

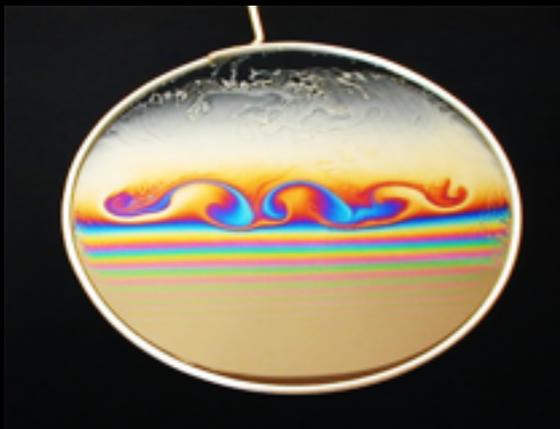
# La physique des (aux) interfaces



Mardi 30/05  
**Marcher sur l'eau**



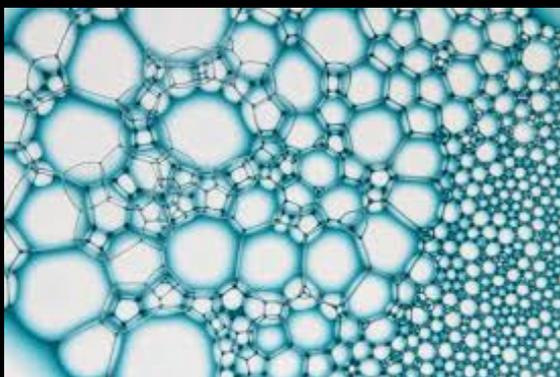
Wiebke Drenckhan  
Directrice de Recherche  
CNRS  
Institut Charles Sadron



Mardi 07/06  
**Comment se faire un film... moléculaire**



Thierry Charitat  
Professeur de Physique  
Université de Strasbourg  
Institut Charles Sadron



Mardi 14/06  
**Et pour finir ...  
une petite mousse**



Faculté de **physique et ingénierie**

Université de Strasbourg





# Solide - Liquide - Gaz

**Solide ?**

**Liquide ?**

**Gaz ?**

# Solide - Liquide - Gaz: vision macroscopique

## Solide

- Dense, compact....
- Forme propre;
- Résiste au cisaillement - Elasticité;
- Ne coule pas;

## Liquide

- Densité proche d'un solide;
- Adopte la forme du contenant;
- Résiste faiblement au cisaillement - Elasticité (?);
- Coule;

## Gaz

- Faible densité;
- Occupe tout le volume du contenant;
- Résiste faiblement au cisaillement;



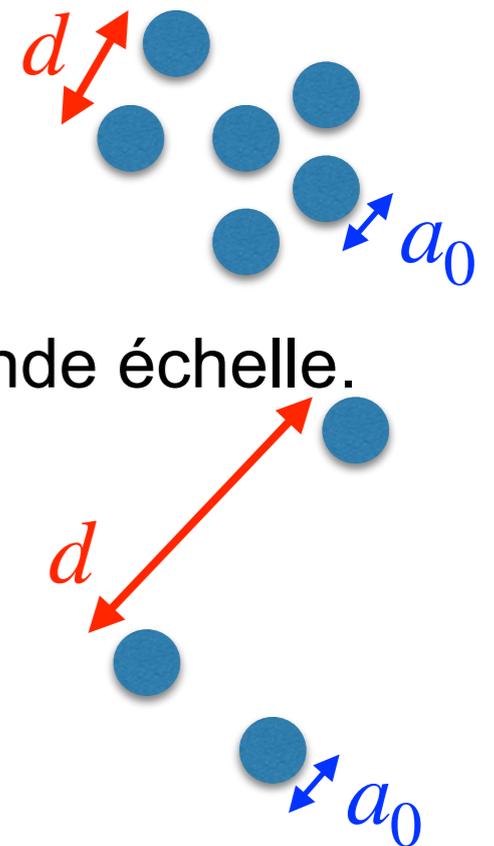
# Solide - Liquide - Gaz: vision microscopique (1)

## Solide

- distance entre atome  $d$  comparable à la taille des atomes  $a_0$ ;
- Ordre à longue portée (cristallographie), amorphe;
- atomes (molécules) bougent *rapidement* mais restent localisés.

## Liquide

- distance entre atome  $d$  comparable à la taille des atomes  $a_0$ ;
- Ordre à courte-portée;
- atomes (molécules) bougent *rapidement* et peuvent diffuser à grande échelle.



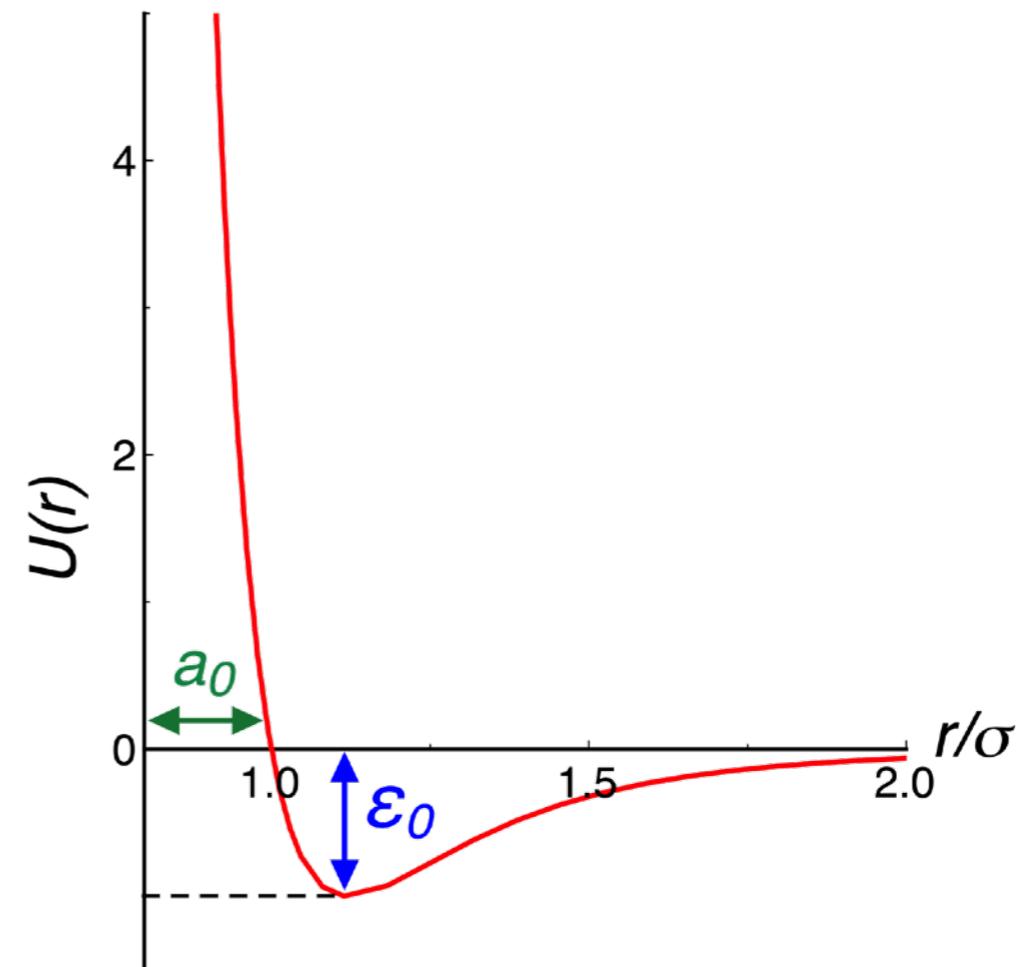
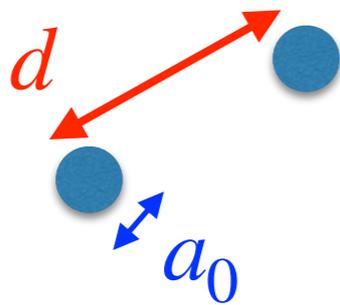
## Gaz

- distance entre atome  $d$  grande devant la taille des atomes  $a_0$ ;
- atomes (molécules) bougent *rapidement* et peuvent diffuser à grande échelle.

[https://phet.colorado.edu/sims/html/states-of-matter-basics/latest/states-of-matter-basics\\_fr.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/states-of-matter-basics/latest/states-of-matter-basics_fr.html)

# Solide - Liquide - Gaz: vision microscopique (2)

## Interaction entre les molécules



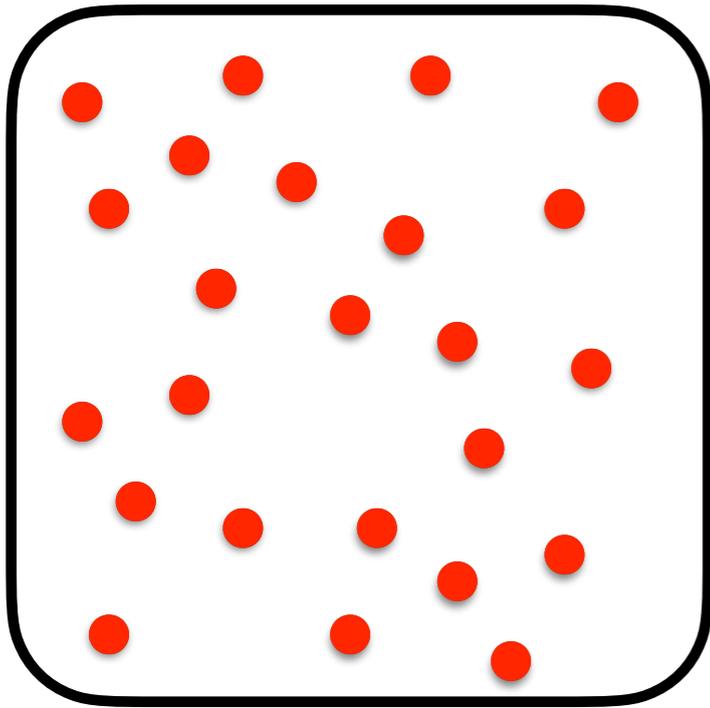
- répulsion à très courte portée ( $\sim$  la taille des atomes  $a_0$ );
- attraction à courte-portée;
- atomes (molécules) bougent rapidement et peuvent diffuser à grande échelle.

**L'énergie  $E$  tend à favoriser un système ordonné: solide, liquide.**

# Solide - Liquide - Gaz: vision microscopique (2)

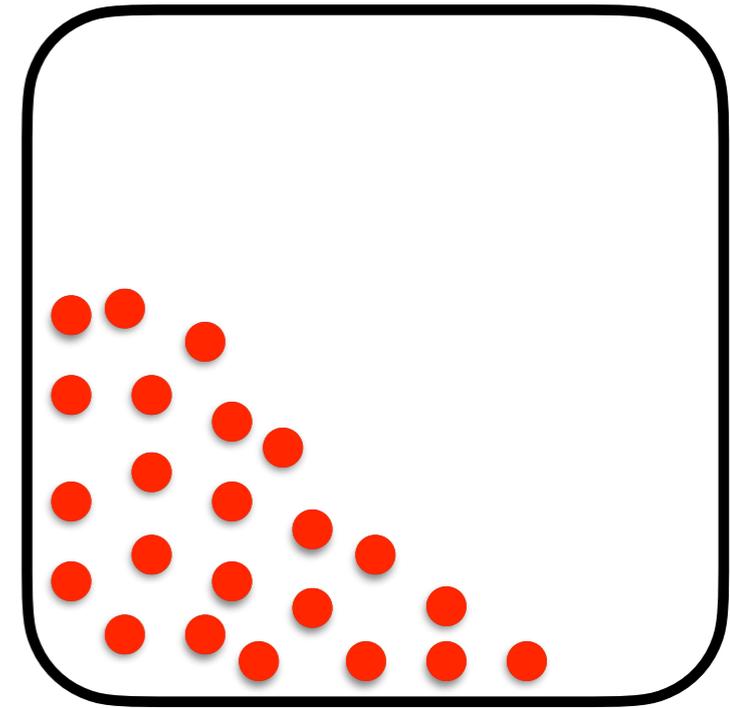
## Agitation thermique

- Beaucoup d'états accessibles pour le système (on ne peut pas tout connaître);
- Approche probabiliste.



$$S = k_B \log \Omega$$

L'entropie mesure la perte d'information sur l'état microscopique du système



Beaucoup d'états microscopiques

⇔ Probabilité  $\mathcal{P}$  est élevée

⇔ entropie  $S$  est grande

Peu d'états microscopiques

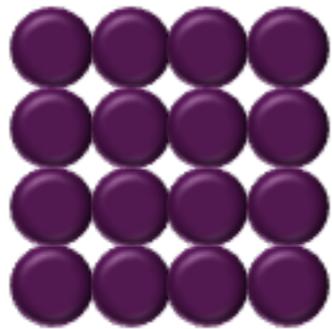
⇔ Probabilité  $\mathcal{P}$  est faible

⇔ entropie  $S$  est petite

[https://phet.colorado.edu/sims/html/states-of-matter-basics/latest/states-of-matter-basics\\_fr.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/states-of-matter-basics/latest/states-of-matter-basics_fr.html)

## Solide - Liquide - Gaz: thermodynamique (statistique)

$$\mathcal{F} = E - TS$$

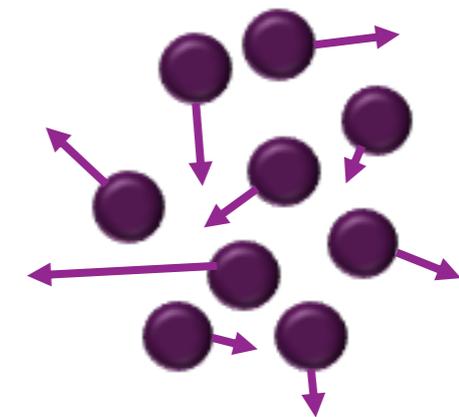


solide ordonné

$$\mathcal{F} \sim E$$



$$E \sim TS$$

liquide, fluide complexe,  
matière molle

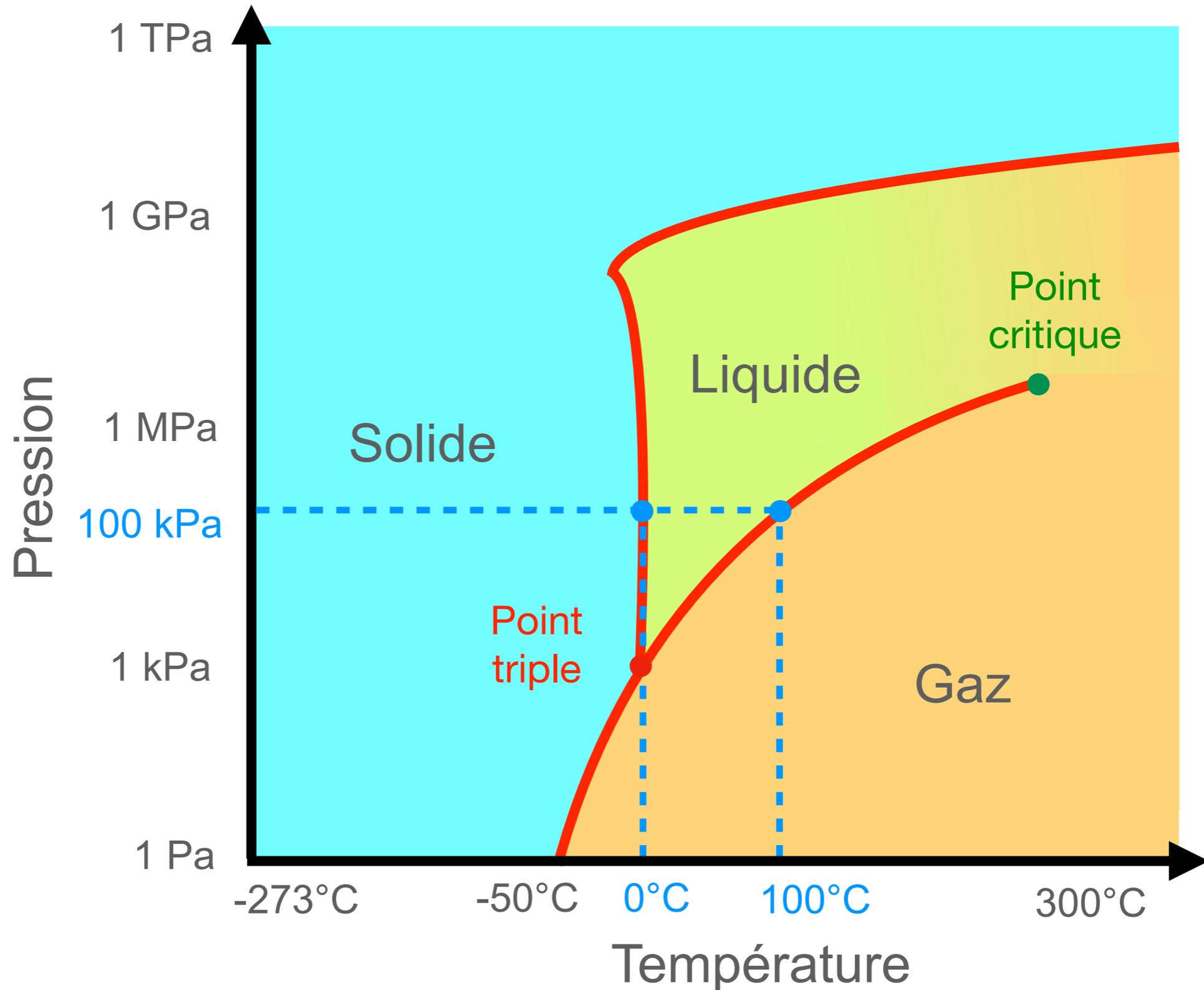
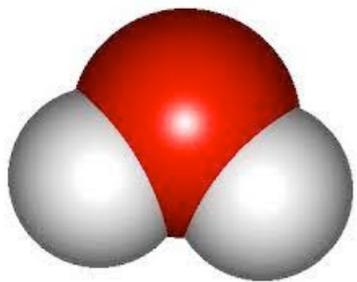
gaz désordonné

$$\mathcal{F} = -TS$$

**Entropie  $S$  tend à favoriser un système désordonné: liquide, gaz.**

# Solide - Liquide - Gaz: diagramme de phase

Eau



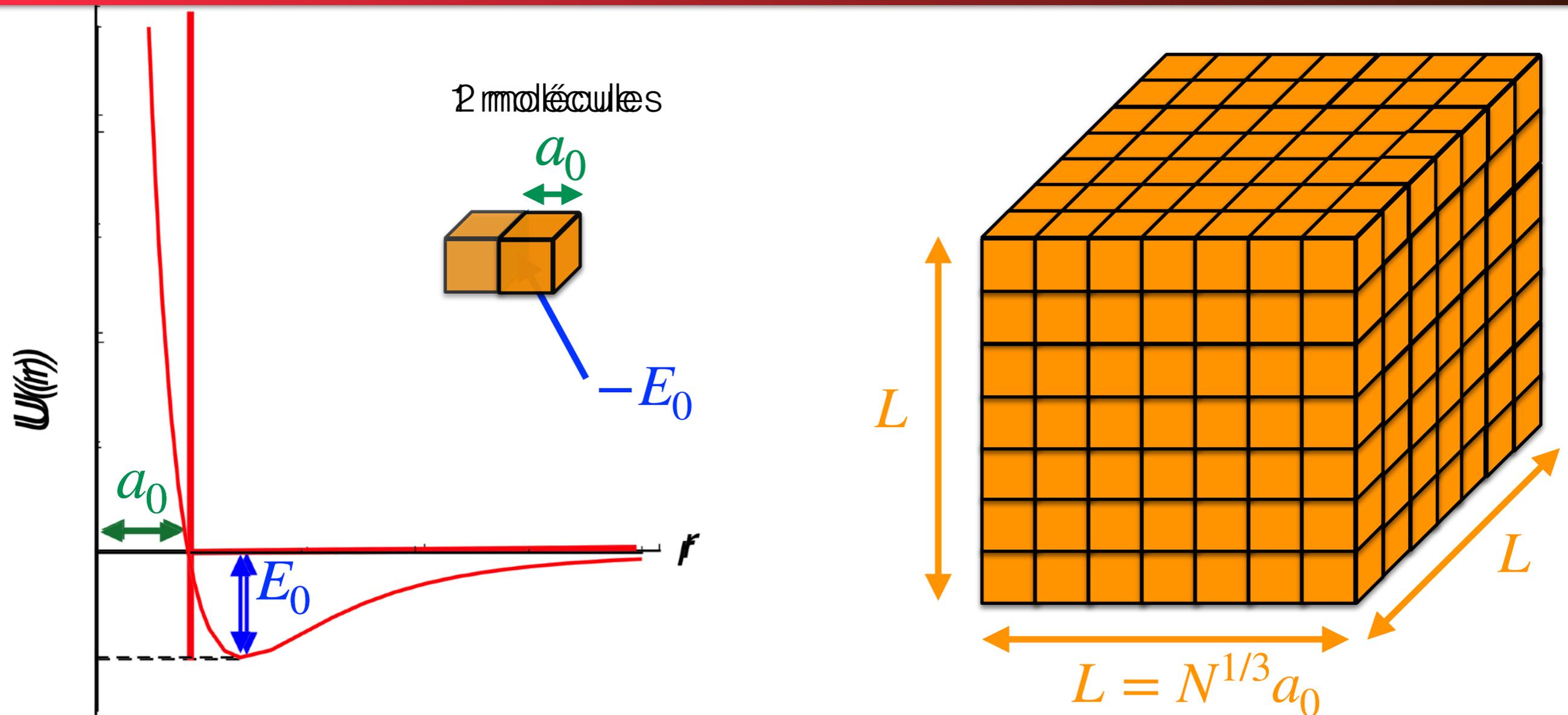
# Solide - Liquide - Gaz: diagramme de phase

Interface liquide/gaz, solide/liquide, solide/gaz

Comment décrire les interfaces ?

Quelles sont les propriétés des interfaces ?

# Interface: notion de tension de surface

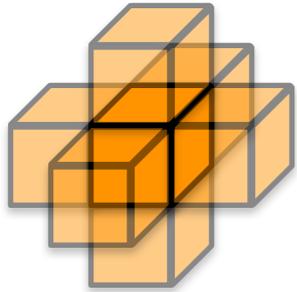


- Volume  $V = L^3 = Na_0^3$ , surface  $\mathcal{A} = 6L^2 = 6N^{2/3}a_0^2$
- Quelle est l'énergie associée à ce volume de matière ?

# Interface: notion de tension de surface

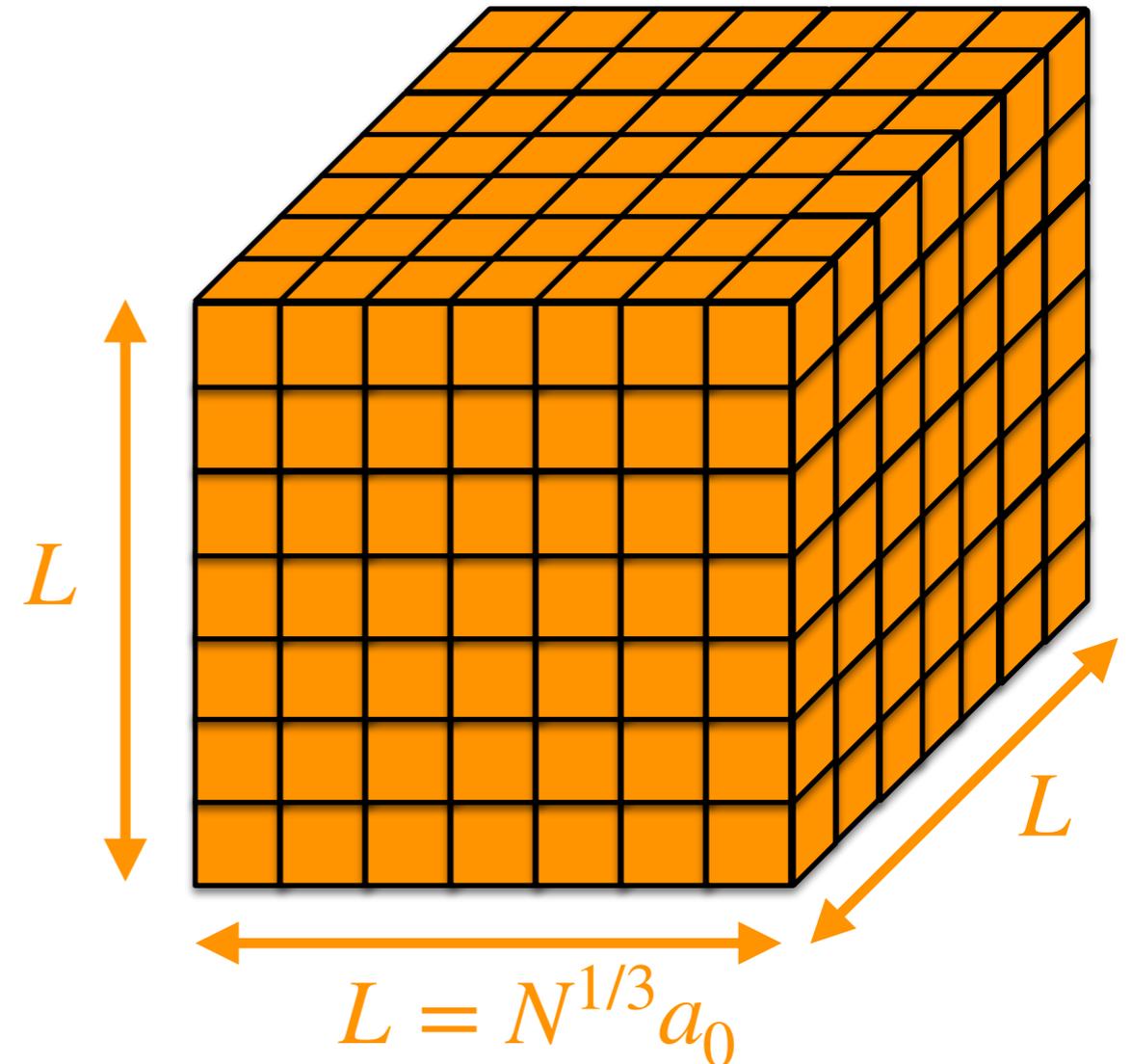
- Volume  $V = L^3 = Na_0^3$ ,
- Surface  $\mathcal{A} = 6L^2 = 6N^{2/3}a_0^2$ ,
- Energie ?

- molécule dans le volume = 6 voisins



$-E_0$  par paire de molécule

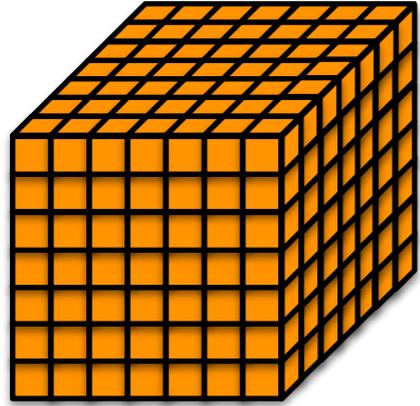
$$\mathcal{E}_{\text{volume}} = 6 \frac{N}{2} (-E_0)$$



- mais les  $6 \times N^{2/3}$  molécules aux interfaces n'ont que 5 voisins !

$$\mathcal{E}_{\text{tot}} = -3NE_0 + 6N^{2/3}E_0 = -3 \frac{E_0}{a_0^3} V + \frac{E_0}{a_0^2} \mathcal{A}$$

# Interface: notion de tension de surface



Volume  $V$ , surface  $\mathcal{A}$

$$\mathcal{E}_{\text{tot}} = -3 \frac{E_0}{a_0^3} V + \frac{E_0}{a_0^2} \mathcal{A}$$

$< 0$ ,  
 $\propto V$ ,  
 énergie de  
 cohésion

$> 0$ ,  
 $\propto \mathcal{A}$ ,  
 coût en énergie  
 de la surface

On définit la tension de surface  $\gamma = \frac{E_0}{a_0^2}$  en J/m<sup>2</sup>

Liquide	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Temp. d'ébullition (°C)	Tension de surface (mJ/m)
H2 liquide	70.8	-253	2
N2 liquide	806	-196	8.9
Hexane	655	69	18
Octane	703	125	21.6
Eau	1000	100	72
Mercure	5430	300	487

# Interface: force de tension de surface

La surface coûte de l'énergie  $\mathcal{F} = \gamma \mathcal{A}$



la surface tend à se réduire

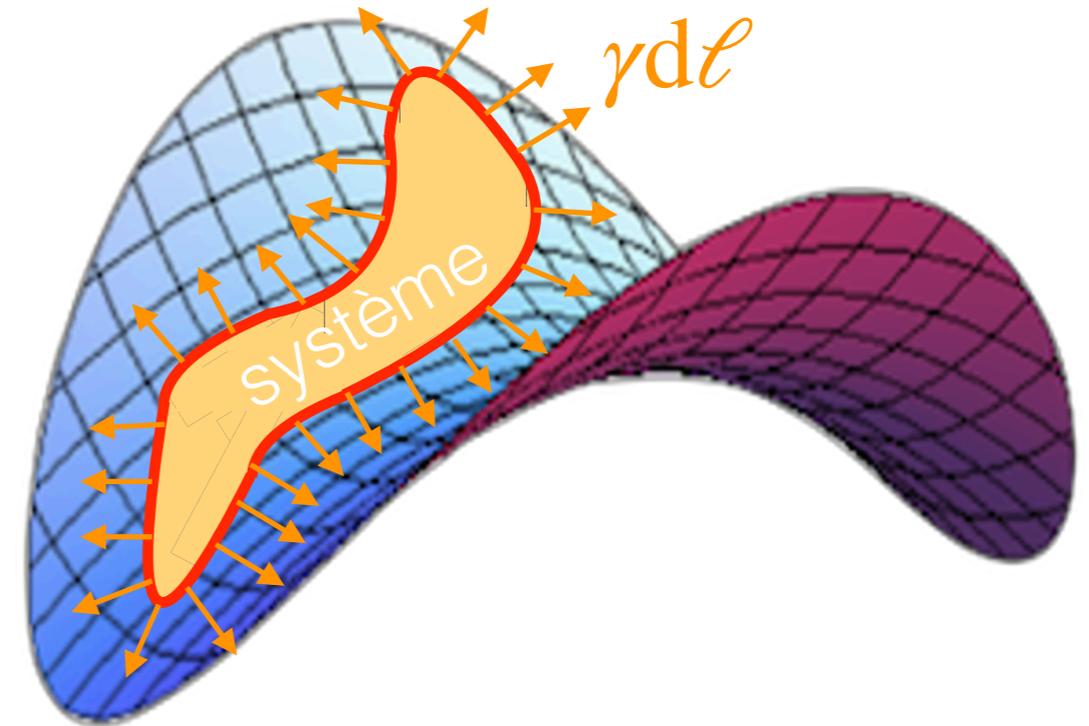


Il existe une force qui tire sur les bords

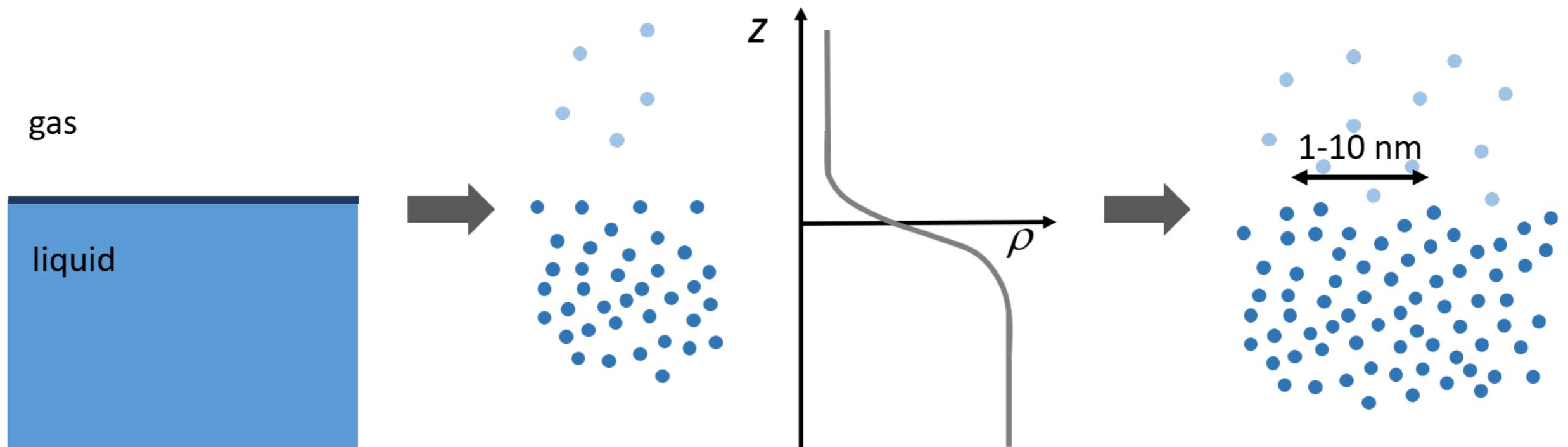
$\gamma$  en J/m<sup>2</sup> mais aussi en N/m

La tension de surface produit une force:

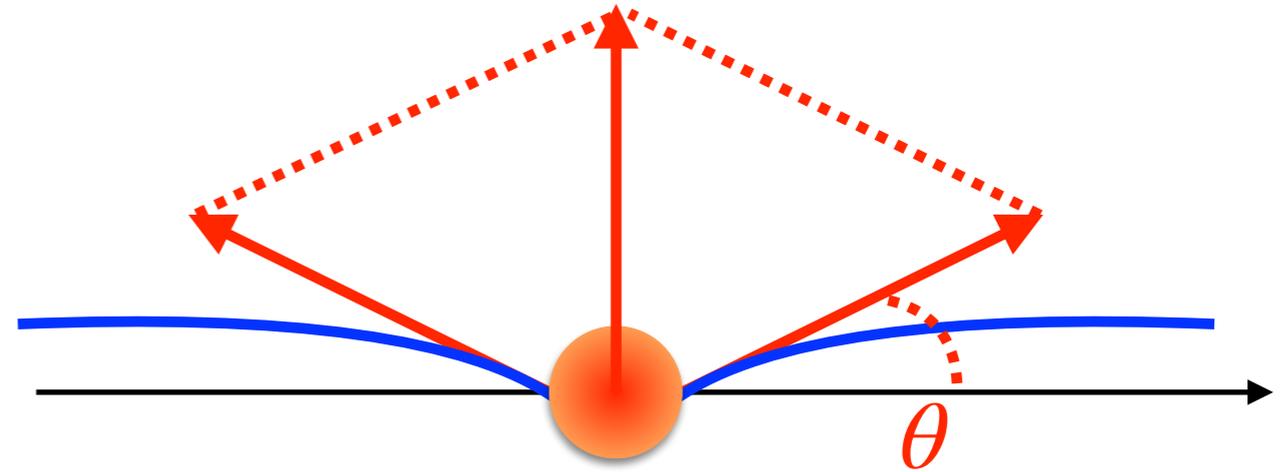
- exercée par une interface sur une ligne;
- proportionnelle à la longueur de la ligne  $\gamma \ell$ ;
- tangente à l'interface.



# Interface: une image plus réaliste



# Application: objets flottants

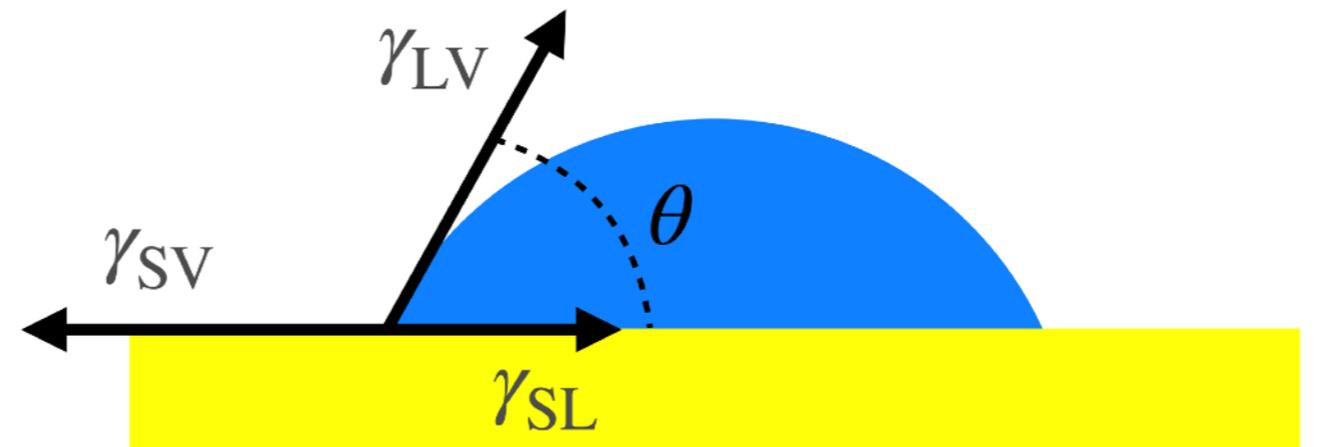


Trombone flottant (0.5 g, 9 cm de long)

# Application: le mouillage (1) Young-Dupré (~1800)



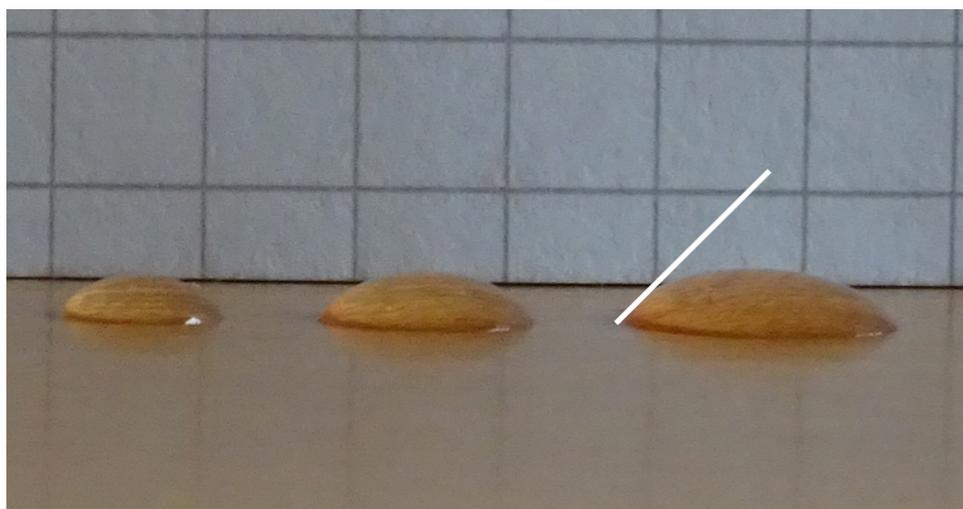
Gouttes sur une surface solide



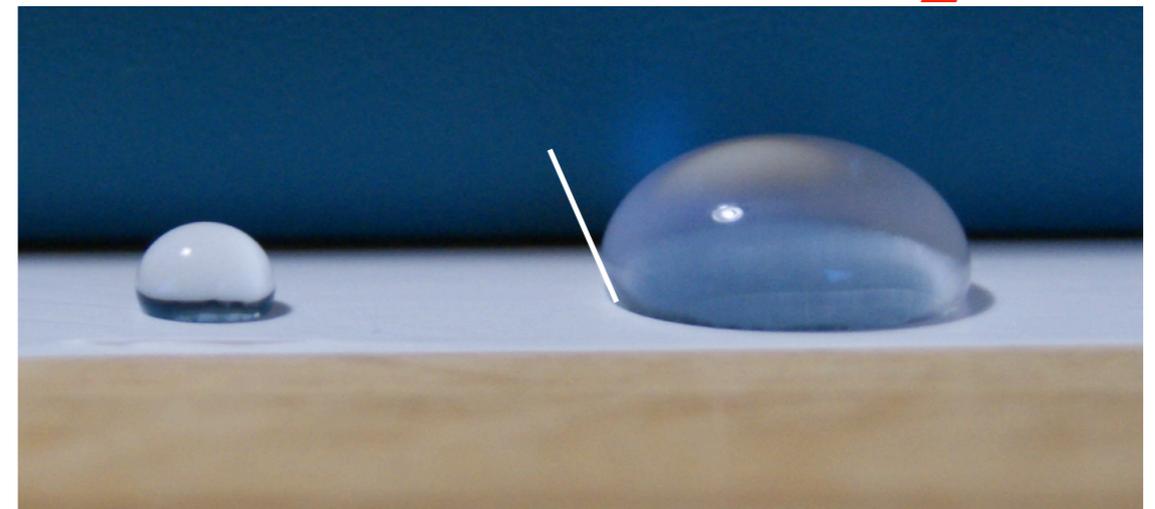
$$\vec{\gamma}_{SL} + \vec{\gamma}_{LV} + \vec{\gamma}_{SV} = 0$$

Projection horizontale  $\gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta - \gamma_{SV} = 0 \Rightarrow \cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}}$

Mouillage partiel  $\theta < \frac{\pi}{2}$

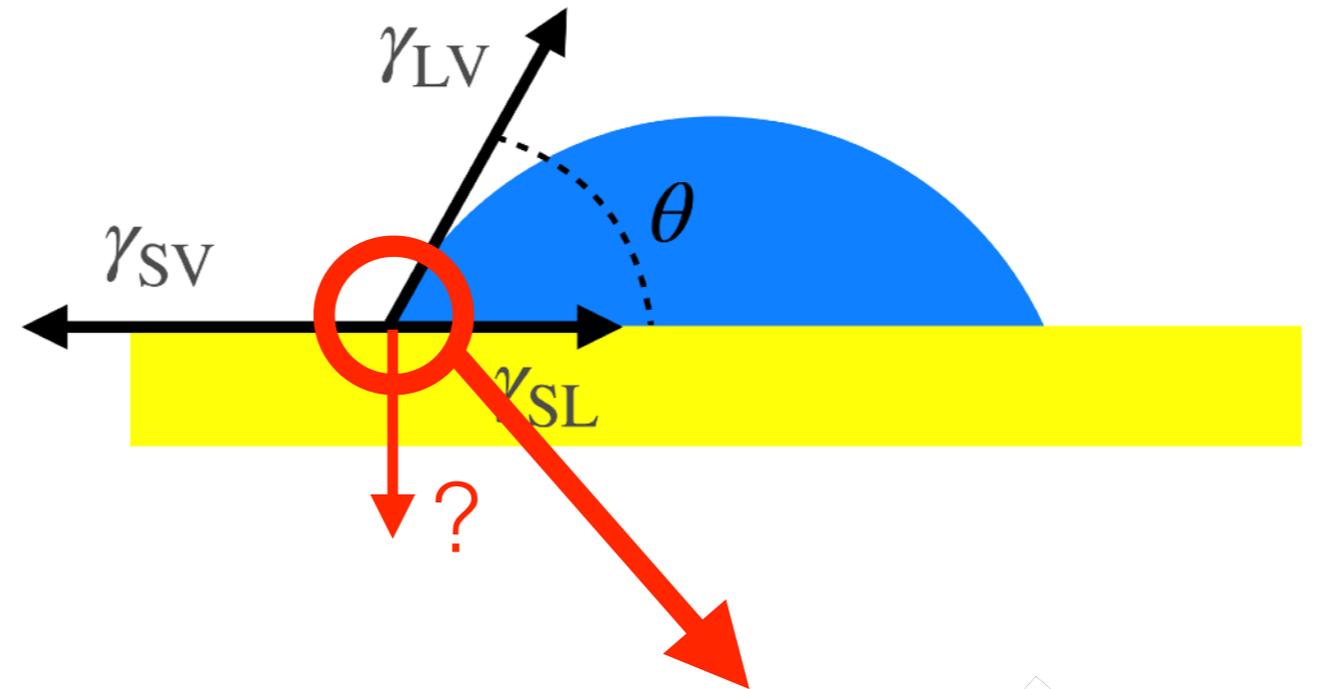


Mouillage partiel  $\theta > \frac{\pi}{2}$



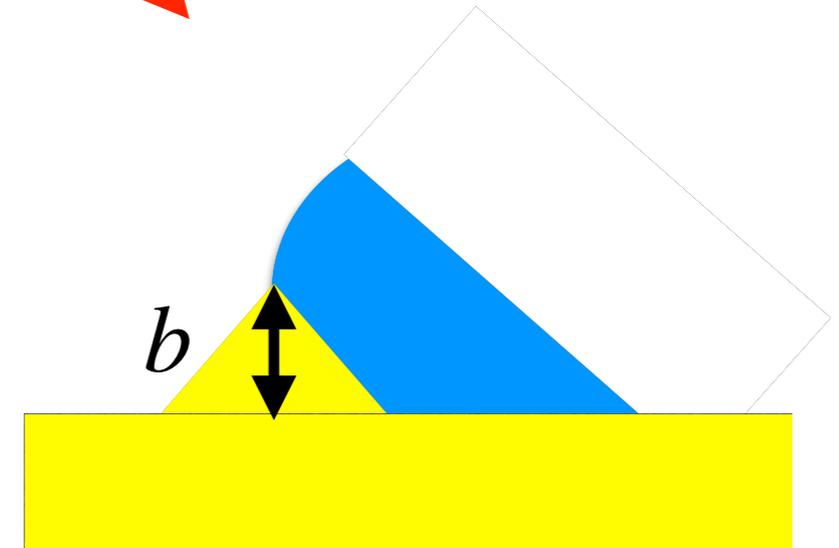
# Application: le mouillage (2)

$$\vec{\gamma}_{SL} + \vec{\gamma}_{LV} + \vec{\gamma}_{SV} = 0$$



Et la projection verticale ?  $\gamma_{LV} \sin \theta = ?$

$$Eb \sim \gamma \Rightarrow b \sim \frac{\gamma}{E}$$

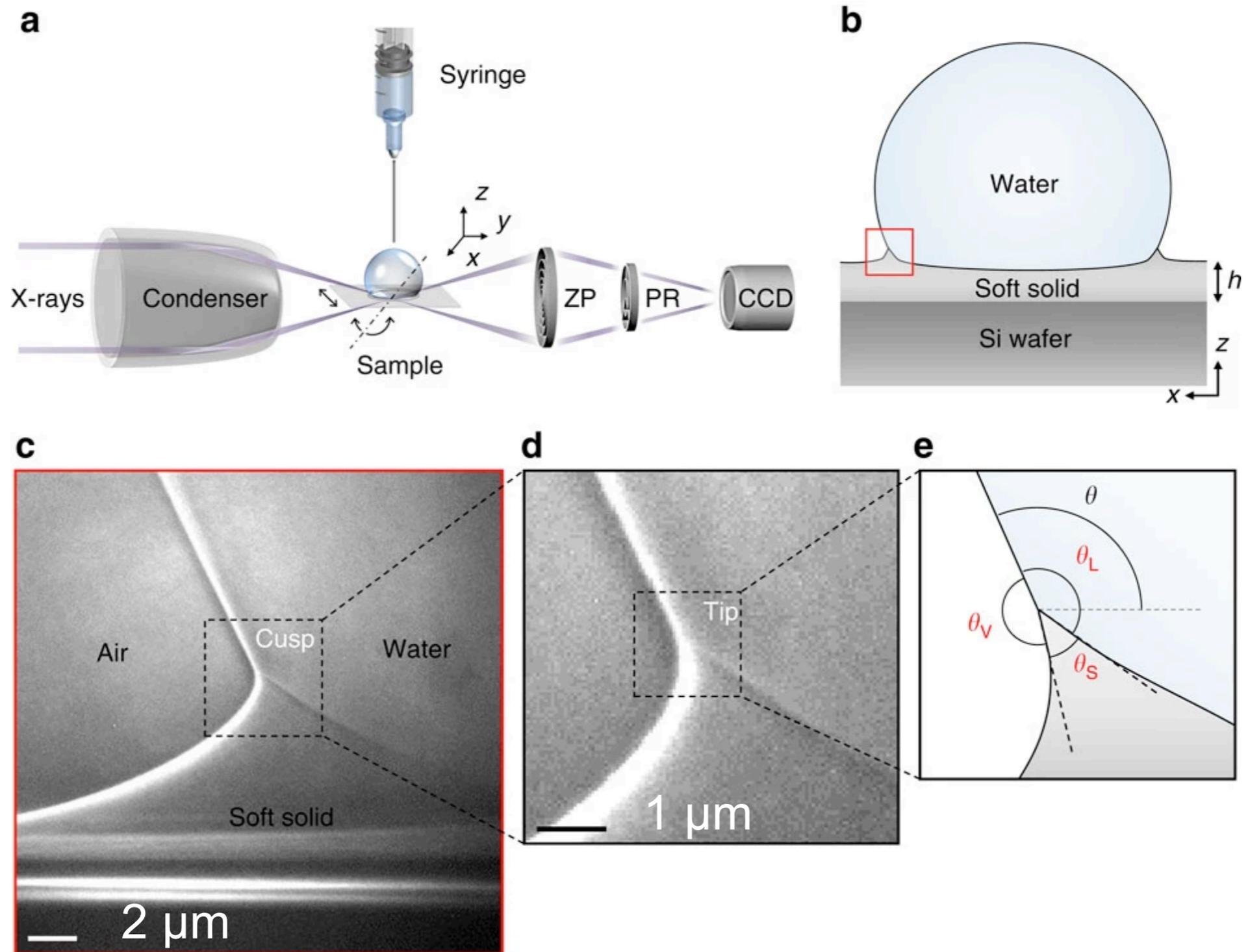


Solide classique  $E \sim 100 \text{ GPa} \Rightarrow b \sim 10^{-11} \text{ m} !$

Si le solide est très mou ou n'est pas un solide....

# Application: le mouillage (3)

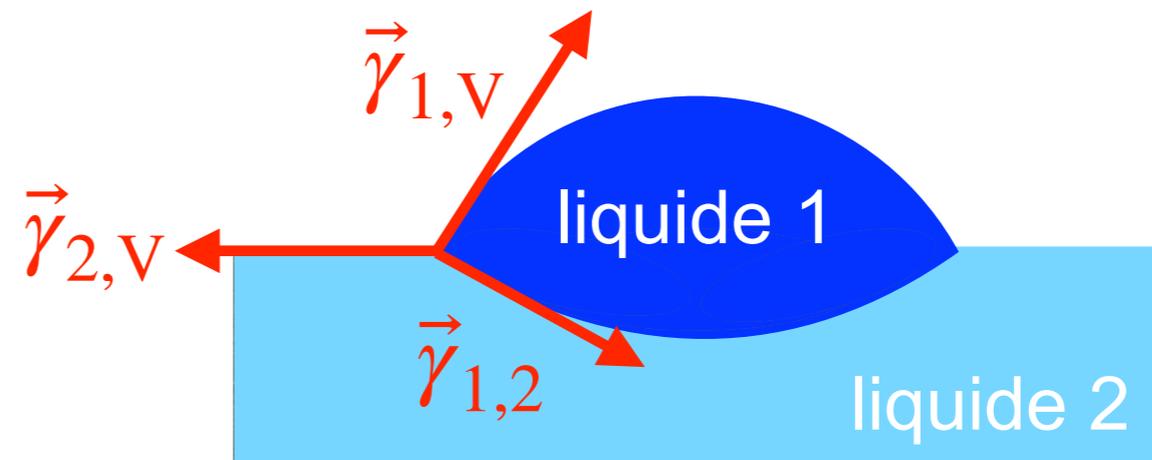
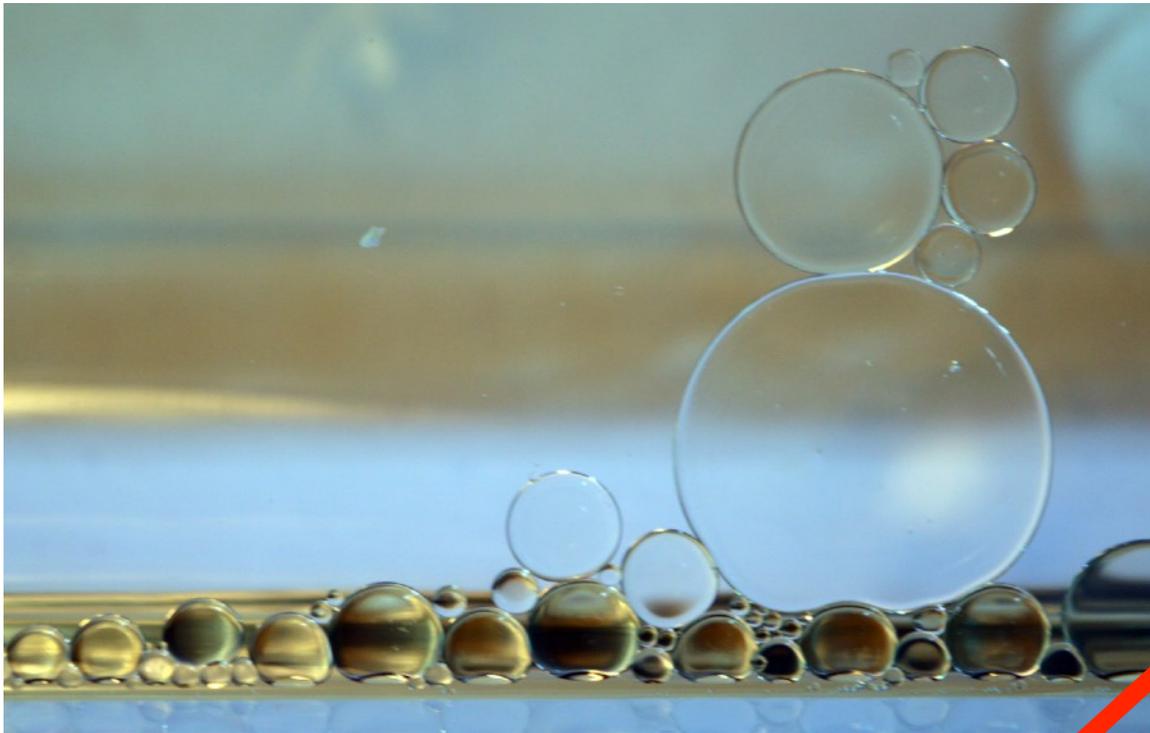
Gouttes sur un gel.... ( $E \sim 10$  kPa)



Park, S. J. et al., Nat. Commun. 5, 4369 (2014).

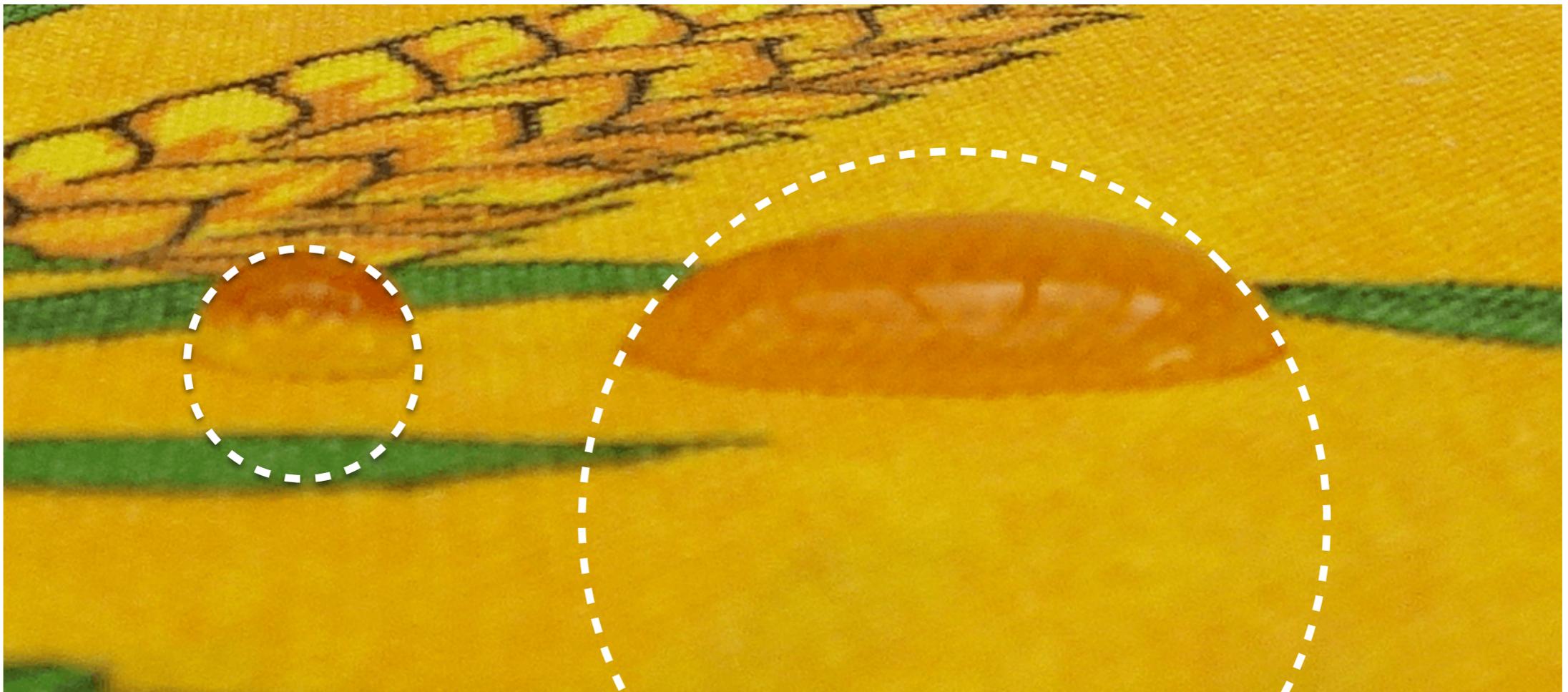
# Application: le mouillage (4)

...ou gouttes sur une surface liquide (lentille)



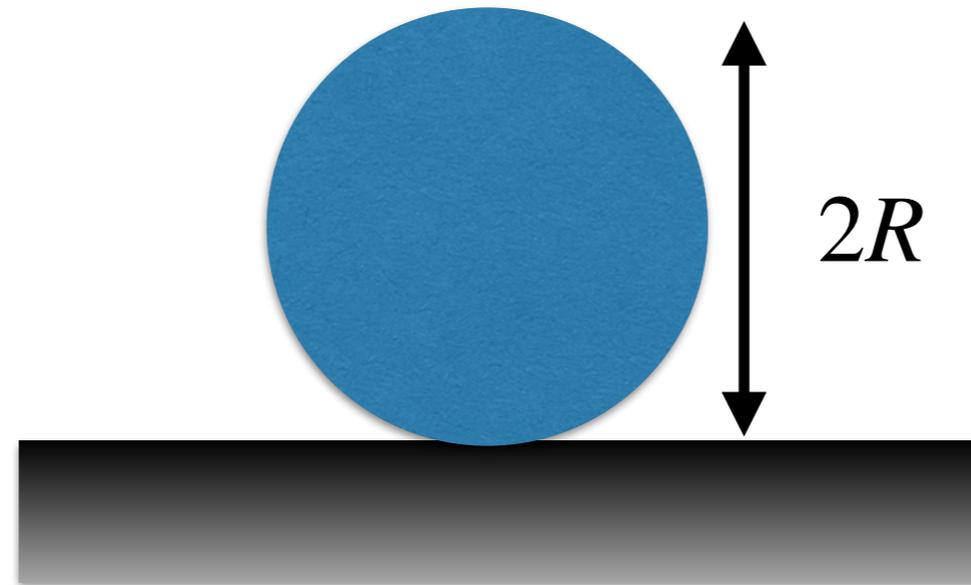
# Application: le mouillage - effet de la gravité

Quand la taille de la goutte augmente la gravité joue un rôle



# Application: le mouillage - effet de la gravité

Quand la taille de la goutte augmente la gravité joue un rôle



$$\mathcal{E}_{\text{surface}} \propto \gamma R^2$$

$$\mathcal{E}_{\text{gravitation}} = mgh$$

avec  $m \propto \rho R^3$  et  $h \sim R$  on obtient

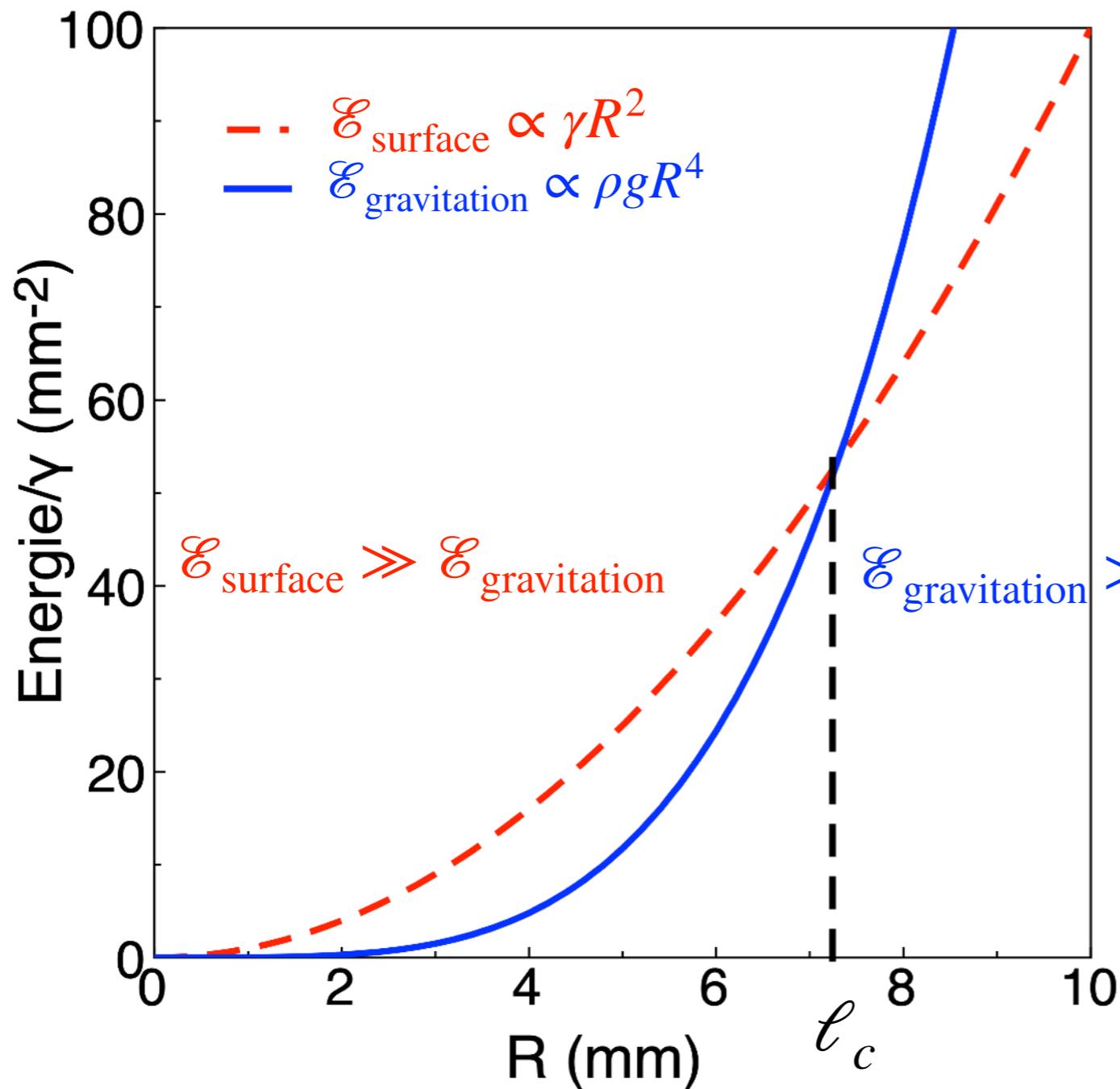
$$\mathcal{E}_{\text{gravitation}} \propto \rho g R^4$$

$$\mathcal{E}_{\text{Totale}} \sim \gamma \left( R^2 + \frac{\rho g}{\gamma} R^4 \right) \sim \gamma \left( R^2 + \frac{R^4}{\ell_c^2} \right)$$

Longueur capillaire

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

# Application: le mouillage - effet de la gravité



On a marché sur la lune, Hergé



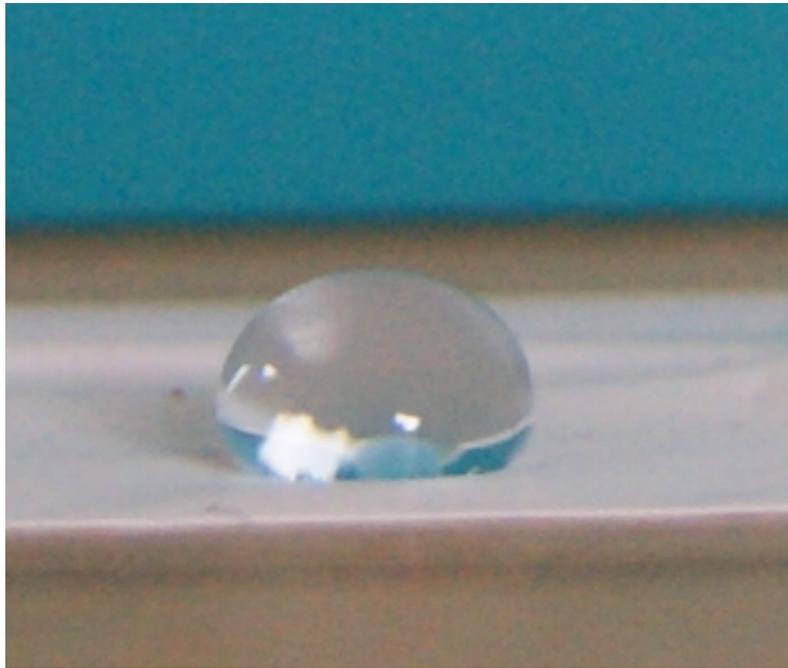
$$g \rightarrow 0 \Rightarrow \ell_c \rightarrow +\infty$$

Longueur capillaire  $\ell_c = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$

pour l'eau  $\ell_c \sim 2.7 \text{ mm}$

# Application: ménisque

Si on continue à ajouter de l'eau ?



Goutte



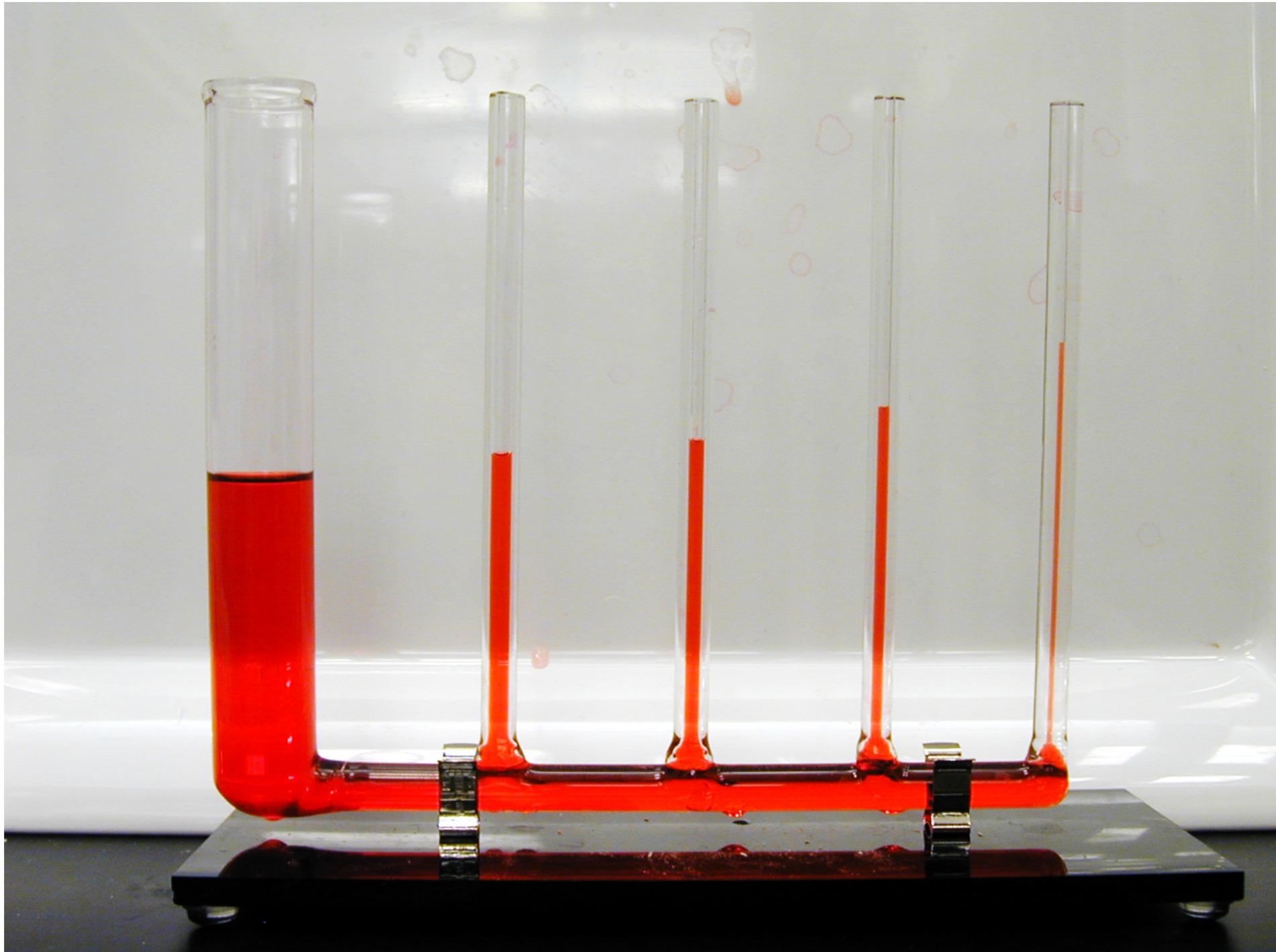
Flaque

Liquide dans un verre  $\Rightarrow$  Ménisque sur le bord  $\ell_c = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$

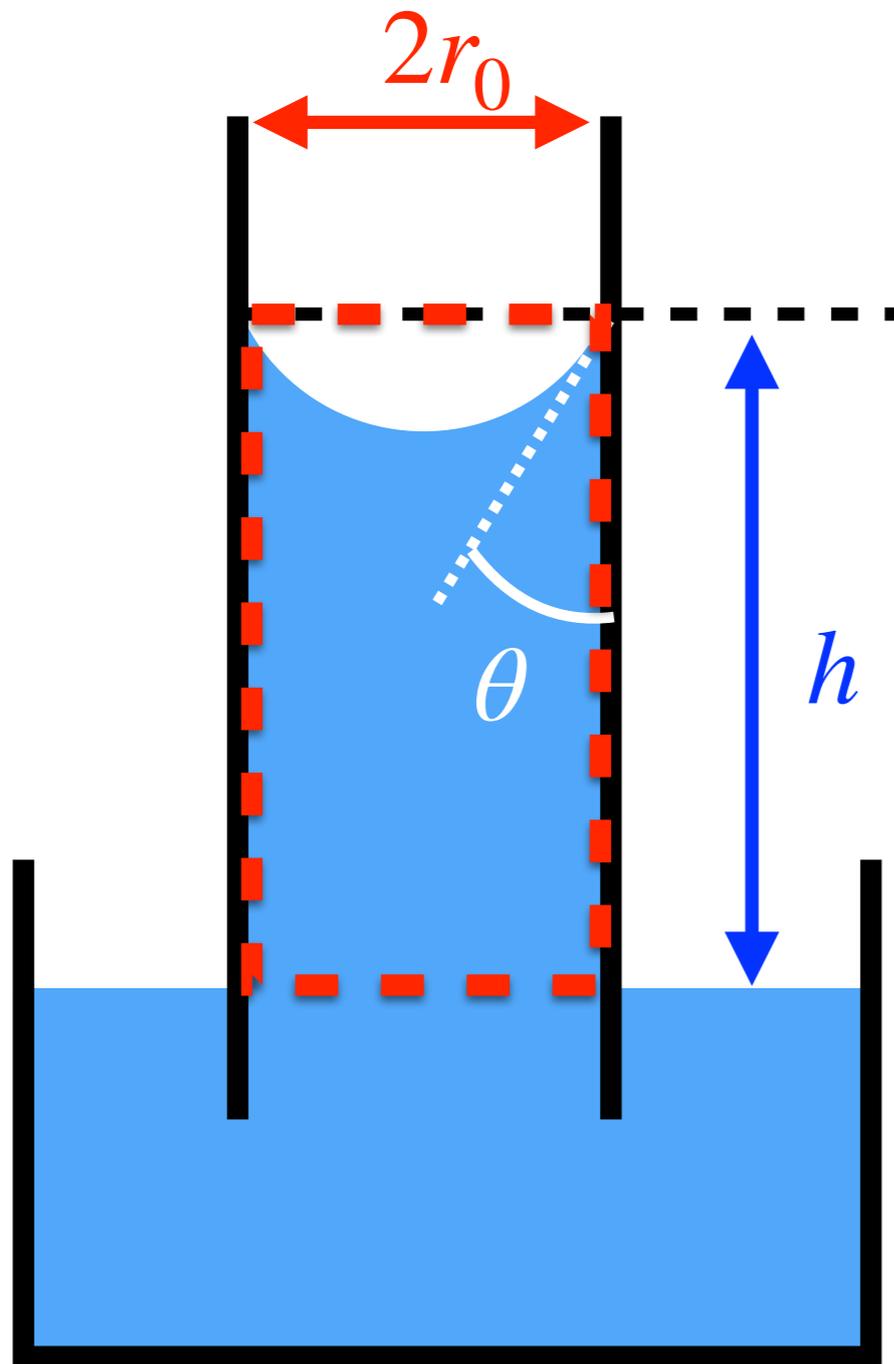
Si on réduit la taille du verre ?

# Application: ascension capillaire (Jurin, 1717)

Si on réduit la taille du verre ? Loi de Jurin



# Application: ascension capillaire



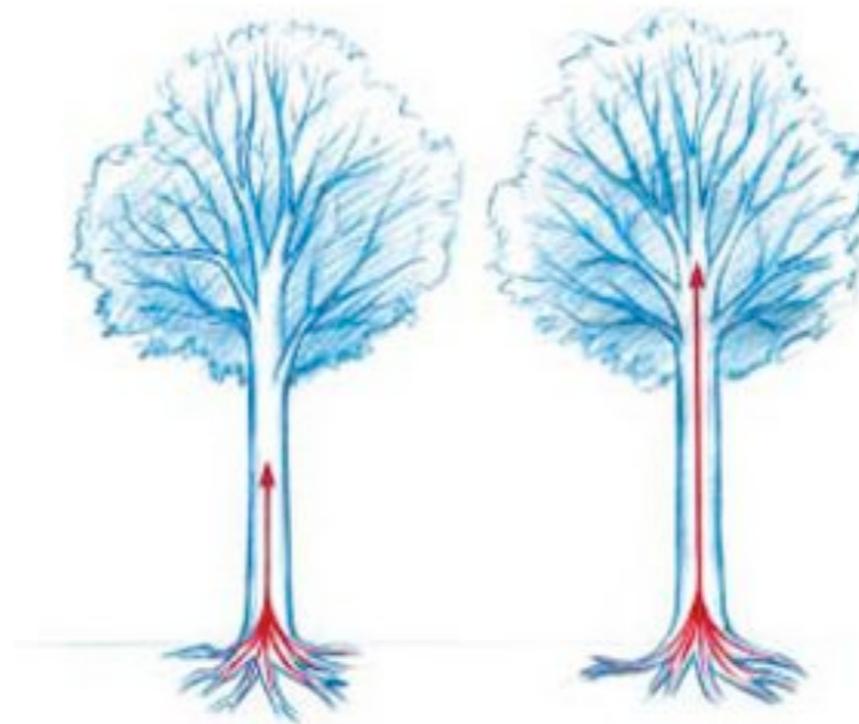
$$h = 2 \frac{\ell_c^2}{r_0} \cos(\theta)$$

- Si  $r_0 \ll \ell_c$  alors  $h \gg \ell_c$
- C'est la force capillaire qui tire le liquide vers le haut
- Si  $\cos(\theta) < 0$  alors  $h < 0$

avec  $\cos(\theta) \sim 1$  et  $r_0 \sim 1 \mu\text{m}$

$$h \sim 1 \text{ m}$$

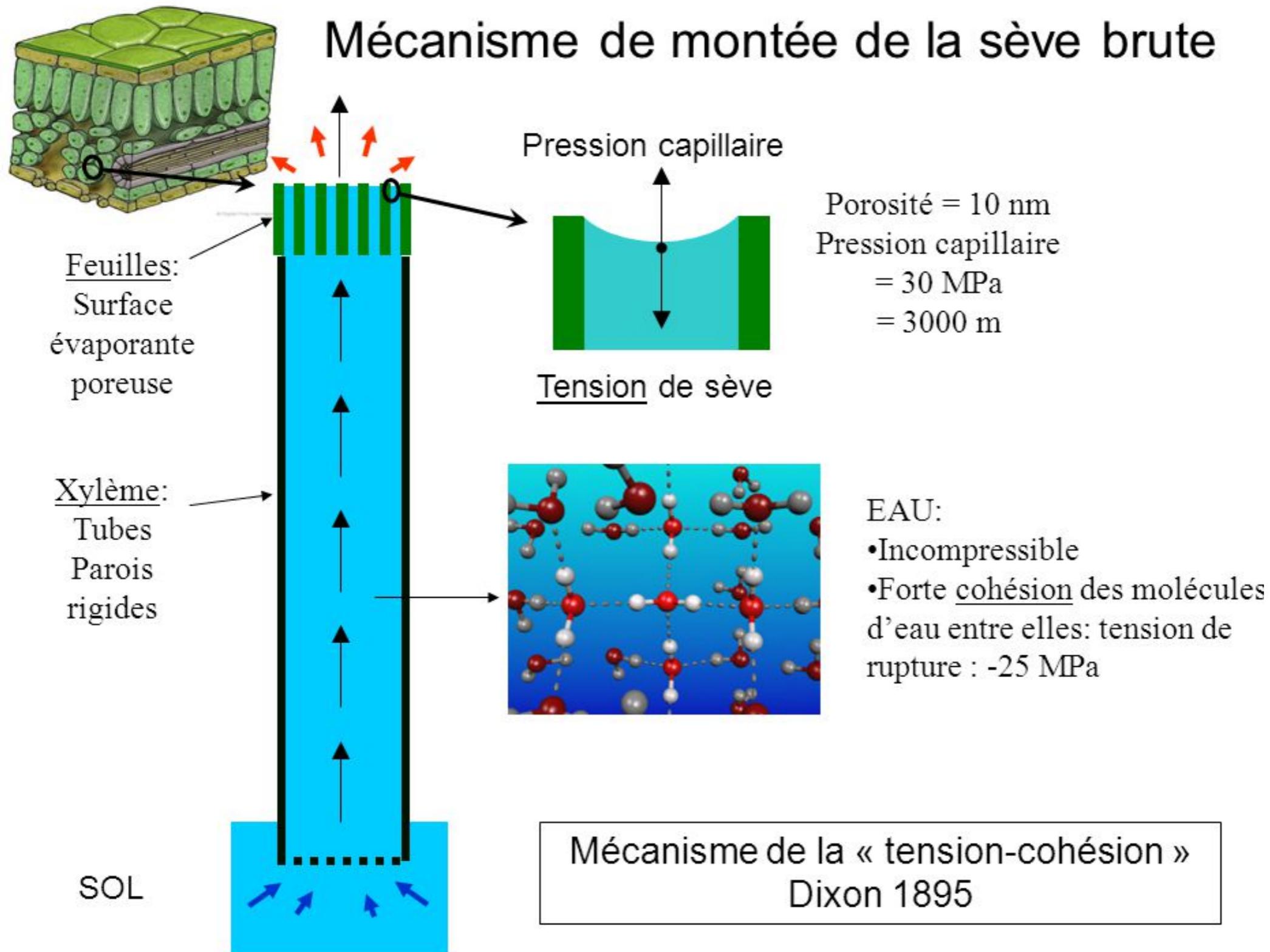
# Application: ascension capillaire



?

Roland Lehoucq 01 juin 2000 | [POUR LA SCIENCE N° 272](#)

# Application: montée du xylème ?



Hervé Cochard UMR-PIAF INRA-Université B. Pascal

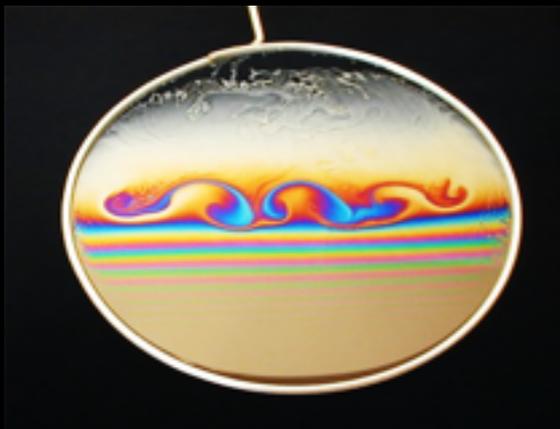
# La physique des (aux) interfaces



Mardi 30/05  
**Marcher sur l'eau**



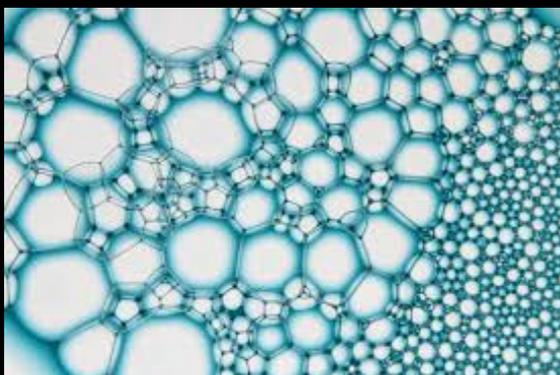
Wiebke Drenckhan  
Directrice de Recherche  
CNRS  
Institut Charles Sadron



Mardi 07/06  
**Comment se faire un film... moléculaire**



Thierry Charitat  
Professeur de Physique  
Université de Strasbourg  
Institut Charles Sadron



Mardi 14/06  
**Et pour finir ...  
une petite mousse**



Faculté de **physique et ingénierie**

Université de Strasbourg

