

# UE 7 – Physique et Biophysique

## Mécanique des fluides

10 heures de cours - 8 heures d'ED (4 séances)

1. Caractéristiques et propriétés	(4 heures)	Thierry Ruiz
2. Statique et dynamique	(3 heures)	Christelle Wisniewski
3. Applications à la biophysique	(3 heures)	Pierre-Olivier Kotszki

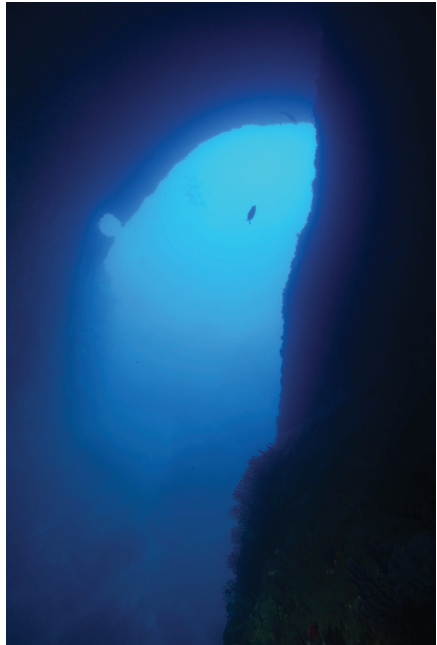
Thierry Ruiz  
UFR des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques  
*thierry.ruiz@umontpellier.fr*

**2020/21**



# 1. Caractéristiques et propriétés des fluides

→ 4h CM et 2h ED 5



## Partie 1 Qu'est-ce qu'un fluide ?

Dualité interactions/mobilité, notions de microstructure et de temps de relaxation.

## Partie 2 Les propriétés majeures des fluides

Pression, volume, masse volumique, loi des gaz parfaits, de Dalton, de Boyle-Mariotte.

## Partie 3 Les comportements rhéologiques

Notion de viscosité, rhéologie élémentaire, cisaillement, régimes d'écoulement.

## Partie 4 La tension de surface et la capillarité

Notion de tension de surface, Longueur capillaire, loi de Young-Laplace.

# Biblio/webographie sommaire

## Documents de cours

<https://www.techniques-ingenieur.fr/>

<https://video.umontpellier.fr/videos/>

Tag : mécanique des fluides, statique des fluides

## Physique des fluides

<https://www.lutetium.paris/fr/>

<https://www.youtube.com/leprojetlutetium>



## Epistémologie des fluides

<https://www.youtube.com/watch?v=2tDegfLrjBg>

Conférence de Étienne Guyon

# Partie 1

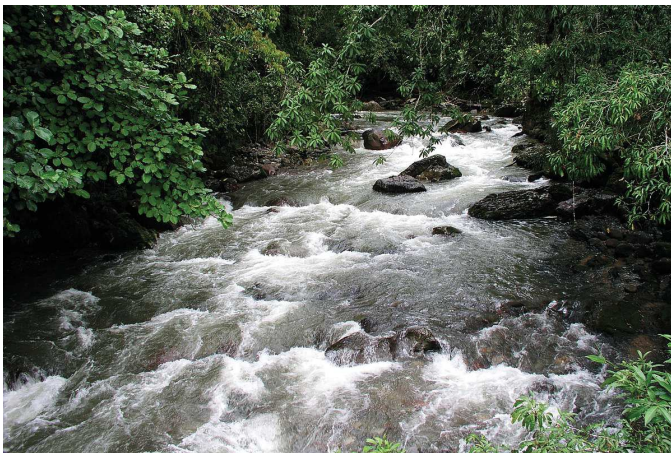
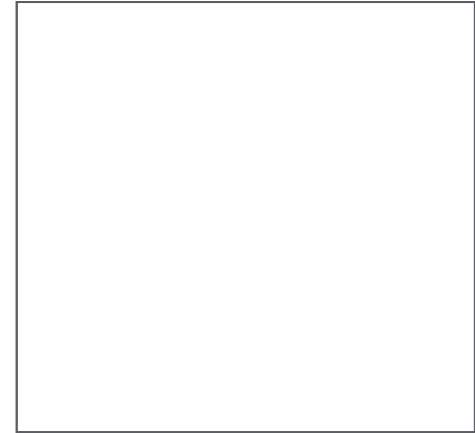
## Qu'est-ce qu'un fluide ?

- Notions de microstructure et de temps de relaxation
- Notions d'échelle spatio-temporelle
- Dualité interactions/mobilité





# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?



... « fluide » : (intuitivement) de la **matière en écoulement**...

# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

## Définition « classique »

« Se dit d'un corps dont les molécules ont peu d'adhésion et peuvent glisser librement les unes sur les autres (liquides) ou se déplacer indépendamment les unes des autres (gaz), de façon que le corps prenne la forme du vase qui le contient. »

Définition du Larousse

La notion classique de fluide fait référence à l'absence de « structure organisée » de la matière à l'échelle « microscopique » (des « particules » constitutives) autorisant donc les mouvements de grande amplitude.

→ Elle regroupe donc les états liquides et gazeux.

« Tout corps qui épouse la forme de son contenant (les liquides, les gaz) → opposé à *solide*. »

# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

Définition « classique »

- On appelle fluide un corps susceptible de s'écouler.
- Un fluide est ainsi déformable et sans forme propre.
- L'état fluide englobe donc principalement deux états physiques : l'état gazeux et l'état liquide.

**Fluide**  $\Leftrightarrow$  pas de forme macroscopique définie (car peu d'**interactions**)  
et qui s'écoule (**mobilité**).

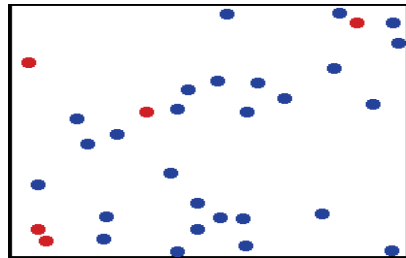
# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

Trois remarques à la définition « classique »

Fluide  $\Leftrightarrow$  pas de forme macroscopique définie (car peu d'interactions) et qui s'écoule (mobilité).

1. « sans forme propre (qui épouse la forme de son contenant) »

Un gaz occupe toute la forme du contenant sans pour autant avoir une forme lui-même.



**Echelle spatiale** : ex. les gouttes





# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

Trois remarques à la définition « classique »

**Fluide**  $\Leftrightarrow$  pas de forme macroscopique définie (car peu d'interactions) et qui s'écoule (mobilité).

2. « susceptible de s'écouler »  $\Rightarrow$  Capable de modifier sa forme pour épouser celle du récipient.

Cette action doit avoir une durée caractéristique.

**Echelle temporelle** : ex. les chats (!!!)

Marc-Antoine Fardin (Université Paris Diderot/CNRS)

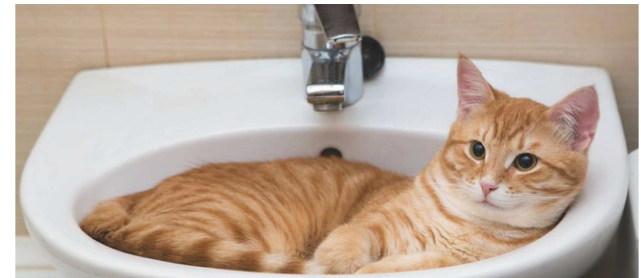
"les chats sont-ils liquides ou solides ?"

Les chats peuvent adapter leur forme au récipient...

...si on leur laisse suffisamment de temps.

En rhéologie cette durée est appelée le **temps de relaxation**.

$\rightarrow$  Déterminer si un matériau est fluide revient alors à savoir si on considère le matériau sur des temps plus petits ou plus grands que son temps de relaxation.

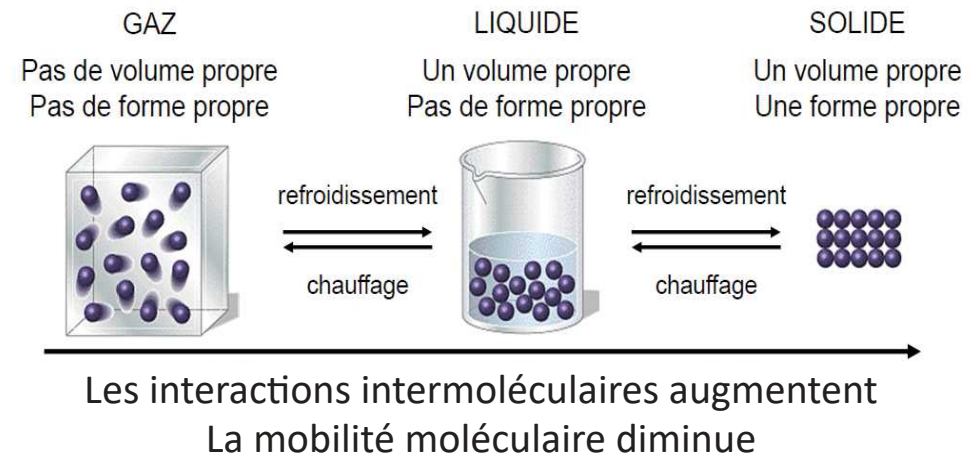
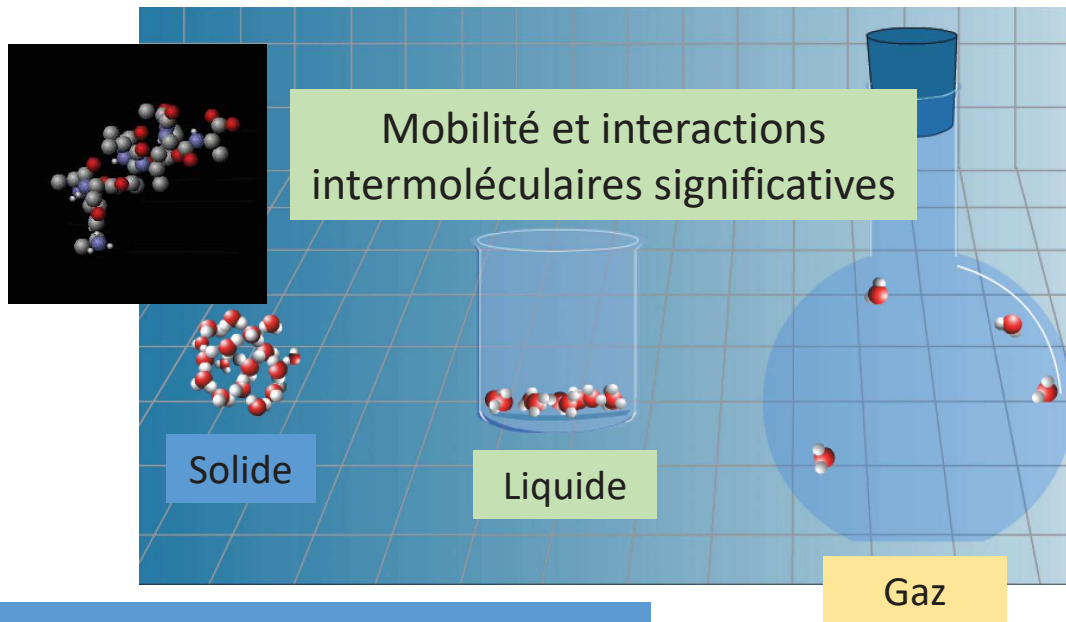


*Prix Ig Nobel de Physique 2017*

# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

Trois remarques à la définition « classique »

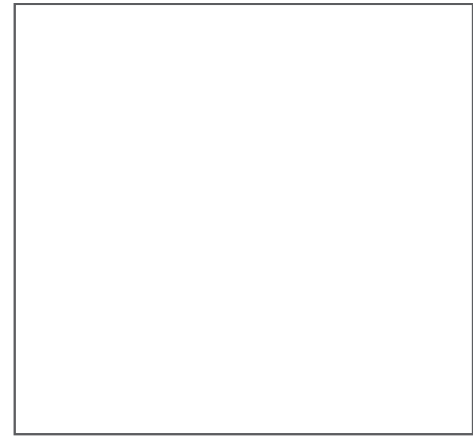
3. « La notion de fluide regroupe donc les états liquides et gazeux. »



... « fluide » : relatif à l'état de la matière plus qu'à sa nature moléculaire...**mais quel état ?**

# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

... « fluide » : (intuitivement) de la **matière en écoulement**... mais quel état ? ...plutôt liquide et gazeux...solide ?



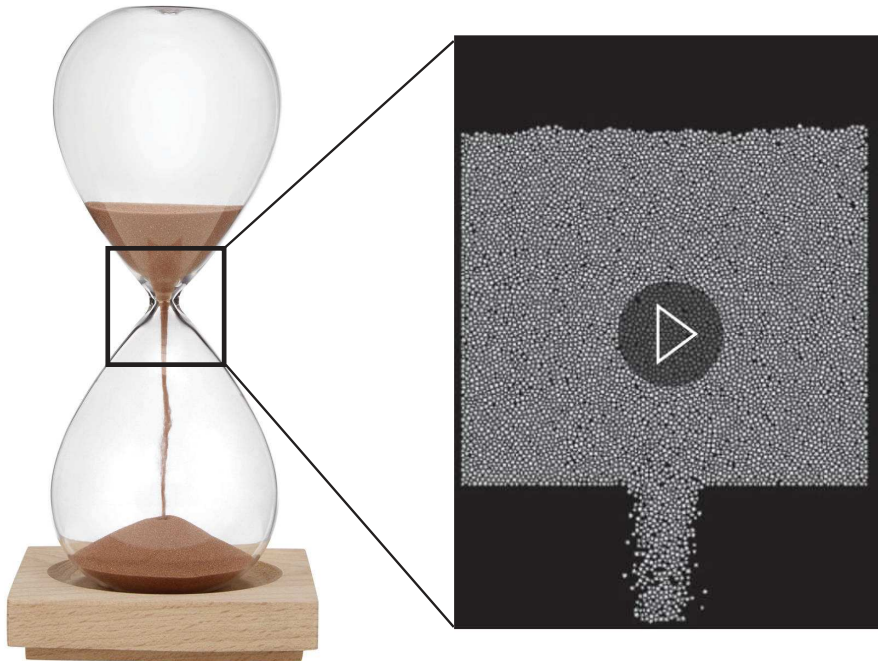
... « fluide » : état permettant une mobilité entre les constituants...mais à **quelle échelle** ? 11



# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

... « fluide » : (intuitivement) de la **matière en écoulement**...

... constituée de phases liquide et gazeuse ou solide ayant une **mobilité**  
à l'échelle de sa microstructure.



... « fluide » : substance ayant de la mobilité à l'échelle microstructurelle...**mais hétérogène ?**



# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

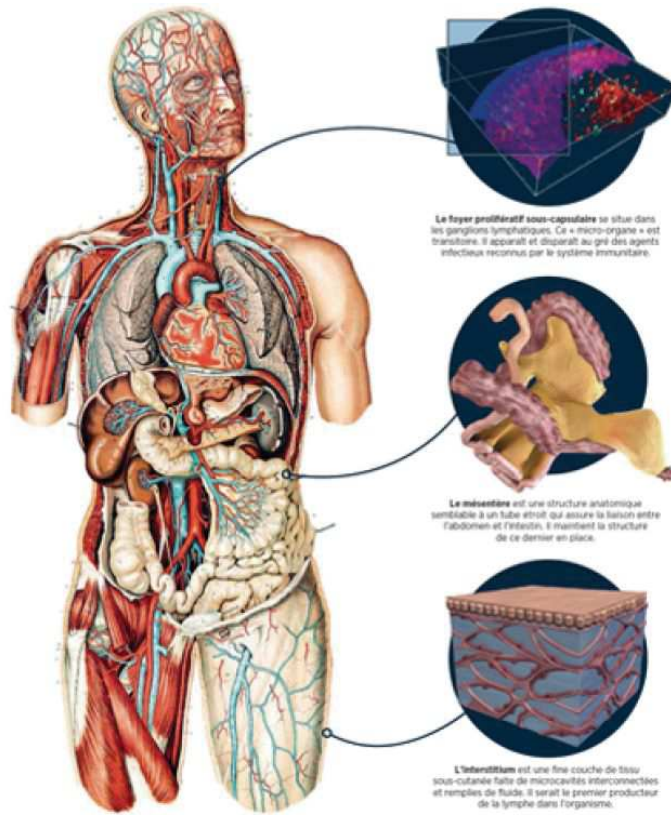
... « fluide » : **matière homogène ou hétérogène en écoulement**... constituée de phases liquide, gazeuse et/ou solide ayant une **mobilité** à l'échelle de sa microstructure.



... « fluide » : substance ayant de la mobilité à l'échelle microstructurelle...**mais tout s'écoule ?**

# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

... « fluide » : (intuitivement) de la **matière homogène ou hétérogène ayant une microstructure permettant la mobilité...**



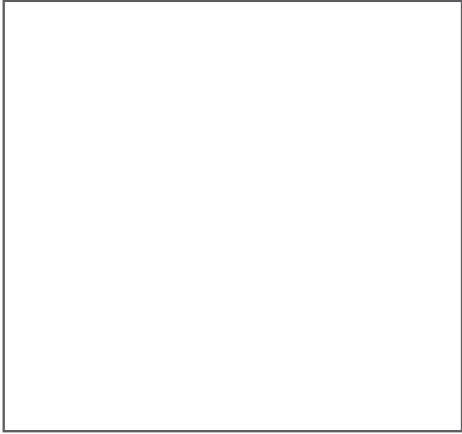
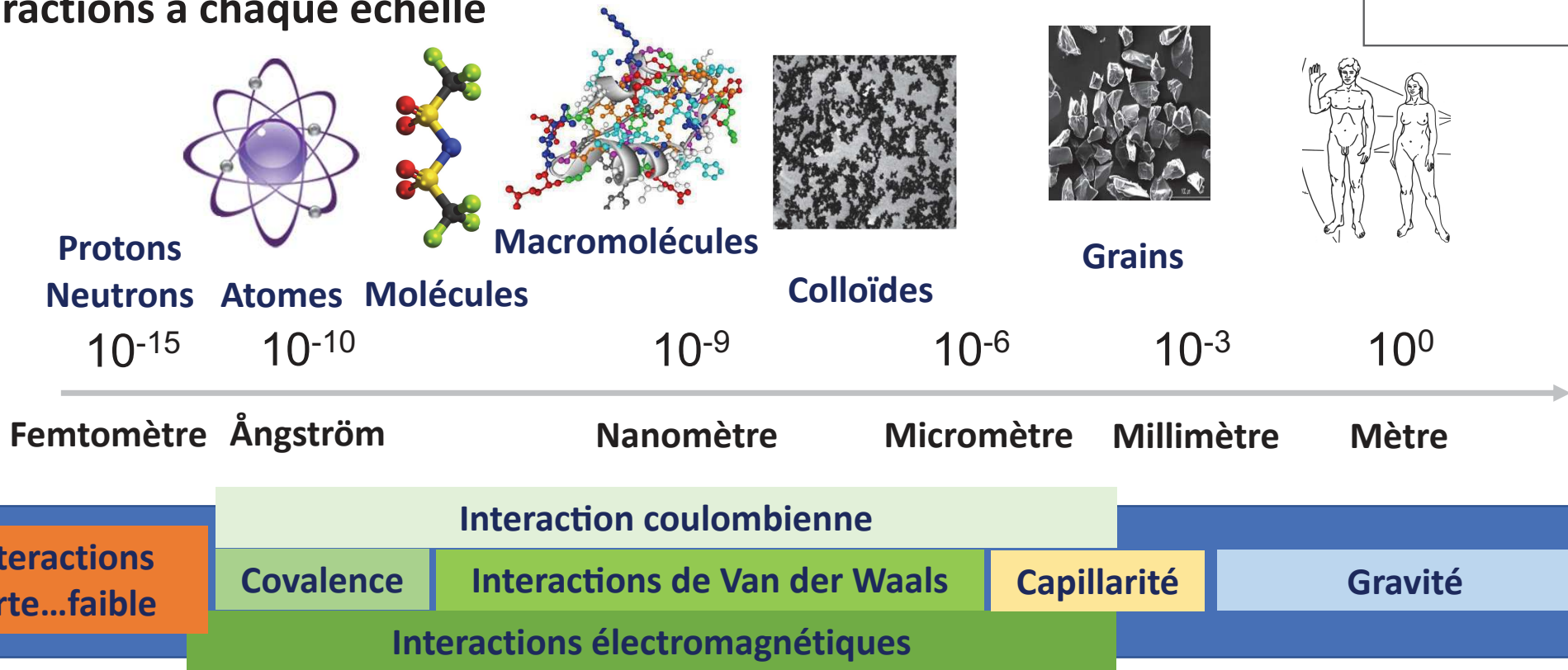
Ex. corps humain



# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

Notions de microstructure – échelle spatiale

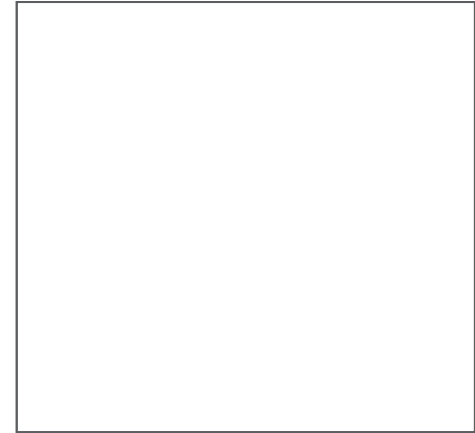
→ La structuration de la matière est fonction de la nature des interactions à chaque échelle



# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

Notions de microstructure – échelle spatiale

→ La microstructure des fluides peut être complexe ⇒ **rhéologie**



<b>Phase continue</b>	<b>Phase dispersée</b>	<b>Fluide</b>	<b>Exemples</b>
Gaz	Liquide	Aérosol	Brouillard, spray
Gaz	Solide	Fumée	Fumée, sable
Liquide	Gaz	Mousse	Ecume, mousse de bière
Liquide	Liquide	Emulsion	Vinaigrette, pommade
Liquide	Solide	Suspension	Boue, lait, encre
Solide	Gaz	Mousse solide	Polystyrène expansé
Solide	Liquide	Gel	Gel de polymères
Solide	Solide	Composite	Fibre de carbone



# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

On qualifie de « fluide », de la matière homogène ou hétérogène constituée de phases liquide, gazeuse et/ou solide ayant une mobilité à l'échelle de sa microstructure, autorisant un écoulement macroscopique plus ou moins rapide et prolongé sous certaines sollicitations.

→ Plus globalement la fluidité caractérise un comportement mécanique.  
Un fluide est un milieu qui adopte ce comportement sous certaines sollicitations

« ...écoulement macroscopique plus ou moins rapide et prolongé sous certaines sollicitations. »

Ex. conditions d'apparition et de la stabilité de vortex au cours de l'écoulement.



Notions de microstructure → échelle spatiale

Notions de temps de relaxation → échelle temporelle

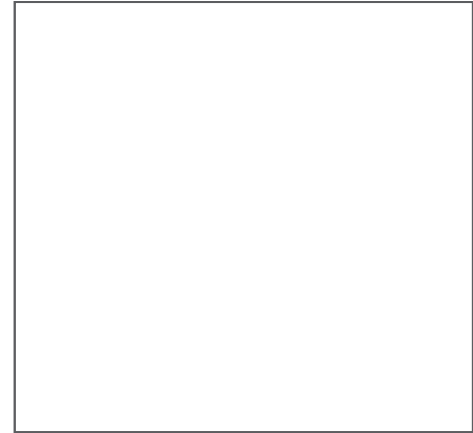


Echelle spatio-temporelle

# Qu'est-ce qu'un fluide ?

Notions de relaxation – échelle temporelle

L'eau est-elle indiscutablement un fluide ! (?)



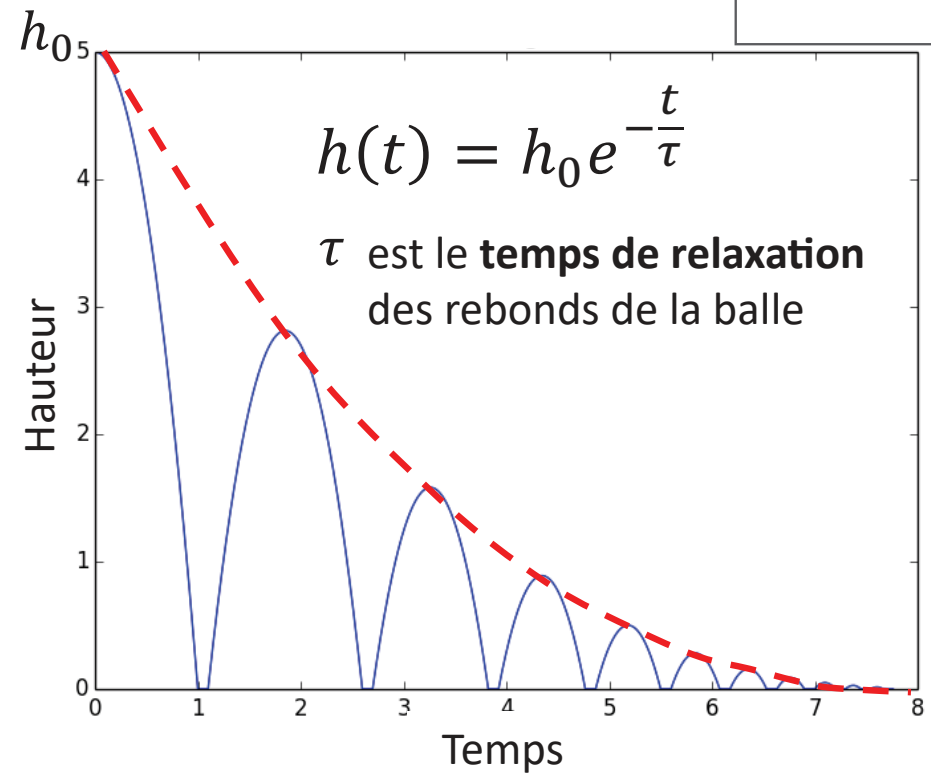
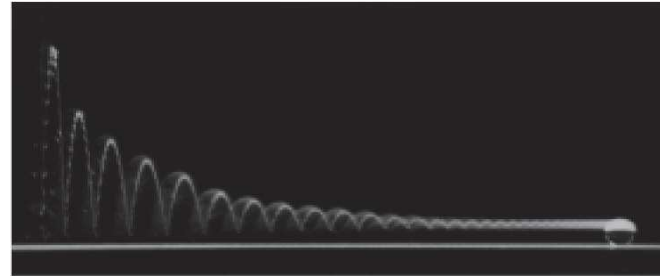
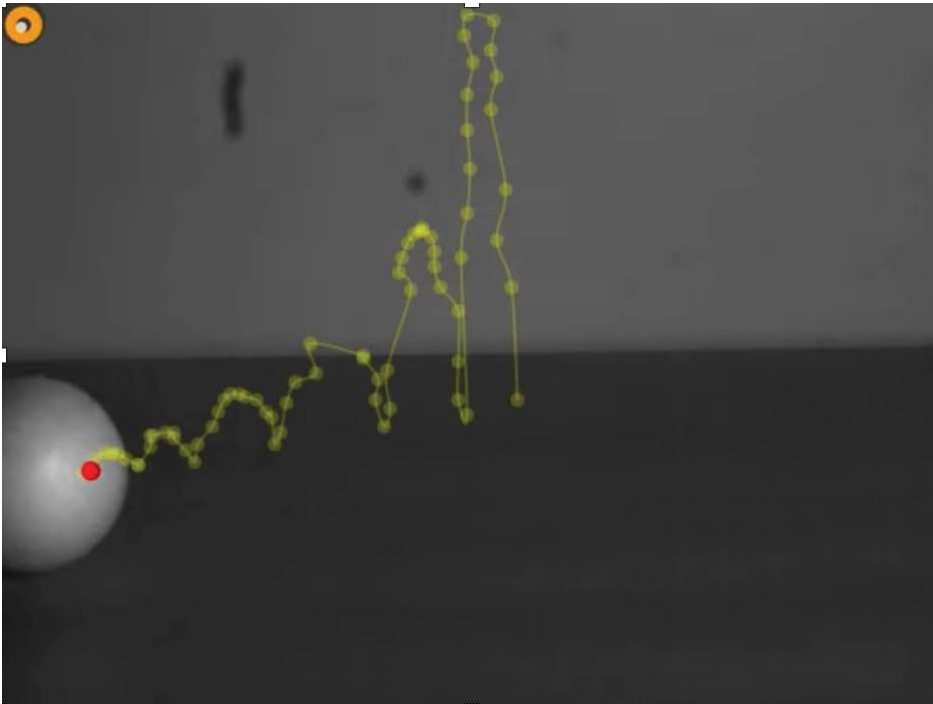
Vitesse de propulsion du jet d'eau :  
900 m/s à 4135 bars ( $\sim 3 \times$  la vitesse du son)  
1 200 m/s à 6150 bars ( $\sim 3 \times$  la vitesse du son)

<https://www.youtube.com/watch?v=sIEqXbXpfg>

# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

Notions de relaxation – échelle temporelle

Analogie avec le rebonds d'une balle sur un plan



# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

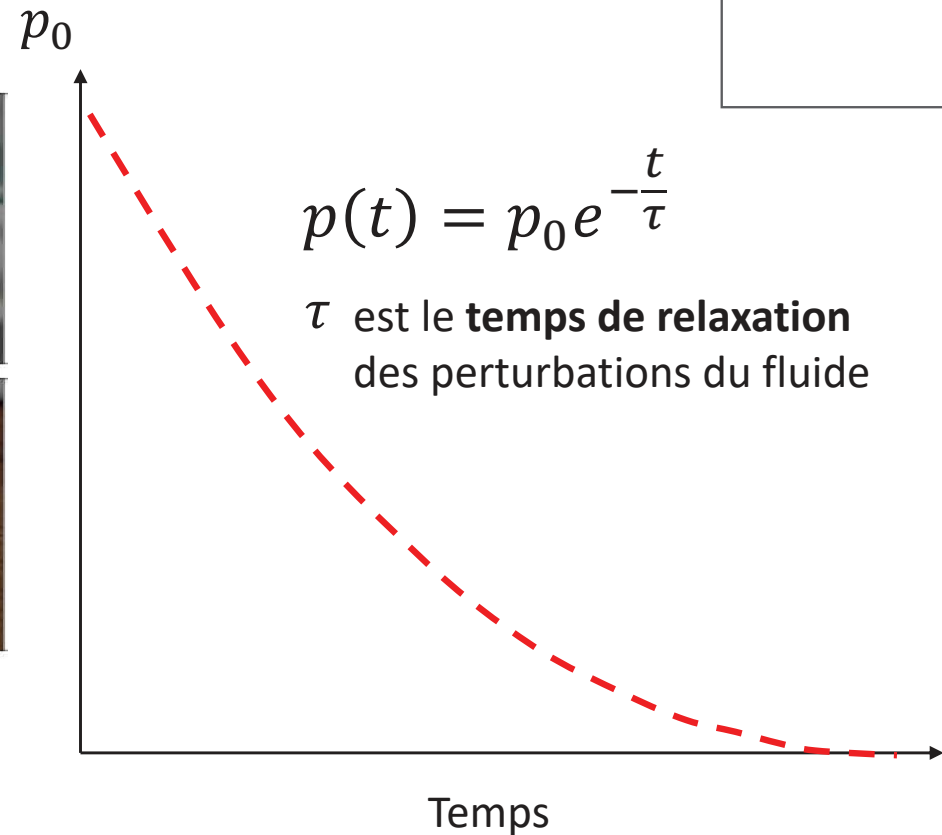
## Notions de relaxation – échelle temporelle

Relaxation d'un fluide suite à une sollicitation



→ Cinétique des déplacements microscopiques

⇒  $\tau$  relaxation





# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

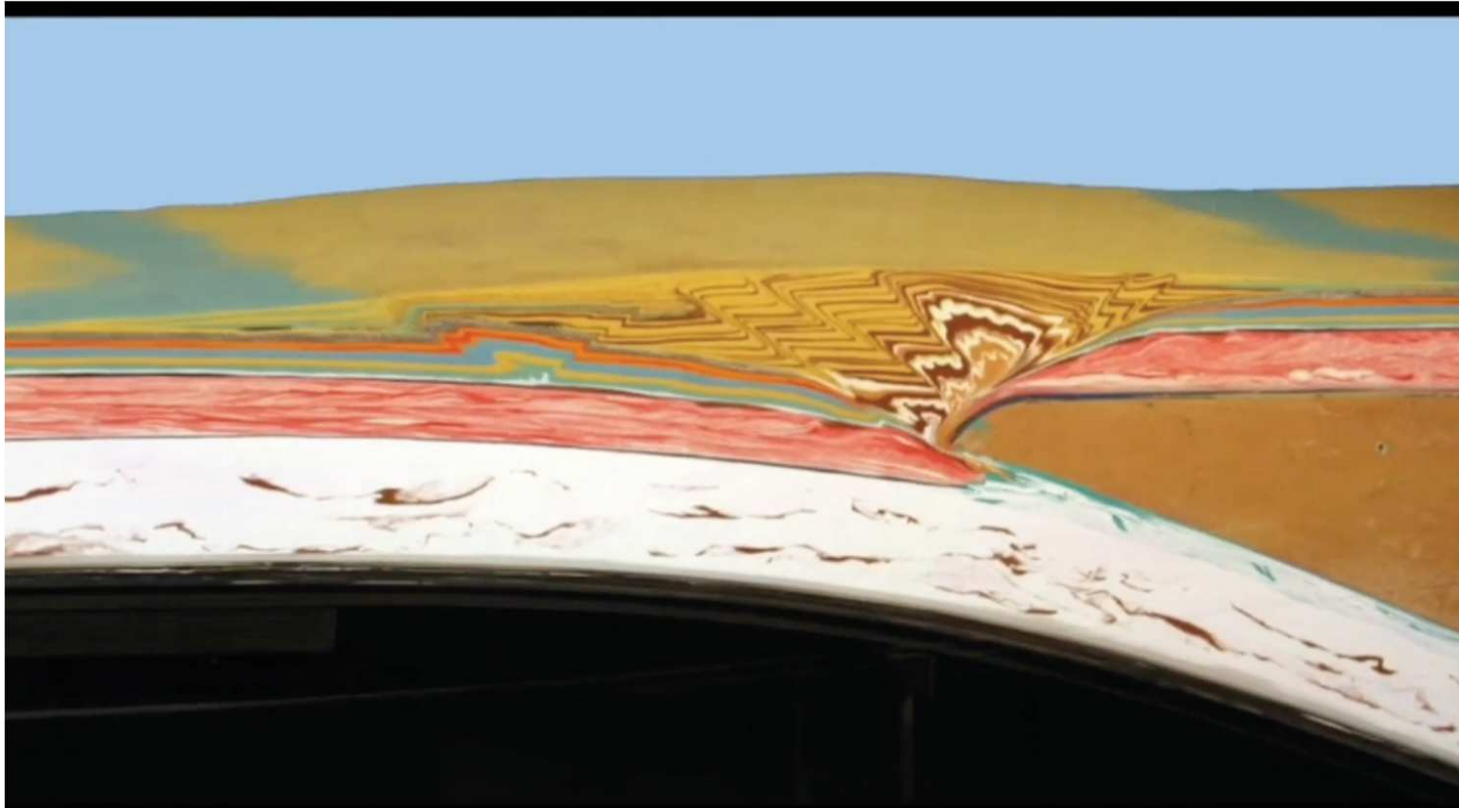
## Notions de relaxation – échelle temporelle

Matière	Temps d'écoulement de la matière $\tau_{relaxation}$
Eau	$10^{-12}$ s (picoseconde)
Pâte silicone	$\sim 1$ s $\rightarrow$ $\sim 1$ min
Bitume ( $-5^{\circ}C$ )	10 s
Bitume ( $40^{\circ}C$ )	$10^{-3}$ s (milliseconde)
Verre ( $300^{\circ}C$ )	$\sim 10^{17}$ s (10 milliards d'années)
Verre ( $500^{\circ}C$ )	$\sim 10^5$ s (1 jour)
Verre ( $600^{\circ}C$ )	$\sim 10^{-1}$ s
Manteau terrestre	$\sim 10^{14}$ s (10 millions d'années)

**Remarque** : les matières possédant un  $\tau_{relaxation}$  proche de la seconde ont un comportement mi-liquide/mi-solide (Ex. le slime).

# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

Notions de relaxation – échelle temporelle



**Exemple en tectonique**

→ simulation d'une subduction

Vidéo de Jacques Malavielle, CNRS/Université de Montpellier

# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

## Notions de relaxation – échelle temporelle

Exemple : expérience de la **goutte de poix**

démarrée en 1927 université du Queensland par le PR. Parnell

« ...démontrer à ses étudiants que certaines substances d'apparence solide sont en réalité des fluides de très haute viscosité. »



*Prix Ig Nobel de Physique 2005*



8<sup>ème</sup> goutte le 28 novembre 2000  
9<sup>ème</sup> goutte le 24 avril 2014  
viscosité ~230 milliards × celle de l'eau

# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

Notions de relaxation – échelle temporelle

**Le comportement d'un fluide dépend de son temps de relaxation...**

**...mais aussi du temps de sollicitation :  $\tau_{sollicitation}$**

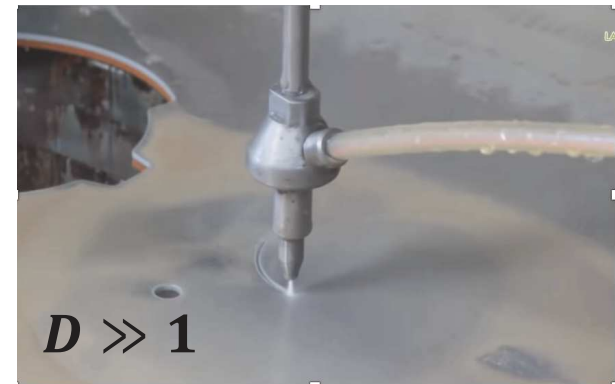
→ Le comportement dépend du nombre de Deborah :

$$D = \frac{\tau_{relaxation}}{\tau_{sollicitation}}$$

$D \ll 1$  Comportement « fluide » (visqueux)

$D \gg 1$  Comportement « solide » (élastique)

$D$  est un nombre sans dimension (adimensionnel)



Cas de l'eau  $\tau_{relaxation} = 10^{-12}$  s



# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

## Dualité interactions/mobilité

On appelle **fluide** un corps **homogène ou hétérogène** constituée de phases liquide, gazeuse et/ou solide ayant une **mobilité à l'échelle de sa microstructure** et **qui s'écoule sur une échelle de temps observable** sous une sollicitation mécanique appliquée avec un temps compatible.

**Fluides** : liquides, gaz, mais aussi des corps plus complexes tels que les polymères, les fluides biologiques ou alimentaires, les milieux granulaires...

Echelle d'observation spatio-temporelle ? Ex. sable

A l'échelle moléculaire

Solide cristallin

A l'échelle d'un grain

Solide cristallin

A l'échelle d'un tas

Fluide granulaire

A l'échelle d'une plage

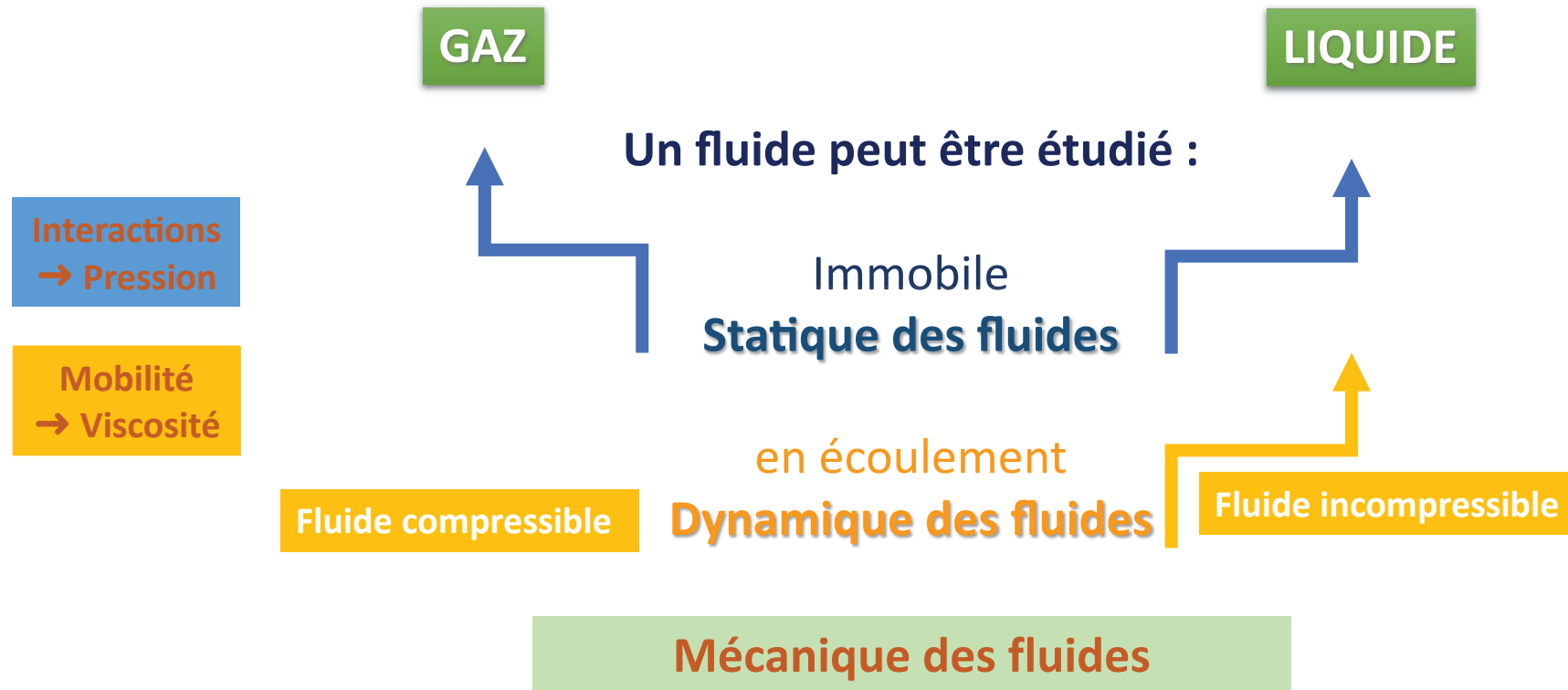
Solide homogène

**Remarque** : « fluide » caractérise plus le **comportement** d'un corps soumis à des sollicitations mécaniques, que son **état**.

# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

La mécanique des fluides – cours de Christelle Wisniewski

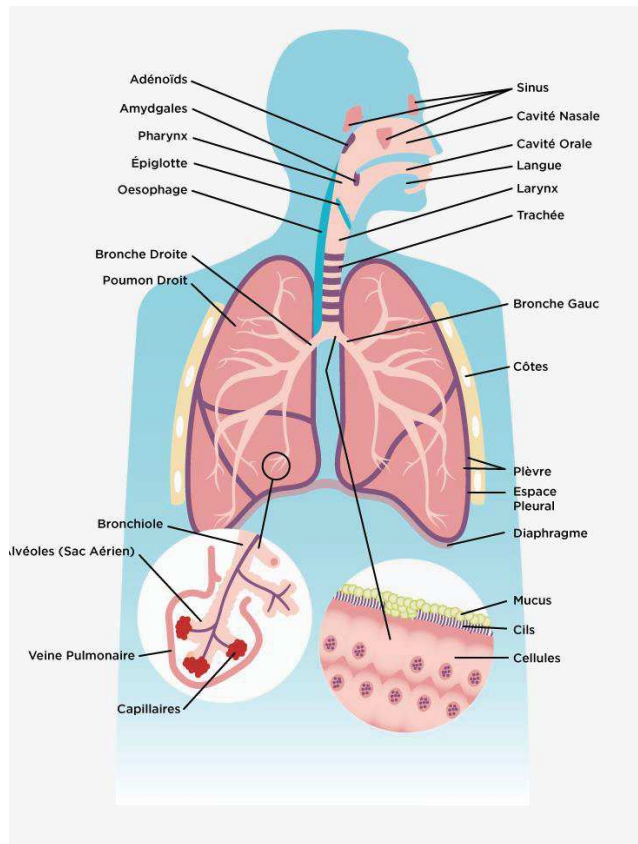
→ Restreint aux fluides incompressibles newtoniens  
(liquide « purs », ex. eau, huile...)



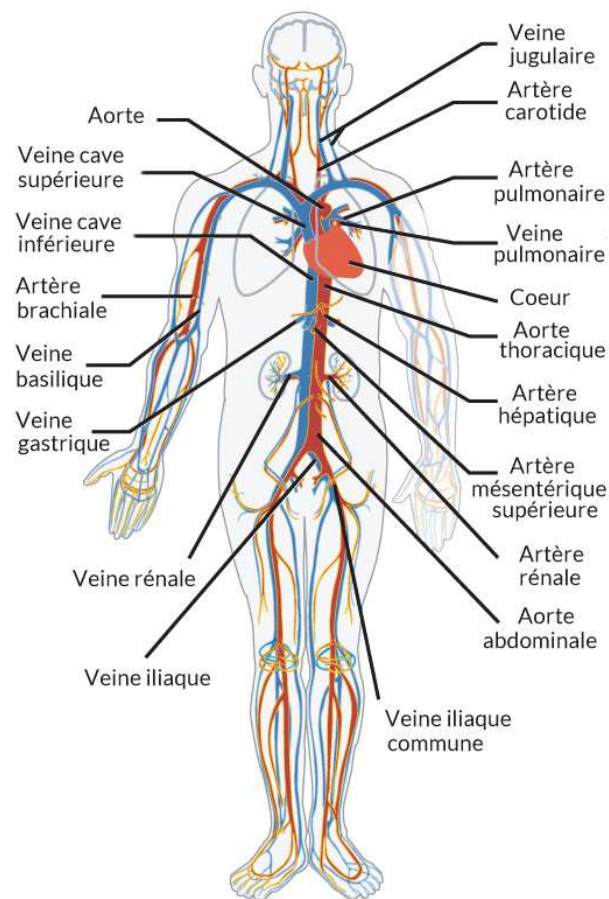
# 1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

Les fluides en biophysique – cours de Pierre-Olivier Kotszki

## Système respiratoire




## Système circulatoire



Fonctions urinaire,  
reproductrice, lacrymale...





# Qu'est-ce qu'un fluide !

**2. Les propriétés majeures des fluides**

Caractéristiques de l'état d'un fluide

**3. Les comportements rhéologiques**

Comportement des fluides en écoulement

**4. La tension de surface et la capillarité**

Propriétés des interfaces

**Mécanique des fluides : lois d'écoulement et statique**

**Christelle Wisniewski**

**Applications à la biophysique**

**Pierre-Olivier Kotszki**



## Partie 2

### Les propriétés majeures des fluides

- Température, pression, masse volumique,...
- Lois des gaz parfaits et de Dalton
- Lois de Boyle-Mariotte, Gay-Lussac et Avogadro
- Etats et changements d'état



## 2. Les propriétés majeures

### Température

- Echelle Celsius ou centigrade ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\theta$  en  $^{\circ}\text{C}$

- Echelle Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ )

$T$  en  $^{\circ}\text{F}$   $\Rightarrow$   $T$  (en  $^{\circ}\text{F}$ ) =  $32 + 1,8 \times \theta$  (en  $^{\circ}\text{C}$ )

- Echelle des températures absolues dite **Kelvin** (K) (**Unité SI**)

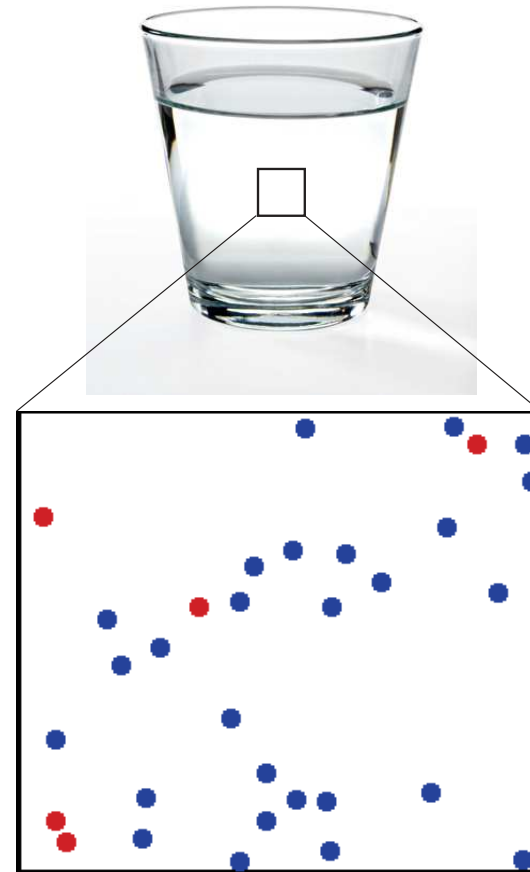
$T$  en K  $\Rightarrow$   $T$  (en K) =  $\theta$  (en  $^{\circ}\text{C}$ ) + 273,15

## 2. Les propriétés majeures

### Pression au sein d'un fluide

#### Définition

Au sein d'un fluide au repos, les molécules sont animées d'une vitesse aléatoire résultant de leur **agitation** et des **interactions** entre-elles : collisions, répulsions électrostatique, forces de Van derWaals,...



Echelle moléculaire

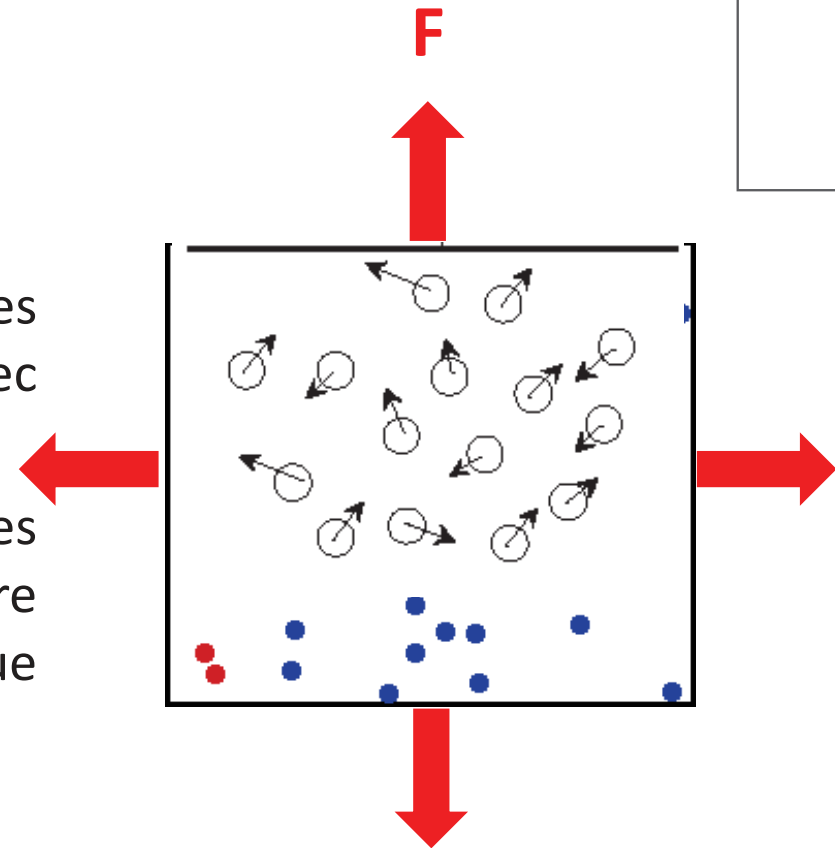
## 2. Les propriétés majeures

### Pression au sein d'un fluide

#### Définition

Au niveau d'une paroi solide, les molécules vont entrer en collision avec cette paroi.

La moyenne de ces différentes impulsions au cours du temps, montre qu'il en résulte une force macroscopique dite : ***force de pression sur la paroi***.



Force de pression contre une paroi

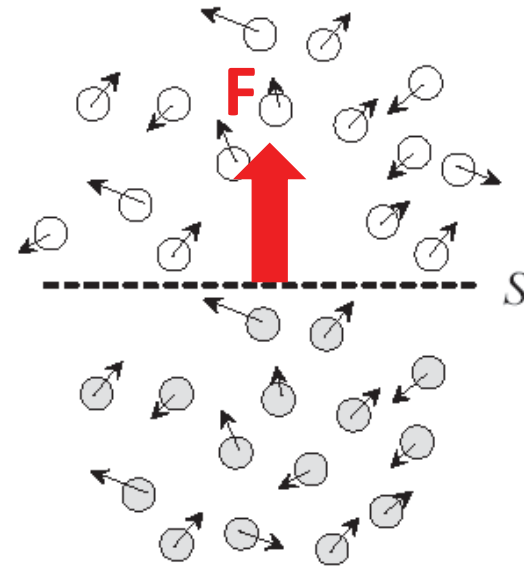


## 2. Les propriétés majeures

### Pression au sein d'un fluide

#### Définition

En plaçant une paroi solide au sein du fluide, les molécules vont entrer en collision avec cette paroi.



Force de pression au sein du fluide

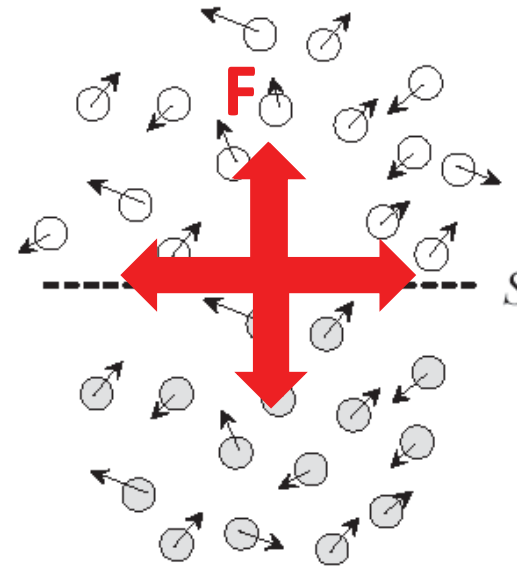
## 2. Les propriétés majeures

### Pression au sein d'un fluide

#### Définition

En plaçant une paroi solide au sein du fluide, les molécules vont entrer en collision avec cette paroi.

En la faisant tourner dans toutes les directions de l'espace il résulte une **force macroscopique isotrope** : ***force de pression au sein du fluide.***



Force de pression au sein du fluide

## 2. Les propriétés majeures

### Pression au sein d'un fluide

#### Définition

L'intensité de la résultante de ces forces ramenée à la surface où elles s'exercent est appelée : **pression**.

$$P = \frac{F}{S}$$



→ Que le fluide soit au repos ou en mouvement, il s'exerce en son sein une pression.

## 2. Les propriétés majeures

### Pression au sein d'un fluide

#### Définition

La pression dépend du nombre de collisions des particules du fluide entre elles et avec le récipient : plus le nombre de collisions est grand, plus la pression est grande.

Les facteurs qui influencent le nombre de collisions et donc la pression sont:

- le nombre de particules dans le fluide : **un nombre plus grand de particules** induit plus de collisions **⇒ plus la pression augmente** ;
- Le volume du fluide : **plus le volume est petit...** plus il y a de collisions **⇒ plus la pression augmente**;
- la température : **plus la température augmente...** plus l'énergie des particules est grande...plus elles se déplacent vite et multiplient le nombre de collisions **⇒ plus la pression augmente**.



## 2. Les propriétés majeures

### Pression au sein d'un fluide

#### Définition

L'intensité de la résultante de ces forces ramenée à la surface où elles s'exercent est appelée : **pression**. La pression est un scalaire.

$$[P] = \frac{[F]}{[S]} = \frac{M \cdot L \cdot T^{-2}}{L^2} = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$$

$$[P] = kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = J \cdot m^{-3} \equiv Pa$$

Atm	cm de Hg	bar	Pa	m colonne d'eau
1	≈ 76	≈ 1	≈ 100000	≈ 10

## 2. Les propriétés majeures

### Pression au sein d'un fluide

Unités de pression : Pa en SI

1 atm	1 mm de Hg	1 bar	1 m colonne d'eau
$10^5$ Pa	133 Pa	$10^5$ Pa	$10^4$ Pa

### Pression atmosphérique

La pression atmosphérique est la pression qu'exerce le mélange gazeux constituant l'atmosphère (l'air) sur une surface quelconque en contact avec elle.

Pression atmosphérique au « niveau de la mer » (niveau 0) à la température de 15 °C :

$$P_{atm} = 101\,325 \text{ Pa}$$

## 2. Les propriétés majeures

### Pression au sein d'un fluide

#### Pression absolue / Pression relative

Pression au sein d'un fluide :  $P = P_{absolue}$

La mesure de pression peut être relative à une valeur de référence :

$$P_r = P_{absolue} - P_{référence}$$

$P_r$  la **pression relative** est la pression la plus fréquemment mesurée dans les domaines technologiques. La plupart des appareils de mesures de pression mesure une pression relative, et généralement :

$$P_{référence} = P_{atm}$$

## 2. Les propriétés majeures

### Pression au sein d'un fluide

#### Pression absolue / Pression relative

La **pression relative** est une différence de pression...qui peut donc être négative.

$$P_r = P_{absolue} - P_{atm} > 0 \quad \text{Surpression}$$

$$P_r = P_{absolue} - P_{atm} < 0 \quad \text{Dépression}$$

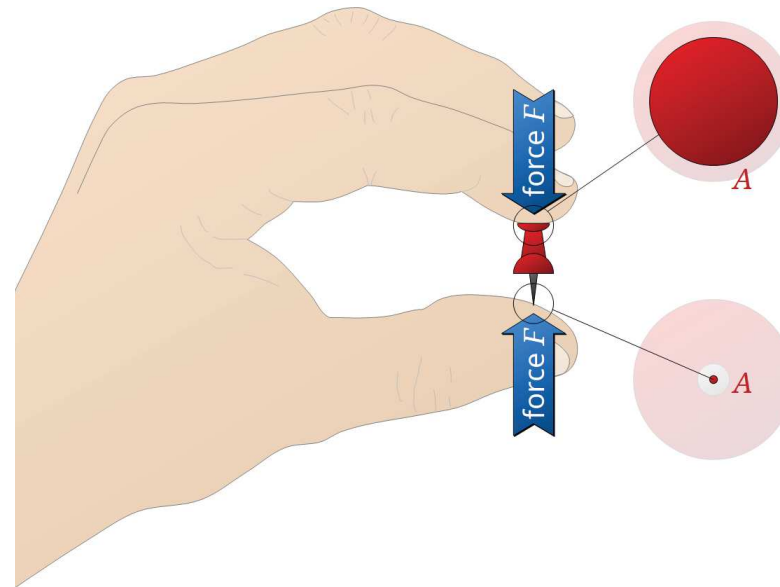
**Remarque** : la pression théorique du vide absolu est nulle.

## 2. Les propriétés majeures

### Pression au sein d'un fluide

#### Force ou pression ?

C'est la pression qui rend compte de l'intensité des interactions.



→ Généralisation de la notion de pression : contraintes mécaniques.



## 2. Les propriétés majeures

### Pression au sein d'un fluide

#### Pression en biophysique

La notion de pression est importante en biophysique et en particulier en médecine. Elle donne lieu à diverses mesures chez l'homme.

- ▶ La plus courante est la mesure de la **pression artérielle** (appelée aussi tension artérielle) exprimée en cm de mercure.
- ▶ La pression est également importante dans le **milieu extérieur** à l'homme. Si la pression est trop faible ou trop élevée il se produit alors des **effets pathologiques** chez l'homme : *barotraumatismes (médecine hyperbare)*.
- ▶ Le son est une **onde de pression** liée aux fluctuations de la pression atmosphérique.

## 2. Les propriétés majeures

### Pression au sein d'un fluide

- La pression est une force par unité de surface ou une densité volumique d'énergie.
- La pression est définie en chaque « point » d'un fluide et elle est isotrope.
- La pression est représenté par un scalaire exprimé en Pa.

## 2. Les propriétés majeures

### Masse volumique

#### Définition

La masse volumique d'un fluide caractérise sa masse par unité de volume. C'est l'inverse du volume massique.

$$\rho = \frac{M}{V}$$



La masse volumique est un scalaire qui s'exprime en :

$$[\rho] = \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Eau (4°C)	Sang	Huile	Air	Vapeur d'eau (100°C)
1000	≈ 1060	≈ 920	≈ 1,29	≈ 0,597

## 2. Les propriétés majeures

### Masse volumique

#### Densité

La densité mesure le rapport de la masse volumique du fluide rapportée celle de l'eau. Elle est sans unité.

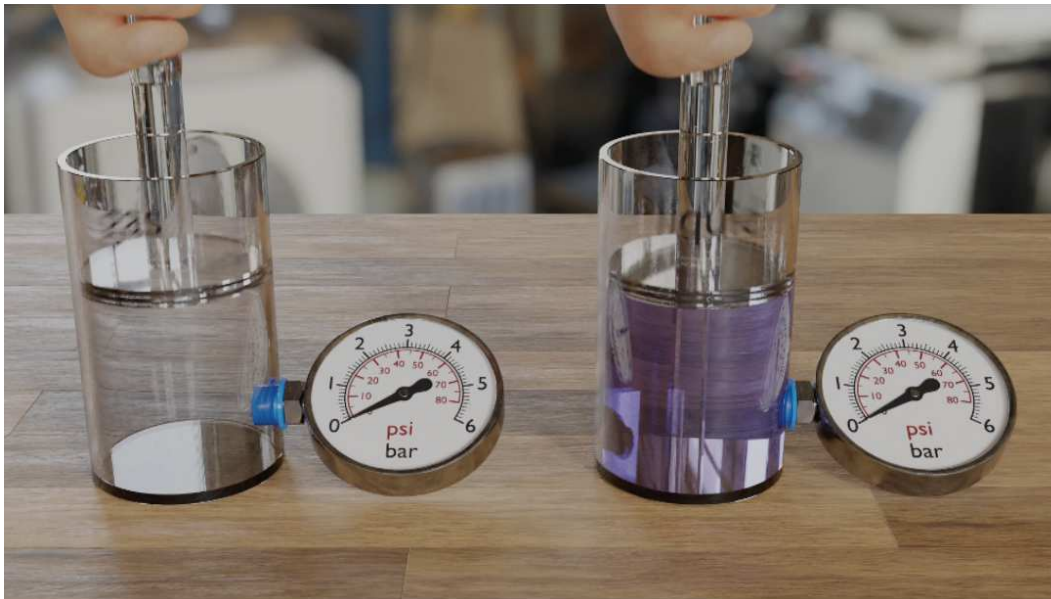
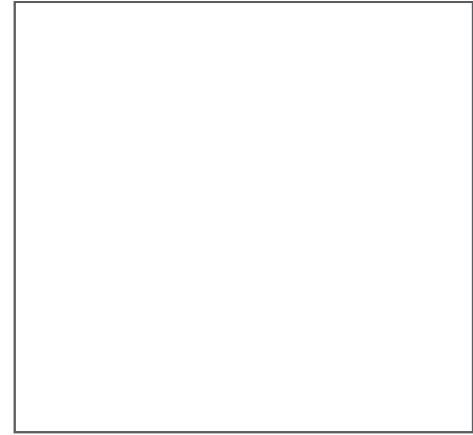
$$d_{fluide} = \frac{\rho_{fluide}}{\rho_{eau}}$$

La masse volumique et la densité peuvent être fonction :  
→ de la pression et de la température.

## 2. Les propriétés majeures

### Masse volumique

#### Masse volumique fonction de la pression





## 2. Les propriétés majeures

### Masse volumique

#### Masse volumique fonction de la pression

On peut comprimer un fluide si les particules qui le constituent sont éloignées les unes des autres.

→ Pour les gaz, les particules peuvent être rapprochées c'est très faiblement le cas pour les liquides.

On distingue les **fluides compressibles et incompressibles**

→ Les gaz sont des fluides compressibles.

→ Les liquides sont des fluides peu ou pas compressibles.

**Remarque** : cette propriété joue un rôle important lors de l'écoulement des fluides.

## 2. Les propriétés majeures

### Masse volumique

#### Masse volumique fonction de la pression

Compressibilité ou incompressibilité d'un fluide (à *température constante*) :

- Fluides compressibles  $\rho_{fluide}$  dépendante de la pression (augmente).
- Fluides incompressibles  $\rho_{fluide}$  indépendante de la pression (constante).

Le **coefficient de compressibilité isotherme** est défini par :  $\chi = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$

Plus  $\chi$  est grand et plus le fluide est compressible.

**Lien avec le son :** Pression acoustique :  $P = \chi \frac{v}{c}$       Impédance acoustique :  $Z = \frac{1}{\chi c}$

$v$  la vitesse de vibration et  $c$  la vitesse de propagation

→ Cours de Denis Mariano-Goulart

## 2. Les propriétés majeures

### Masse volumique

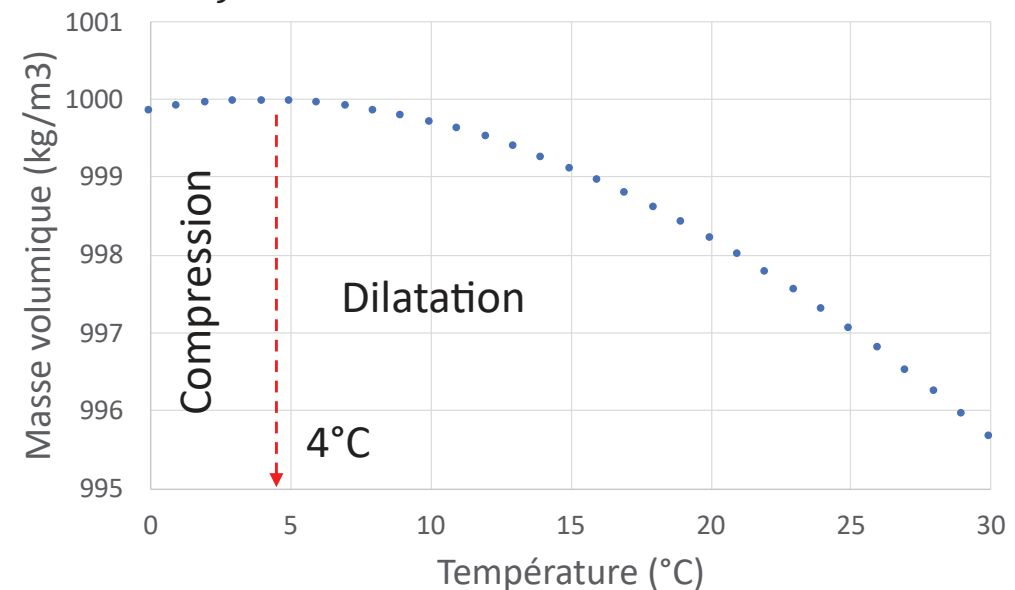
#### Masse volumique fonction de la température

A pression constante, l'augmentation de la température dilate (généralement) les fluides. Ils occupent un plus grand volume et par conséquent  $\rho_{\text{fluide}}$  diminue.

Le **coefficient de dilatation isobare** est défini par :

$$\alpha = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

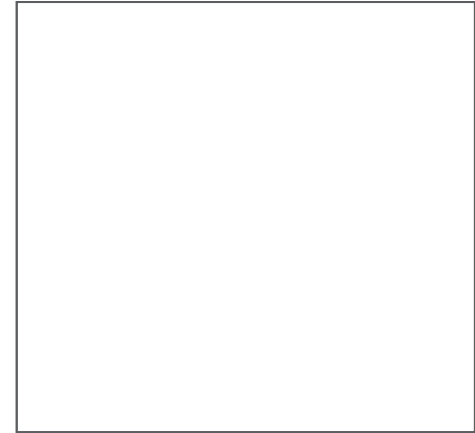
Plus  $\alpha$  est grand et plus le fluide est dilatable.



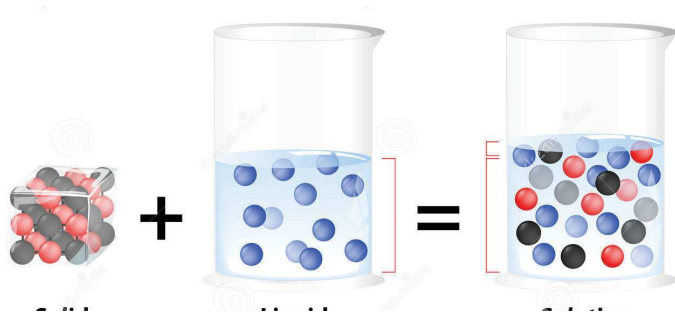
## 2. Les propriétés majeures

### Composition d'un fluide hétérogène

Lorsque le fluide contient des constituants **solubles** autres que ses propres molécules, il faut définir sa **composition physico-chimique** :



- **Constituants : molécules/ions dissouts** ( $\text{Ångström} \leq \text{taille} \leq \text{Nanomètre}$ )



Fluide : liquide → **Solution liquide**



Fluide : gaz → **Solution gazeuse**

## 2. Les propriétés majeures

### Composition d'un fluide hétérogène

Lorsque le fluide contient des constituants **non solubles** autres que ses propres molécules, il faut définir sa **composition physico-chimique** :

- **Constituants : colloïdes** (Nanomètre  $\leq$  *taille*  $\leq$  Micromètre)



Fluide : liquide  $\rightarrow$  Suspension



Fluide : gaz  $\rightarrow$  Suspension (aerosol)





## 2. Les propriétés majeures

### Composition d'un fluide hétérogène

La composition peut être exprimée par :

- La **quantité de matière** molaire ou massique de chaque constituant

- La **fraction molaire** :  $x_s = \frac{n_s}{\sum_i n_i}$  pour le solvant et  $x_i = \frac{n_i}{\sum_i n_i}$  pour les solutés

$$\Rightarrow \sum_i x_i = 1$$

Rapport sans dimension qui est donc compatible avec n'importe quel système d'unité.

- La **concentration (molaire)** :  $C_s = \frac{n_s}{V}$  pour le solvant et  $C_i = \frac{n_i}{V}$  pour les solutés

Avec  $V$  le volume du fluide.

## 2. Les propriétés majeures

### Composition d'un fluide hétérogène

Type de variable de composition	Dimension	Symbole et Unité SI
Concentration massique	$M.L^{-3}$	$\rho$ : kg de soluté / $m^3$ de solution
Concentration molaire ou molarité	$N.L^{-3}$	C : nombre de moles de soluté / $m^3$ de solution
Molalité	$N.M^{-1}$	b : nombre de moles de soluté / kg de solvant
Fraction molaire	/	x : nombre de moles du soluté / nombre total de moles présentes dans la solution

## 2. Les propriétés majeures

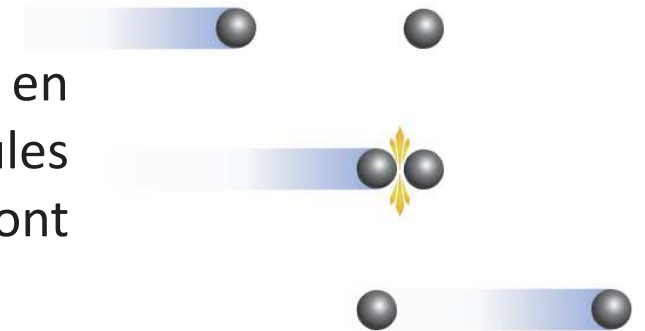
### Relation d'état

→ Relation (mathématique) entre les grandeurs qui définissent l'état d'un fluide, qui rend compte du comportement du fluide avec un minimum de variables  $\Rightarrow$  certaines variables ne sont pas indépendantes.

→ *Théorie cinétique des gaz* : description comportement macroscopique d'un gaz à partir des caractéristiques des mouvements des particules qui le composent.

(Daniel Bernoulli, Rudolf Clausius James Clerk Maxwell, **Ludwig Boltzmann**)

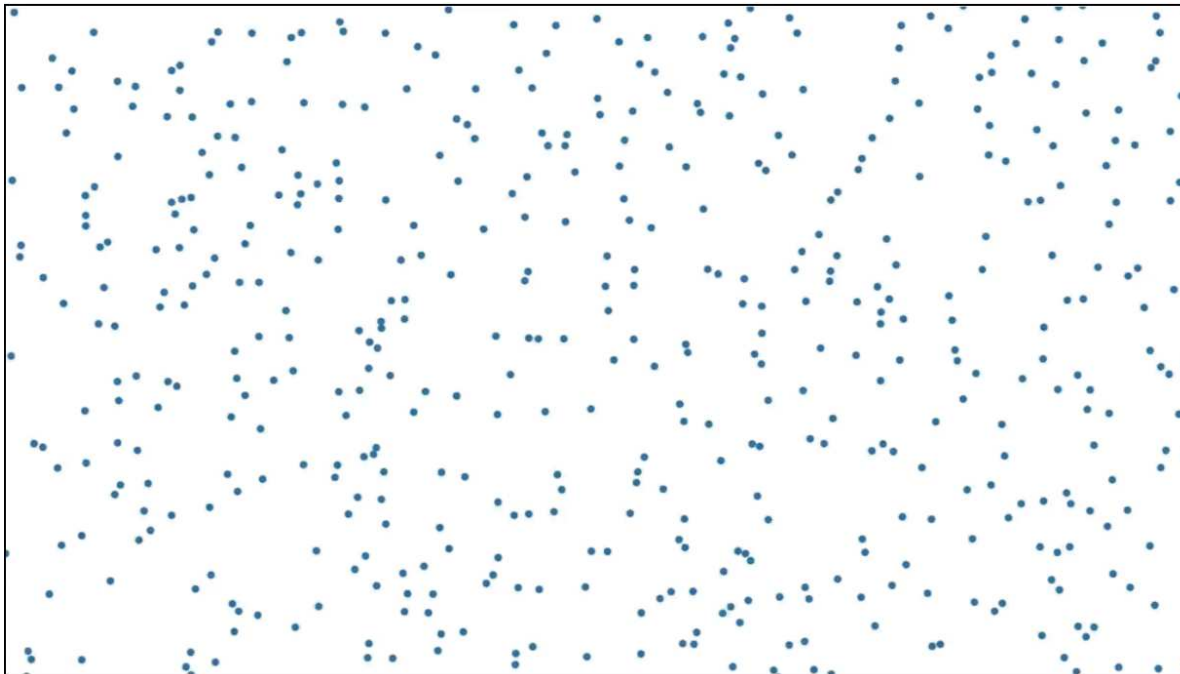
Le **gaz parfait** est un gaz modèle idéal constitué de molécules en mouvement (agitation moléculaire) et dont les seules interactions sont des chocs élastiques les autres interactions sont négligeables.



## 2. Les propriétés majeures

### Relation d'état

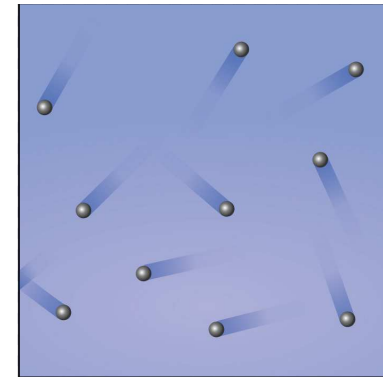
Le **gaz parfait** est un gaz modèle idéal constitué de molécules en mouvement (agitation moléculaire) et dont les seules interactions sont des chocs élastiques les autres interactions sont négligeables.



Mobilité à l'échelle moléculaire

→ **le libre parcours moyen**

Distance entre deux chocs successifs



$10^{-10}$  m pour un liquide (0,1 nm)

$10^{-7}$  m pour un gaz (100 nm)



## 2. Les propriétés majeures

### Relation d'état

#### Loi des gaz parfaits

L'état d'un gaz parfait dépend de : (i) son nombre de moles  $n$ , (ii) sa pression  $P$ , (iii) son volume  $V$  et (iv) sa température  $T$ .

$$PV = nRT$$

Pa   m<sup>3</sup>   mol   K

Pa.m<sup>3</sup>.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

The diagram shows the equation PV = nRT inside an orange rounded rectangle. Above the equation, the units Pa, m³, mol, and K are listed. Blue arrows point from these units to the corresponding variables in the equation: Pa to P, m³ to V, mol to n, and K to T. Below the equation, the unit Pa.m³.mol⁻¹.K⁻¹ is shown with a blue arrow pointing to the entire equation.

Autre écriture

$$P = CRT$$

$C$  est la concentration (mol.m<sup>-3</sup>).

$R$  est la constante des gaz parfaits = **8,31 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>**

$R$  est le produit de la constante de Boltzmann et du nombre d'Avogadro :  $R = k_B \mathcal{N}_A$

#### Interprétation de la loi des gaz parfait :

$PV$  : l'énergie de pression d'un gaz parfait est égale à :  $nRT$  l'énergie cinétique totale de tous ses constituants.

## 2. Les propriétés majeures

### Relation d'état

#### Gaz parfaits

→ La **température** est une mesure macroscopique de l'agitation des molécules : de leur énergie cinétique.

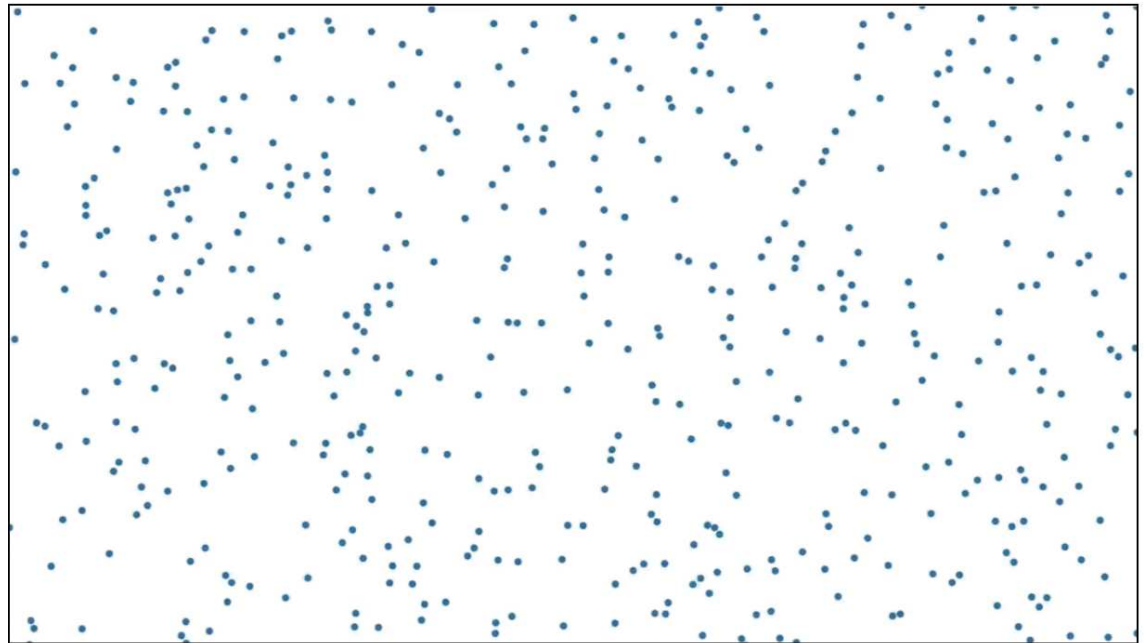
$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \propto k_B T$$

$k_B$  est la constante de Boltzmann

#### T → agitation thermique

→ La **pression** exercée par un gaz sur une paroi résulte des chocs des particules sur cette dernière. Elle est liée à leur quantité de mouvement.

Le **gaz parfait** est un gaz modèle idéal...



## 2. Les propriétés majeures

### Relation d'état

#### Gaz parfaits

Le **gaz parfait** est un gaz modèle idéal constitué de molécules en mouvement (agitation moléculaire) et dont les seules interactions sont des chocs élastiques les autres interactions sont négligeables.

- Ce modèle rend compte du comportement des gaz réels à basse pression.
- Pour les gaz réels  $\exists$  des modèles plus complexes (développement du Viriel, modèle de Van der Waals,...).
- Pas d'équivalent pour les liquides.

**Remarque** : en pratique biomédicale, les gaz peuvent être considérés comme des gaz parfaits.

## 2. Les propriétés majeures

### Cas des gaz parfaits

#### Loi de Boyle-Mariotte

La loi de Boyle-Mariotte relie la pression et le volume d'un gaz parfait à température et composition constantes :  $T = \text{cte}$  et  $n = \text{cte}$ .

$$PV = \text{cte} \quad (= nRT)$$

#### Loi de Gay-Lussac

La loi de Gay-Lussac relie la pression et la température d'un gaz parfait à volume et composition constants :  $V = \text{cte}$  et  $n = \text{cte}$ .

$$\frac{P}{T} = \text{cte} \quad (= \frac{nR}{V})$$

#### Loi d'Avogadro

Aux mêmes conditions de température et de pression, les gaz parfaits ont tous le même volume molaire  $V_m = \frac{V}{n}$ .

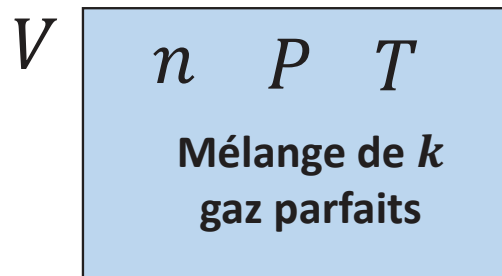
$$\frac{V}{n} = \text{cte} \quad (= \frac{RT}{P})$$

→ Sous les conditions normales de température :  $273 \text{ K}$  et de pression :  $10^5 \text{ Pa}$ , une mole de gaz occupe un volume de  $22,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  (22,4 L). Dans  $1 \mu\text{m}^3$  il y a environ  $2,7 \times 10^7$  molécules.

## 2. Les propriétés majeures

### Cas des gaz parfaits

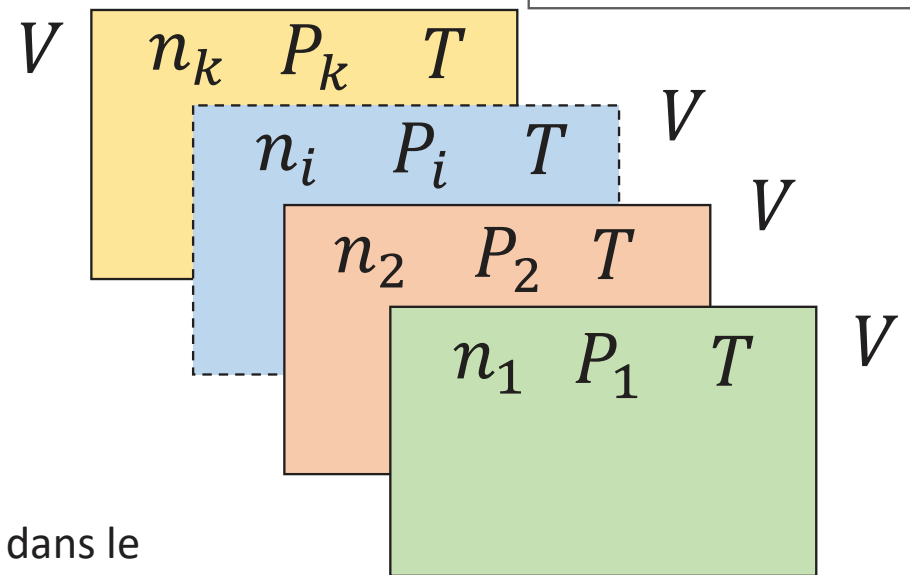
Mélange gazeux parfait – notion de *pression partielle*



$$PV = nRT$$

$$n = \sum_{i=1 \dots k} n_i$$

$n_i$  : nombre de mole du constituant  $i$



→ Un mélange de gaz parfaits est un gaz parfait.

→ Il est considéré comme la superposition de chacun des gaz dans le même volume  $V$ .

→ **La loi des gaz parfait s'applique indépendamment à chacun des gaz du mélange.**

$$P_i V = n_i RT$$
$$\forall i \in \{1, \dots, k\}$$



## 2. Les propriétés majeures

### Cas des gaz parfaits

#### Mélange gazeux parfait – notion de *pression partielle*

→ La **pression partielle** du constituant  $i$  :  $P_i$ , est la pression qu'exercerait ce constituant s'il était seul dans le volume occupé par le mélange.

$$PV = nRT \quad \text{pour le mélange} \quad \Rightarrow \quad \frac{RT}{V} = \frac{P}{n} = \frac{P_i}{n_i} \quad \forall i \in \{1, \dots, k\}$$
$$P_i V = n_i RT \quad \text{pour chaque constituant}$$

Comme  $n = \sum_{i=1 \dots k} n_i$  et avec la fraction molaire du constituant  $i$  :  $x_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1 \dots k} n_i} = \frac{n_i}{n}$

⇒ **Lois de Dalton**  $\sum_{i=1 \dots k} P_i = P$  et  $P_i = x_i P$

Ex.  $P_{atm} = P_{N_2} + P_{O_2}$   
 $P_{N_2} \approx 0,8 P_{atm}$   $P_{O_2} \approx 0,2 P_{atm}$

**La somme des pressions partielles est égale à la pression totale du mélange gazeux.**

## 2. Les propriétés majeures

Etats et changements d'état

→ Les états structurels de la matière : entre **interactions et mobilités**

GAZ

Corps dont les molécules sont en très forte mobilité et très faible interaction les unes par rapport aux autres.

LIQUIDE

Corps dont les atomes molécules sont relativement mobiles et en interaction les unes par rapport aux autres.

Fluides

SOLIDE

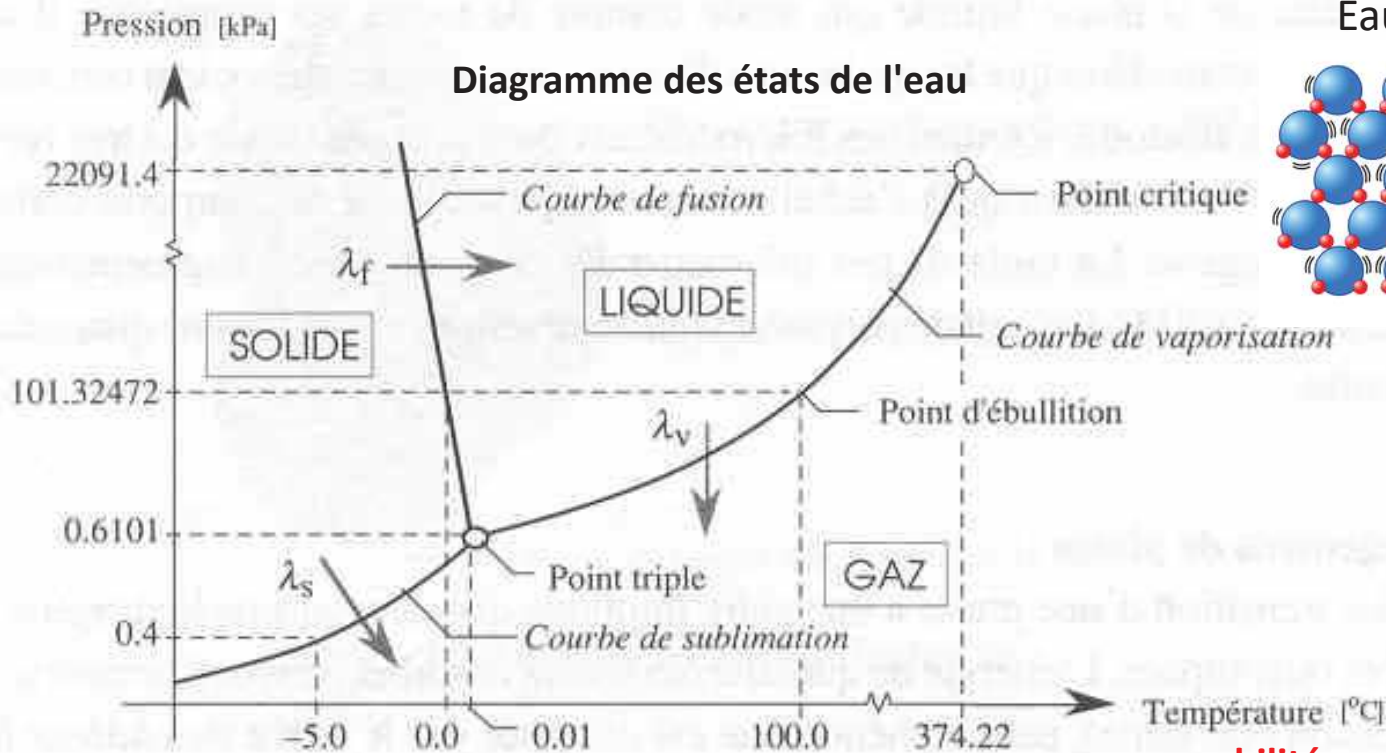
Corps dont les atomes et/ou molécules sont en très forte interaction les uns par rapport aux autres et très faible mobilité (vibration).

## 2. Les propriétés majeures

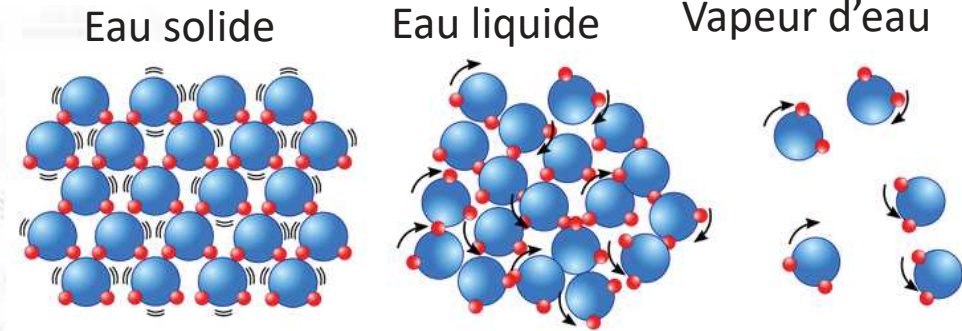
### Etats et changements d'état

→ Les états structuraux de la matière : entre **interactions et mobilités**

« interactions »



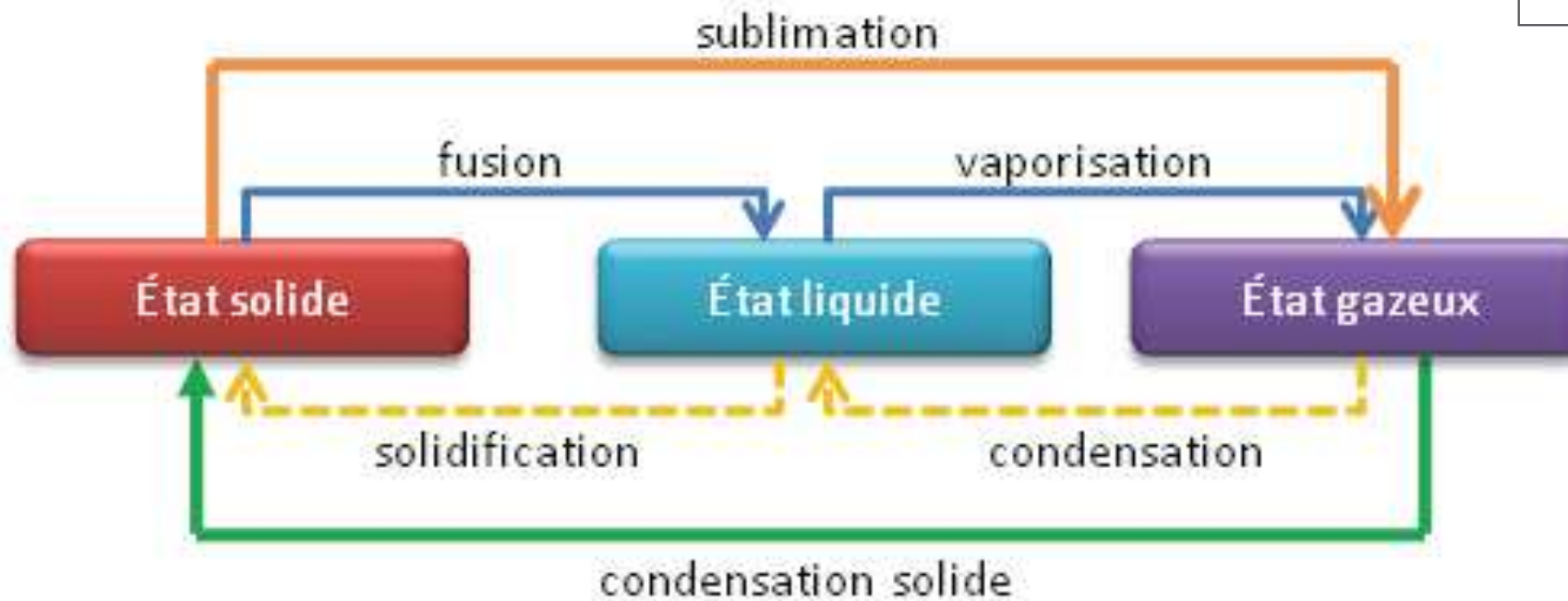
« mobilités »



## 2. Les propriétés majeures

Etats et changements d'état

→ Un changement d'état implique toujours une variation d'énergie



## 2. Les propriétés majeures

### Etats et changements d'état

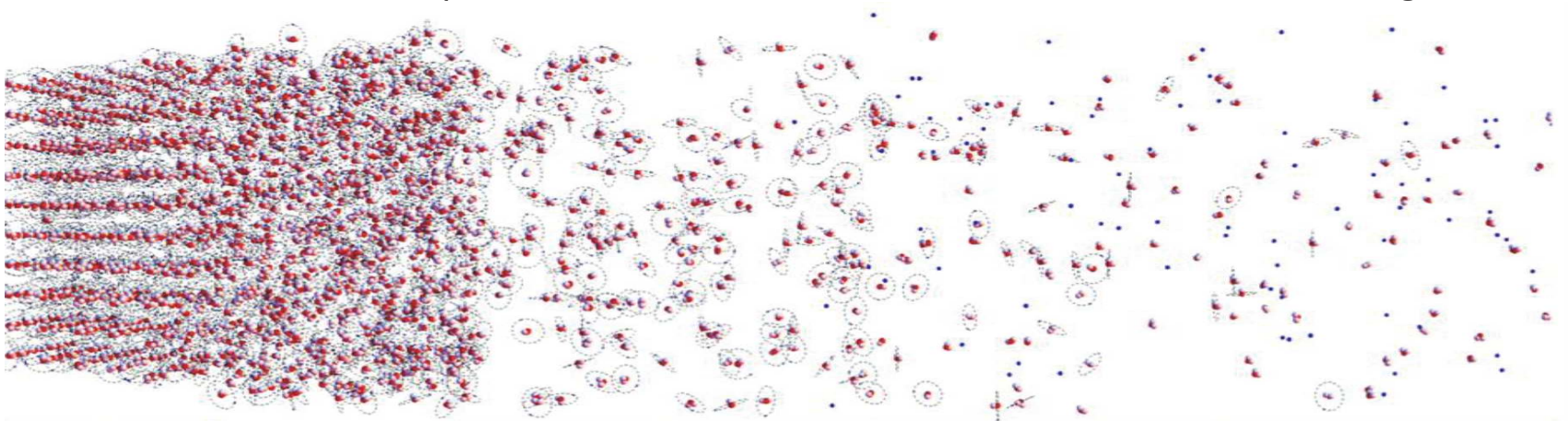
→ Un changement d'état implique toujours une variation d'énergie

Sens où de l'énergie est absorbée (apport d'énergie calorifique i.e. mobilité)

Etat solide

Etat liquide

Etat gazeux



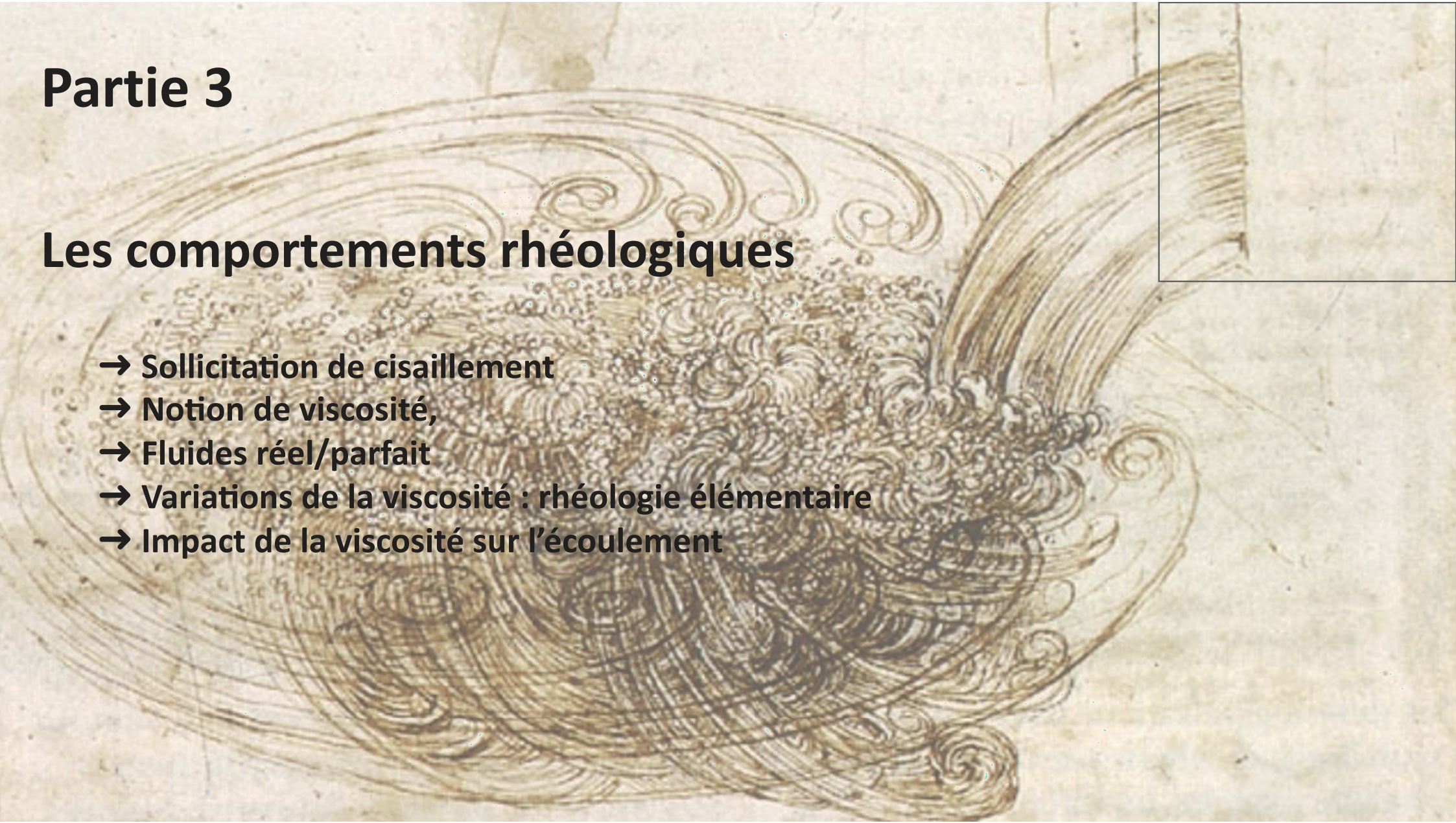
Sens où de l'énergie est libérée (renforcement de l'énergie potentielle i.e. interactions)



## Partie 3

### Les comportements rhéologiques

- Sollicitation de cisaillement
- Notion de viscosité,
- Fluides réel/parfait
- Variations de la viscosité : rhéologie élémentaire
- Impact de la viscosité sur l'écoulement



# 3. Les comportements rhéologiques

## Rhéologie ?

La **rhéologie** est la science qui étudie le comportement des fluides qui s'écoulent sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées.

Le mot « rheology » (en anglais) a été introduit en 1928 par Eugene Bingham.

→ Rhéologie « science des écoulements »

→ Description de la réaction de la matière en terme de déformation et d'écoulement face à des sollicitations mécaniques : **description du comportement mécanique.**

→ Relation (mathématique) entre la sollicitation mécanique et les caractéristiques de l'écoulement

# 3. Les comportements rhéologiques

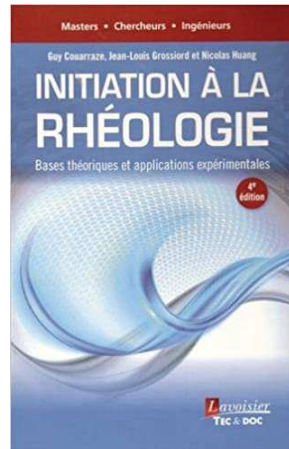
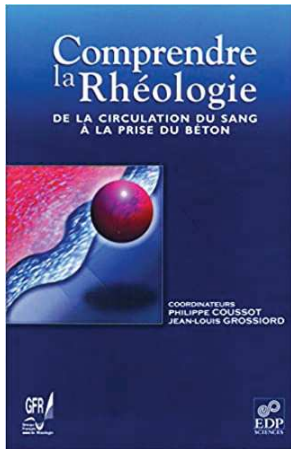
## Rhéologie ?

La **rhéologie** est la science qui étudie le comportement des fluides qui s'écoulent sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées.

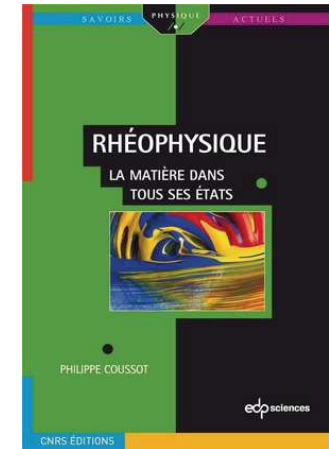
Le mot « rheology » (en anglais) a été introduit en 1928 par Eugene Bingham.

→ Rhéologie « science des écoulements »

→ Description de la réaction de la matière en terme de déformation et d'écoulement face à des sollicitations mécaniques : **description du comportement mécanique.**



→ Rhéophysique : **compréhension du comportement mécanique**





### 3. Les comportements rhéologiques

#### Quelles sollicitations mécaniques ?

#### Trois types majeurs de sollicitation mécanique

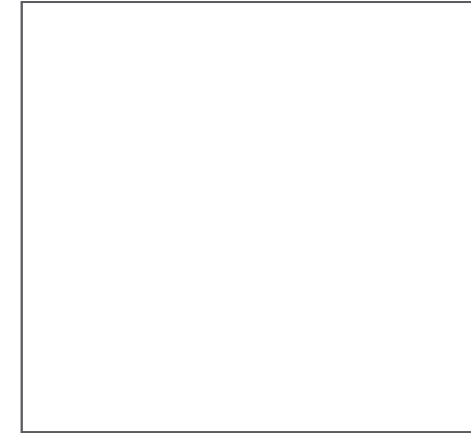
**Compression** (uniaxiale « piston »)

Fluides compressibles : ok

Fluide incompressibles...aucune réaction

Coefficient de compressibilité  
à température constante

$$\chi = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$$



### 3. Les comportements rhéologiques

Quelles sollicitations mécaniques ?

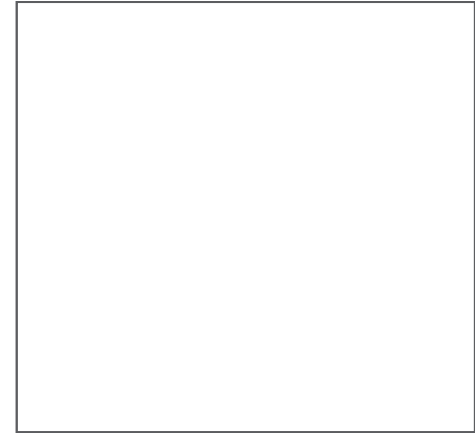
Trois types majeurs de sollicitation mécanique

- Compression** (uniaxiale « piston »)
- Traction** (uniaxiale)



Photo de Fabien Soulié – Université de Montpellier

...pour une goutte → notion de tension de surface (capillarité)



### 3. Les comportements rhéologiques

#### Quelles sollicitations mécaniques ?

Trois types majeurs de sollicitation mécanique

**Compression** (uniaxiale « piston »)

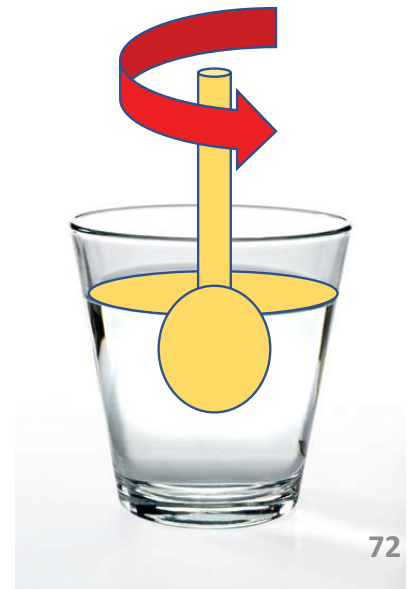
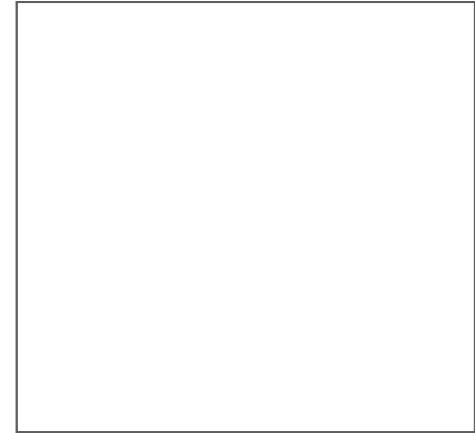
**Traction** (uniaxiale)

**Cisaillement** (torsion)

Cisaillement = force tangentielle  
(ex. action cuillère, glissement sur une flaque)

→ réaction de la matière en terme de déformation et d'écoulement

**Rhéologie** → relation entre la sollicitation de cisaillement et les caractéristiques de l'écoulement





### 3. Les comportements rhéologiques

Quelles sollicitations mécaniques **et à quelle vitesse ?**

La vitesse d'application des contraintes de cisaillement ou plus généralement leur variation au cours du temps impacte le comportement rhéologique d'un fluide.

→  $\tau_{sollicitation}$  est le temps caractéristique d'application (ou de variation) de la contrainte de cisaillement.

Exemple de l'agitation d'un liquide :  $\tau_{sollicitation} \sim f^{-1}$       Fréquence de rotation :  $f$

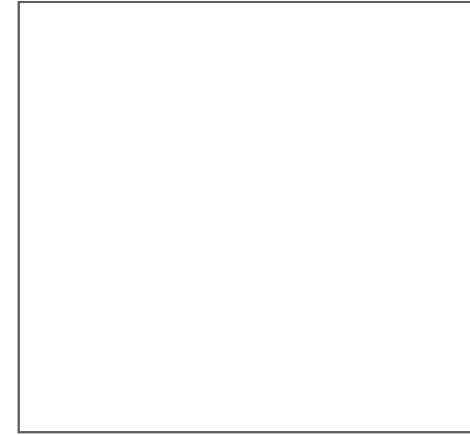
→  $\tau_{relaxation}$  temps de relaxation due à la « microstructure » du fluide

$$\text{Nombre de Deborah : } D = \frac{\tau_{relaxation}}{\tau_{sollicitation}}$$

$D \ll 1$     Comportement « fluide » (visqueux)

$D \gg 1$     Comportement « solide » (élastique)

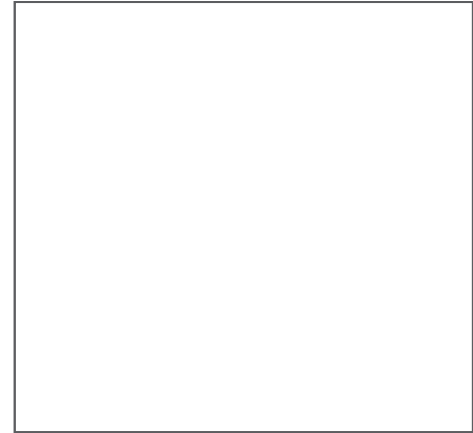
⇒ Adapter la sollicitation mécanique



# 3. Les comportements rhéologiques

## Notion intuitive de viscosité

La viscosité est la résistance à l'écoulement d'un fluide soumis à une force tangentielle (une contrainte de cisaillement).



Eau

Soupe

Ketchup

Purée

Ciment

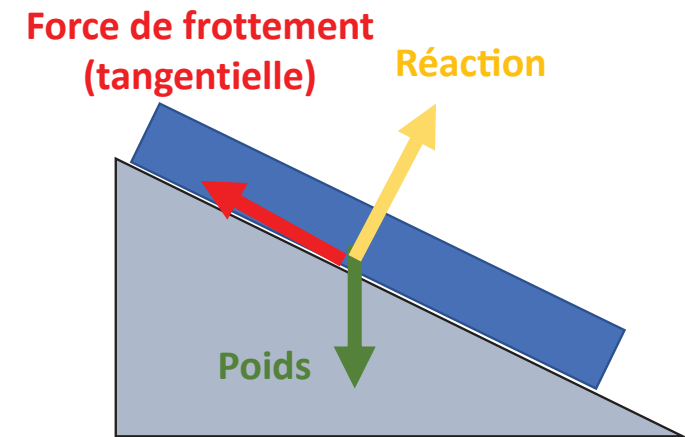
Béton

« Les peintures, encres, ciments, boues, mousses, émulsions, dentifrices, gels, purées, ont des structures complexes et des comportements parfois surprenants, souvent intermédiaires entre ceux des solides et ceux des liquides simples. »

### 3. Les comportements rhéologiques

#### Notion intuitive de viscosité

La viscosité est la résistance à l'écoulement d'un fluide soumis à une force tangentielle (une contrainte de cisaillement).

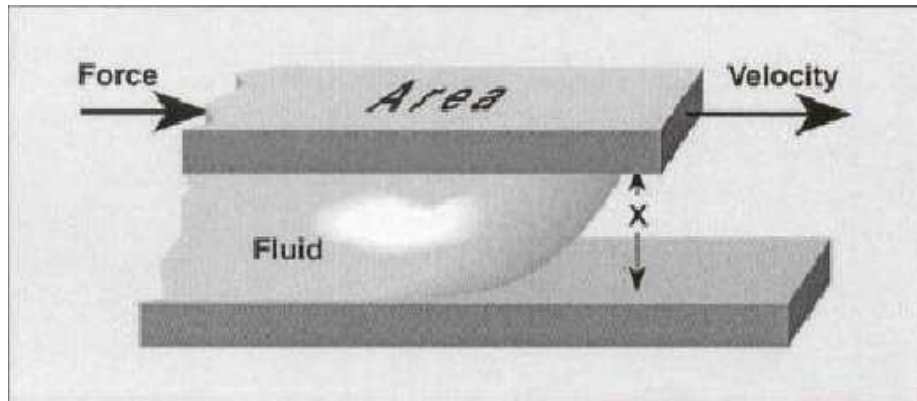


Cas de l'écoulement sur un plan incliné

### 3. Les comportements rhéologiques

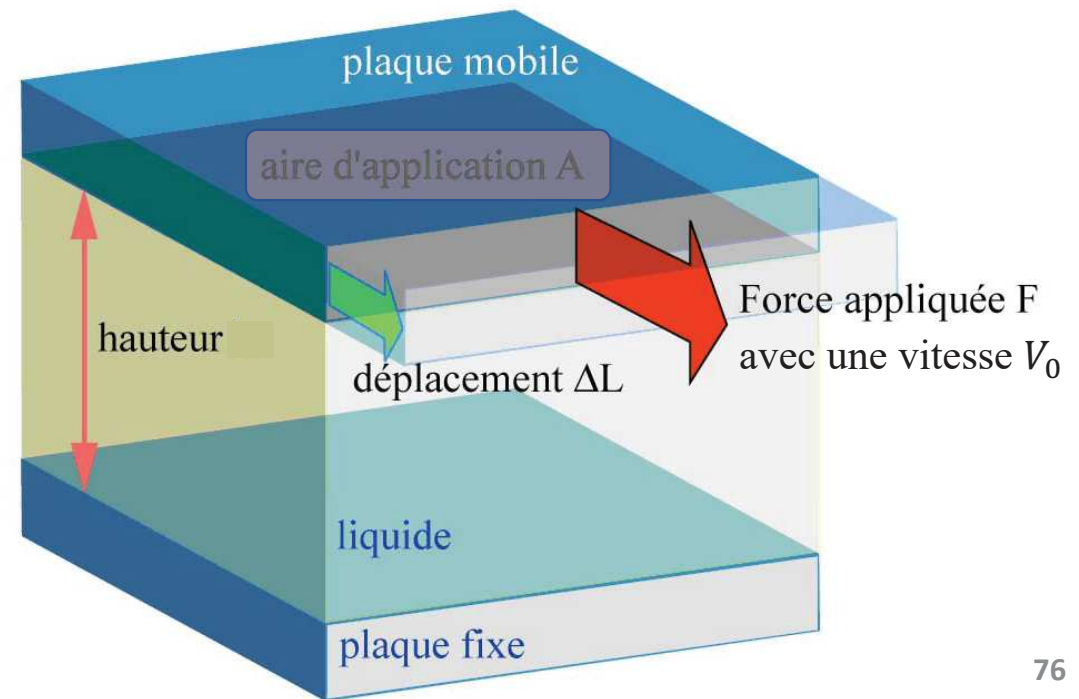
#### Définition de la viscosité

La viscosité est une caractéristique quantitative des fluides qui peut être mise en évidence par l'étude d'un écoulement entre deux plans parallèles.



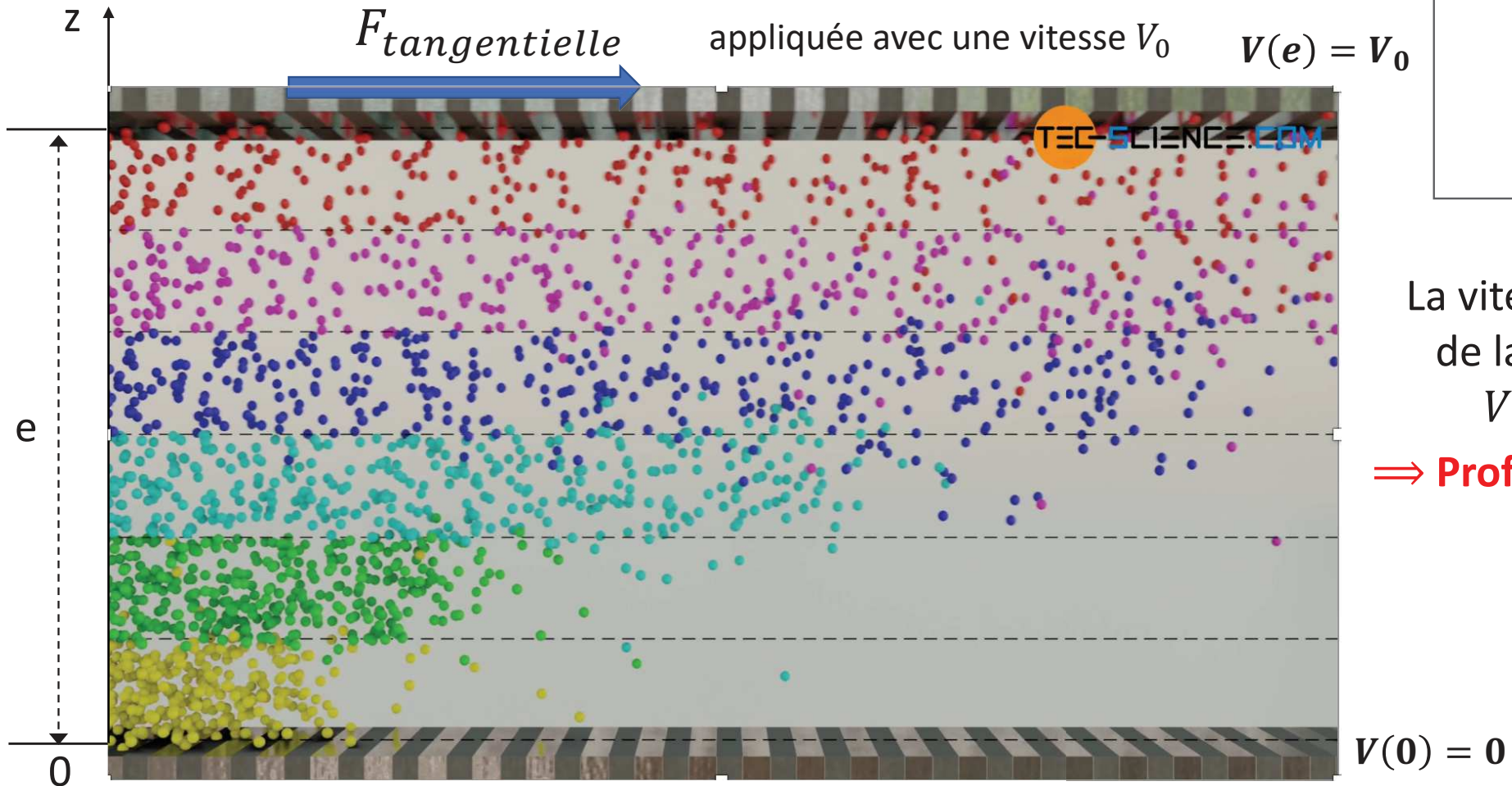
Soit un film fluide placé entre deux plaques planes, parallèles et horizontales, l'une fixe, l'autre en mouvement uniforme à la vitesse  $v_0$  par l'action d'une force tangentielle.

→ Action d'une force tangentielle (cisaillement)





### 3. Les comportements rhéologiques

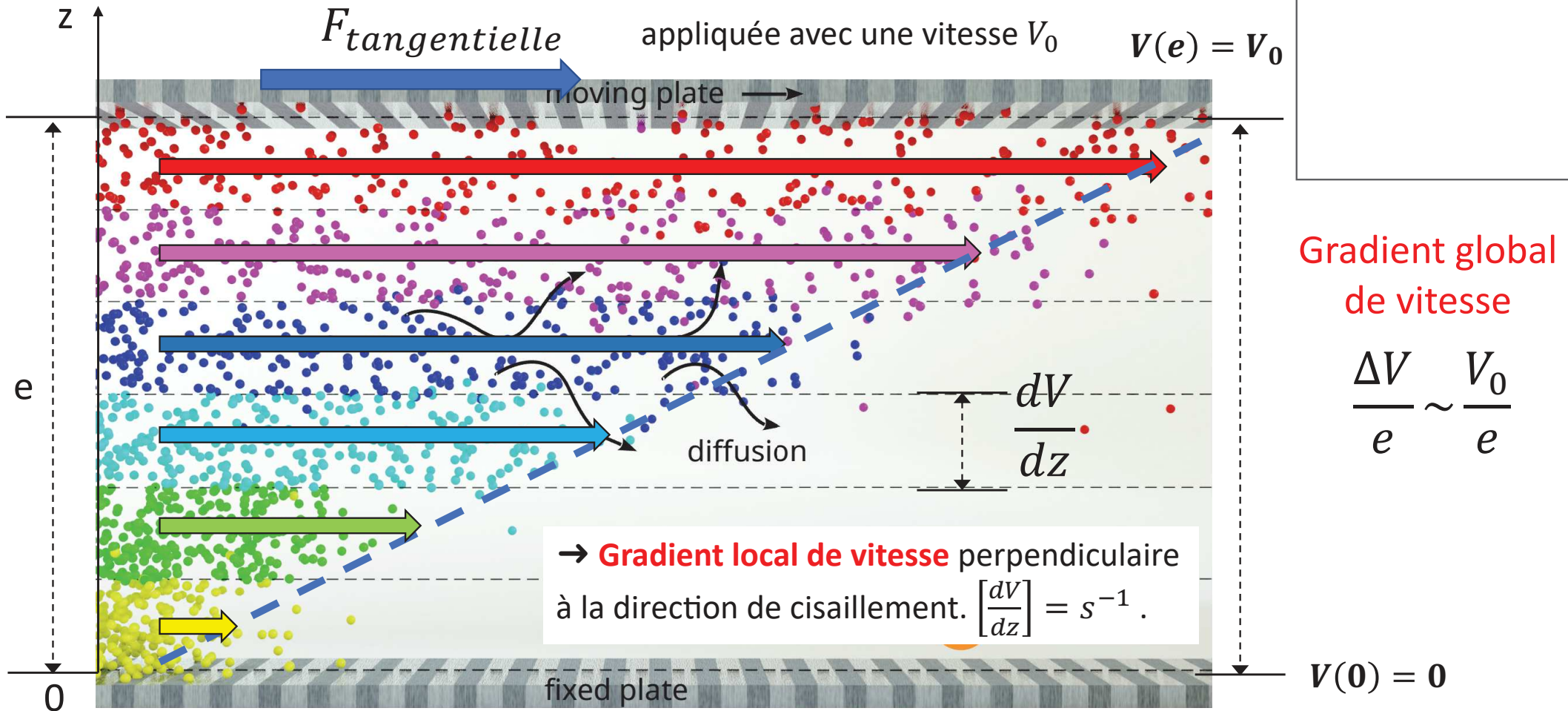


La vitesse dépend de la position :  
 $V = f(z)$

⇒ Profil de vitesse

→ Variation spatiale de la vitesse d'écoulement au sein du fluide

### 3. Les comportements rhéologiques



→ Description de la distribution des vitesses



### 3. Les comportements rhéologiques

#### Définition de la viscosité

L'expression de la force de tangentielle est donnée par la **loi de Newton** :

$$F_{tangentielle} = \eta A \frac{dV}{dz}$$

$A$  est l'aire d'application de la force

→ Le coefficient  $\eta$  est appelé la **viscosité dynamique**.

Unité de la viscosité dynamique :  $[\eta] = \text{Pa} \cdot \text{s}$

Définition de la contrainte de cisaillement :  $\tau_{cisaillement} = \tau_c = \frac{F_{tangentielle}}{A}$

La contrainte de cisaillement est homogène à une pression :  $[\tau_c] = \text{Pa}$

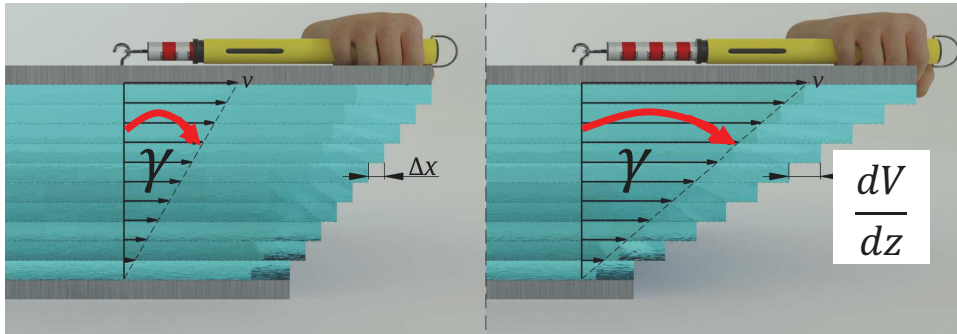
**loi de Newton :**

$$\tau_c = \eta \frac{dV}{dz}$$

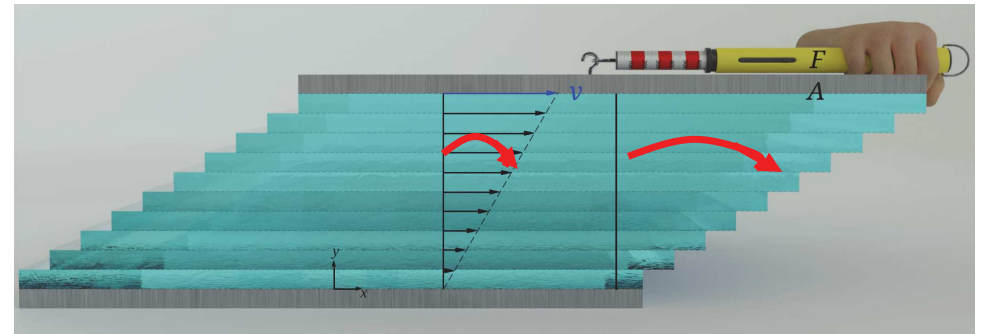
### 3. Les comportements rhéologiques

#### Gradient de vitesse et vitesse (taux) de cisaillement

→ Gradient de vitesse :  $\frac{dV}{dz} \Rightarrow$  Variation de l'angle de cisaillement



→ Angle de cisaillement :  $\gamma$



$\gamma(t)$  dépend du temps

Vitesse (taux) de cisaillement = vitesse de déformation du fluide :  $\frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma} \quad [\dot{\gamma}] = s^{-1}$

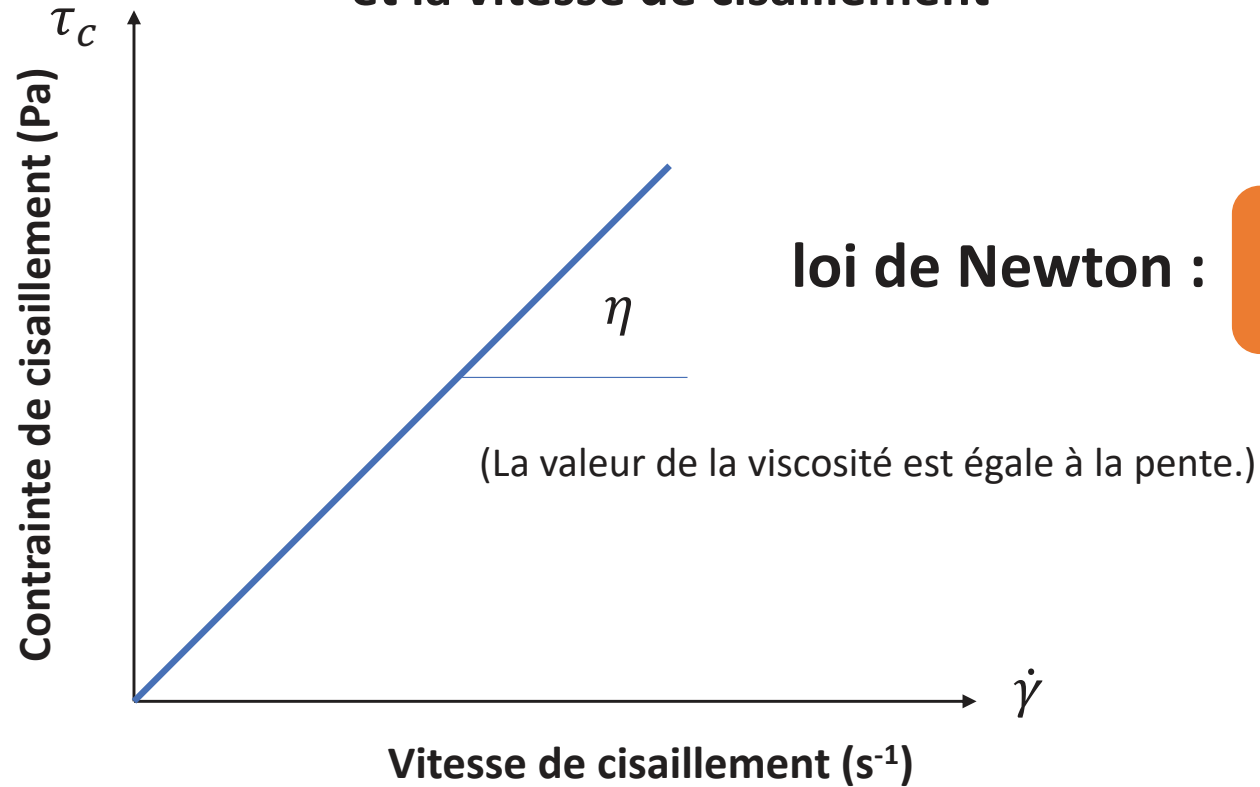
On montre que :  $\dot{\gamma} = \frac{dV}{dz}$  **Taux de cisaillement = Gradient de vitesse**

Remarque : dans l'expression du nombre de Deborah  $\rightarrow \tau_{solicitation} \sim \dot{\gamma}^{-1}$

# 3. Les comportements rhéologiques

## La loi de Newton

**Rhéologie** → relation entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement



loi de Newton :

$$\tau_c = \eta \dot{\gamma}$$

### 3. Les comportements rhéologiques

#### La loi de Newton

Viscosité dynamique → résistance d'un fluide à l'écoulement

Substance	Air sec	Eau	Mercure	Lait	Sang	Huile d'olive
$\eta$ (Pa.s)	$15,6 \times 10^{-6}$	$1,005 \times 10^{-3}$	$1,554 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$	$84 \times 10^{-3}$
(20°C et $10^5$ Pa)	Miel	Gel/crème	Vernis	Peintures	Goudron	Glace (0°)
	6	1 à 100	$10-10^2$	$10^2-10^3$	$10^2-10^5$	$10^{13}$

→ Plus la viscosité augmente, plus le fluide s'écouler difficilement : plus **l'énergie cinétique est dissipée par l'écoulement.**

### 3. Les comportements rhéologiques

#### Fluides réels/fluides parfaits

→ On appelle **fluide parfait** un fluide fictif qui serait sans viscosité.

#### Fluide réel

Dans un fluide réel, il existe une résistance au glissement des particules fluides les unes sur les autres : frottement.

- ⇒ **Viscosité non nulle**
- ⇒ Ecoulement avec perte d'énergie

#### Fluide parfait

Dans un fluide parfait, il n'existe pas de force (frottement) qui s'opposent au glissement des particules fluides les unes sur les autres.

- ⇒ **Viscosité nulle**
- ⇒ Ecoulement sans perte d'énergie

La notion de fluide parfait constitue un modèle simplifié...  
...**les fluides parfaits n'existent pas.**

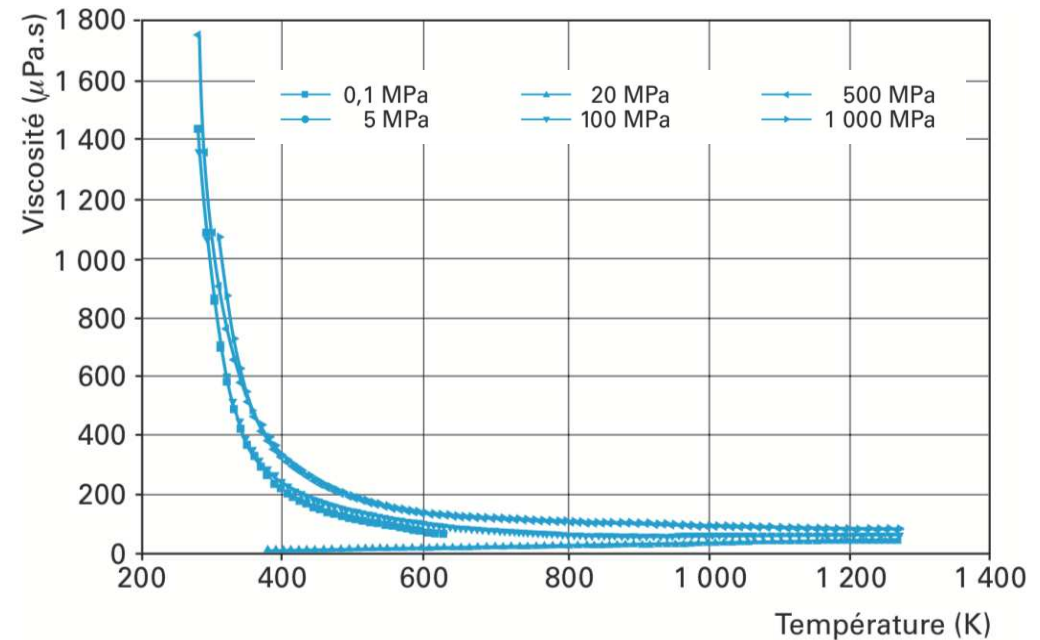
### 3. Les comportements rhéologiques

La viscosité d'un fluide est-elle constante ?

Variations avec la température et la pression

Effets de la température : la viscosité y est très sensible. Quand la température augmente ; la viscosité diminue pour les liquides mais augmente pour les gaz.

Effets de la pression : la viscosité varie peu avec la pression. Elle est négligée pour les liquides sous 40 bars et pour les gaz sous 20 bars.



Variation de la viscosité de l'eau avec la température  
(Techniques de l'Ingénieur Réf. : K490 V1)



### 3. Les comportements rhéologiques

La viscosité d'un fluide est-elle constante ?

Variations avec la composition et la « microstructure »

- La viscosité dynamique n'est pas corrélée à la masse volumique du fluide.

On définit la **viscosité cinématique** par :  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$        $[\nu] = m^2 s^{-1}$

- La viscosité dynamique est très fortement dépendante de la composition et de la microstructure.

→ Concentration des composants, encombrement stérique, taille et interactions des composants...

→ Evolutive dans le temps

### 3. Les comportements rhéologiques

La viscosité d'un fluide est-elle constante ?

**Variations dépendantes ou indépendantes du temps**

La viscosité est une propriété qui ne se manifeste que **lorsque le fluide est en écoulement**.

Au repos  $\dot{\gamma} = 0$  : aucune distinction n'est possible entre les **fluides réels** et les **fluides parfaits**

Cette distinction n'apparaît qu'en **dynamique des fluides** :  $\dot{\gamma} > 0$

**Deux grandes catégories de fluides réels :**

- **Viscosité indépendante du temps (dépend d'autres facteurs)**
- **Viscosité dépendant du temps (évolutive)**

### 3. Les comportements rhéologiques

La viscosité d'un fluide est-elle constante ?

Variations avec l'intensité du taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$

Deux familles de fluides réels dont la viscosité est indépendante du temps :

→ newtonien et non newtonien

Ils vérifient la loi de Newton :  $\tau_c = \eta \dot{\gamma}$  mais :

Fluide newtonien  $\eta = \text{cte}$

Fluide dont la viscosité  $\eta$  est constante quelle que soit l'intensité du cisaillement appliqué ( $\dot{\gamma}$ ).

Fluide non newtonien  $\eta = \eta(\dot{\gamma})$

Fluide dont la viscosité  $\eta$  dépend de l'intensité du cisaillement appliqué ( $\dot{\gamma}$ ).

### 3. Les comportements rhéologiques

La viscosité d'un fluide est-elle constante ?

Variations avec l'intensité du taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$

→ Deux comportements rhéologiques non newtoniens

#### ■ Comportement **rhéofluidifiant**

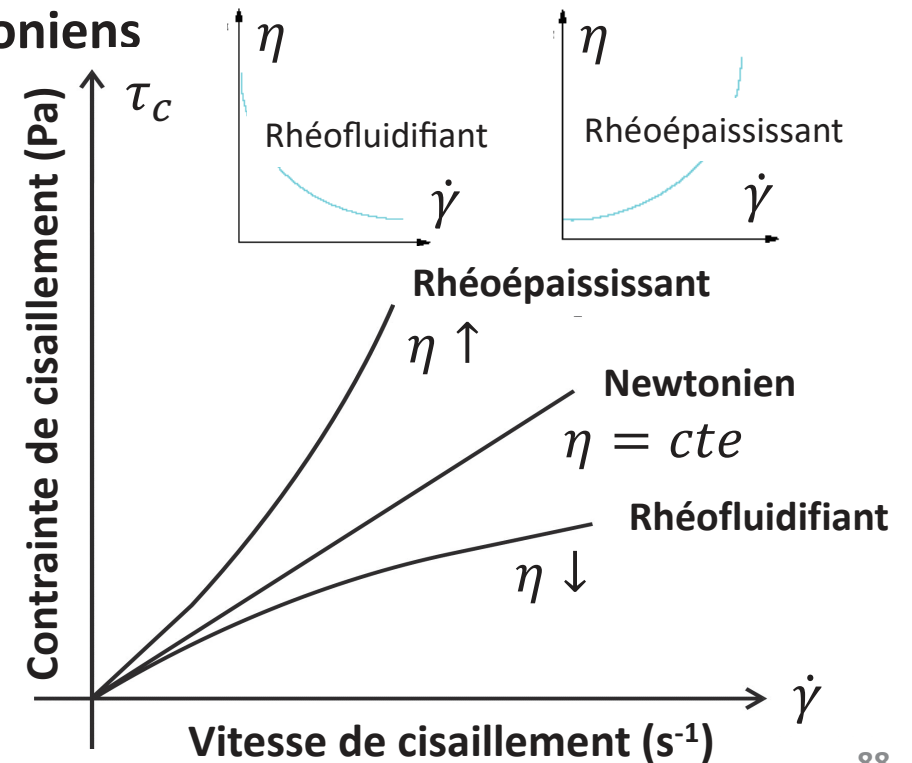
La viscosité dynamique diminue quand  $\dot{\gamma}$  augmente.

Ex. des émulsions ou des suspensions de polymères de masse moléculaire élevée, peintures, encres d'imprimerie...

#### ■ Comportement **rhéoépaississant**

La viscosité dynamique augmente  $\dot{\gamma}$  augmente.

Ex. ciment, dentifrice, glaçage de gâteau, suspensions de polymères à longues chaînes, sables mouillés.



### 3. Les comportements rhéologiques

La viscosité d'un fluide est-elle constante ?

Variations dans le temps

Deux comportements de fluides réels dont la viscosité dépendante du temps :

→ thixotrope/anti-thixotrope et viscoélastique

Fluide thixotrope  $\eta = \eta(t)$

Fluide dont la viscosité  $\eta$  décroît dans le temps quelque soit  $\dot{\gamma}$ .

Fluide viscoélastique  $\eta = \eta(D)$

Fluide dont la viscosité  $\eta$  dépend de la vitesse à laquelle la contrainte est appliquée (dépend du nombre de Deborah).

### 3. Les comportements rhéologiques

La viscosité d'un fluide est-elle constante ?

Variations dans le temps : thixotropie

#### ■ Comportement **thixotrope**

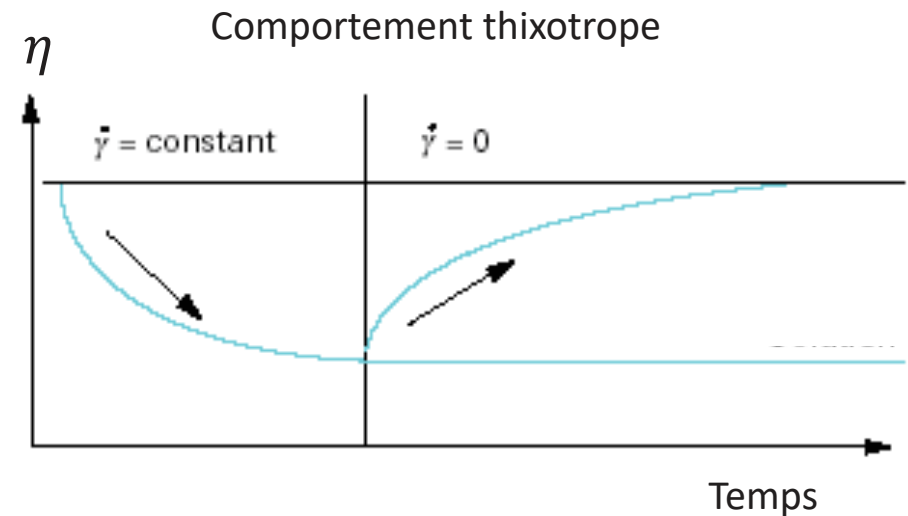
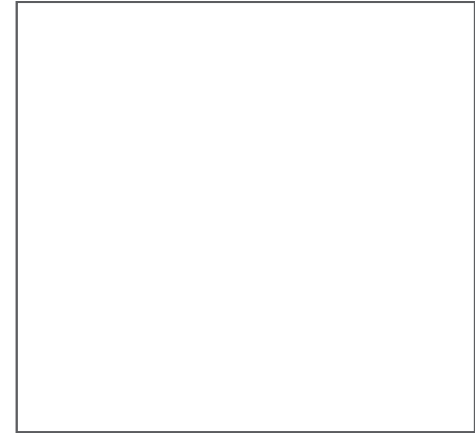
La viscosité dynamique diminue au cours du temps quand on applique  $\dot{\gamma}$  constant.

⇒ désorganisation de la microstructure par le cisaillement  
Ex. suspensions colloïdales : argile, mucus, yaourt, ketchup...

#### ■ Comportement **antithixotrope (rhéopexie)**

La viscosité dynamique augmente au cours du temps quand on applique  $\dot{\gamma}$  constant.

⇒ organisation de la microstructure par le cisaillement  
Ex. suspensions colloïdales : empois...





# Les comportements rhéologiques

La viscosité d'un fluide est-elle constante ?

Variations dans le temps : viscoélasticité

Les fluides viscoélastiques présentent des **caractéristiques visqueuses (et) ou élastiques**, lorsqu'ils subissent une sollicitation. → Dépend du nombre de Deborah :

$$D = \frac{\tau_{relaxation}}{\tau_{sollicitation}} = \dot{\gamma} \tau_{relaxation}$$

**viscoélasticité**

Comportement « fluide » (visqueux)

$$D \ll 1$$

Comportement « solide » (élastique)

$$D \gg 1$$

# Les comportements rhéologiques

La viscosité d'un fluide est-elle constante ?

Variations dans le temps : viscoélasticité

$$D = \dot{\gamma} \tau_{relaxation}$$

$$\dot{\gamma} \text{ « petit »} \Rightarrow D \ll 1$$

Comportement « fluide » : écoulement

$$\dot{\gamma} \text{ « grand »} \Rightarrow D \gg 1$$

Comportement « solide » : rebond

Ex. Le mucus peut être considéré comme un gel capable de s'écouler comme les liquides (viscosité) et de se déformer comme les solides (élasticité).



Ex. le slime <sup>92</sup>

# Les comportements rhéologiques

La viscosité d'un fluide est-elle constante ?

Variations dans le temps : viscoélasticité

Apparition d'une contrainte normale lorsque l'on sollicite le fluide en cisaillement :

⇒ le fluide « remonte » le long de l'agitateur.

Ex. l'effet **Weissenberg**



### 3. Les comportements rhéologiques

#### Récapitulatif des différents comportements rhéologiques

##### Indépendants du temps

**Newtonien**  
Indépendant de  $\dot{\gamma}$   
 $\eta = cte$

**Non-newtonien**  
Dépendant de  $\dot{\gamma}$   
*Rhéofluidifiant*  
 $\eta = \eta(\dot{\gamma}) \downarrow$   
*Rhéoépaississant*  
 $\eta = \eta(\dot{\gamma}) \uparrow$   
*Fluides à seuil*

##### Dépendants du temps

**Thixotrope**  
*Thixotrope*  
 $\eta = \eta(t) \downarrow$   
*Antithixotrope*  
(rhéopexie)  
 $\eta = \eta(t) \uparrow$

**Viscoélastique**  
 $\eta = \eta(\tau_{sollicitation})$

### 3. Les comportements rhéologiques

#### Le sang... un fluide non newtonien

Le sang est assimilé à une suspension : cellules (hématies) en suspension dans une solution macromoléculaire (plasma)

→ Le sang est un fluide **rhéofluidifiant**.

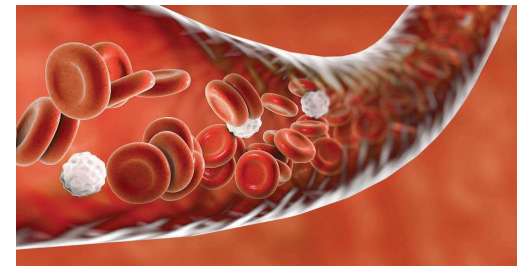
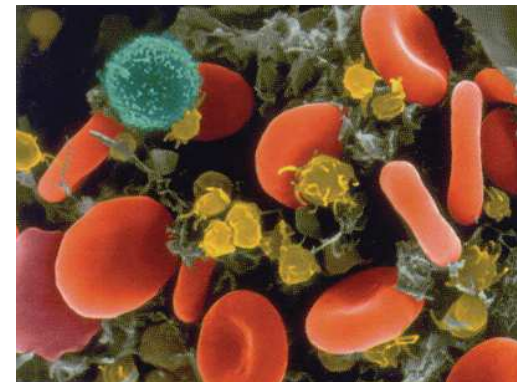
Les principaux facteurs qui déterminent la viscosité du sang sont :

- (i) le nombre d'hématies ainsi que leur conformation,
- (ii) la viscosité du plasma,
- (iii) l'intensité du **cisaillement appliqué**.

« La rhéofluidification du sang est associée à des changements dynamiques de morphologie des globules rouges, ceux-ci prenant des formes complexes polylobées inconnues jusqu'à présent. »

Centre de Biochimie Structurale de Montpellier, PNAS 2016 .

Remarque : on considèrera néanmoins souvent le sang comme un fluide Newtonien.



# 3. Les comportements rhéologiques

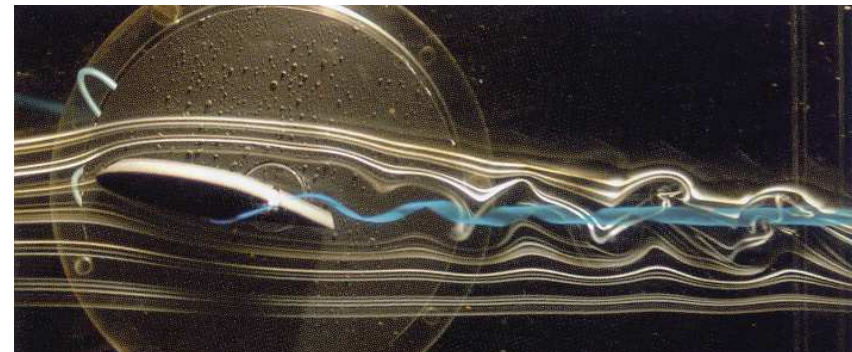
## Impact de la viscosité sur l'écoulement

Écoulement  $\Rightarrow$  Profil de vitesse

■ Ex. écoulement entre deux plans (dont l'un fixe)



■ Ex. écoulement autour d'un obstacle



Description cinématique d'un écoulement : **lignes de courant**

**Ligne de courant** : toute courbe dont la tangente en chacun de ses points est, à chaque instant et localement, perpendiculaire au vecteur vitesse du champ d'écoulement.



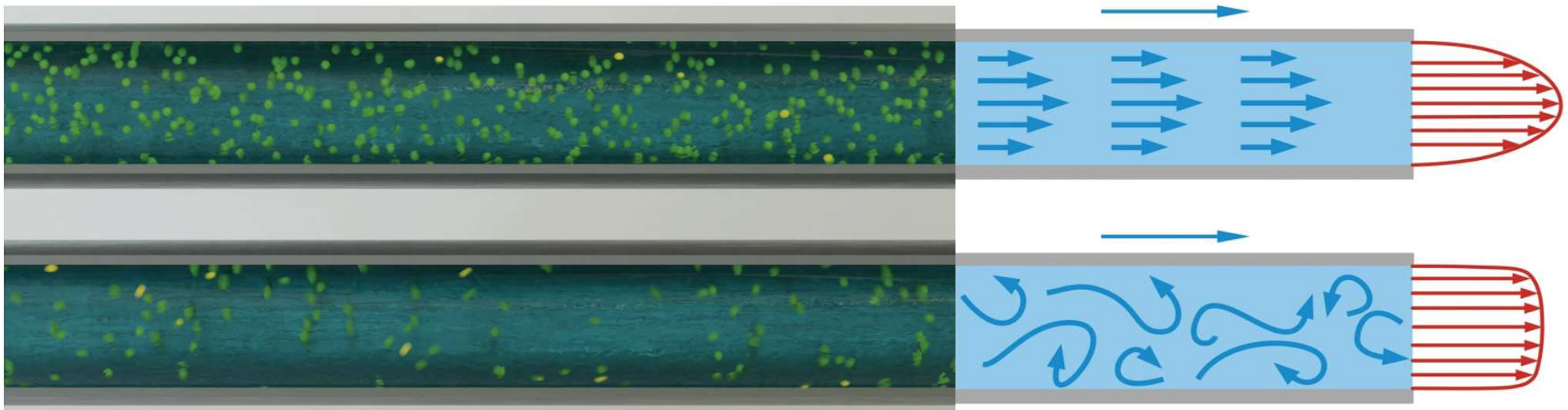
# 3. Les comportements rhéologiques

## Impact de la viscosité sur l'écoulement

Écoulement  $\Rightarrow$  Profil de vitesse

■ Ex. écoulement dans une conduite

« Petite vitesse »



« Grande vitesse »

**Écoulement laminaire**

**Écoulement turbulent**

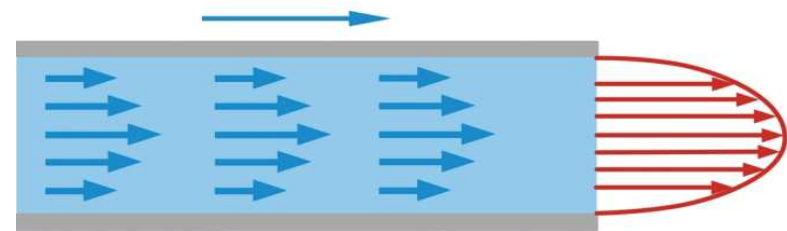
# 3. Les comportements rhéologiques

## Impact de la viscosité sur l'écoulement

Deux régimes majeurs d'écoulement

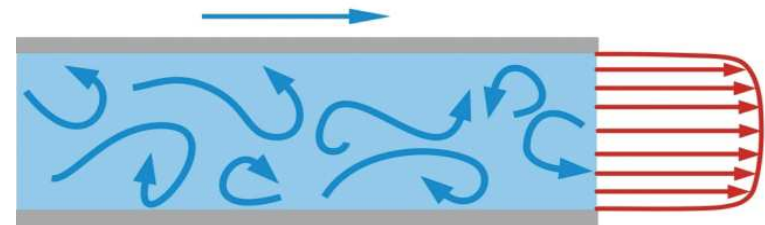
### ■ Ecoulement laminaire

- ⇒ Les lignes de courant ne se coupent pas entre elles.
- ⇒ Profil de vitesse parabolique.



### ■ Ecoulement turbulent

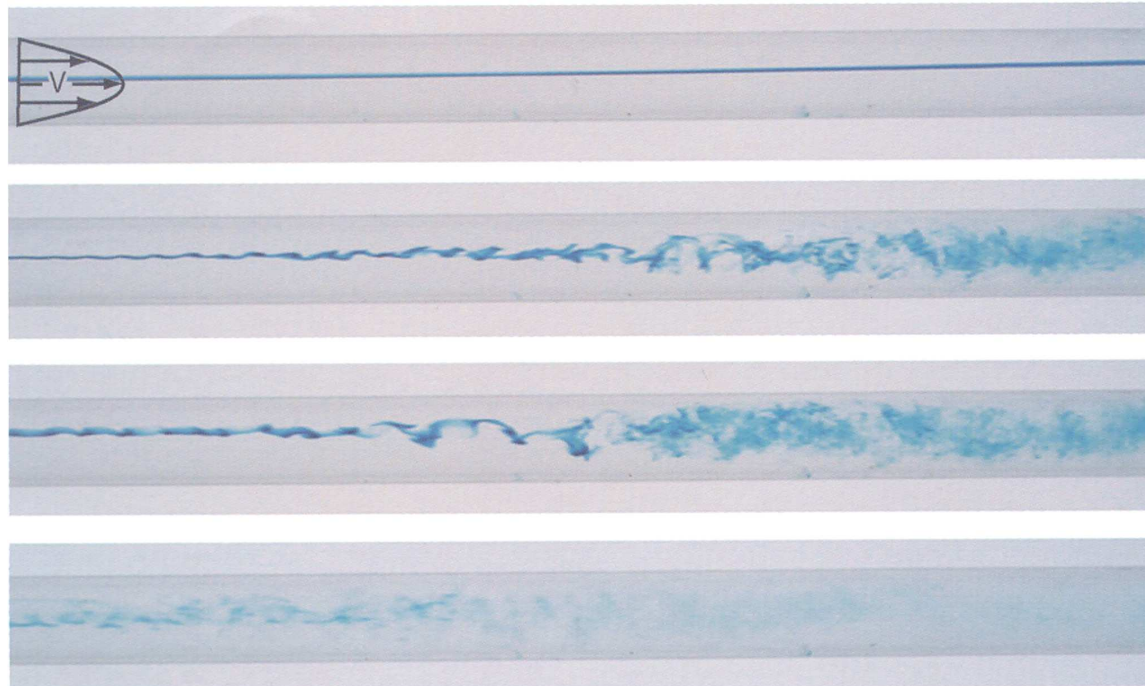
- ⇒ Intersection entre les lignes de courant et présence de vortex.
- ⇒ Profil de vitesse avec un front constant (parabolique « aplati »).



### 3. Les comportements rhéologiques

#### Impact de la viscosité sur l'écoulement

Deux régimes majeurs d'écoulement



Augmentation  
de la vitesse



Illustration de la transition entre un régime d'écoulement **laminaire** et un régime **turbulent**.

# 3. Les comportements rhéologiques

## Impact de la viscosité sur l'écoulement

→ L'écoulement d'un fluide réel  $\Rightarrow$  profil de vitesse qui dépend de :

- (i) la viscosité dynamique  $\eta$  et la masse volumique du fluide  $\rho$  (viscosité cinématique  $\nu = \eta/\rho$ ),
- (ii) La vitesse moyenne de l'écoulement  $V$ ,
- (iii) Une dimension caractéristique de l'écoulement  $D$  (diamètre de la conduite).

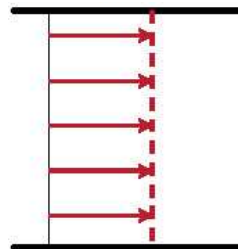
Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho V D}{\eta} = \frac{V D}{\nu}$$



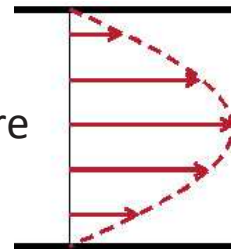
→ L'écoulement d'un fluide parfait (viscosité nulle)  $\Rightarrow$  profil de vitesse uniforme et constant.

Fluide parfait

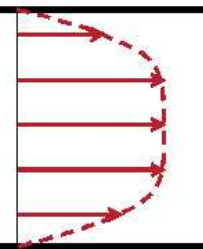


Fluide réel

Laminaire

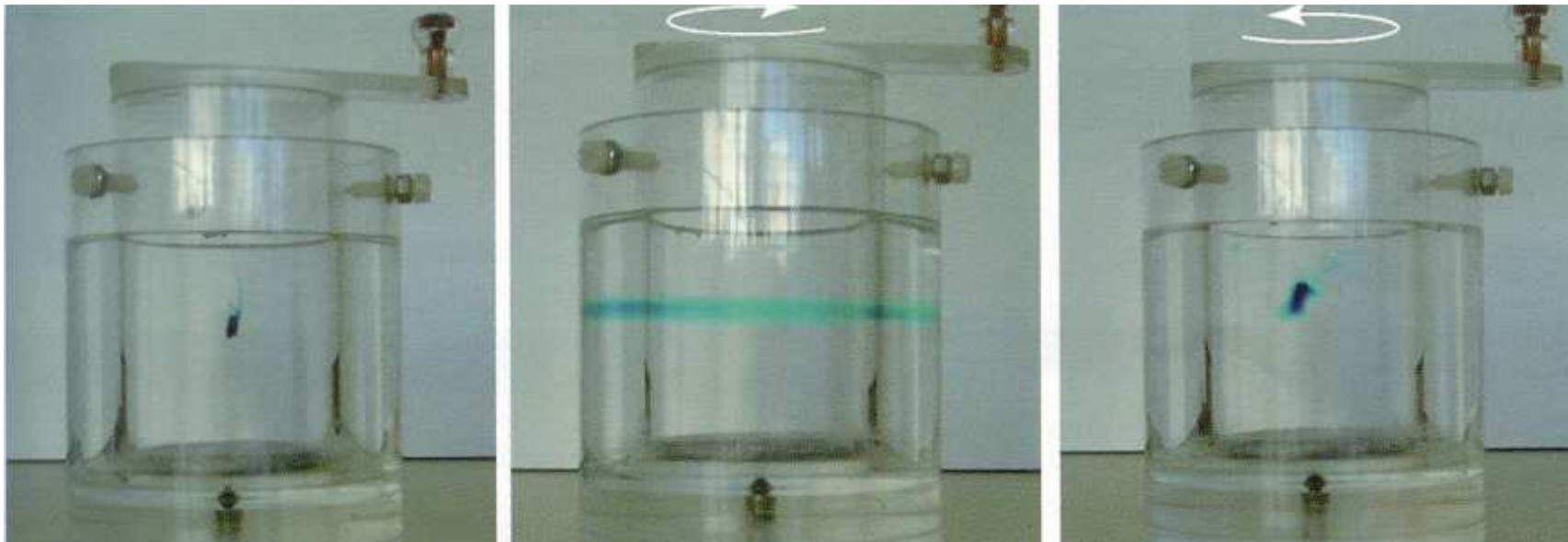


Turbulent



### 3. Les comportements rhéologiques

#### Impact de la viscosité sur l'écoulement



Réversibilité cinématique d'un écoulement laminaire : **expérience de Taylor (1970)**



## Partie 4

### La tension de surface et la capillarité

- Notion de tension de surface
- Phénomènes capillaires
- Loi de Laplace





## 4. La tension de surface et la capillarité

### Notion de tension superficielle

→ Il existe une propriété particulière des fluides au niveau de l'interface entre deux fluides non miscibles, et plus généralement entre deux phases non miscibles (liquide/gaz, solide/liquide, solide/gaz, liquide/liquide).

**Interface** = surface de séparation entre **deux phases condensées**.

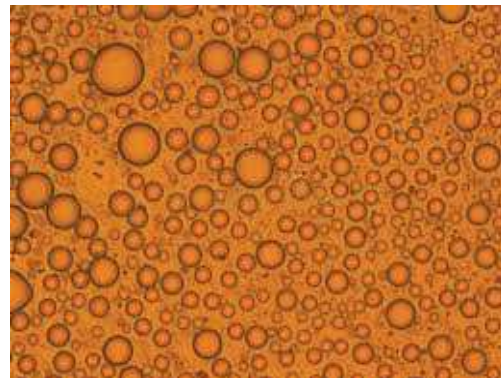
Ex. une phase liquide et une vapeur, de l'eau et de l'huile, surface solide mouillée...



Eau/air/verre



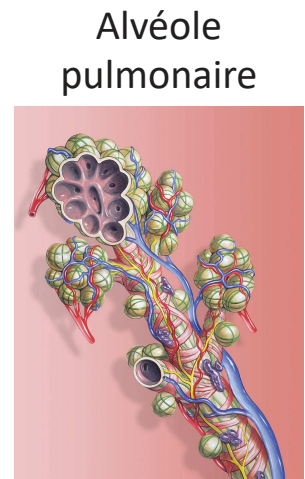
Eau/huile



Emulsion huile dans eau



Mousse

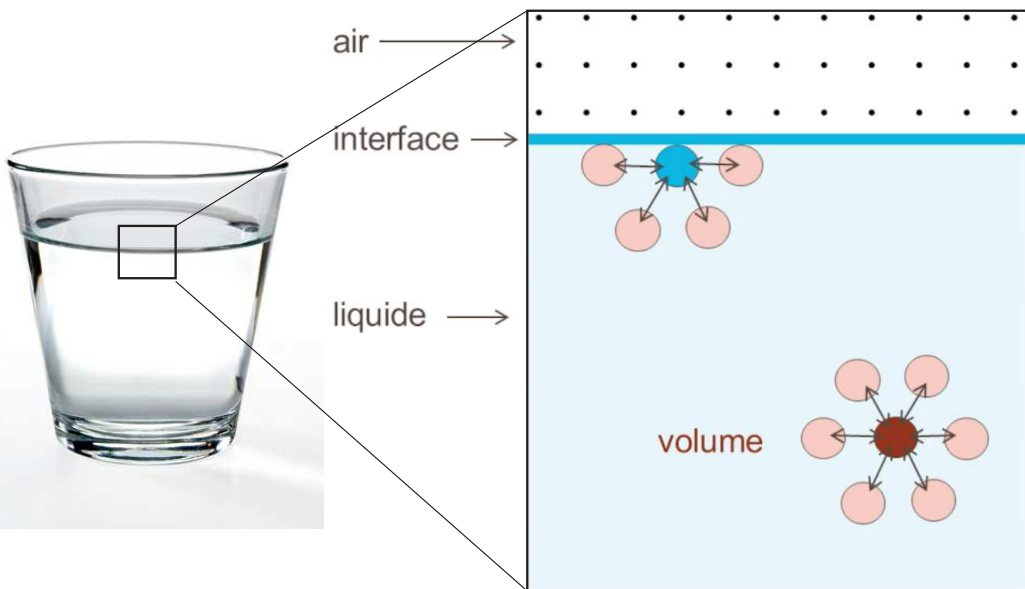


Alvéole  
pulmonaire

## 4. La tension de surface et la capillarité

### Notion de tension superficielle

→ Les **molécules présentées aux interfaces** ne sont pas soumises aux mêmes interactions que les molécules au sein des phases ⇒ **déficit d'interactions/mêmes molécules du volume**.



Ex. Interface liquide/gaz

Coût énergétique associé à la présence de molécules en surfaces  $\approx$  **quelques % de  $|U_0|$**  (énergie d'interaction inter-moléculaire).

Surface créée par une molécule à la surface  $\approx d^2$  (taille d'une molécule).

**Coût énergétique par unité de surface**

$$\approx |U_0|/d^2 \text{ J.m}^{-2}$$

## 4. La tension de surface et la capillarité

### Notion de tension superficielle

La **tension de surface** est le coût énergétique par unité de surface :

$$\gamma \sim \frac{|U_0|}{d^2} \quad \gamma : \text{tension superficielle en } \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \text{ ou } \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$$

→  $\gamma$  dépend de la nature et de l'intensité des interactions intermoléculaires ( $U_0$ ).

Liquide	$U_0$ (J)	d	Interface	$\gamma$ ( $\text{J}/\text{m}^2$ )
Huile	$4 \cdot 10^{-21}$ (vdW)	~0,1-1 nm	Huile/air	~0,02
Eau	$40 \cdot 10^{-21}$ (liaison hydrogène)	~0,1-1 nm	Eau/air	~0,07

→  $\gamma$  dépend de la température :  $\gamma \downarrow$  quand  $T \uparrow$

## 4. La tension de surface et la capillarité

### Notion de tension superficielle

L' **énergie de surface** est présente au niveau de toutes les interfaces :

$$E_{surface} = \gamma S$$

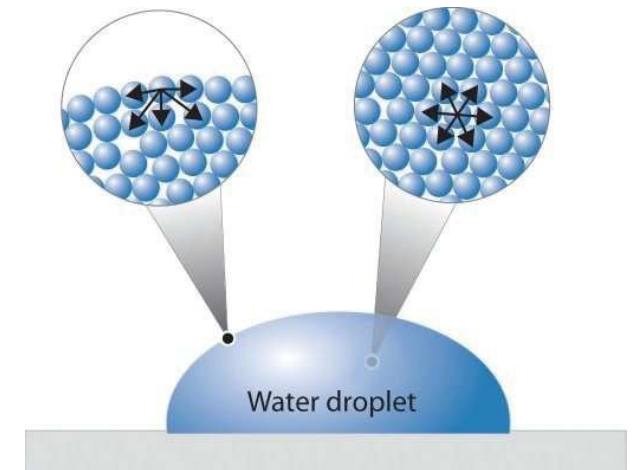
avec S l'aire de l'interface

→ Un **phénomène** est caractérisé de : **capillaire**, lorsque l'interaction majeure qui l'induit est due à la tension de surface (i.e. la capillarité)

→ Problématique de la minimisation de l'énergie de surface :

comme  $\gamma$  constant  $\Rightarrow$  **diminution la surface par adaptation de la forme**

Conséquence : *la forme des gouttes*



# 4. La tension de surface et la capillarité

## Phénomènes capillaires

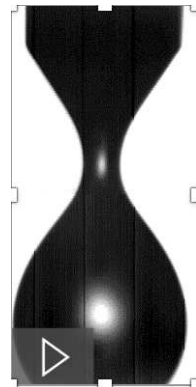
→ Quelques un des très nombreux phénomènes capillaires



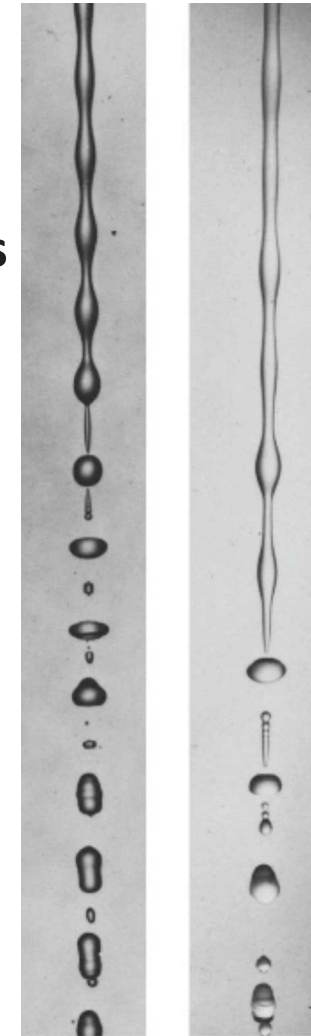
Gouttes sessiles



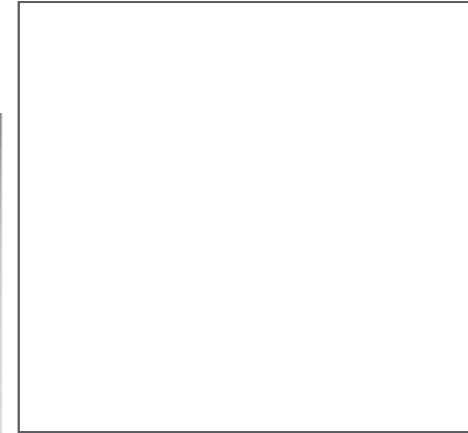
Ondes capillaires



Gouttes pendantes



Rupture d'un jet



Remontée capillaire



## 4. La tension de surface et la capillarité

### Phénomènes capillaires

→ Comparaison énergie de surface/énergie potentielle  
⇒ portée forces capillaires

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$$

$g$  est l'accélération de la gravité ( $\text{m.s}^{-2}$ )

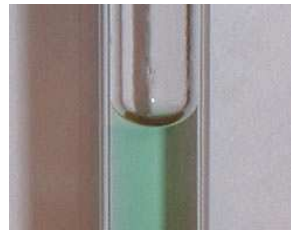
$\lambda_c = 2,72$  mm pour de l'eau à  $20^\circ\text{C}$

La **longueur capillaire**  $\lambda_c$  est la taille caractéristique à partir de laquelle la gravité est plus « intense » que la capillarité.

→ taille à partir de laquelle :

les ménisques capillaires disparaissent,

les gouttes s'écrasent sous leur propre poids en flaques.



Ex. Diamètre maximum des gouttes  
 $D_g \sim 2\lambda_c \approx 6$  mm pour de l'eau

quand  $T \uparrow \Rightarrow \gamma \downarrow \Rightarrow \lambda_c \downarrow$   
Goutte plus petite

quand  $\rho \uparrow \Rightarrow \gamma \downarrow \Rightarrow \lambda_c \downarrow$   
Goutte plus petite

quand  $g \downarrow \Rightarrow \gamma \uparrow \Rightarrow \lambda_c \uparrow$   
Goutte plus grande



## 4. La tension de surface et la capillarité

### Phénomènes capillaires

Quand  $g \downarrow \Rightarrow \gamma \uparrow \Rightarrow \lambda_c \uparrow$  goutte (beaucoup) plus grande



Goutte en apesanteur



Astronaute Scott Kelly

## 4. La tension de surface et la capillarité

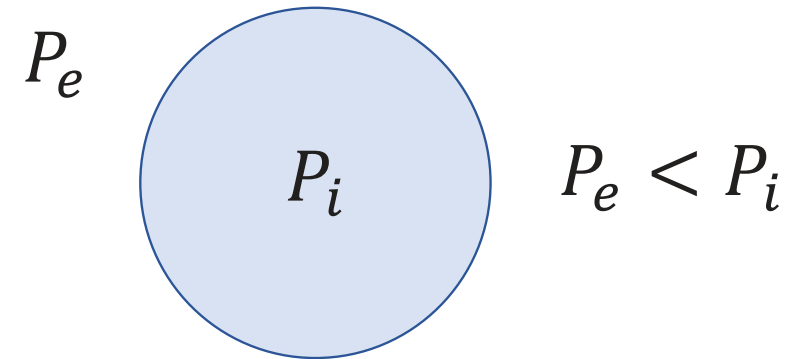
### Loi de Laplace

**Ballon de baudruche** : la surpression génère une tension de l'enveloppe du ballon.

**Goutte de liquide**: la tension superficielle génère une surpression.



Soit une **goutte sphérique** de rayon  $R$



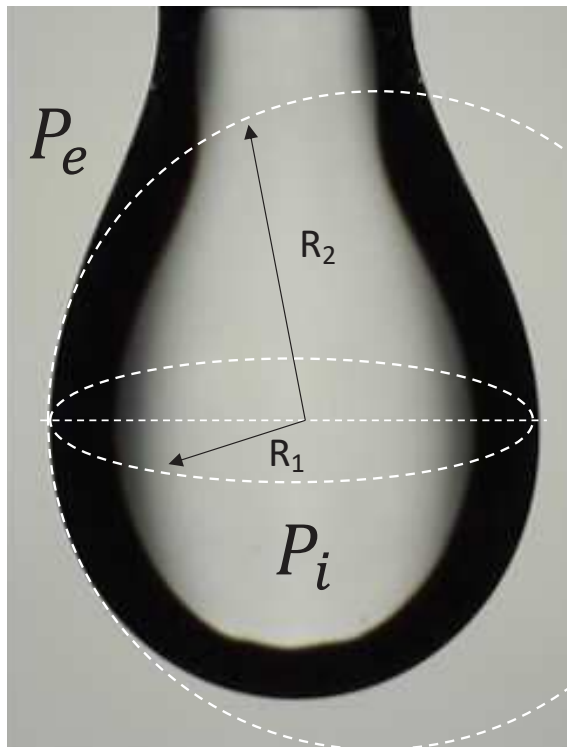
loi de Laplace

$$P_i - P_e = \Delta P = \frac{2\gamma}{R}$$

## 4. La tension de surface et la capillarité

### Loi de Laplace

Gouttes non sphériques : 2 rayons de courbure  $R_1$  et  $R_2$



### loi de Laplace généralisée

$$P_i - P_e = \Delta P = \gamma \left( \frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2} \right)$$

Signe  $+$  pour les courbures de même sens

Signe  $-$  pour les courbures inverses

**Remarque** : application en biophysique  $\rightarrow$  comportement des artères.