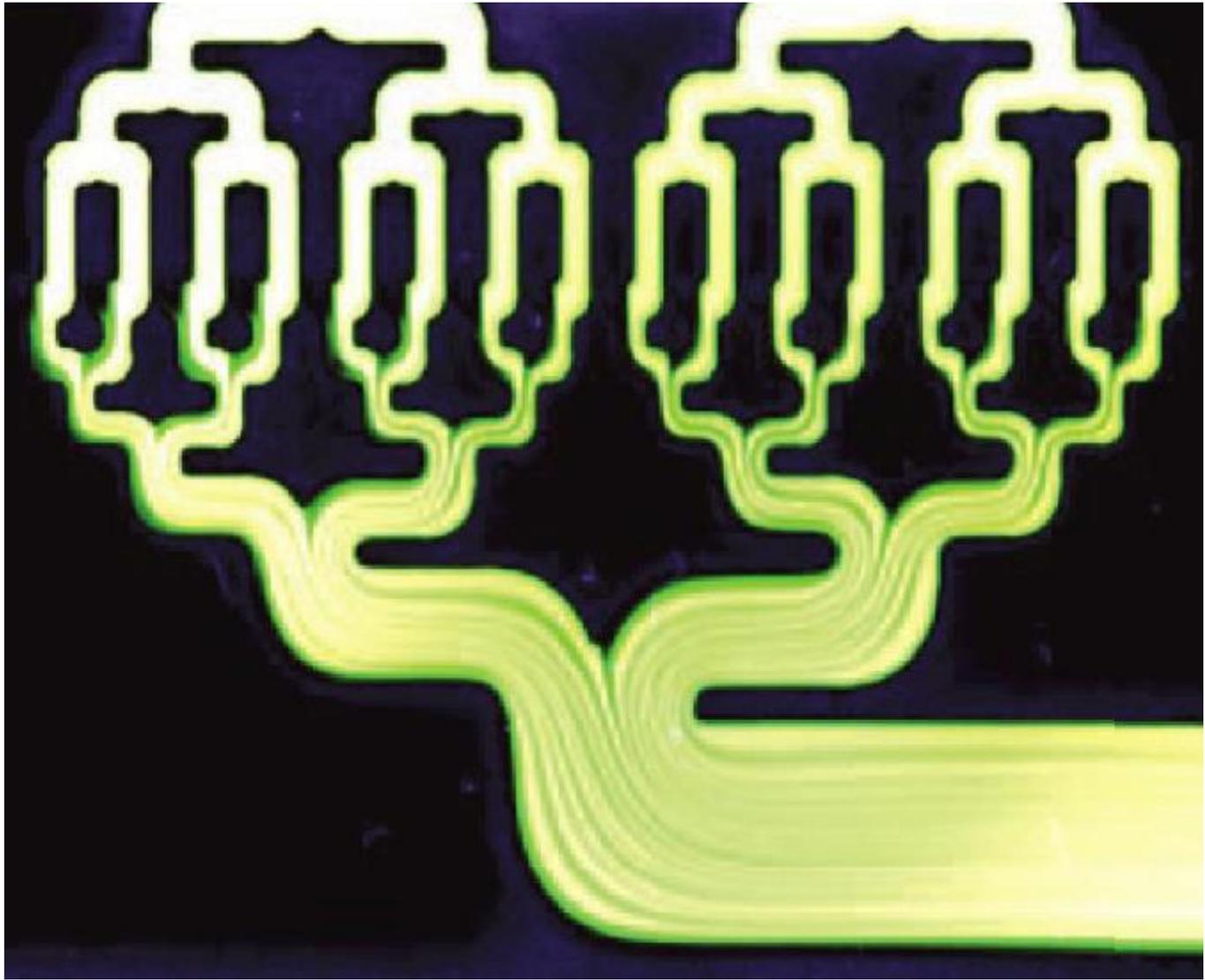
- Les couches de fluide se déplacent parallèlement les uns par rapport aux autres.
- Il n'y a pas d'échange de matière entre les couches, mais échange de quantité de mouvement

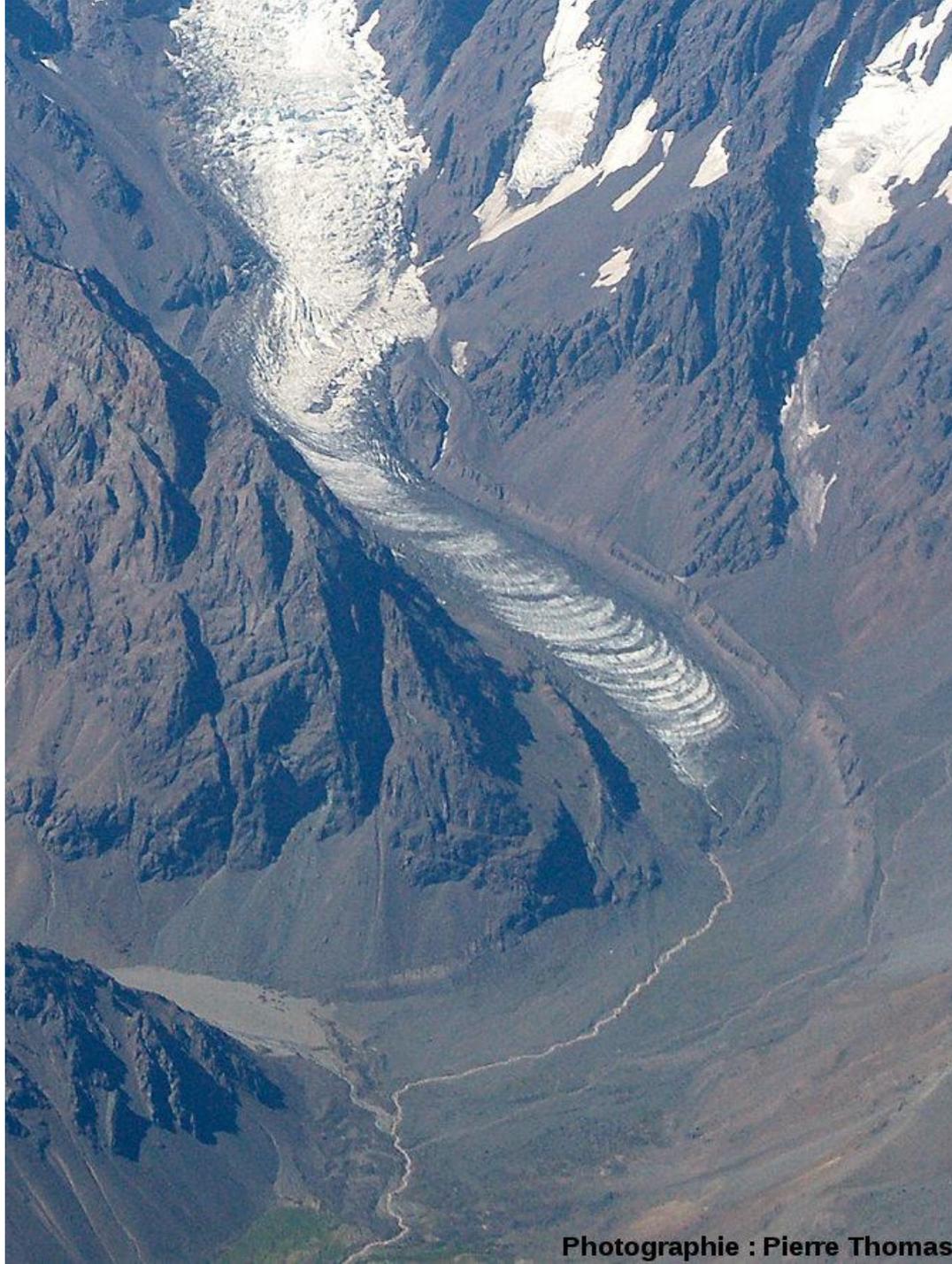
*Nombre permettant de savoir si un régime d'écoulement est laminaire ou turbulent : le nombre de Reynolds  $Re$ .*

$$Re = \frac{\text{effet inertiel}}{\text{effet visqueux}} = \frac{\rho \bar{v}^2}{\eta \frac{\bar{v}}{L}}$$

*soit*

$$Re = \frac{\bar{v}L}{\nu} = \frac{\rho \bar{v}L}{\eta}$$





Photographie : Pierre Thomas

Deux types d'écoulement de cisaillement importants en rhéologie :

- écoulement de Poiseuille ;
- écoulement de Couette.

# Deux types d'écoulement de cisaillement

## 1) Écoulement de Poiseuille

Le fluide s'écoule entre des parois fixes.

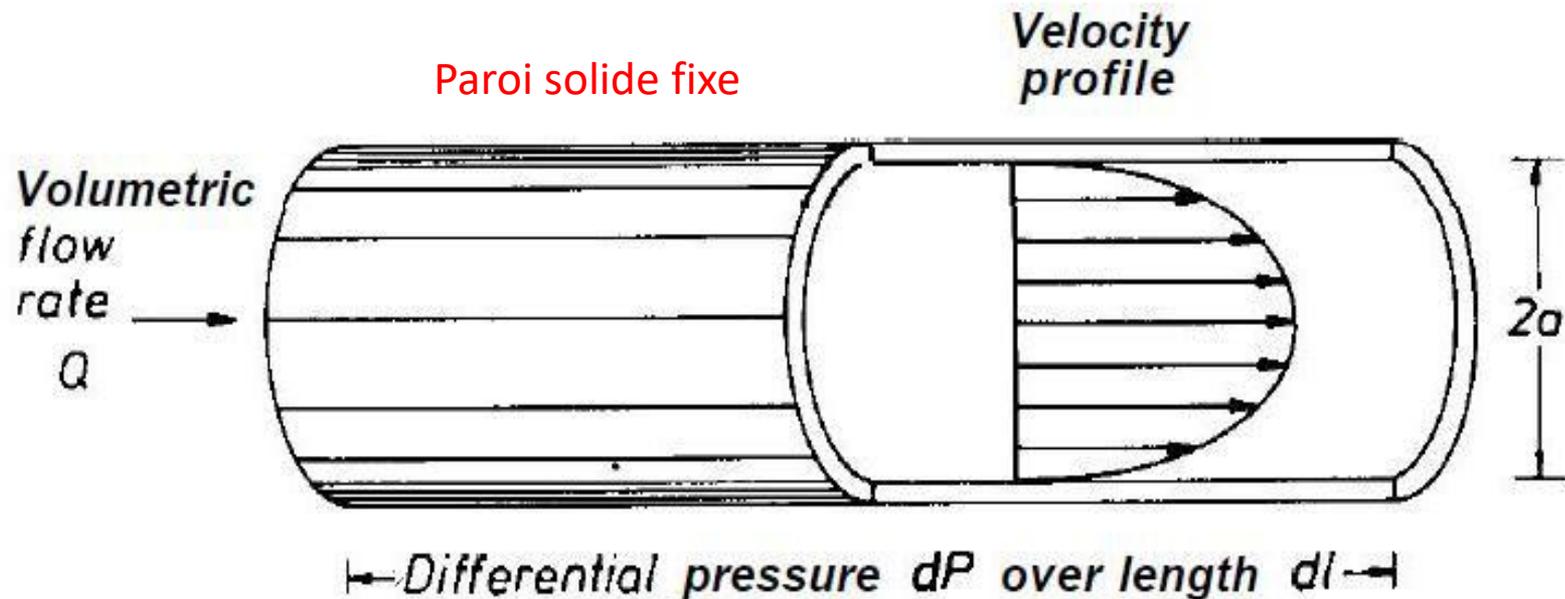


Figure : Écoulement de Poiseuille cylindrique

Dans un viscosimètre capillaire, l'écoulement est un écoulement de Poiseuille cylindrique.

**Hypothèse de non-glissement aux parois : la couche de fluide en contact avec une paroi possède la même vitesse que cette paroi.**

# Deux types d'écoulement de cisaillement

## 2) Écoulement de Couette

Le fluide s'écoule entre une paroi fixe et une paroi mobile (ou deux parois mobiles qui sont à des vitesses différentes)

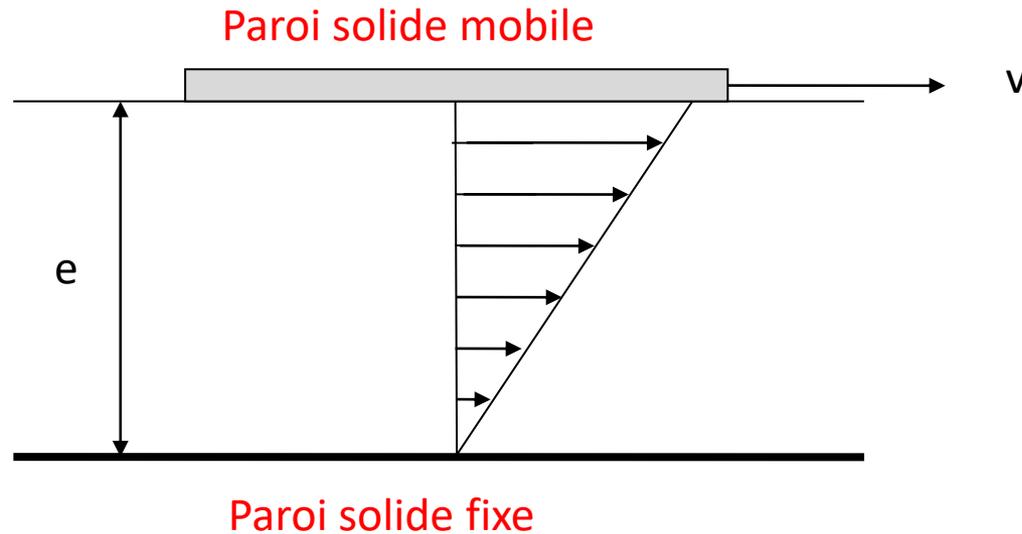


Figure : Écoulement de Couette plan

(Écoulement de Couette cylindrique : écoulement entre cylindres concentriques)

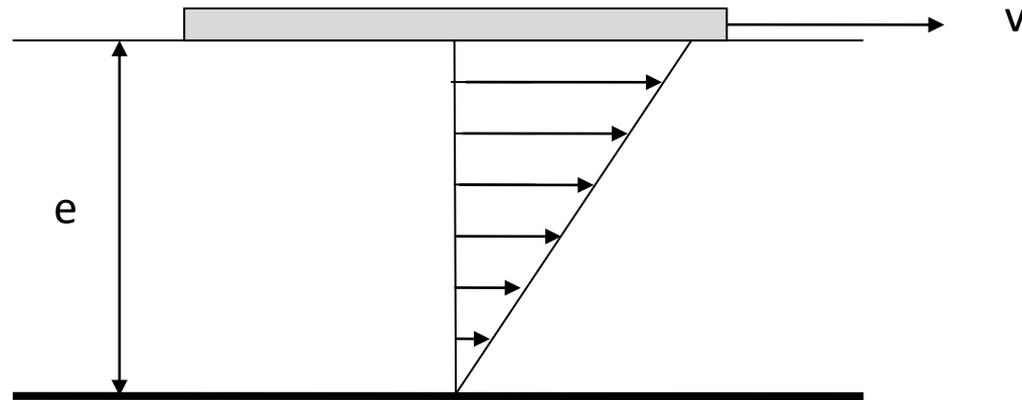
Dans un rhéomètre rotatif, l'écoulement est un écoulement de Couette, plan ou cylindrique.

**Hypothèse de non-glissement aux parois : la couche de fluide en contact avec une paroi possède la même vitesse que cette paroi.**

# Comment définir la viscosité ?

Comment définir quantitativement la viscosité ?  
Avec quels paramètres physiques ?

Partons d'un écoulement de Couette (plan).



# Comment définir la viscosité ?

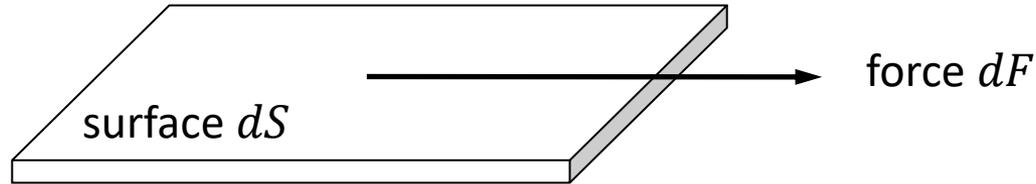
**Contrainte de cisaillement  $\tau$**   
**(shear stress)**

$$\tau = \frac{dF}{dS}$$

Unité SI :  $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ , ou Pa

Unité CGS :  $\text{dyne}\cdot\text{cm}^{-2} = 0.1 \text{ Pa}$

Autre notation:  $\sigma$

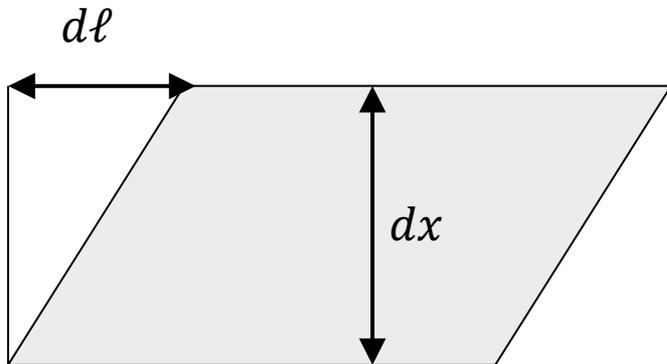


**Déformation de cisaillement  $\gamma$**

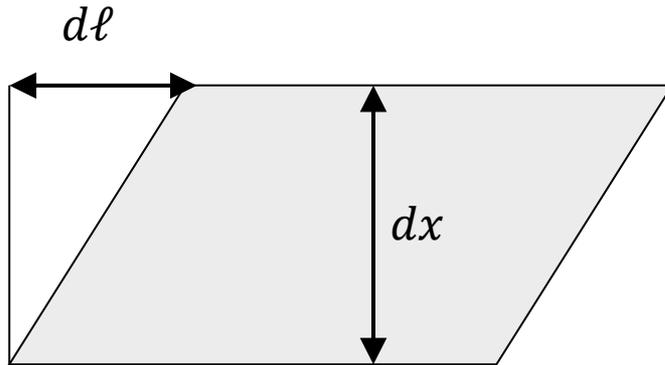
$$\gamma = \frac{d\ell}{dx}$$

Pas d'unité

Autre notation:  $\varepsilon$



# Comment définir la viscosité ?



**Taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$**   
(*shear rate*)

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv}{dx}$$

Unité SI :  $s^{-1}$

Autre notation :  $\dot{\epsilon}$

Autre dénomination : vitesse de déformation, vitesse de cisaillement, taux de cisaillement, gradient de vitesse.

Démonstration :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{d\ell}{dx} = \frac{d}{dx} \frac{d\ell}{dt} = \frac{dv}{dx}, \text{ avec } v = \frac{d\ell}{dt} \text{ (vitesse de la couche supérieure)}$$

# Exemples d'application du taux de cisaillement

— *Mouvement plan (échantillon entre plaque supérieure mobile et plaque fixe)*

$$\dot{\gamma} \simeq \frac{\text{vitesse maximum}}{\text{épaisseur de l'échantillon}}$$

Ici, la vitesse maximum est la vitesse de la plaque supérieure.

— *Etalement d'une crème*

$$\dot{\gamma} \simeq \frac{\text{vitesse de la main}}{\text{épaisseur de l'échantillon}}$$

— *Application d'une crème cosmétique : 10 à 10<sup>5</sup> s<sup>-1</sup>*

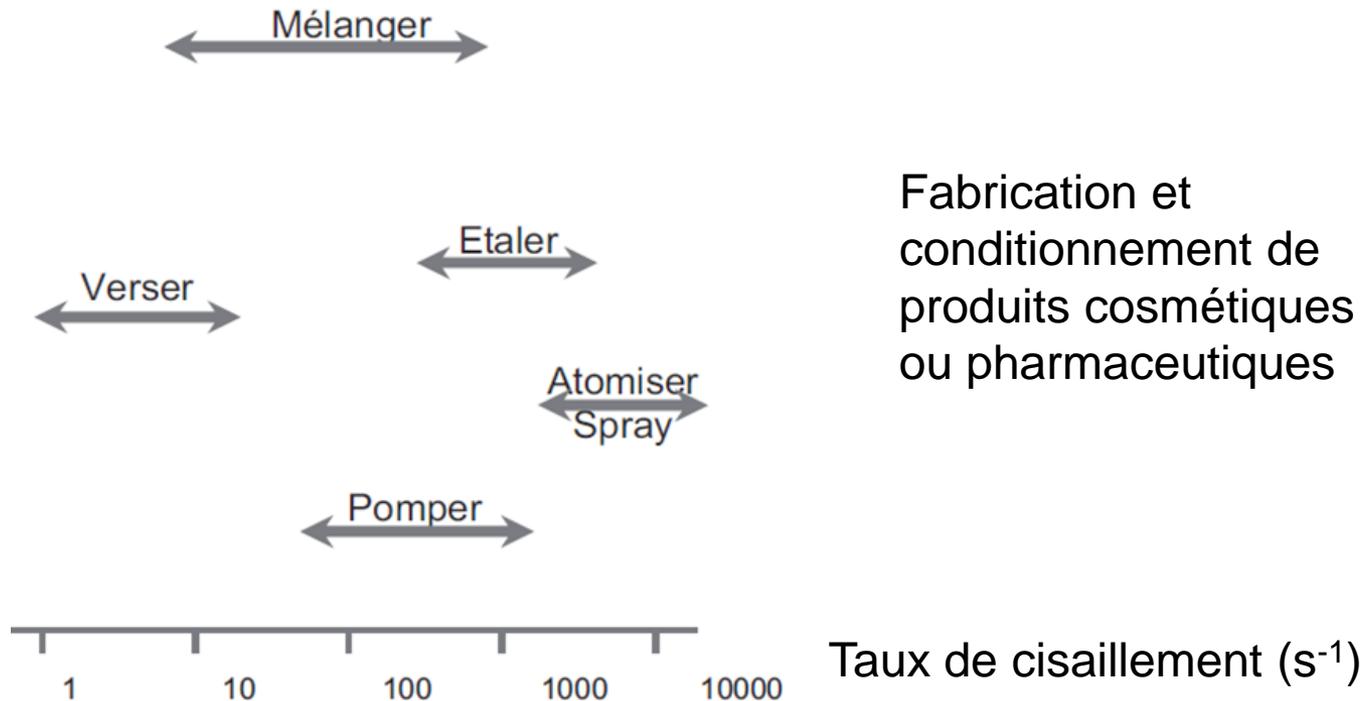
Lors de l'application cutanée, l'épaisseur d'une crème peut varier typiquement entre 10 μm et 1 mm. La vitesse d'application, elle, peut varier entre 1 cm.s<sup>-1</sup> et 1 m.s<sup>-1</sup>. La vitesse de cisaillement peut donc varier couramment entre 10 s<sup>-1</sup> et 10<sup>5</sup> s<sup>-1</sup>.

— *Symétrie cylindrique*

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

— *Rhéomètre rotatif : 10<sup>-5</sup> à 10<sup>4</sup> s<sup>-1</sup>*

| $\dot{\gamma}$ en $s^{-1}$ | Phénomènes associés                        |
|----------------------------|--|
| $10^{-6}$ à $10^{-4}$      | Sédimentation de particules colloïdales    |
| $10^{-4}$ à $10^{-2}$      | Sédimentation de particules macroscopiques |
| $10^1$ à $10^3$            | Fabrication, mélange                       |
| $10^2$ à $10^4$            | Conditionnement                            |
| $10^1$ à $10^5$            | Applications de crèmes ou de lotions       |
| $10^3$ à $10^5$            | Broyage                                    |



# Comment définir la viscosité ?

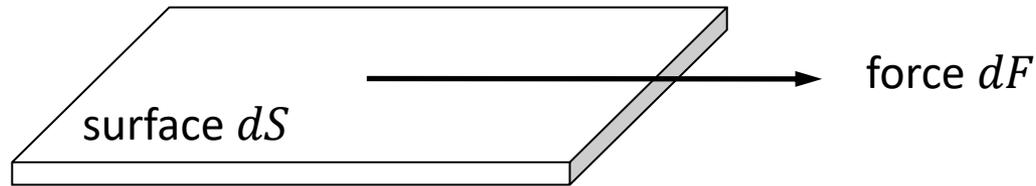
**Contrainte de cisaillement  $\tau$**   
(shear stress)

$$\tau = \frac{dF}{dS}$$

Unité SI :  $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ , ou Pa

Unité CGS :  $\text{dyne}\cdot\text{cm}^{-2} = 0.1\text{Pa}$

Autre notation:  $\sigma$

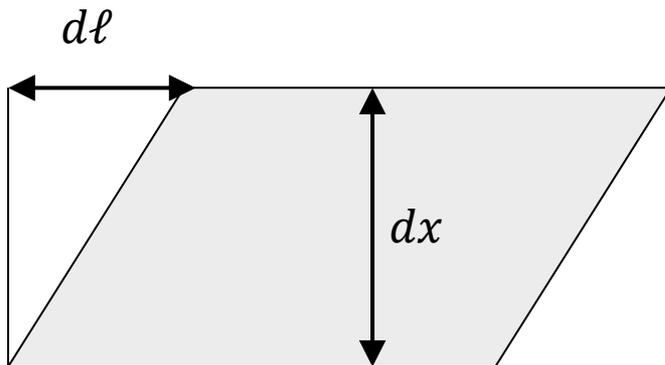


**Taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$**   
(shear rate)

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv}{dx}$$

Unité SI :  $\text{s}^{-1}$

Autre notation :  $\dot{\epsilon}$



# Comment définir la viscosité ?

## Viscosité dynamique de cisaillement $\eta$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

ou  $\tau = \eta \dot{\gamma}$

Unités SI : Pa.s, or PI (Poiseuille)  
1 PI = 1 Pa.s

Unité CGS: Poise, notée P ou Po  
(conversion: 1 Pa.s = 10 P,  
ou 1 mPa.s = 1 cP)

Autre notation :  $\mu$

Exemples, à 20 °C :

|               |   |
|---------------|---|
| Eau           | $\eta \approx 1 \text{ mPa.s (= 1 cP)}$ |
| Huile d'olive | $\eta \approx 80 \text{ mPa.s}$         |

# Comment définir la viscosité ?

## Shear kinematic viscosity $\nu$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

SI units:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

CGS units: Stokes, noted St  
(conversion:  $1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  
or  $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

Examples:

Water:  $\nu \approx 1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  at  $20 \text{ }^\circ\text{C}$

$\nu$  quantifies the momentum diffusion through the layers of the fluid.

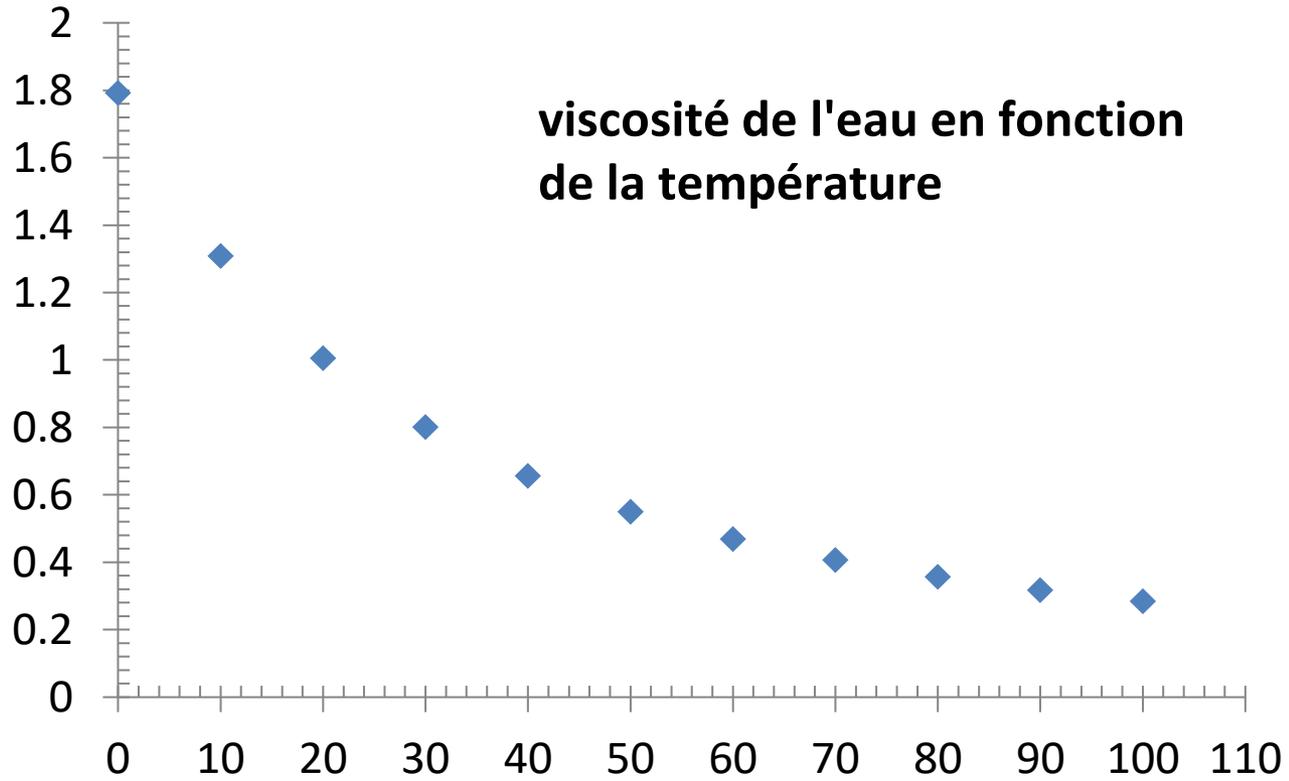
# Influence de la température sur la viscosité

# Influence de la température sur la viscosité

Généralement, pour  $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ , on a :

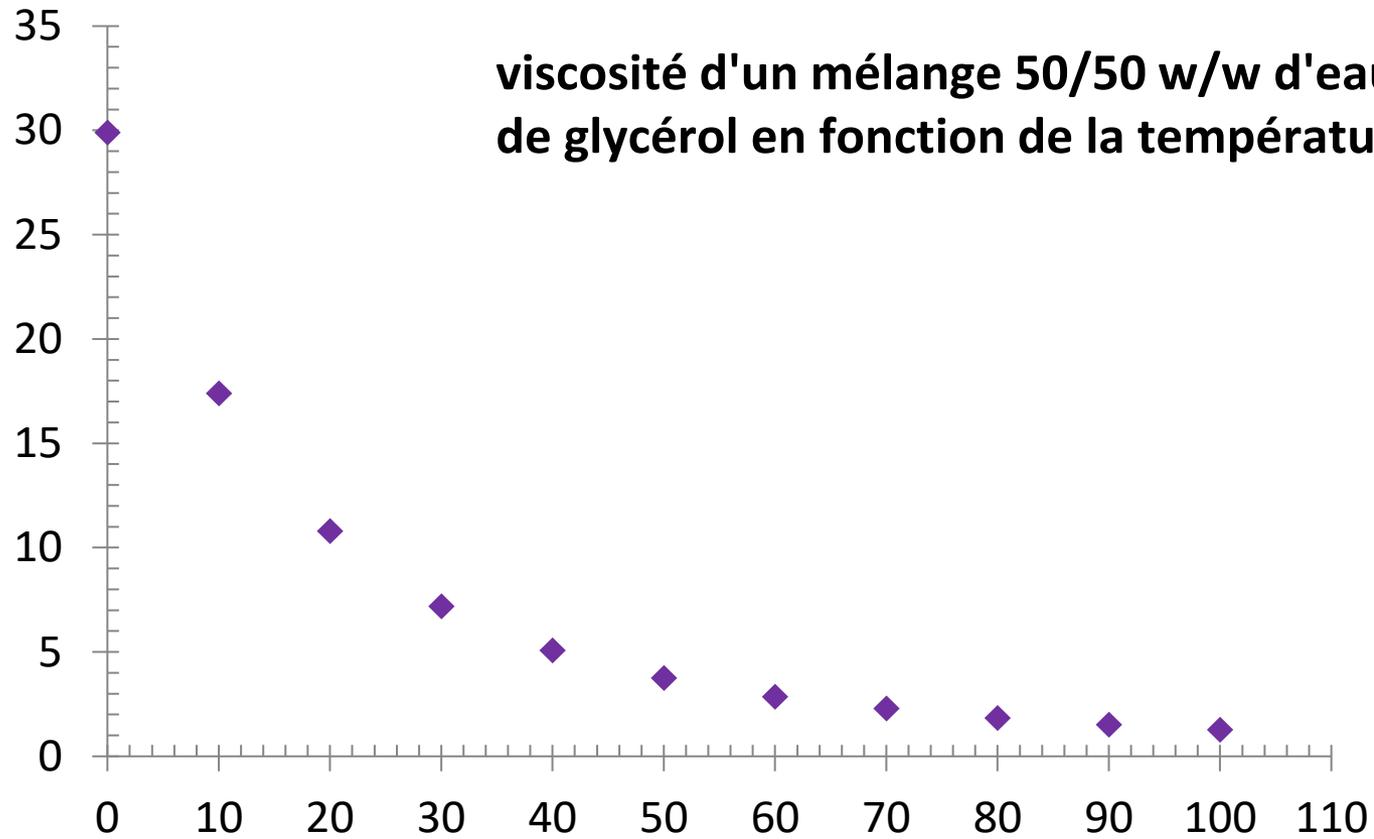
$$0,5 \% \leq \frac{\Delta\eta}{\eta} \frac{1}{\Delta T} \leq 10 \%$$

**viscosité (mPa.s)**



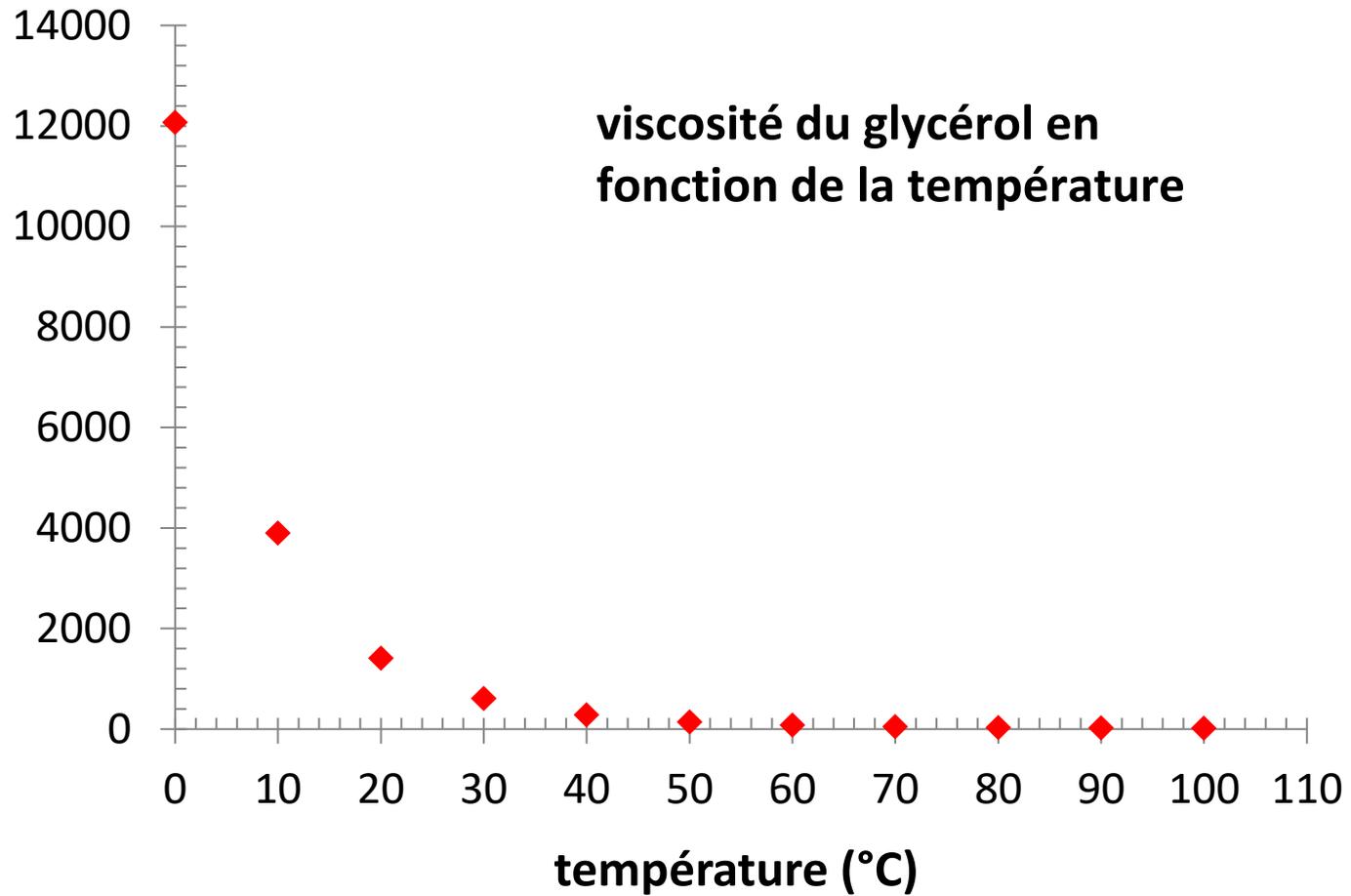
**température (°C)**

**viscosité (mPa.s)**

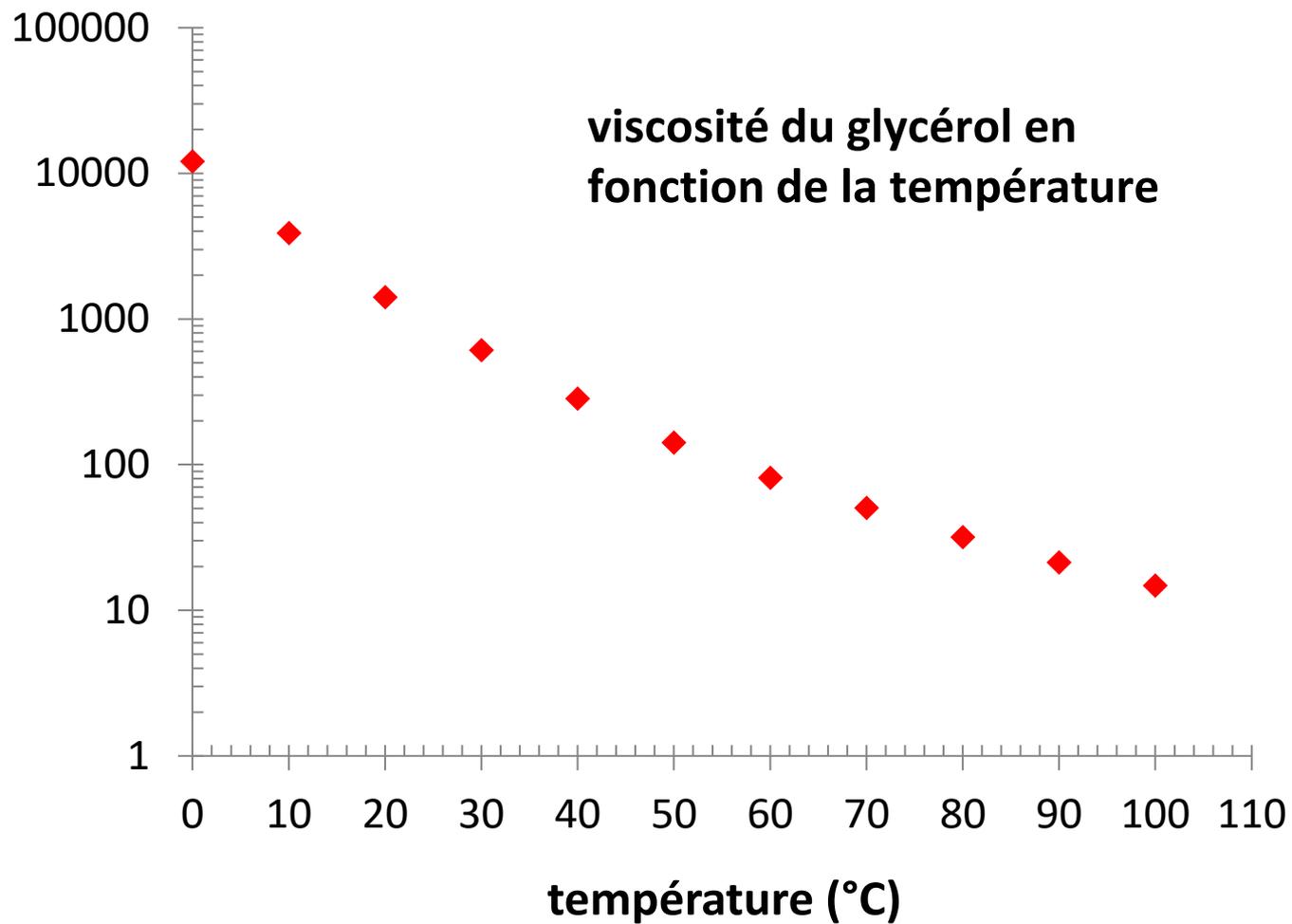


**température (°C)**

**viscosité (mPa.s)**

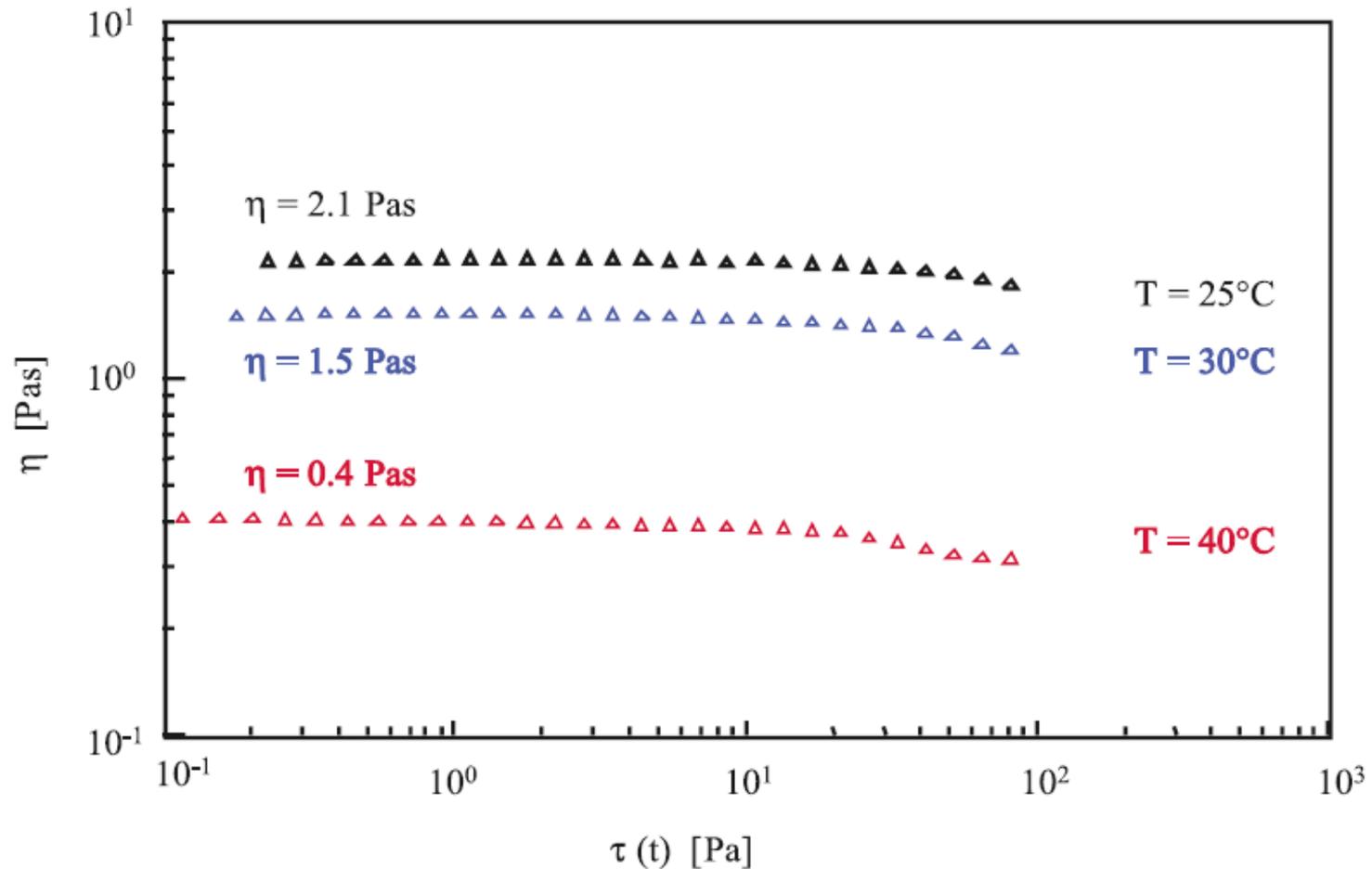


**viscosité (mPa.s)**



# Effet de la température

Dépendance de la viscosité d'une émulsion cosmétique en fonction de la température



## **Excellent book for a first approach in rheology:**

- Barnes H. A., *A handbook of elementary rheology*, The University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2000

## **More advanced than the previous one, but also very pedagogical:**

- Barnes H. A., Hutton J. F., Walters K., *An introduction to rheology*, Elsevier, 1989

## **Lots of interesting informations, particularly on rheometry and protocols:**

- Mezger T.G., *The Rheology Handbook* (4<sup>th</sup> edition), Vincentz, 2014

## **Short book with many applications:**

- Brummer R., *Rheology Essentials of Cosmetic and Food Emulsions*, Springer, 2005

## **Short but informative introductions to rheology for pharmacists can also be found in these books:**

- Sinko P. J., *Martin's Physical Pharmacy and Pharmaceutical Sciences 7th Edition*, LWW, 2016
- Mansoor A., Cook T. J., Mobley C., *Applied Physical Pharmacy 2nd Edition*, McGraw Hill Education, 2014
- MA J. K. H., Hadzija B., *Basic Physical Pharmacy*, Jones and Bartlett Pub, 2009

## In French :

### **Introductory book to the concepts in rheology:**

- Couarraze G., Grossiord J.-L., Huang N., *Initiation à la rhéologie*, Tec & Doc Lavoisier, 2014

### **Excellent introductory subchapter on non-Newtonian fluids:**

- Guyon E., Hulin J.-P., Petit L., *Hydrodynamique physique* (3<sup>rd</sup> edition), EDP Sciences, 2012

### **Pedagogical introduction to rheology with many thoroughly developed exemples:**

- Grossiord J.-L., Ponton A. (coordinateurs), *Comprendre la rhéologie: de la circulation du sang à la prise du béton*, EDP Sciences, 2002

### **A book about rheometry, with recent experimental and theoretical developements:**

- Grossiord J.-L., Ponton A. (coordinateurs), *La mesure en rhéologie*, EDP Sciences, 2013

### **Book with a focus on the physical aspects of rheology:**

- Coussot P., *Rhéophysique : la matière dans tous ses états*, EDP Sciences, 2014

### **Advanced book with interesting mathematical developments:**

- Oswald P., *Rhéophysique*, Belin, 2005