

# Méthodes de caractérisation des interfaces

## Interfaces fluides

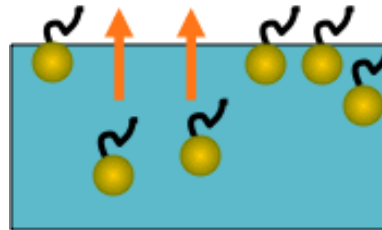
Jean-Philippe Michel  
Institut Galien Paris-Saclay

# Monocouches à l'interface air-liquide

- **Adsorption à l'interface air/liquide**

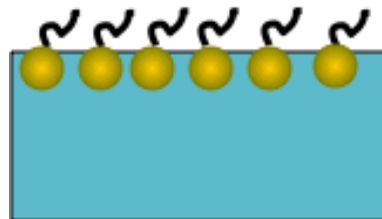
- Films monomoléculaires de Gibbs

- Adsorption d'un soluté amphiphile à l'interface air/liquide



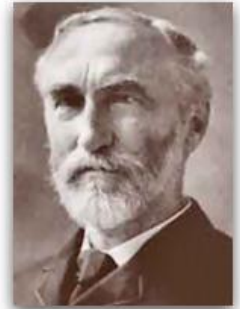
- Films monomoléculaires de Langmuir

- Etalement d'une substance insoluble à l'interface



# Monocouches à l'interface air-liquide

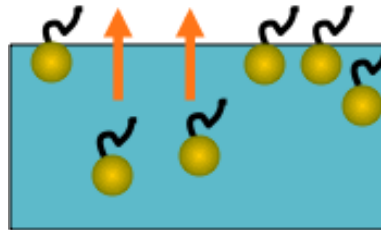
- **Adsorption à l'interface air/liquide**



1839-1903

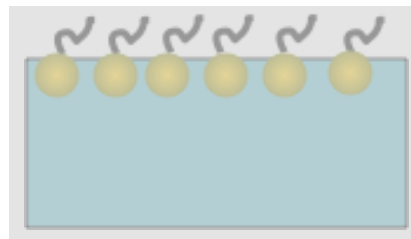
- Films monomoléculaires de *Gibbs*

- Adsorption d'un soluté amphiphile à l'interface air/liquide



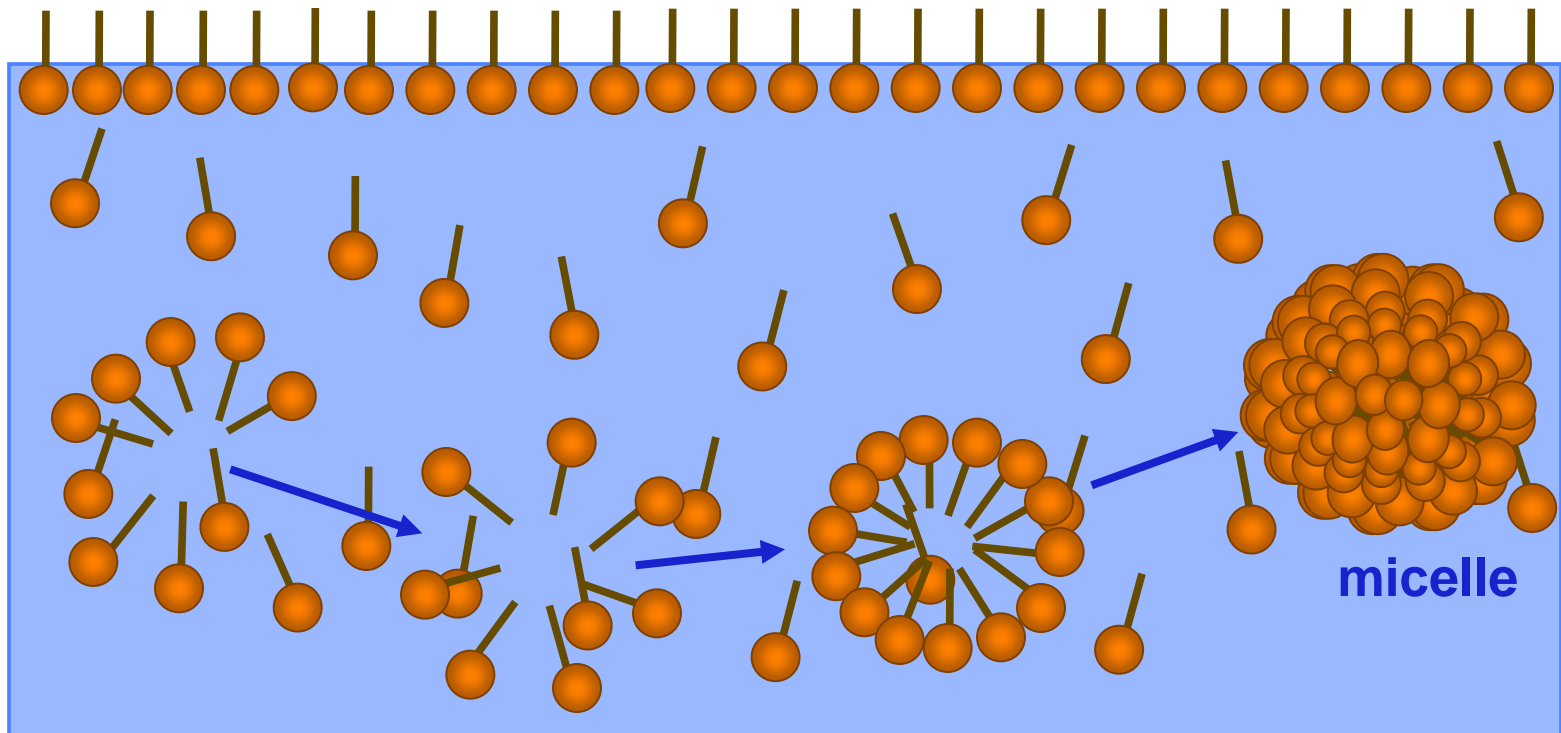
- Films monomoléculaires de *Langmuir*

- Etalement d'une substance insoluble à l'interface



# Organisation des amphiphiles en solution

- **En fonction de leur concentration...**
  - De la monocouche aux micelles

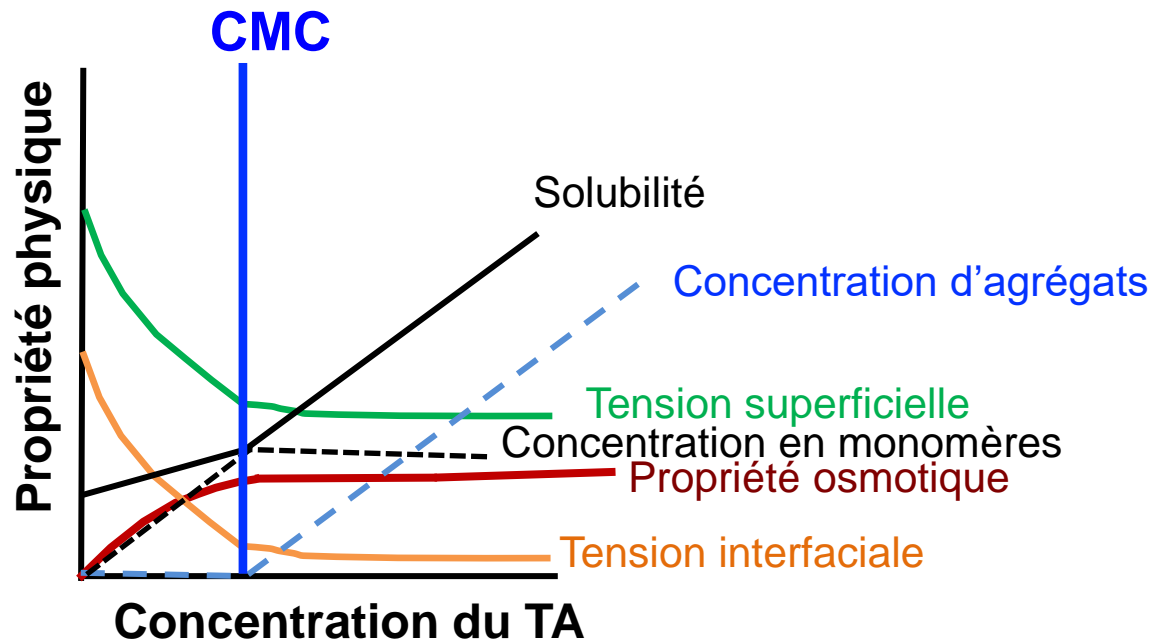


# Organisation des amphiphiles en solution

- **Notion de CMC**

- Formation des micelles = solubilisation des molécules de TA

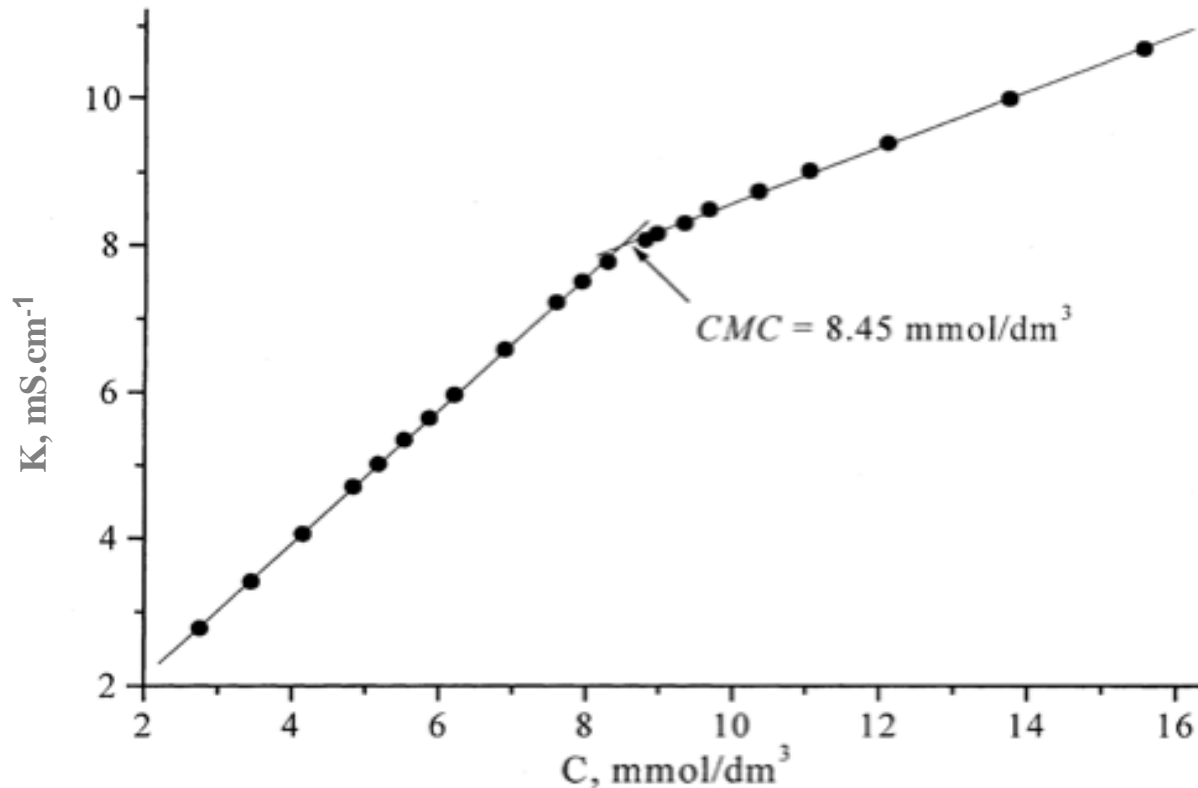
➔ Phase isotrope



# Organisation des amphiphiles en solution

- **Détermination de la CMC des tensioactifs ioniques**

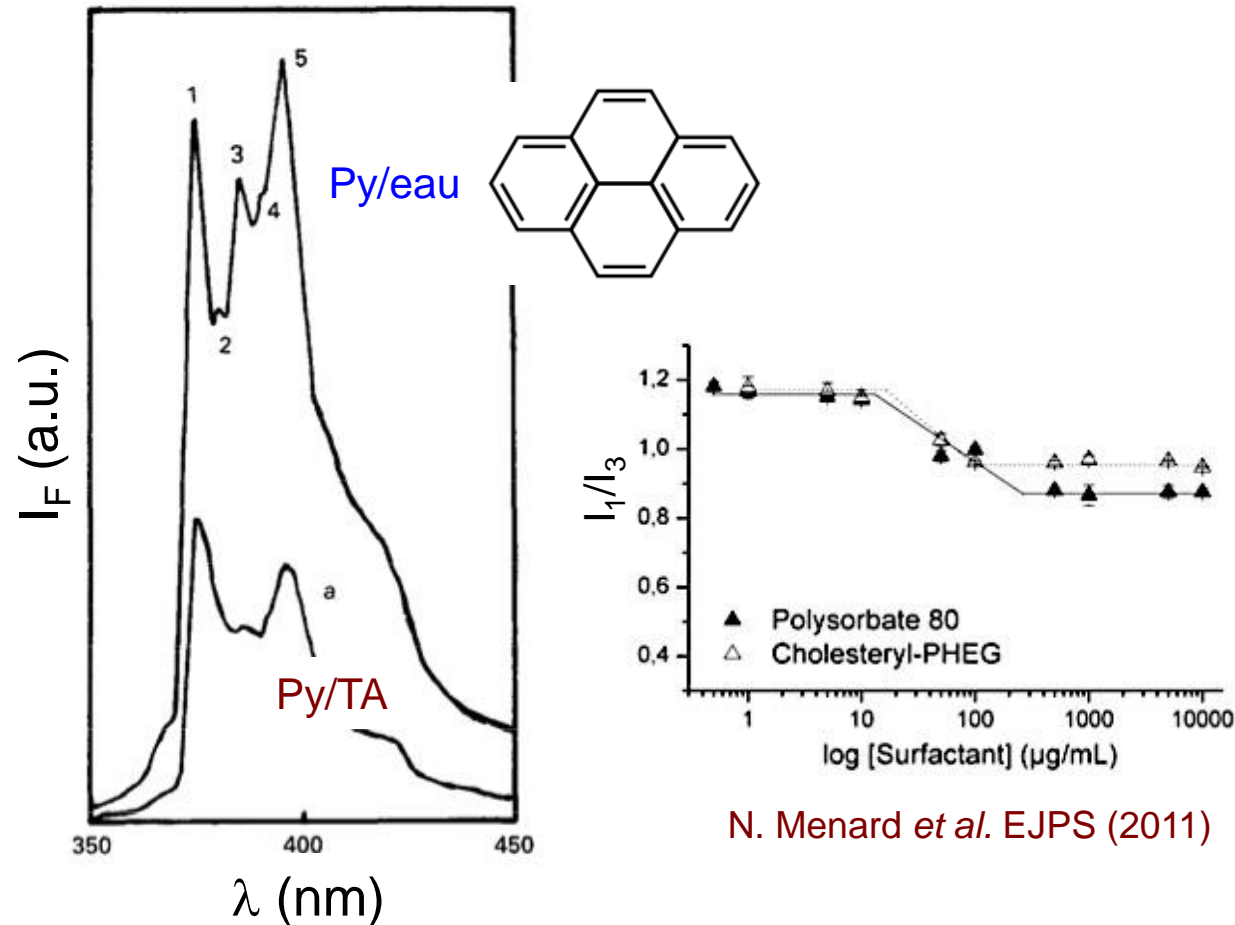
- Par conductimétrie



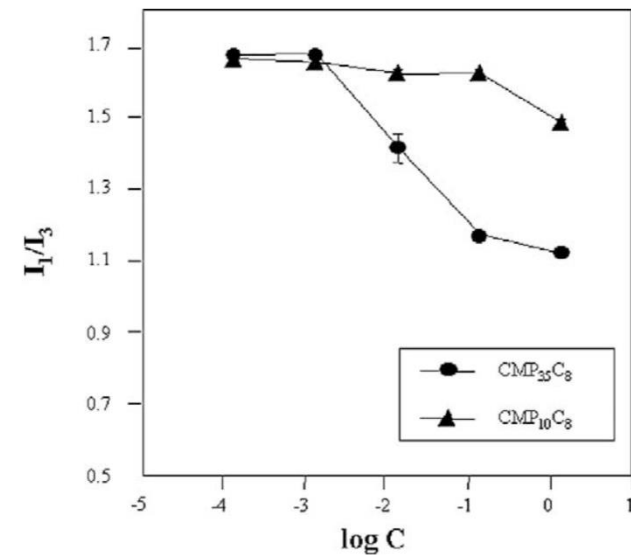
# Organisation des amphiphiles en solution

## • Détermination de la CMC par fluorescence

- Quenching de la fluorescence du pyrène



N. Menard *et al.* EJPS (2011)



W. Silhadi *et al.* JCIS (2005)

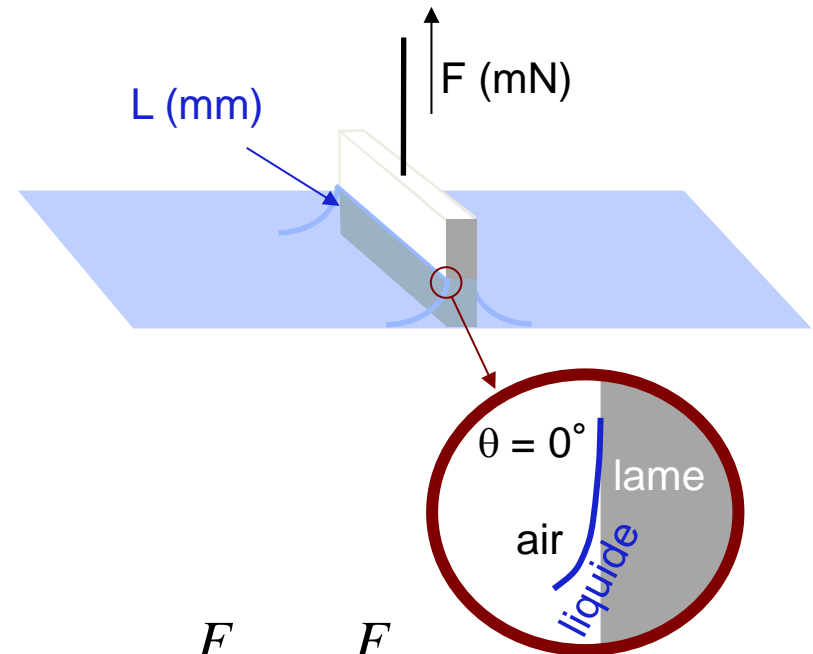
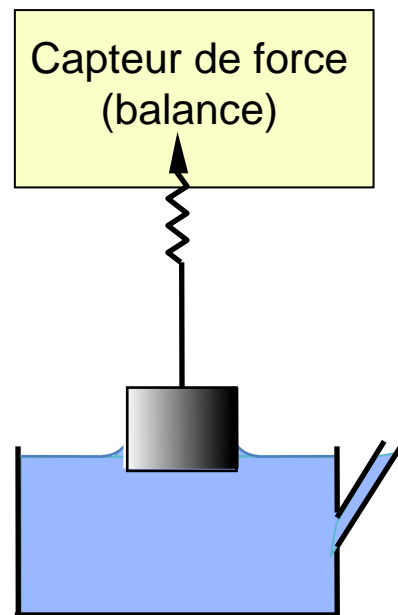
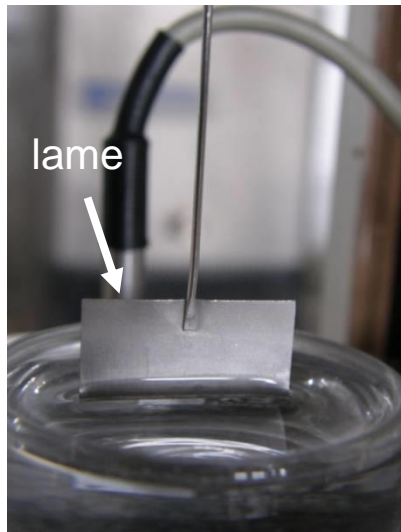
- **Détermination de la CMC par mesure de tension superficielle**
  - Tension superficielle dynamique (DST)
    - Donne une information sur le comportement immédiat des surfactants
    - Ne prend pas en compte la diffusion, ni le réarrangement
      - Méthode de l'anneau de du Noüy
      - Méthode de la lame de Wilhelmy
      - Méthode du volume de goutte



- **Détermination de la CMC par mesure de tension superficielle**
  - Tension superficielle à l'équilibre (EST)
    - Donne des informations sur la capacité tensioactive maximale du surfactant
    - Sa valeur est déterminée en enregistrant la valeur de tension superficielle en fonction du temps.
      - Méthode de la lame de Wilhelmy
      - Méthode de la goutte pendante/émergente

# Mesure de la tension superficielle

- **Méthode de la lame de Wilhelmy**



$$g = \frac{F}{L \cos \theta} = \frac{F}{L}$$

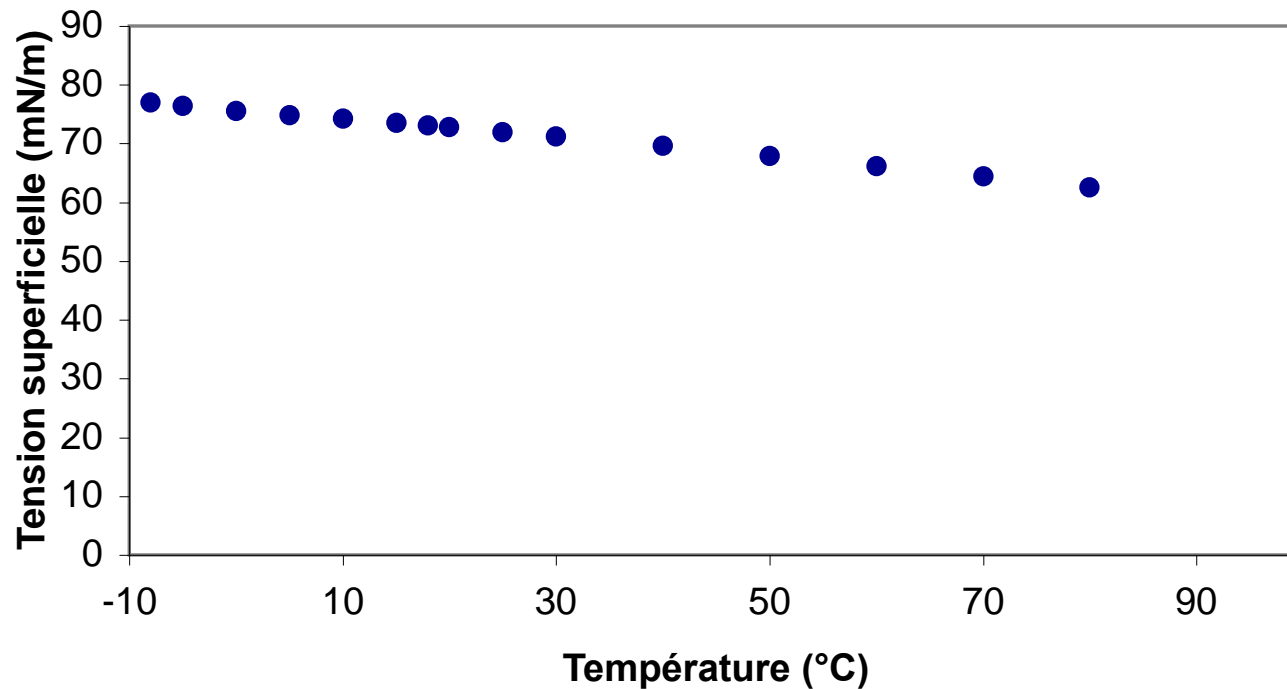
$$\rho = g_{liq.pur} - g_{liq.monocouche}$$

# Mesure de la tension superficielle

- Effet de la température sur la tension superficielle

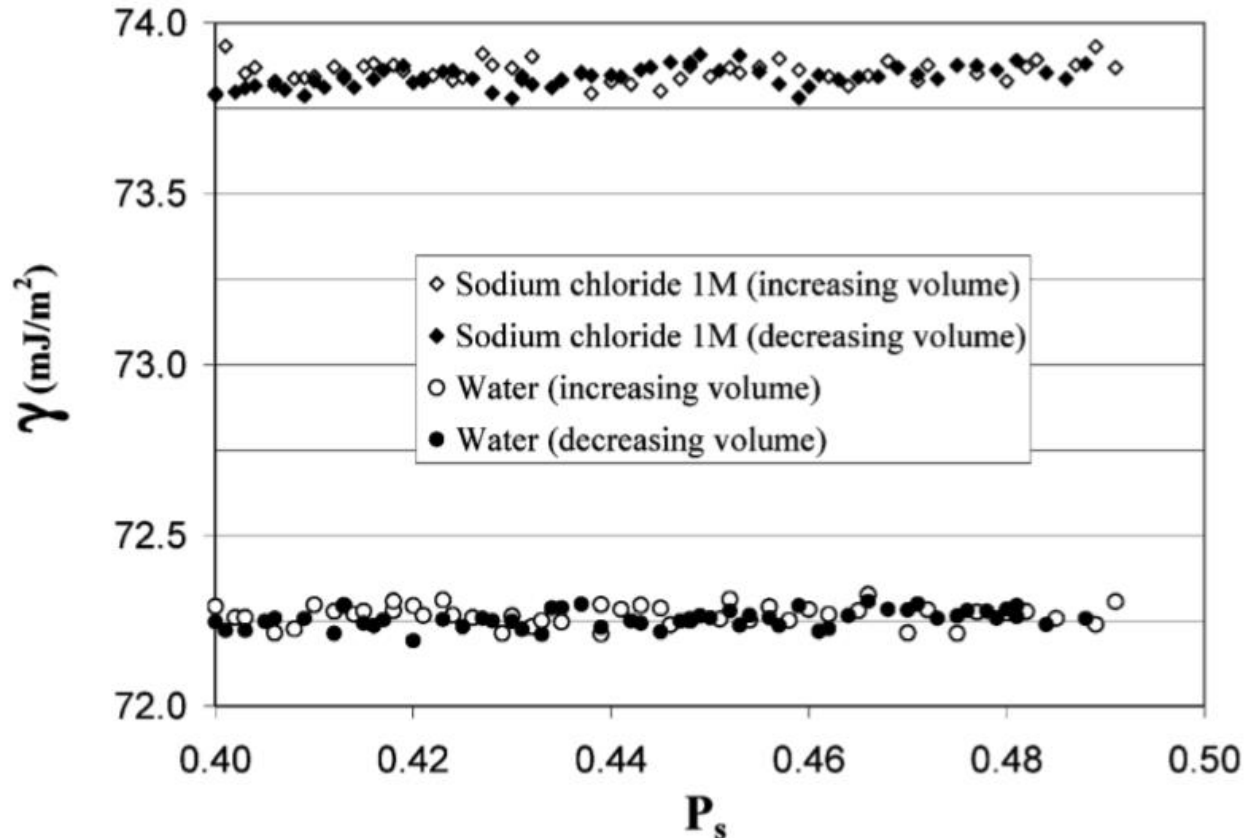
$$g(T) = g(T_0) \left[ 1 - b(T - T_0) \right]$$

- Eau:  $\gamma = 72,0 \text{ mN/m}$  à  $25^\circ \text{ C}$ ;  $\gamma = 72,8 \text{ mN/m}$  à  $20^\circ \text{ C}$



# Mesure de la tension superficielle

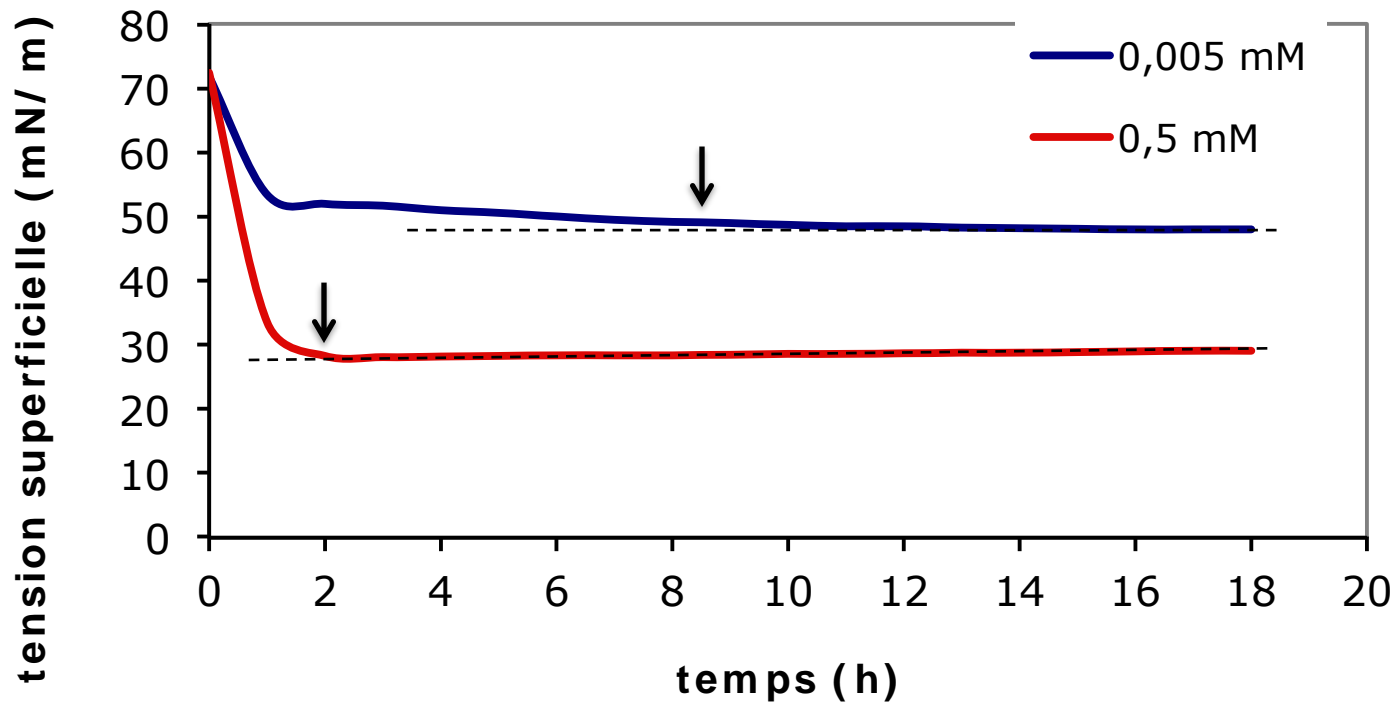
- Effet des sels sur la tension superficielle



**Figure 5.** Surface tension measurements of water and a sodium chloride solution with a concentration of 1 M.

# Mesure de la tension superficielle

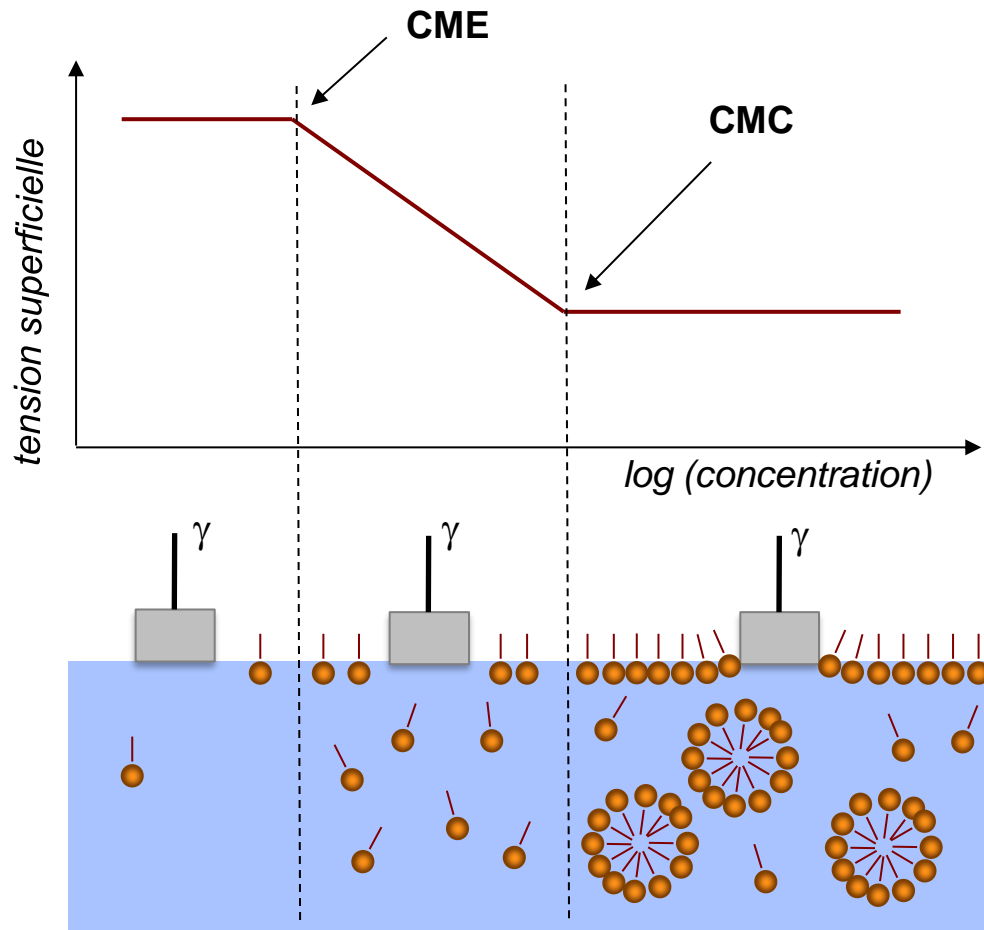
- **Détermination de la tension superficielle d'équilibre**
  - Exemple: Triton X100



Plus la concentration est élevée, plus l'équilibre est atteint rapidement

# Mesure de la tension superficielle

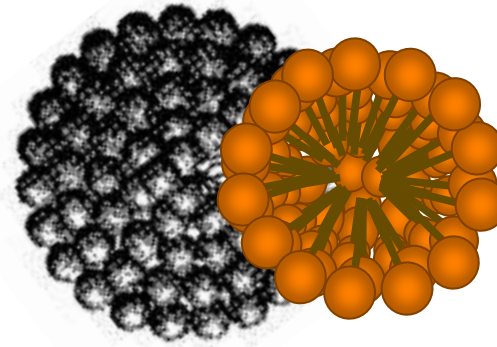
- **Détermination de la concentration micellaire**



# Organisation des amphiphiles en solution

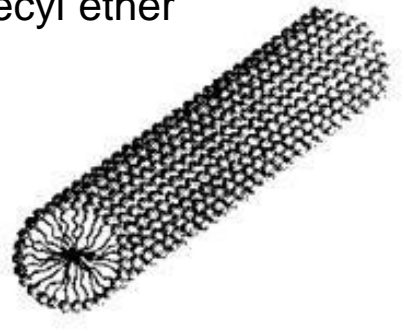
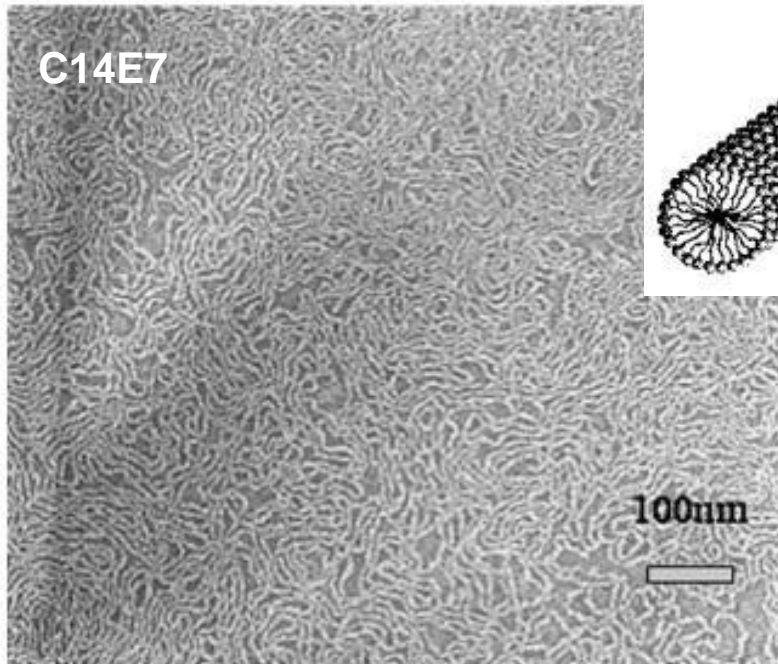
- **Formes des micelles**

- **Micelles sphériques**

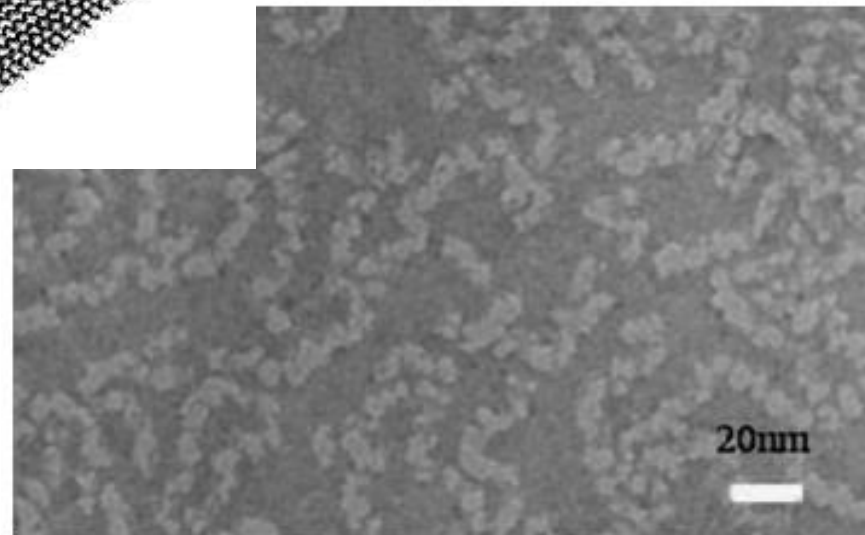


- **Micelles cylindriques**

heptaethylene glycol monotetradecyl ether

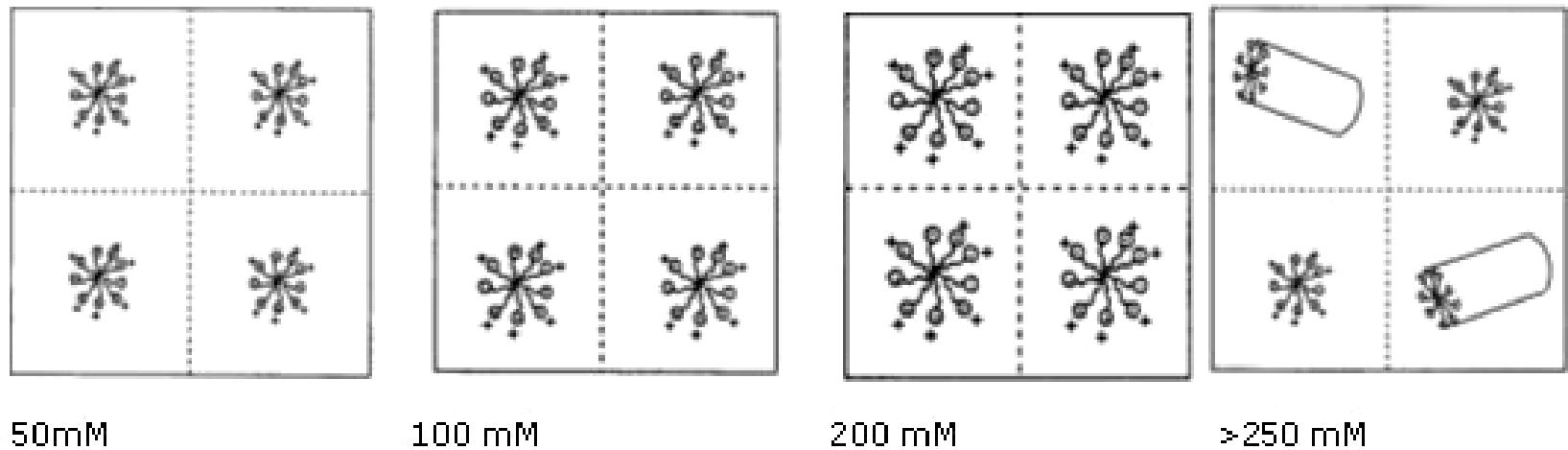


S. Ishii *et al.* JCIS, 317 (2008) 115-120



# Organisation des amphiphiles en solution

- **Relation entre concentration du TA et dimension des micelles**



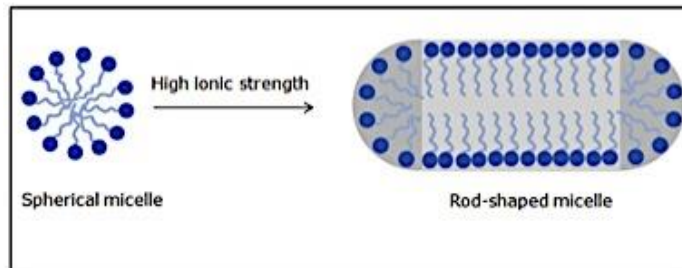
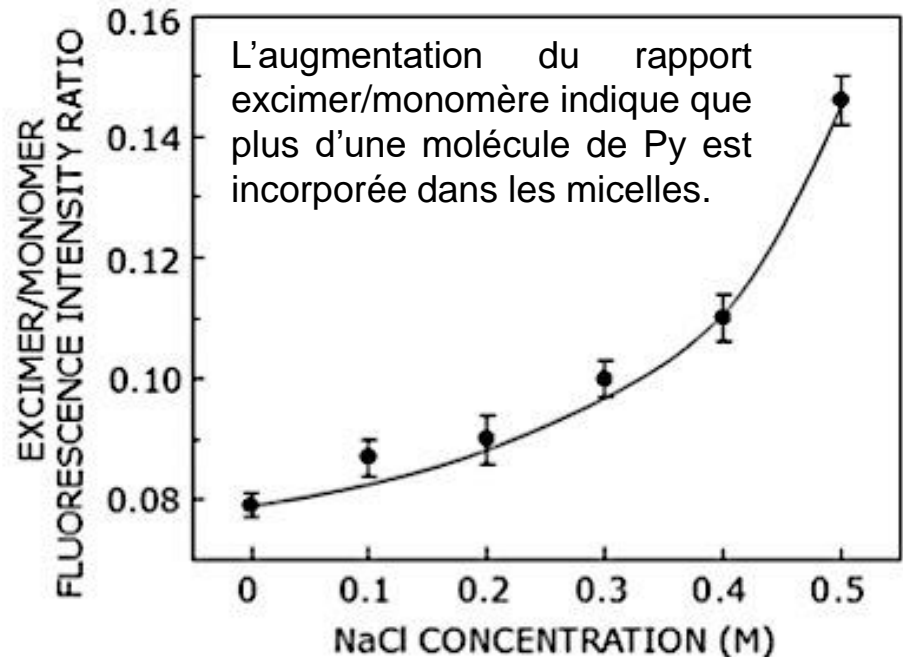
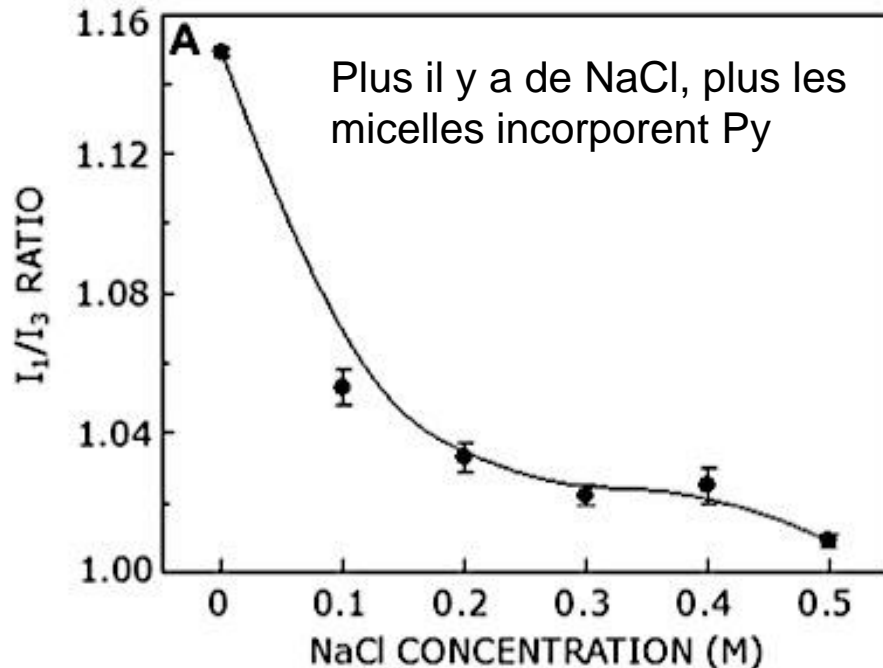
*Assemblage micellaire du SDS à la concentration de 50, 100, 200 et 250 mM*

Plus la concentration en SDS augmente au-delà de la cmc, plus les structures grossissent et s'allongent.



# Organisation des amphiphiles en solution

- Relation entre concentration en sel et forme des micelles de SDS

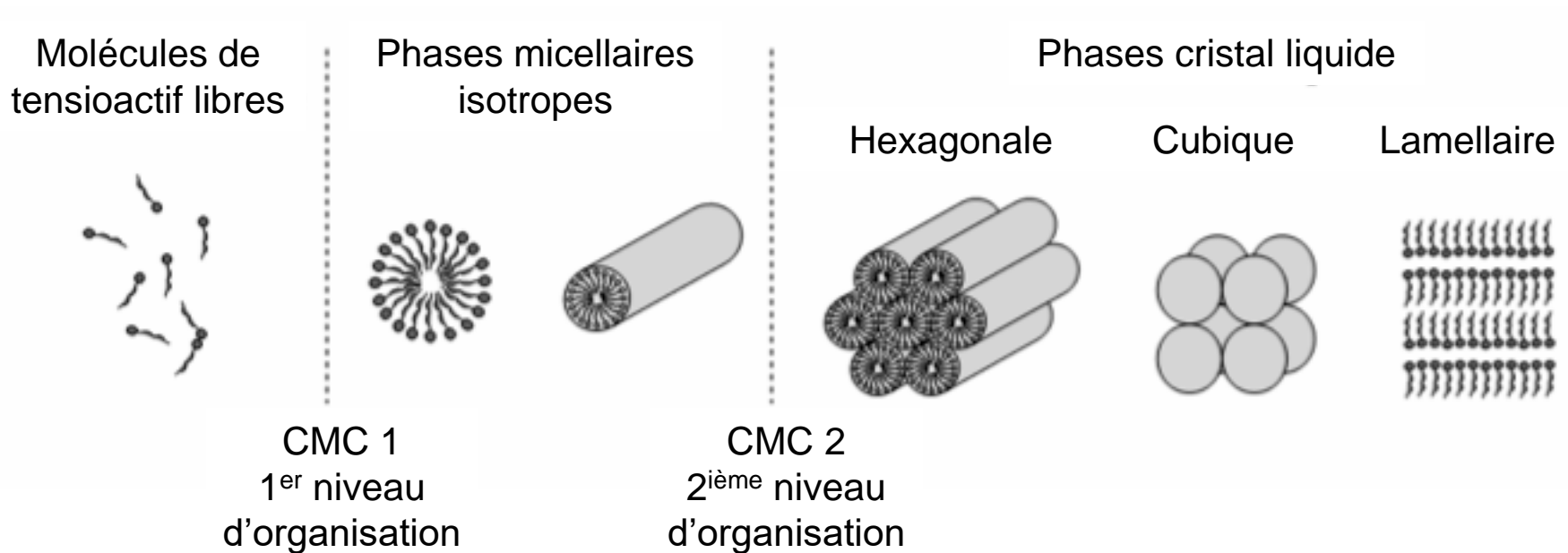


Transition micelle sphérique-  
micelle cylindrique

# Organisation des amphiphiles en solution

- **Relation entre CMC et assemblages complexes de tensioactifs**

- Notion de double CMC



SM. Gruner PNAS 82 (1985) 3665

D. Myers *in* Surfactant Science & Technology, VCH, NY, 1992

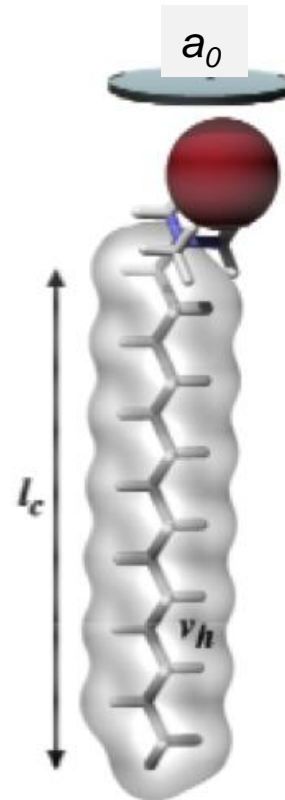
# Organisation des amphiphiles en solution

- **Structure chimique des TA et organisation supramoléculaire**

- Relation entre paramètre d'empilement critique et formation des structures micellaires

$$CPP = \frac{v_h}{a_0 l_c}$$

$a_0$  = aire moyenne par tête  
 $l_c$  = longueur de la chaîne  
 $v_h$  = volume chaîne hydrocarbonée



MiDiFABS, vol 4, 2005

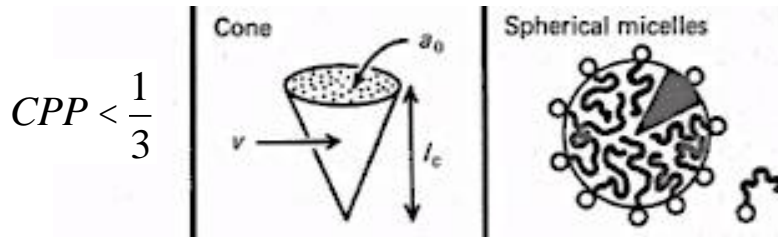
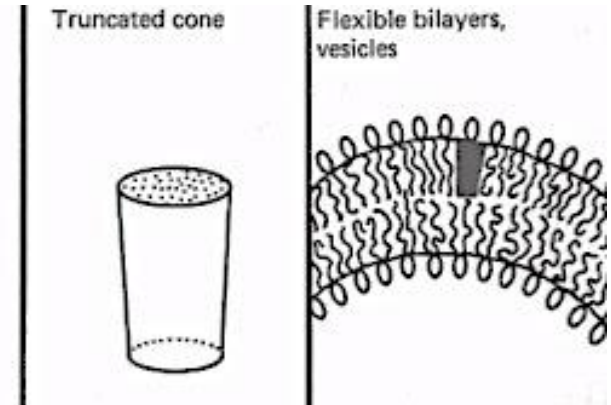
# Organisation des amphiphiles en solution

## • Relation entre paramètre d'empilement et organisation supramoléculaire

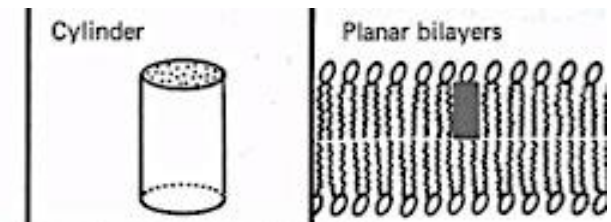
$$CPP = \frac{v_h}{a_p l_c}$$

$a_p$  = aire optimale par tête  
 $l_c$  = longueur de la chaîne étendue  
 $v_h$  = volume chaîne hydrocarbonée

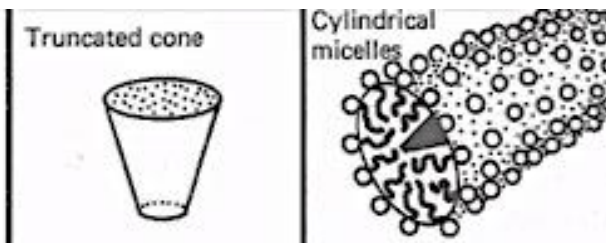
$$\frac{1}{2} < CPP < 1$$



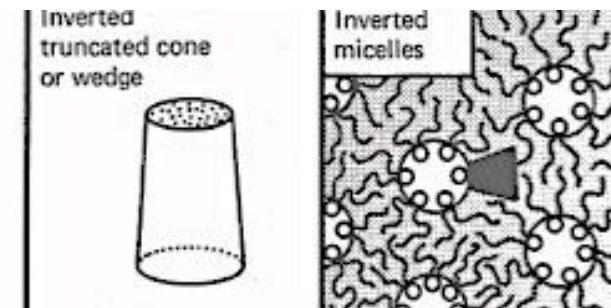
$$CPP \gg 1$$



$$\frac{1}{3} < CPP < \frac{1}{2}$$



$$CPP > 1$$

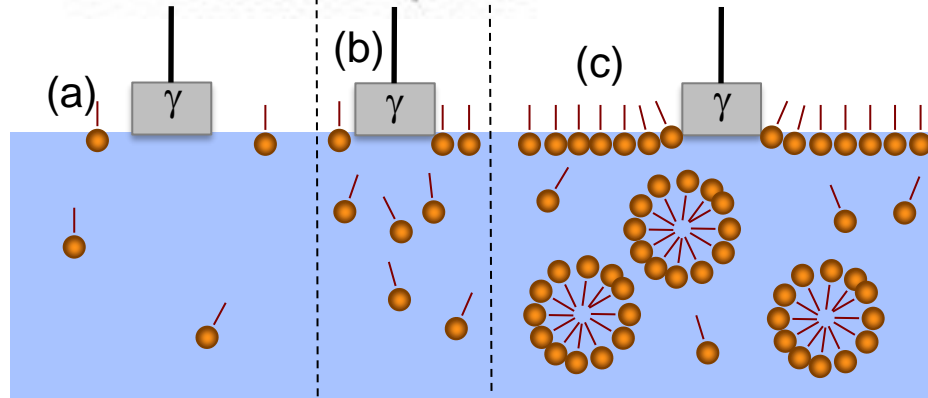
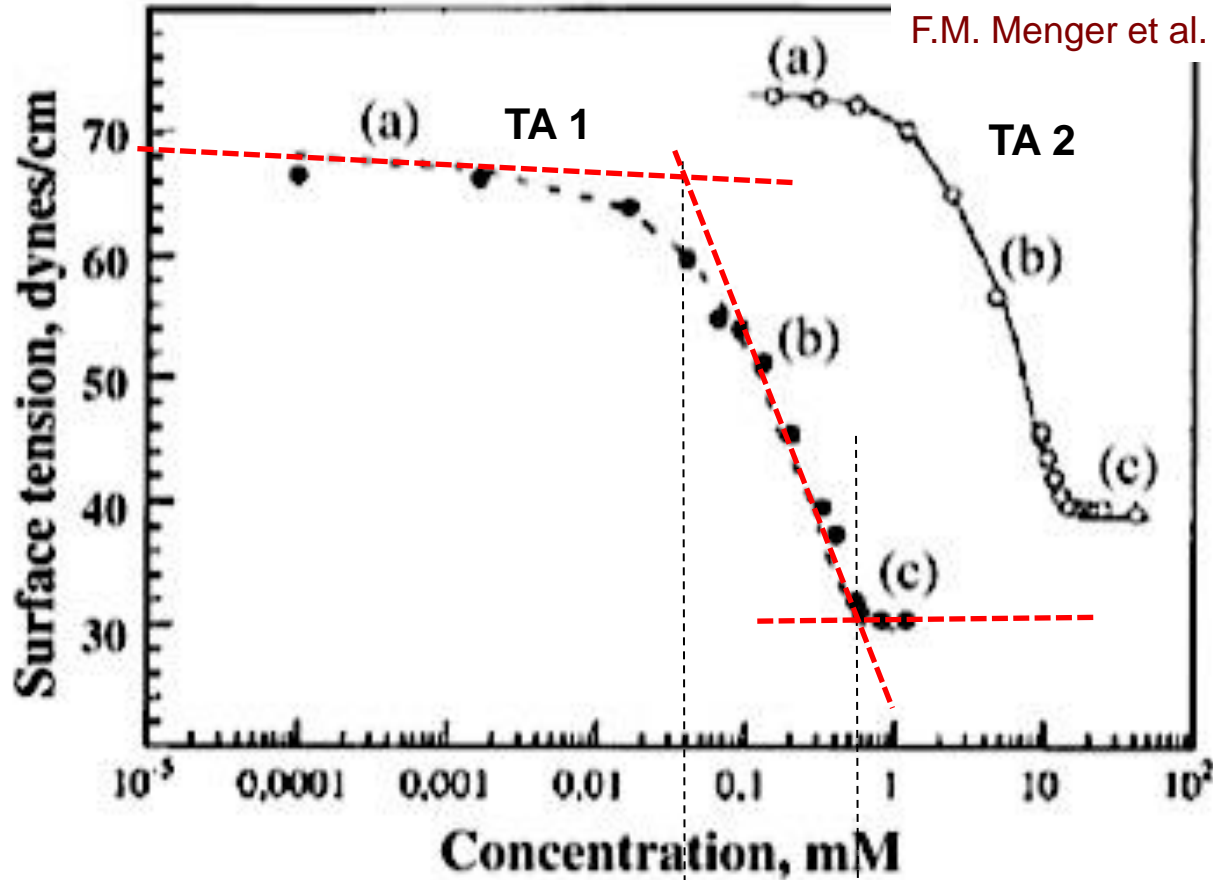


Israelachvili, Intermolecular Forces, Acad Press, 1992

Nagarajan, Langmuir, 18 (2002) 31-38

# Revenons à la mesure de tension superficielle

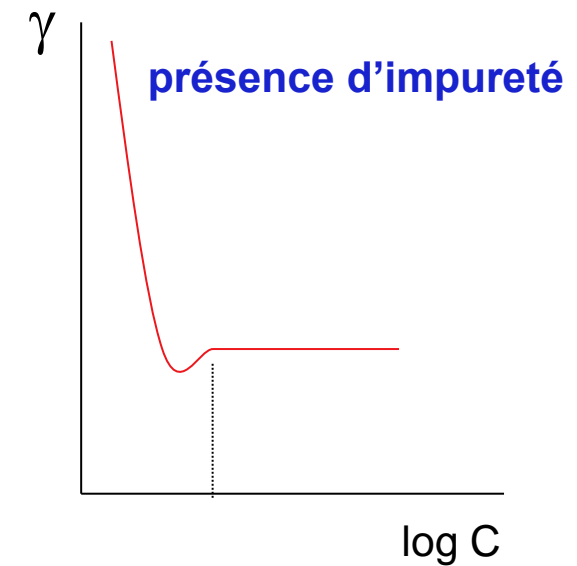
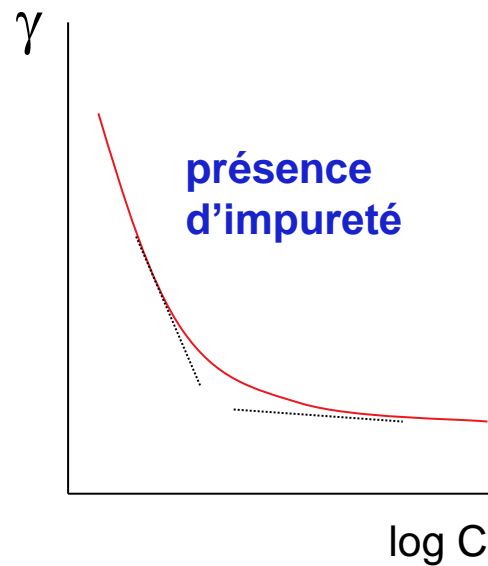
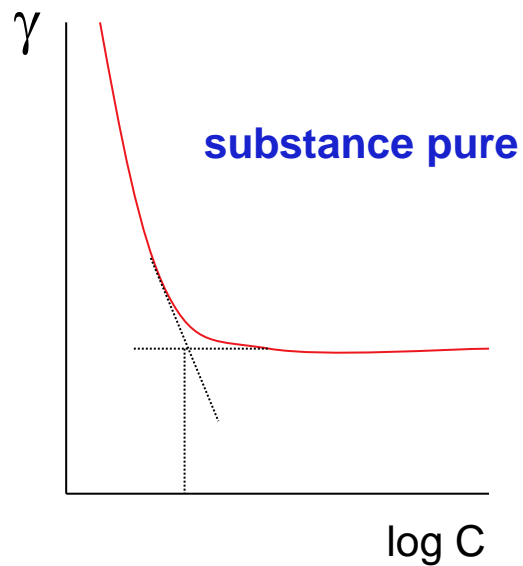
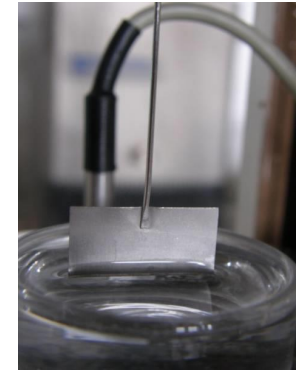
F.M. Menger et al. Langmuir, 21 (2005) 9010-9012



# Mesure de la tension superficielle

- **Exemples de comportements interfaciaux**

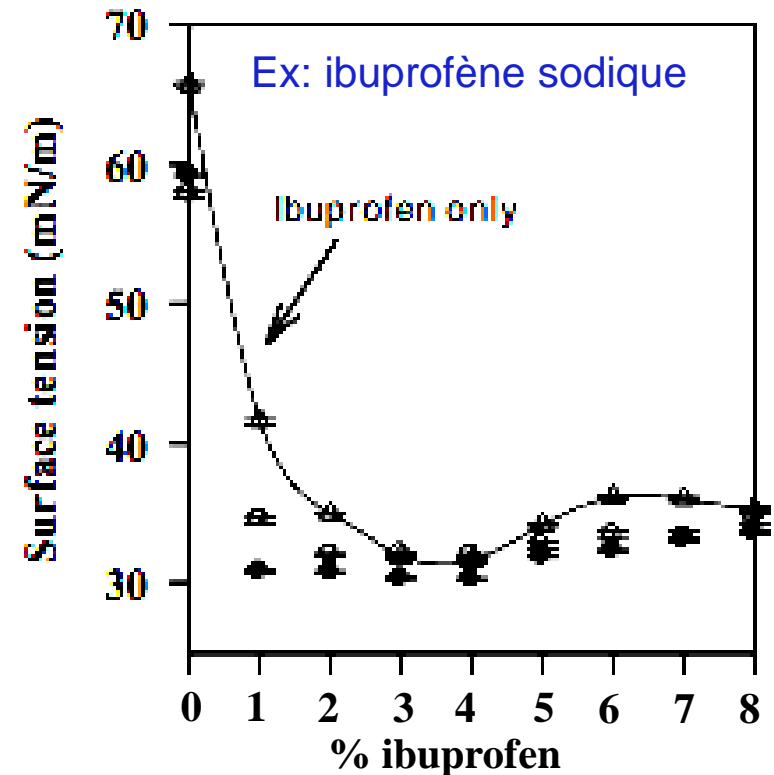
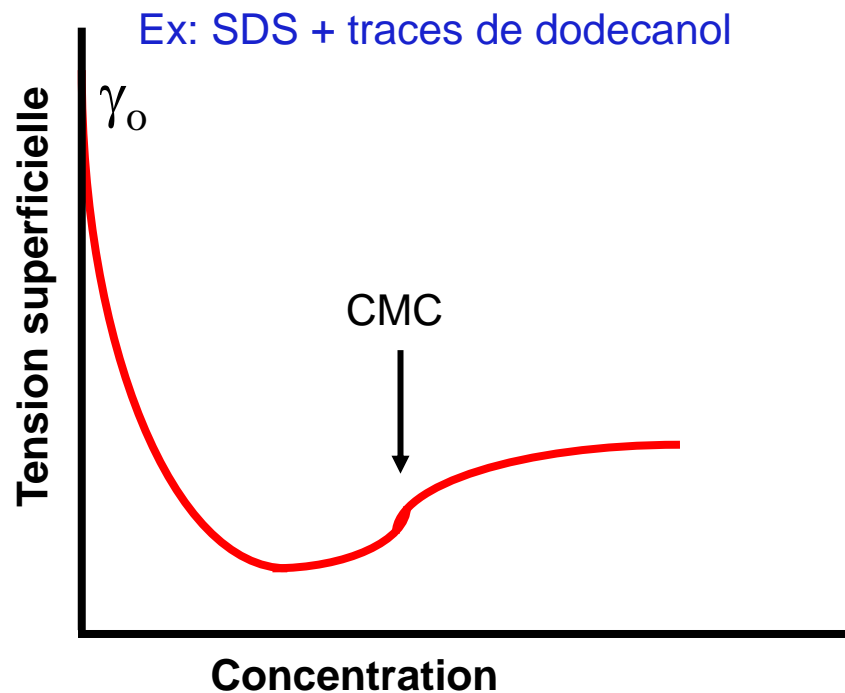
- Comment déterminer la CMC ?



# Mesure de la tension superficielle

- **Effet d'impuretés sur l'évaluation de la CMC**

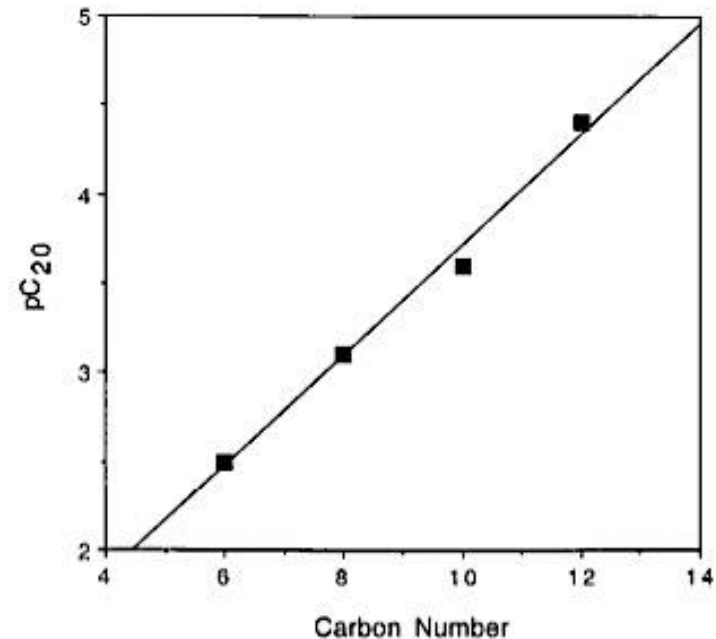
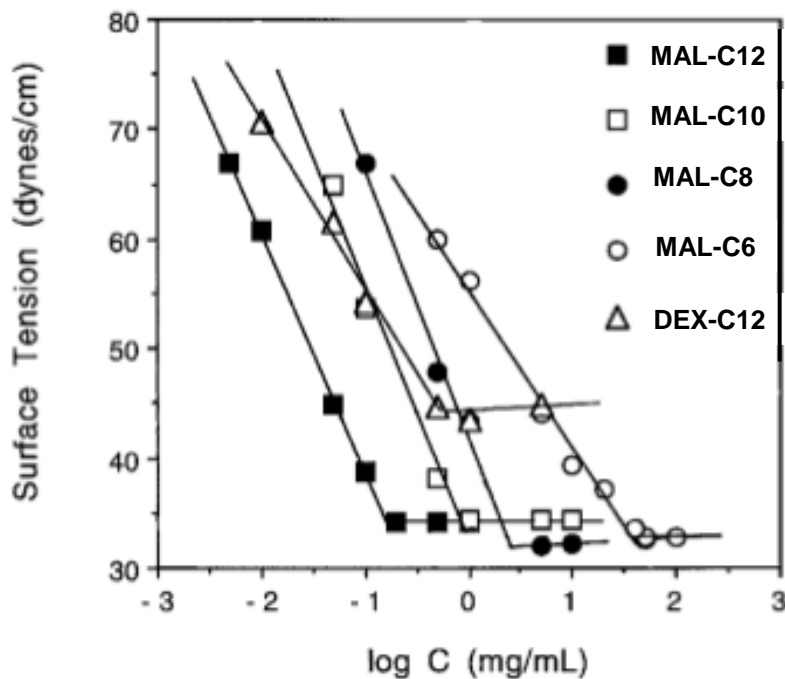
- La solubilisation d'impuretés dans les micelles provoque une augmentation de la tension superficielle.



# Mesure de la tension superficielle

- **Pouvoir tensioactif**

- **Efficacité** (*effectiveness* au sens de *puissance*): l'intensité de l'abaissement de la tension superficielle à la CMC ( $\Delta\gamma$  ou  $\pi_{cmc}$ )
- **Efficience** (*efficiency*, efficacité au sens de *rendement*)
  - la valeur du logarithme négatif de la concentration nécessaire pour abaisser la tension superficielle de 20 mN/m:  $pC_{20} = -\log C_{20}$



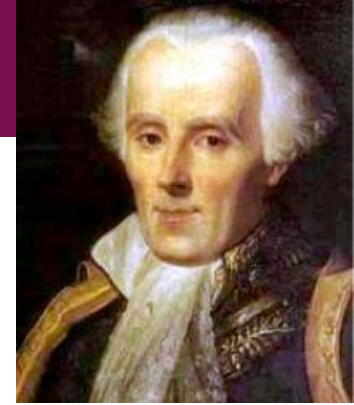


- **Méthodes de la goutte**

- volume de goutte, forme de goutte

- Formation progressive de la goutte de la phase 1 à la sortie d'un capillaire plongé dans la phase 2.





1749-1827

- **Méthodes fondées sur l'équation de Laplace**

- Pour une goutte sphérique: 
$$P_{\text{int}} - P_{\text{ext}} = \frac{2g}{R}$$

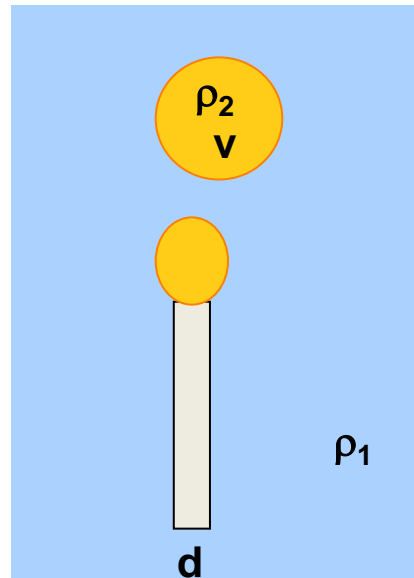
- $P_{\text{int}} - P_{\text{ext}}$  est la différence de pression mesurée entre l'int. et l'ext. de la goutte
- R est le rayon de courbure

- Pour une goutte non sphérique, de rayons de courbure  $R_1$  et  $R_2$  :

$$P_{\text{int}} - P_{\text{ext}} = g \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

# Mesure de la tension interfaciale

- **Méthode du volume de goutte**
  - Tension interfaciale dynamique



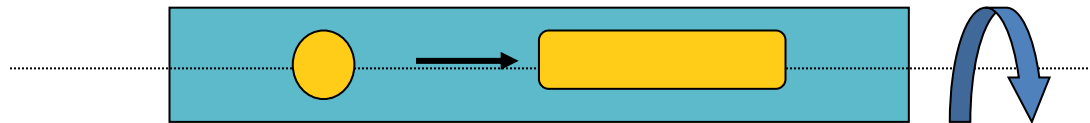
$$g_i = \frac{v(r_1 - r_2)g}{\rho d}$$

- **Méthode de la goutte tournante**

- Mesure de tensions interfaciales de l'ordre de 10 à 10<sup>-5</sup> mN/m

- **Application à la formulation de microémulsions**

- Injection d'une gouttelette d'huile dans un tube capillaire horizontal contenant la phase aqueuse et pouvant tourner autour de son axe



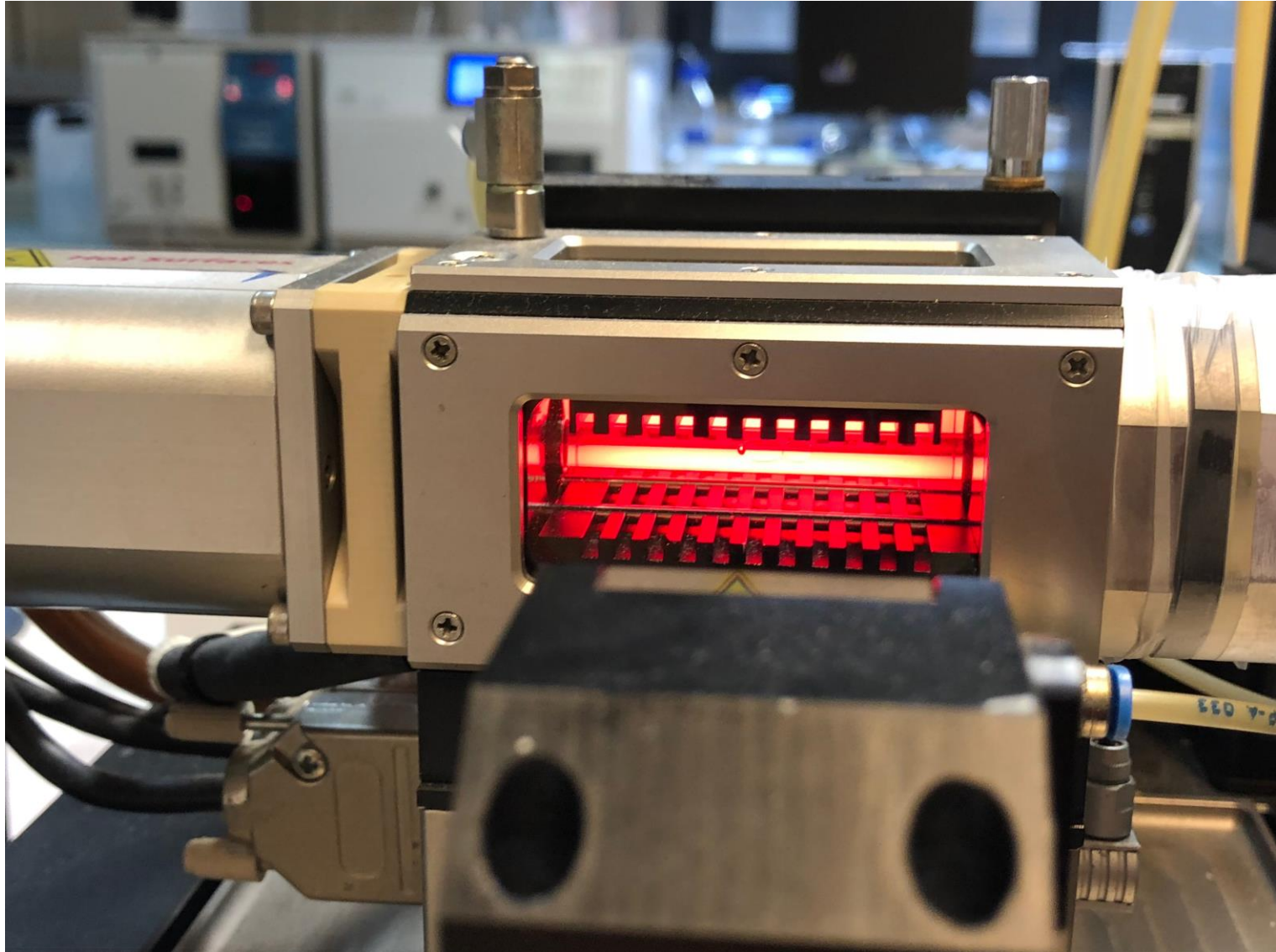
Evolution de la gouttelette lors de la rotation du tube

$$\gamma = \frac{\omega^2 \Delta \rho d^3}{32}$$

VONNEGUT

# Mesure de très faibles tensions interfaciales

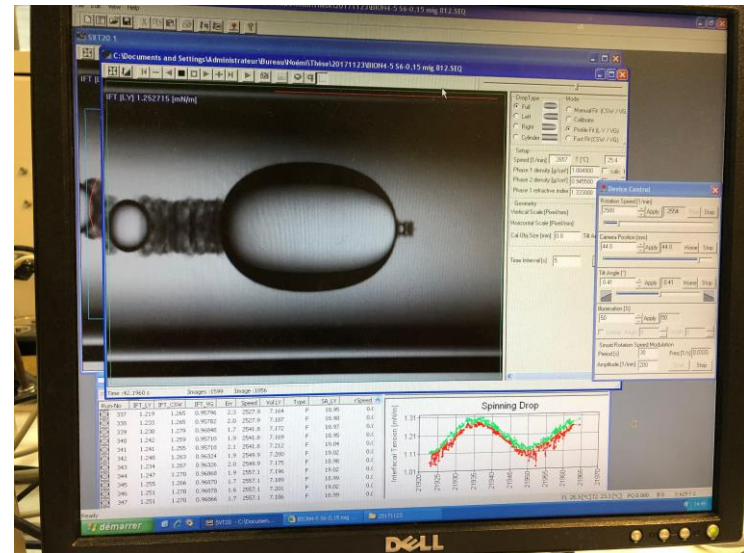
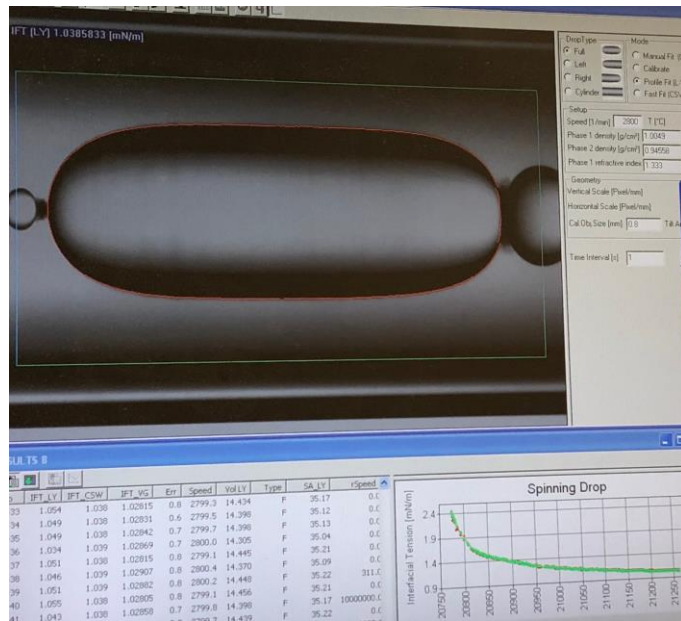
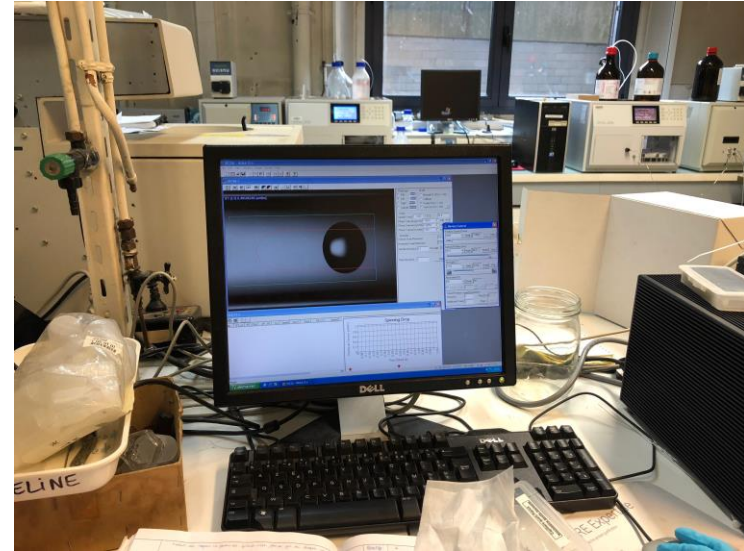
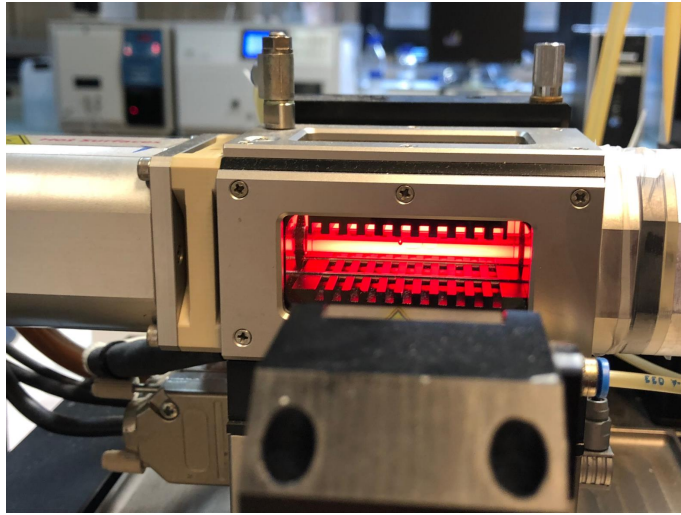
- **Tensiomètre à goutte tournante**





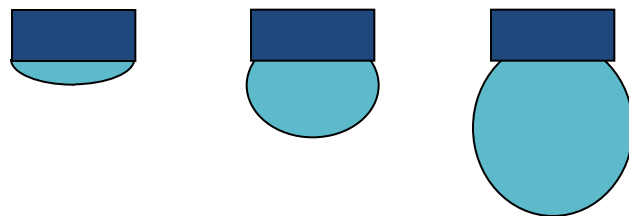
# Mesure de très faibles tensions interfaciales

- Tensiomètre à goutte tournante



- **Méthode de la goutte pendante**

- Permet de mesurer la tension superficielle en fonction de la géométrie d'une goutte.
- La goutte formée est soumise à deux forces
  - Celle qui résulte de la gravité
  - Celle qui résulte de la tension superficielle
- qui lui imposent une géométrie particulière, reliée par la loi de Laplace à la tension superficielle



$$\Delta P_{(t)} = \frac{2\gamma_{(t)}}{R_{(t)}}$$

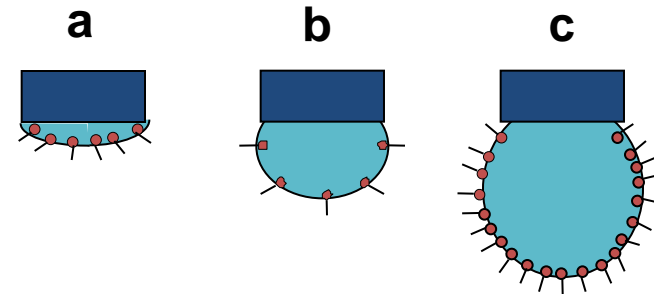
- **Méthode de la goutte pendante**

- Lorsque le liquide émergeant est **pur**:

- $\gamma = \text{constante} = \gamma_{\text{équi}}$

- Lorsque le liquide contient un **tensioactif**, le transfert de ce tensioactif affecte la tension interfaciale

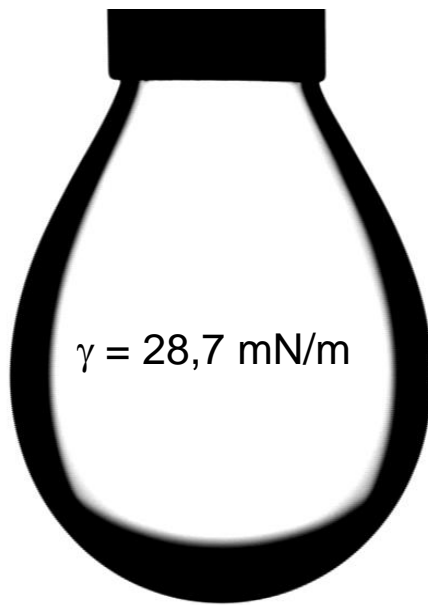
- a: état initial de la goutte
- b: expansion rapide de la goutte
  - déplétion en tensioactif
- c: adsorption du tensioactif



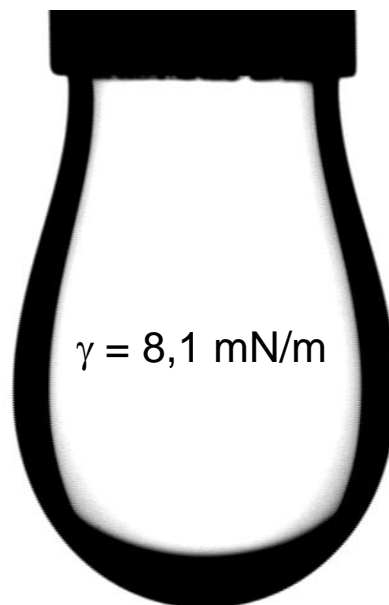


# Application à la formulation

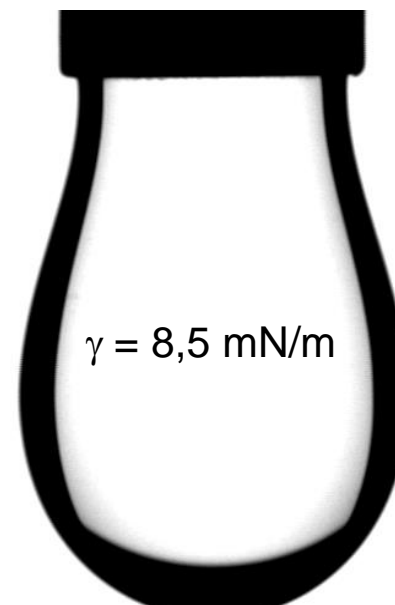
- **Effet de tensioactifs sur l'interface dichlorométhane-eau**



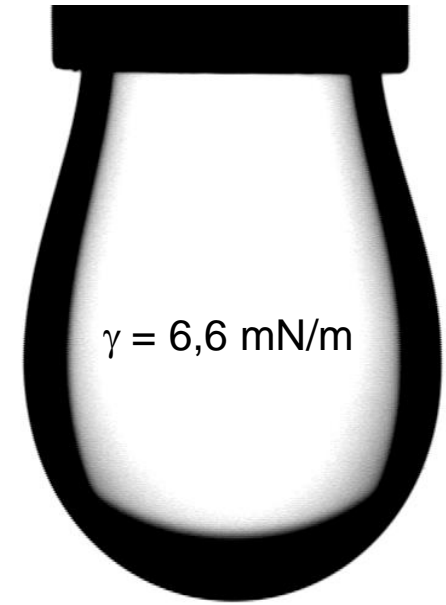
DCM/eau



DCM/eau+SC



DCM/eau+TC



DCM/eau+PVA

- **Rhéologie interfaciale**

$$E = \frac{dg}{d \ln A} \quad \text{Elasticité de Gibbs}$$

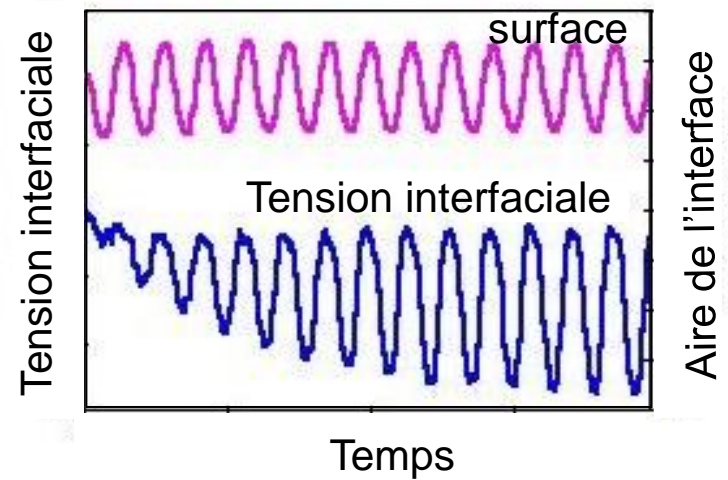
- La méthode consiste à imposer une variation périodique (sinusoïdale) de l'aire de l'interface  $dA(t)$

Déformation de l'aire de l'interface:  $dA_0/A$

$$\Delta A(t) = \Delta A_0 \cos \omega t$$

$$\Delta \gamma(t) = \Delta \gamma_0 \cos \omega t + \delta$$

$$E' = \frac{A \Delta \gamma_0}{\Delta A_0} \cos \delta \quad E'' = \frac{A \Delta \gamma_0}{\Delta A_0} \sin \delta$$

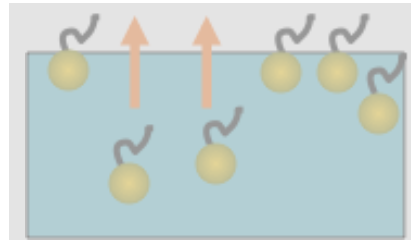


# Monocouches à l'interface air-liquide

## ◆ Adsorption à l'interface air/liquide

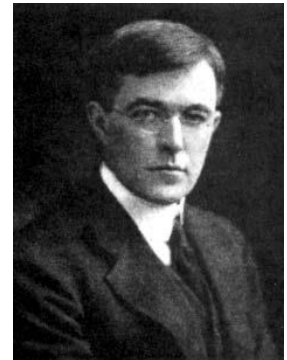
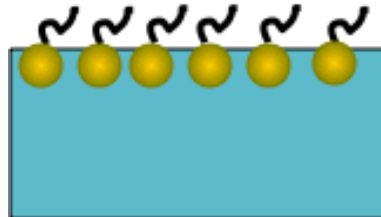
### ■ Films monomoléculaires de *Gibbs*

- Adsorption d'un soluté amphiphile à l'interface air/liquide



### ■ Films monomoléculaires de *Langmuir*

- Etalement d'une substance insoluble à l'interface



Irving Langmuir  
1881-1957

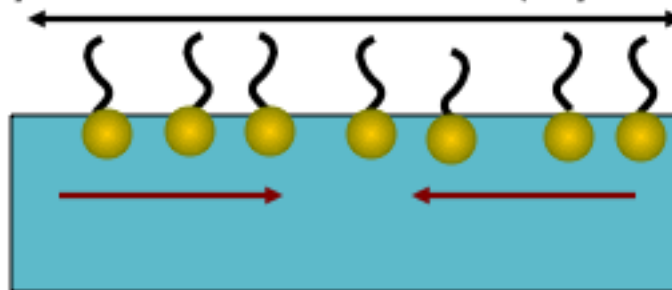
# Monocouches de Langmuir

- **Films monomoléculaires formés de molécules insolubles**

- Exemples: cholestérol, phospholipides, acides et alcools gras, acide polylactique ou copolymère lactique-glycolique

$$P = g_{H_2O} - g_F$$

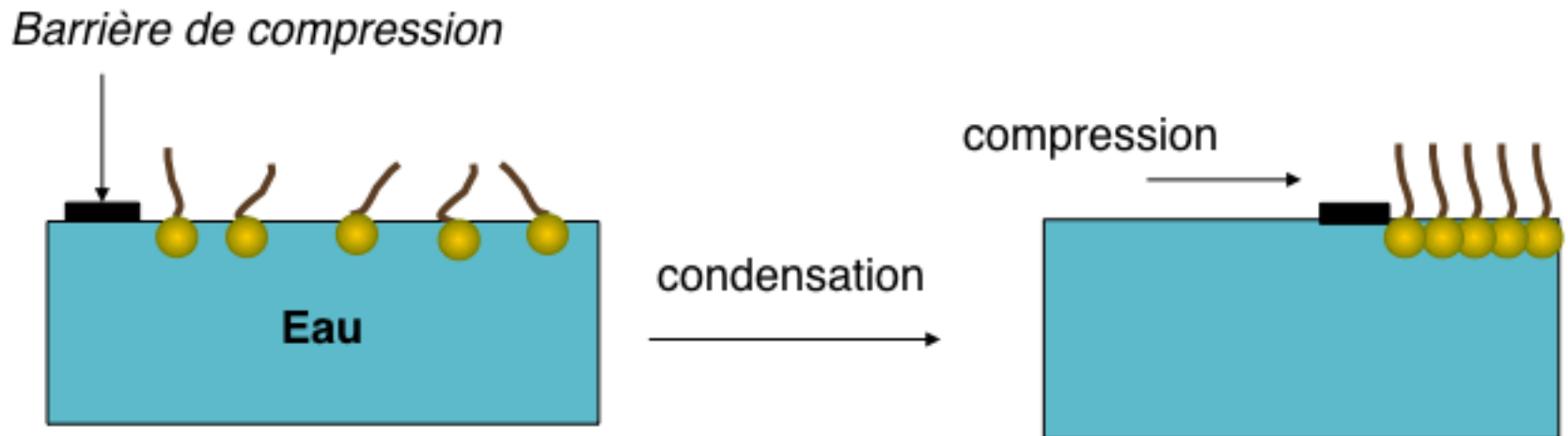
*Répulsion entre molécules (expansion)*



*Attraction entre molécules*

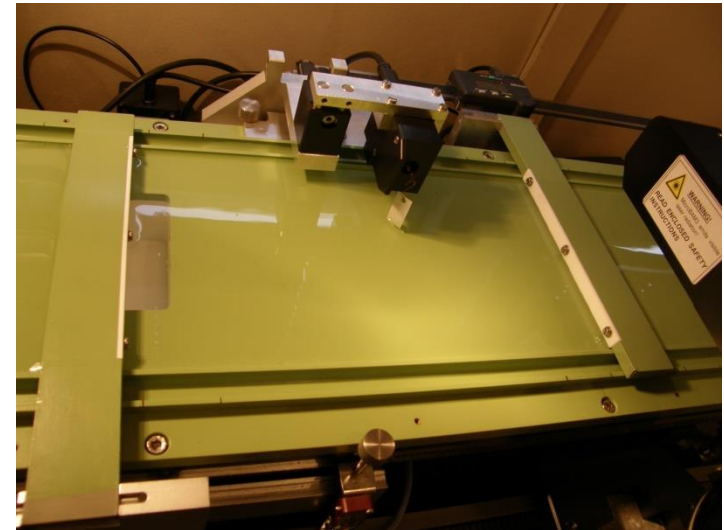
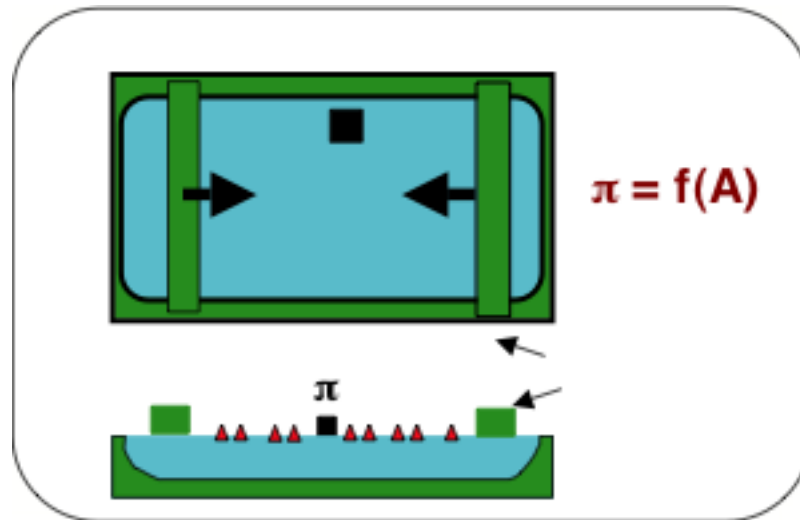
# Monocouches de Langmuir

- **Changement d'état physique au sein d'une monocouche**
  - Evolution de la pression de surface et de l'aire occupée par les molécules dans des conditions de compression dynamique



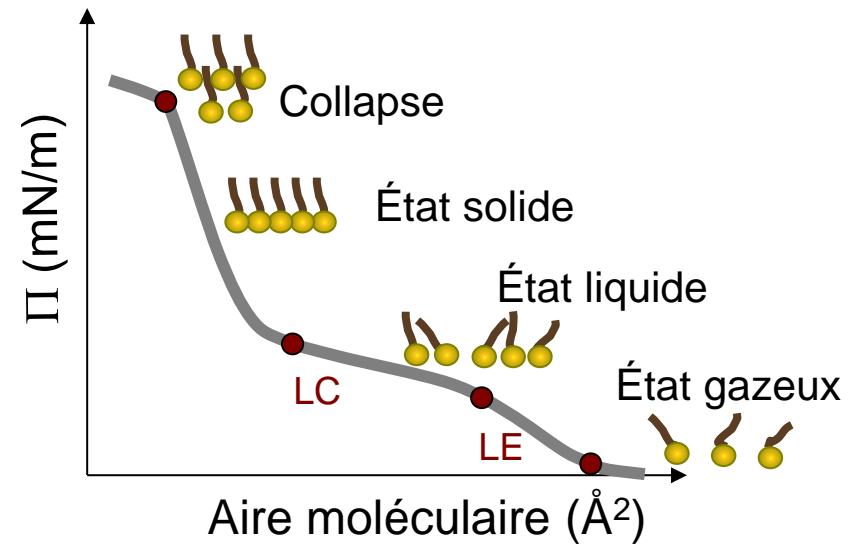
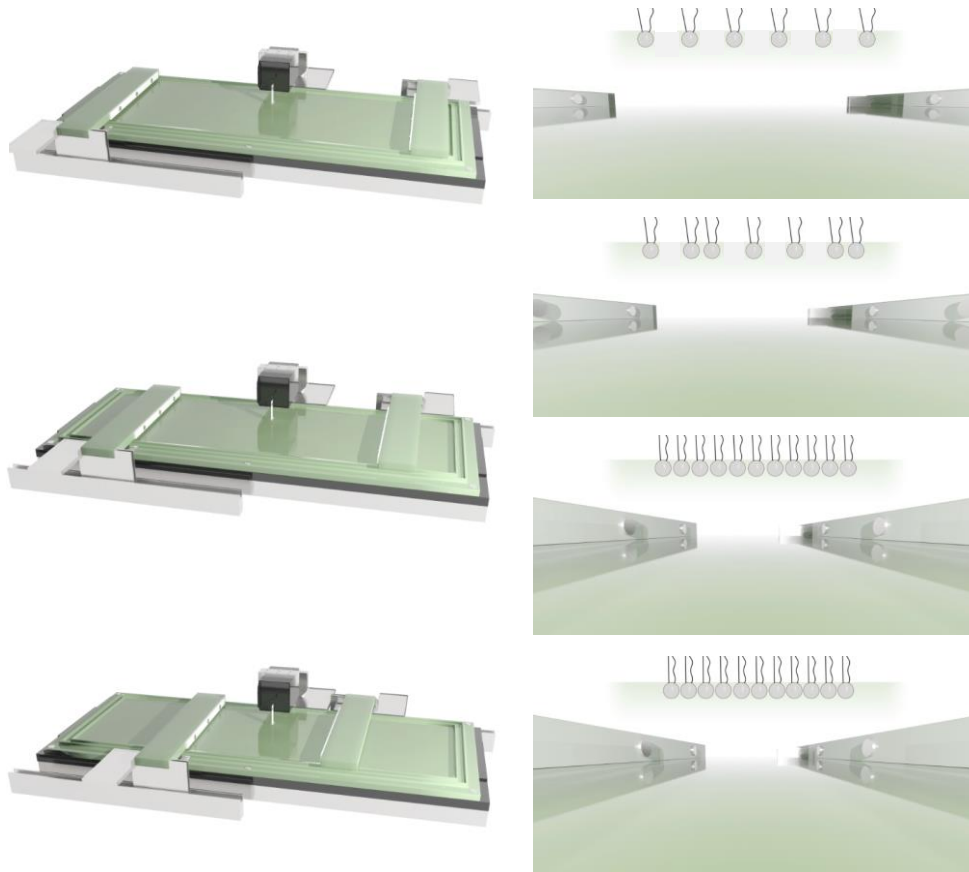
# Mesure dynamique de la pression de surface

- **Balance à film de Langmuir**



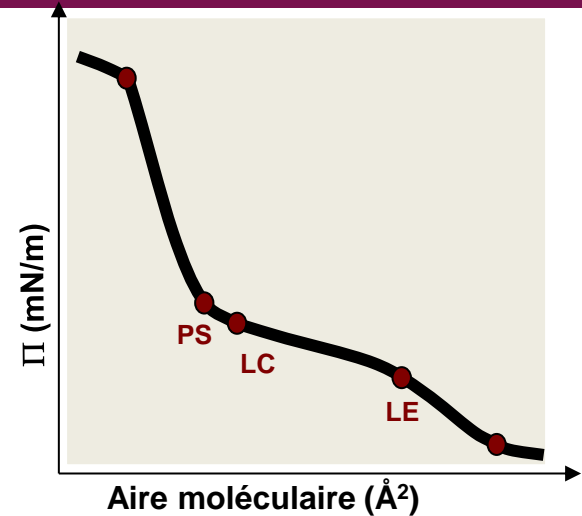
# Mesure dynamique de la pression de surface

- **Balance à film de Langmuir**



# Isotherme $\pi - A$

- **Transition LE-LC**

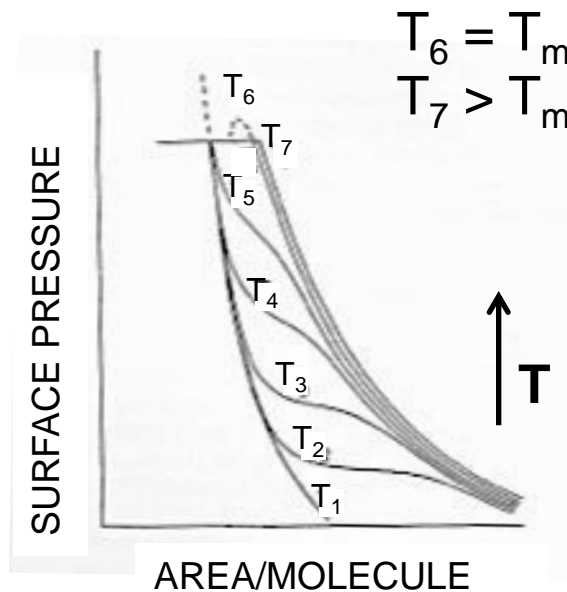


- Formation de petits domaines cristallins de 100 Å de diamètre (nucléation)
  - Co-existence des domaines cristallins avec des domaines fluides
- Augmentation progressive des domaines cristallins (1 mm de diamètre)
- Fusion des domaines (10 mm) lors de la transition LC-phase solide

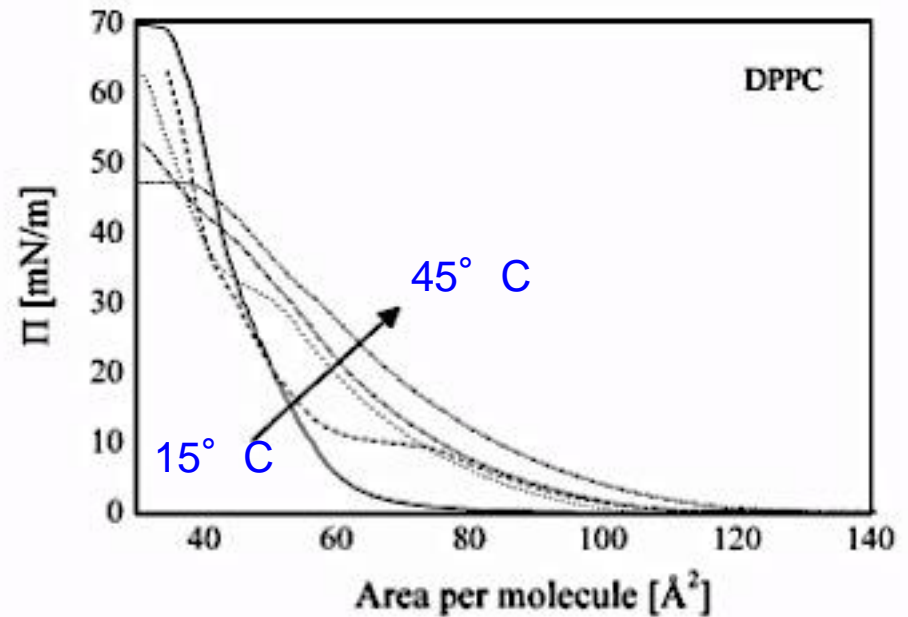


# Isotherme $\pi - A$

- Effet de la température



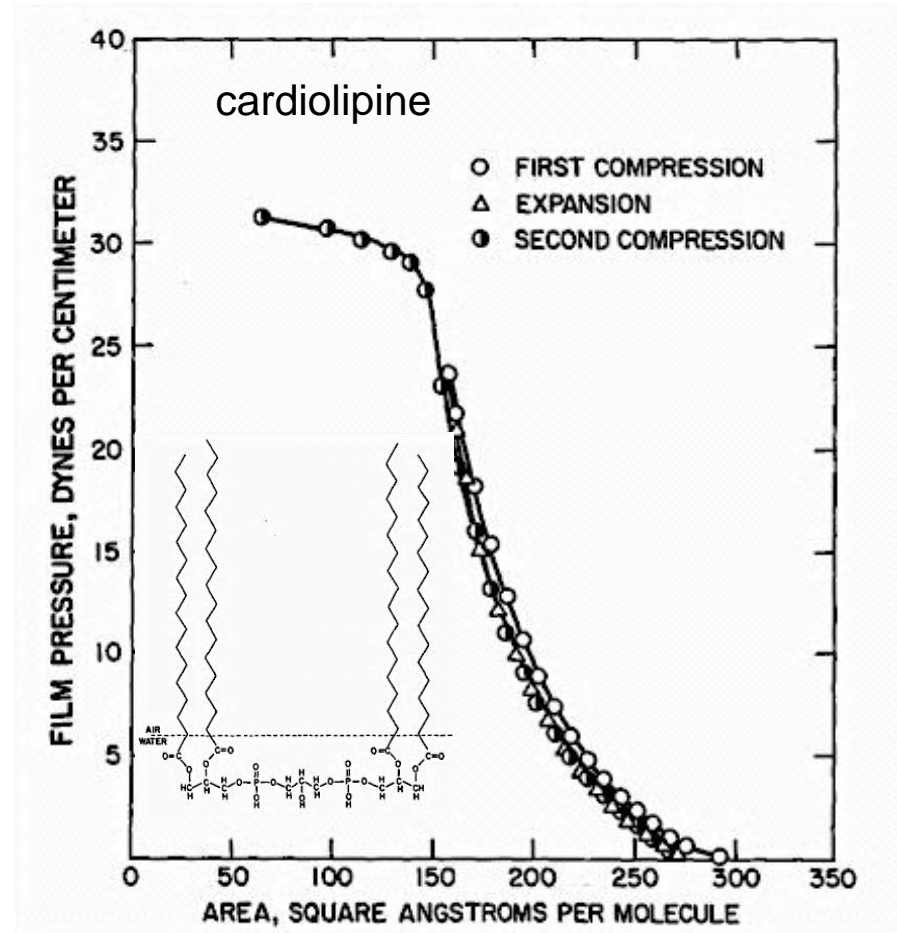
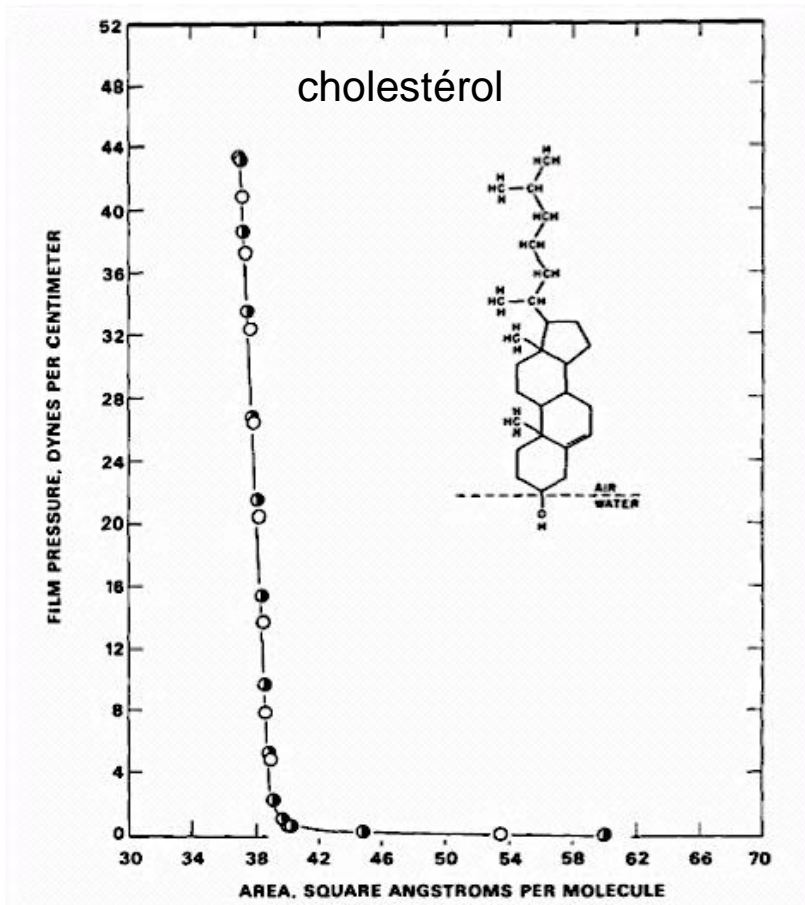
MacDonald RC, in Vesicles (Ed. M. Rosoff), Dekker, NY. pp.3-48, 1996



Bordi F. et al, Colloids Surf B. 61 (2008) 304-310

# Isothermes $\pi - A$

- Absence de transition et différences de compressibilité latérale

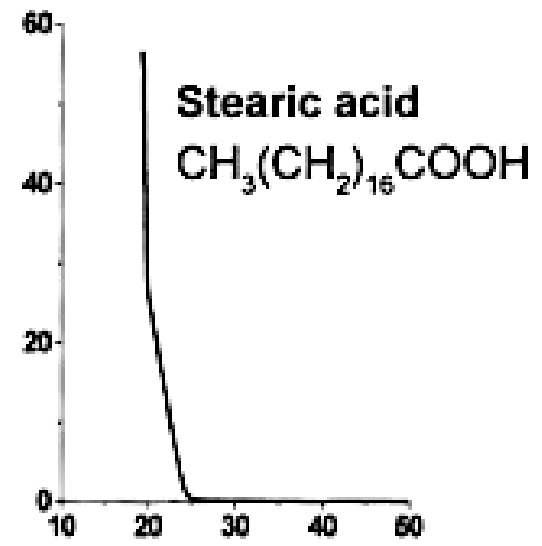
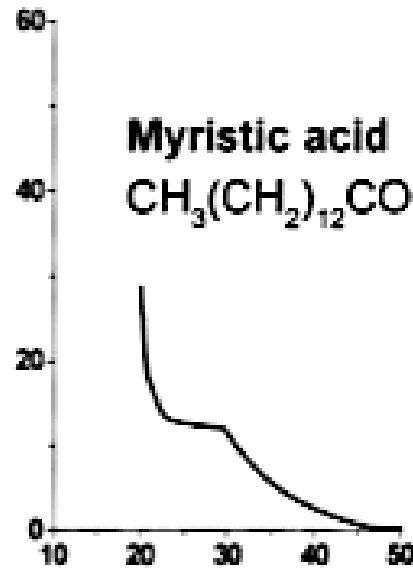
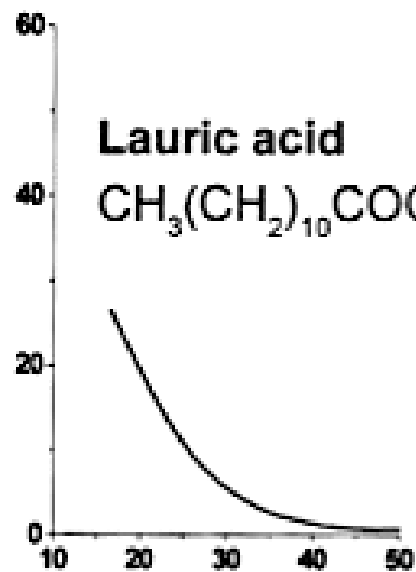


# Organisation des molécules à l'interface

- **Facteurs déterminant le type de monocouche**

- Nature de la partie hydrophobe
  - Acide gras  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$

$\pi$  [mN/m]

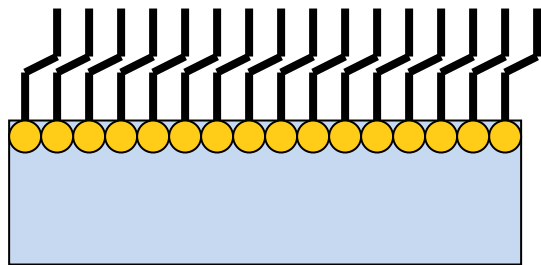


Area [Å<sup>2</sup>/molecule]

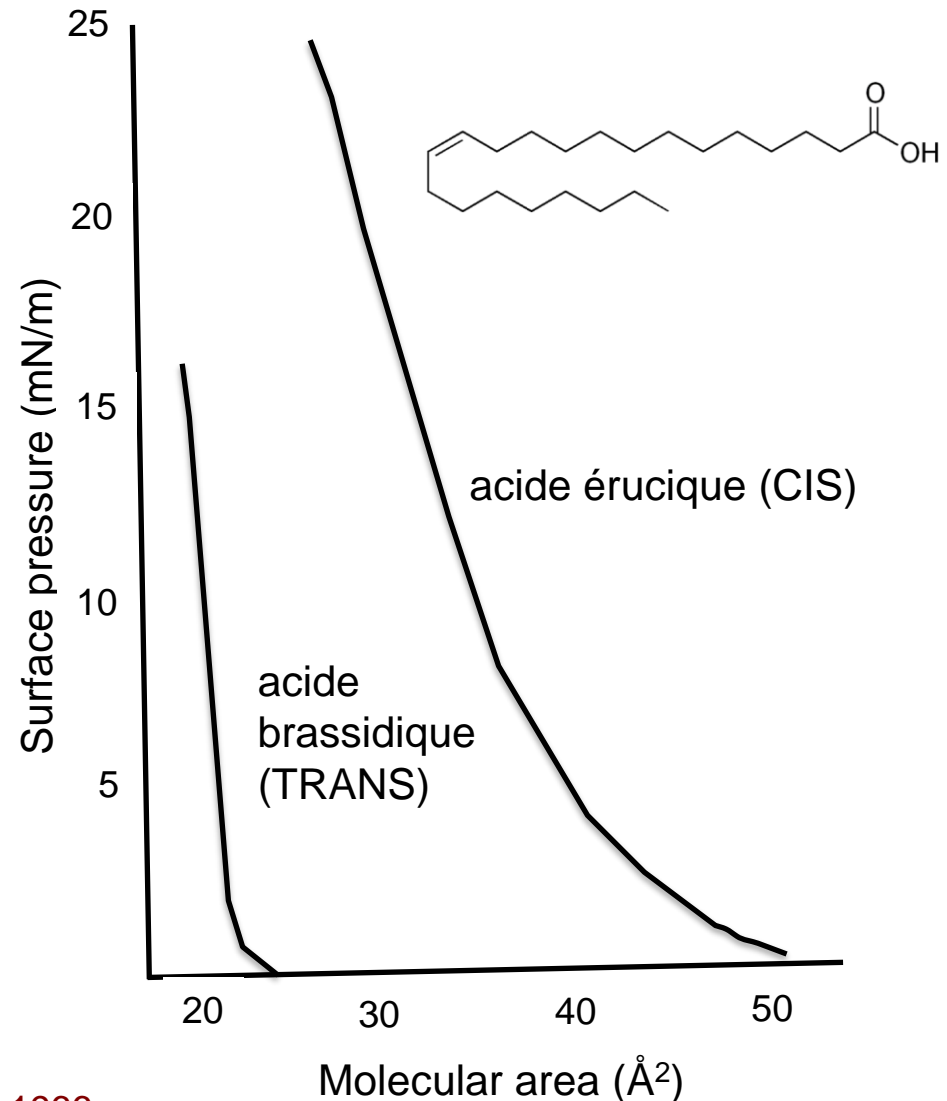
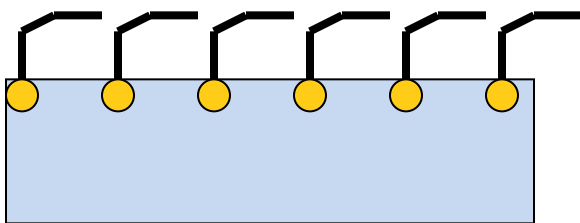
# Organisation des molécules à l'interface

## • Effet de la double-liaison dans le cas d'acides insaturés

- configuration trans
  - couche condensée



- configuration cis
  - couche expansée



- **Effet du groupement polaire**
  - Solvatation
    - OH: expansion de la monocouche
    - COOH: condensation de la monocouche
  - Charge électrique
    - expansion de la monocouche

# Organisation des molécules à l'interface

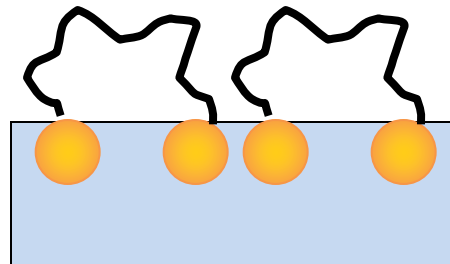
- **Effet du groupement polaire**

- Cas des bolaamphiphiles

- 1 queue hydrophobe pour 2 têtes polaires

- Film dans l'état liquide expansé

- » L'aire occupée par les molécules limite la condensation



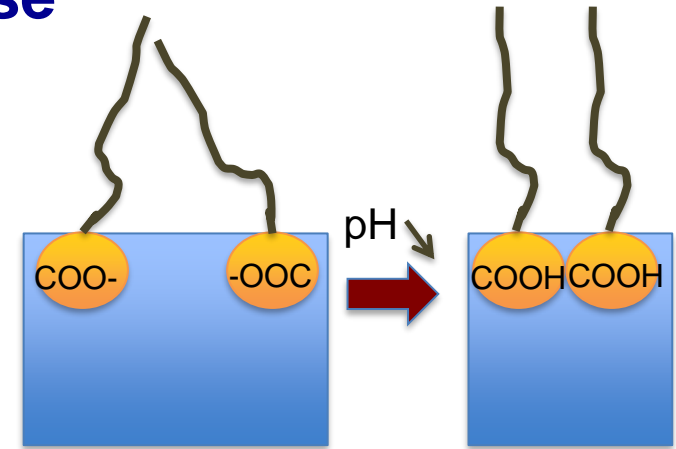
# Organisation des molécules à l'interface

- **Effet de la nature de la sous-phase**

- Diminution du pH:

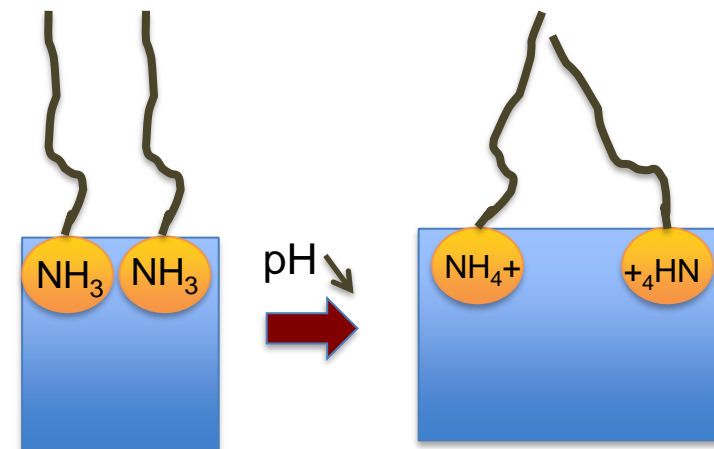
- Film d'acides carboxyliques

- » Condensation du film



- Film d'amines

- » Expansion du film



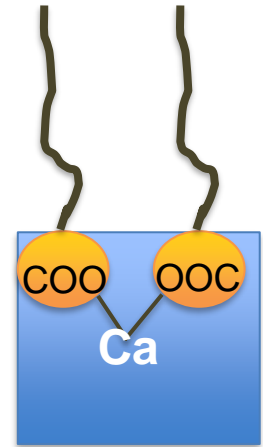
# Organisation des molécules à l'interface

- **Effet de la nature de la sous-phase**

- Présence d'un sel de calcium

- Film d'acide carboxylique

- » Complexation des groupements acides
  - Condensation de la monocouche



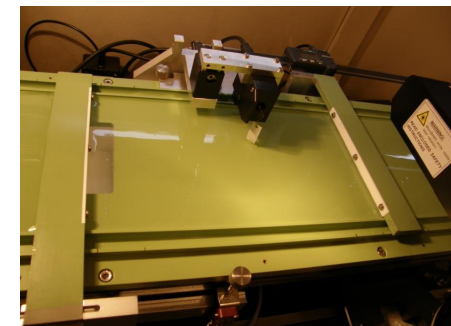
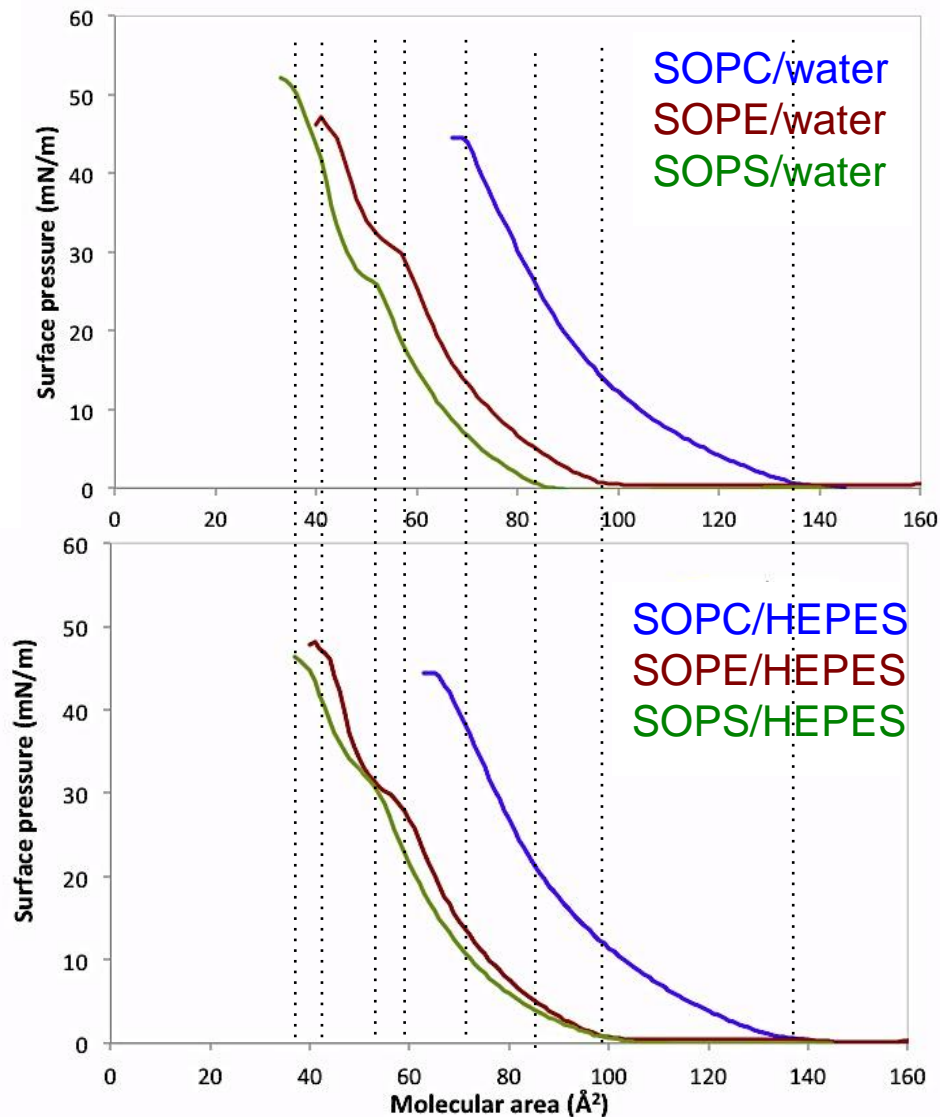
- Présence de NaCl

- Réduction de la répulsion électrostatique entre les groupes polaires



# Organisation des molécules à l'interface

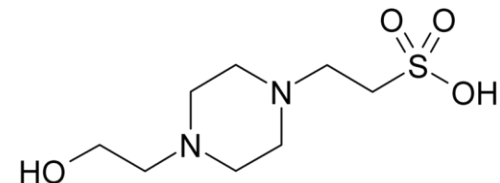
- Effet de la nature de la sous-phase



Température :  $22 \pm 1^\circ \text{C}$

pH (eau) : 6.5

pH (HEPES): 6.5



HEPES: 4-(2-hydroxyethyl)-1-piperazineethane sulfonic acid

# Organisation des molécules à l'interface

## • Adsorption à l'interface air/liquide: films mixtes

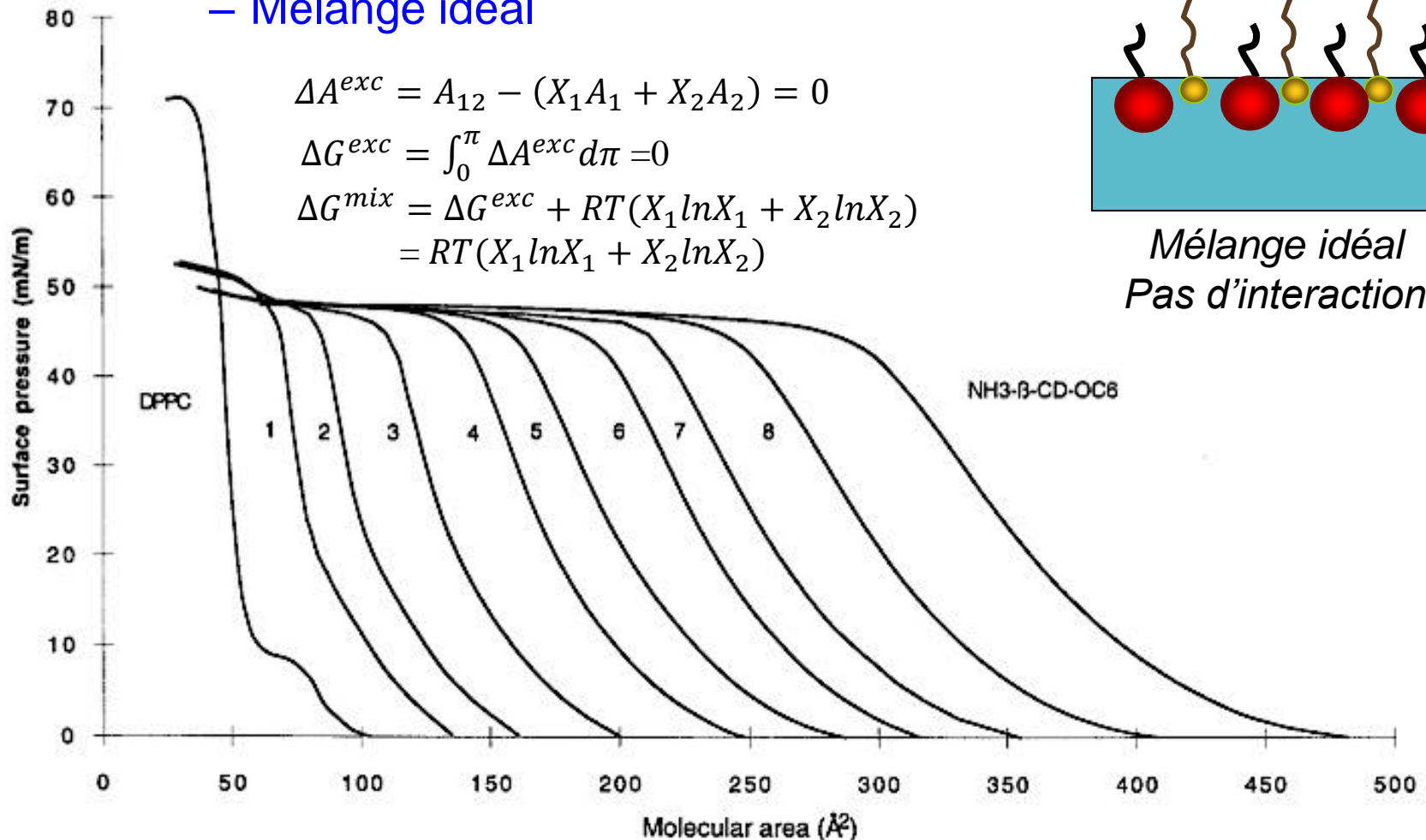
– Composants n'interagissant pas entre eux

– Mélange idéal

$$\Delta A^{exc} = A_{12} - (X_1 A_1 + X_2 A_2) = 0$$

$$\Delta G^{exc} = \int_0^\pi \Delta A^{exc} d\pi = 0$$

$$\begin{aligned} \Delta G^{mix} &= \Delta G^{exc} + RT(X_1 \ln X_1 + X_2 \ln X_2) \\ &= RT(X_1 \ln X_1 + X_2 \ln X_2) \end{aligned}$$

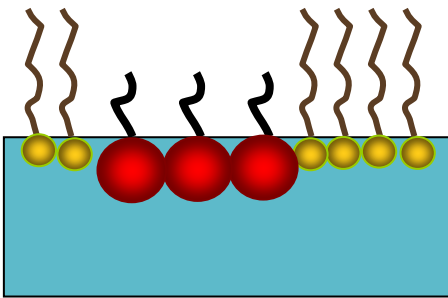


# Organisation des molécules à l'interface

- **Adsorption à l'interface air/liquide: films mixtes**

- Composants n'interagissant pas entre eux

- ségrégation

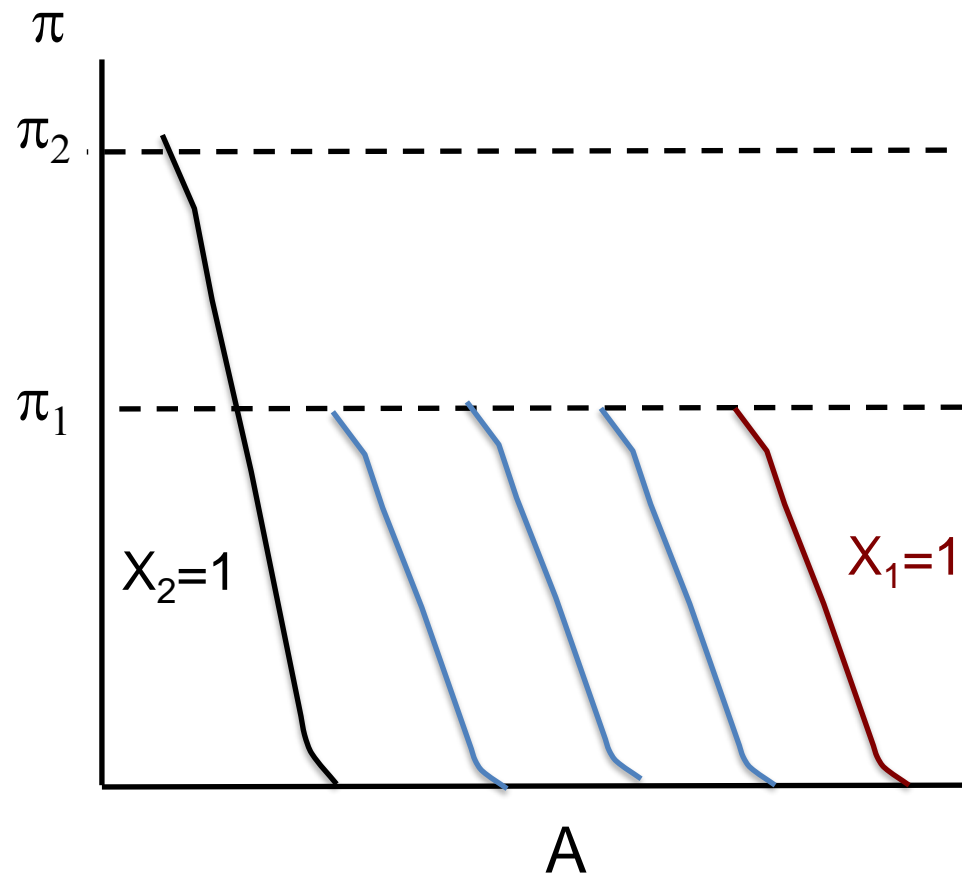


*Ilôts ou ségrégation complète*

$$\Delta A^{exc} = A_{12} - (X_1 A_1 + X_2 A_2) = 0$$

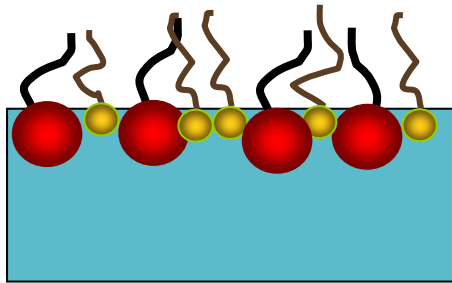
$$\Delta G^{exc} = \int_0^\pi \Delta A^{exc} d\pi = 0$$

$$\begin{aligned} \Delta G^{mix} &= \Delta G^{exc} + RT(X_1 \ln X_1 + X_2 \ln X_2) \\ &= RT(X_1 \ln X_1 + X_2 \ln X_2) \end{aligned}$$

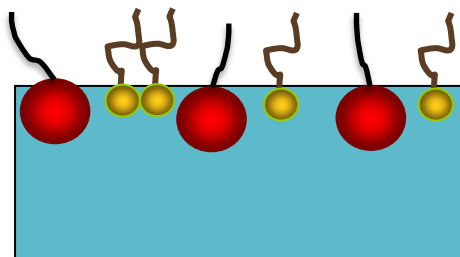


# Organisation des molécules à l'interface

- Adsorption à l'interface air/liquide: films mixtes



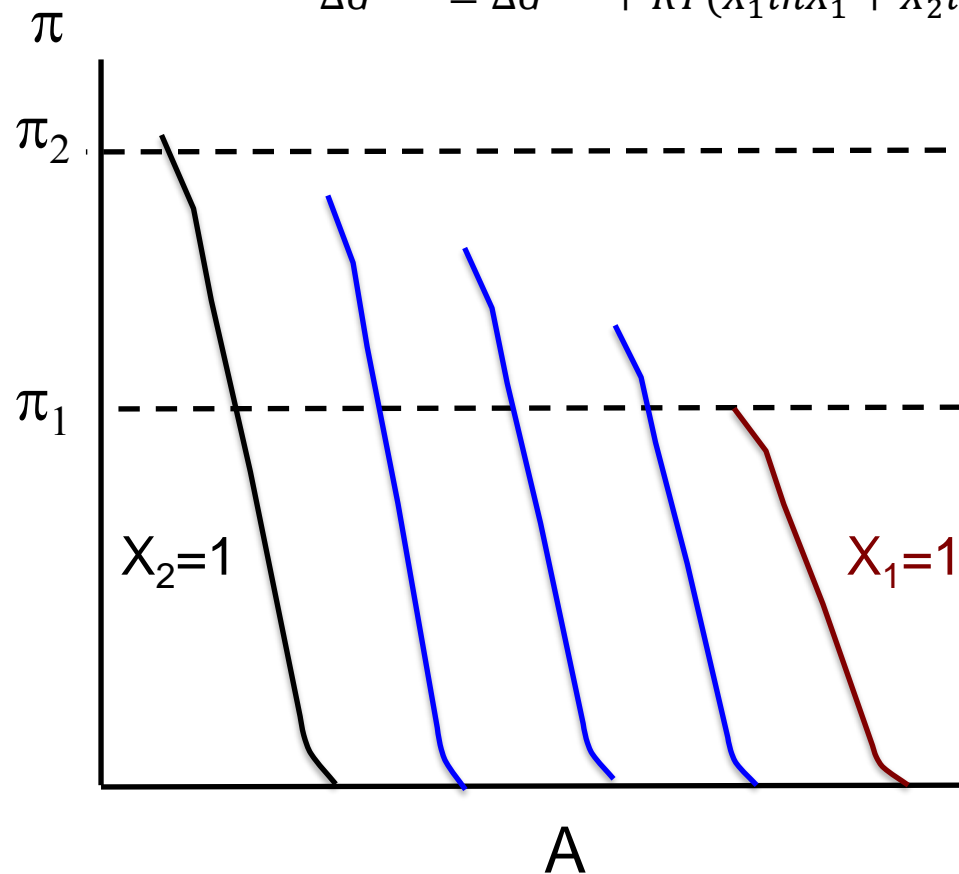
*Interaction attractive*  
 $\Delta G^{exc} < 0, \Delta G^{mix} < 0$



*Interaction répulsive*  
 $\Delta G^{exc} > 0, \Delta G^{mix} < 0$  ou  
 $\Delta G^{exc} > 0, \Delta G^{mix} > 0$

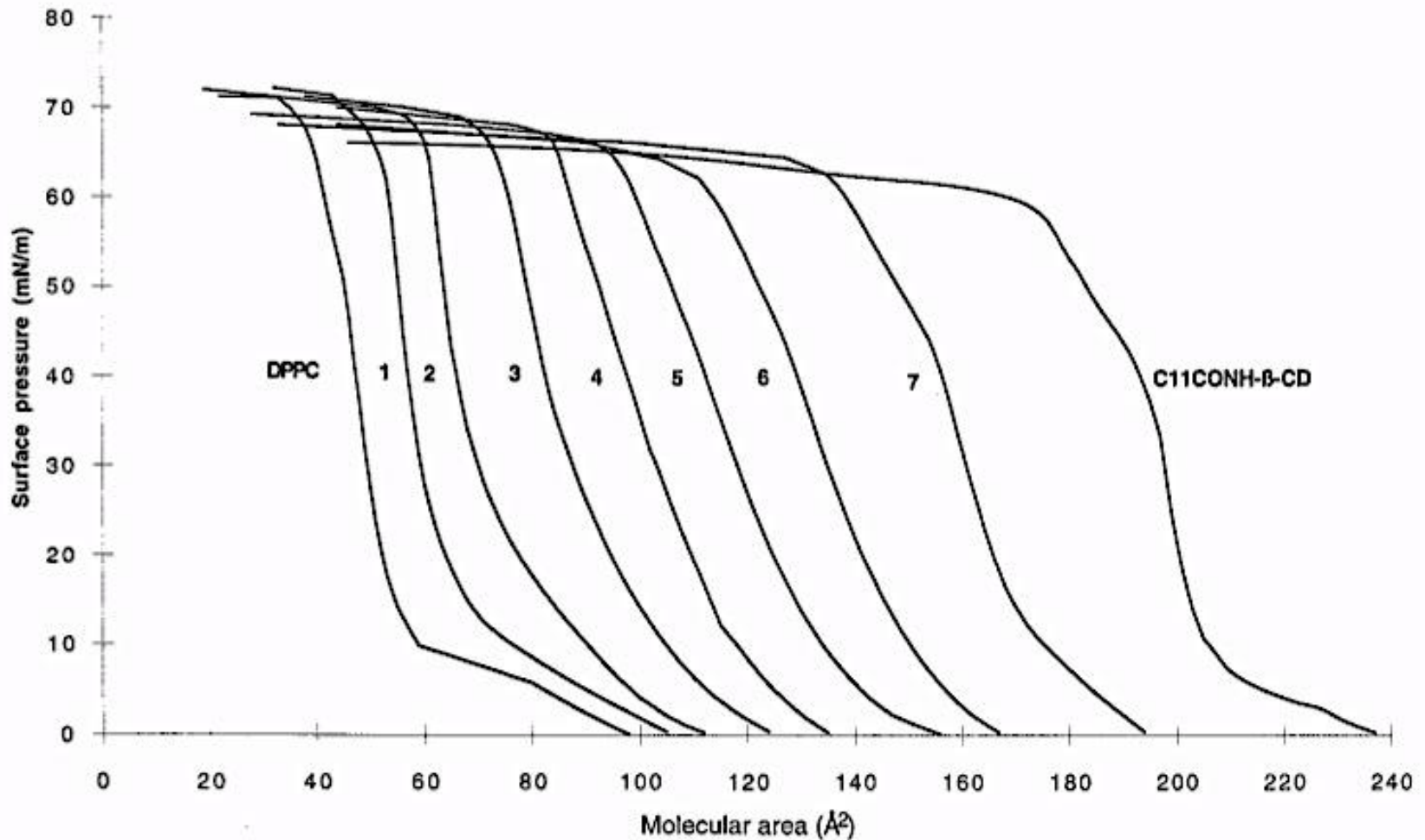
$$\Delta G^{exc} = \int_0^\pi \Delta A^{exc} d\pi$$

$$\Delta G^{mix} = \Delta G^{exc} + RT(X_1 \ln X_1 + X_2 \ln X_2)$$



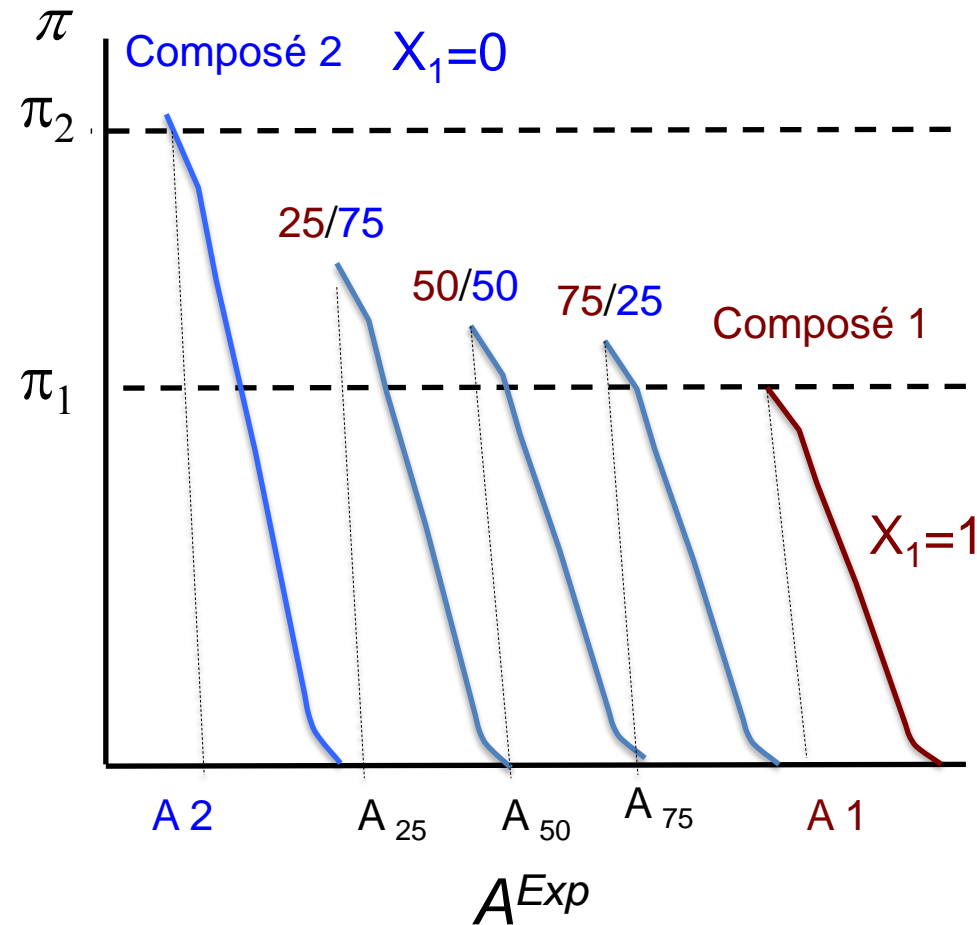
# Organisation des molécules à l'interface

- **Adsorption à l'interface air/liquide: films mixtes**
  - Composants miscibles



# Organisation des molécules à l'interface

## • Exemple d'analyse d'un système



$X$  = fraction molaire

Aire du mélange théorique

$$A_{12}^{théorique} = X_1 A_1 + X_2 A_2$$

$$X_2 = 1 - X_1$$

Dans l'exemple, 3 fractions molaires:

$$X_1 = 0,75$$

$$X_1 = 0,50$$

$$X_1 = 0,25$$

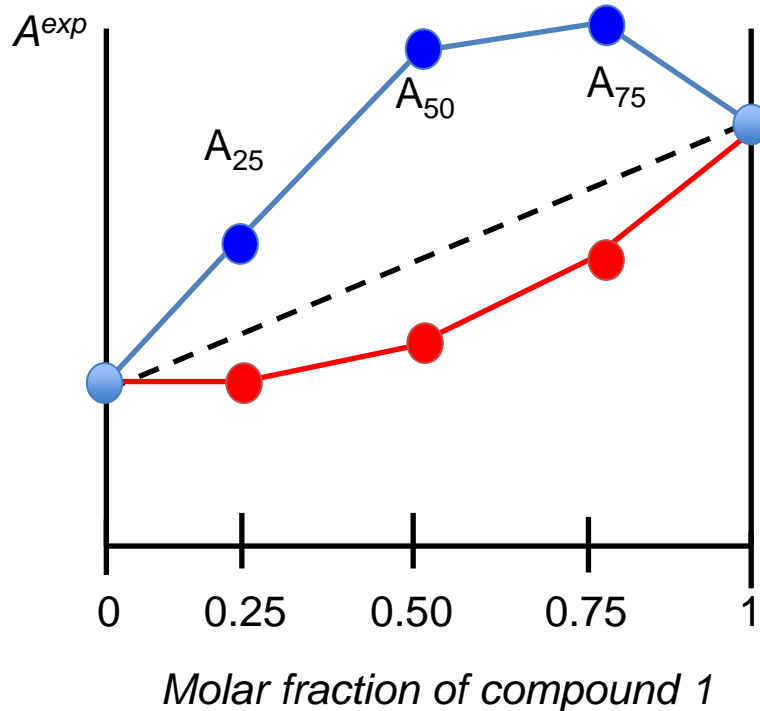
$$DA^{Excès} = A_{12}^{Expérimental} - A_{12}^{Théorique}$$

L'aire d'excès peut être négative ou positive

# Organisation des molécules à l'interface

- Exemple d'analyse d'un système

Interprétation: les aires expérimentales suivent-elles la règle d'additivité?



Le trait pointillé représente l'aire théorique, calculée selon la règle d'additivité

Cas 1: les points expérimentaux se placent au-dessus de la droite théorique:  $\Delta A^{exc} > 0$ . La monocouche est plus expansée qu'elle ne devrait: empêchement géométrique ou répulsion entre les molécules?

Cas 2: les points expérimentaux se placent en-dessous de la droite théorique:  $\Delta A^{exc} < 0$ . La monocouche est plus condensée qu'elle ne devrait: est-ce dû à une meilleure organisation géométrique (paramètre d'empilement), ou à une attraction entre les molécules ?

# Organisation des molécules à l'interface

- **Exemple d'analyse d'un système**

Interprétation: Les  $\Delta A^{\text{excès}}$  positifs ou négatifs sont-ils dus à l'organisation géométrique ou à une interaction favorable ou défavorable entre les constituants du mélange?

Pour répondre à la question, il faut calculer l'énergie libre (Gibbs) d'excès, pour différentes pressions: si  $\Delta G_{\text{exc}} > 0$ , l'interaction est défavorable (interactions répulsives),  $\Delta G_{\text{exc}} < 0$ , l'interaction est favorable (interactions attractives).

$$DG_{\text{excès}}^{\rho} = \int_0^{\rho} (A_{12}^{\text{Exp}} - X_1 A_1 - X_2 A_2) d\rho$$

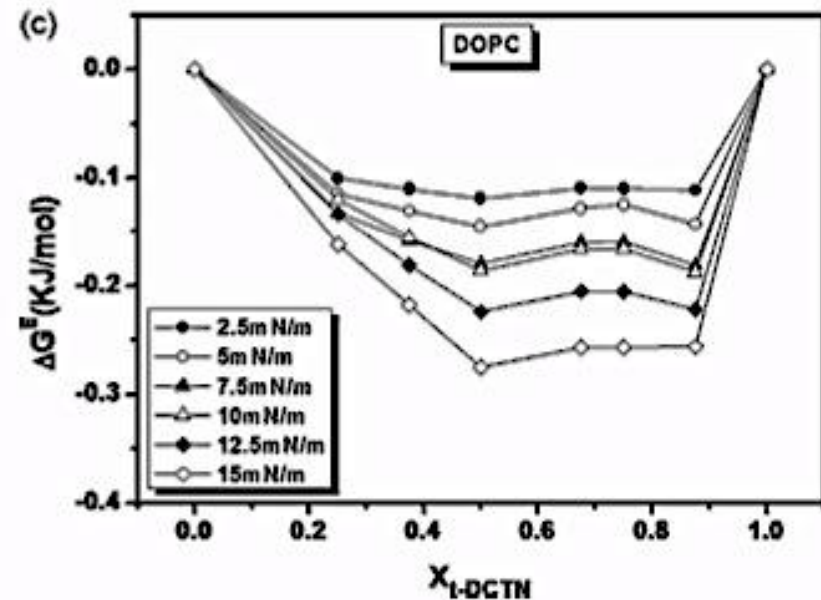
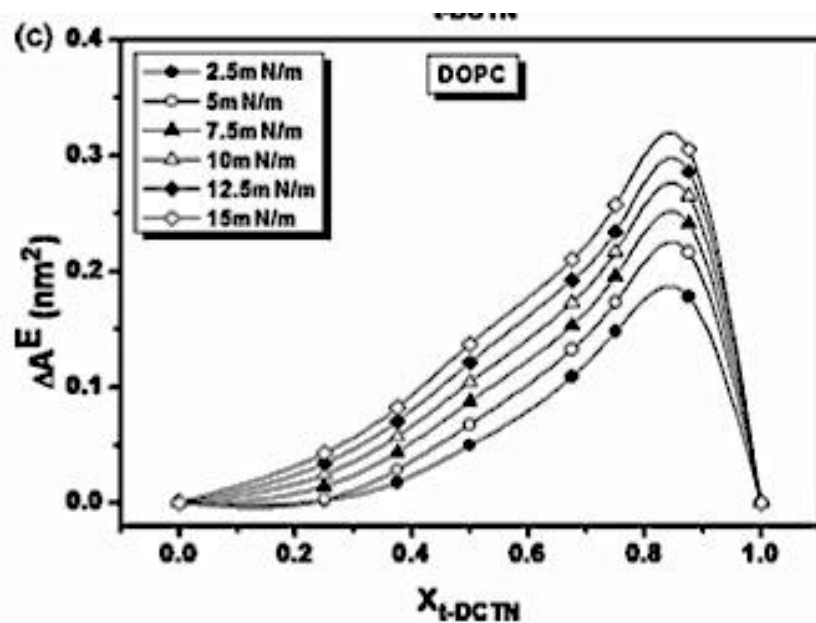
**A noter**, les notions de répulsion et attraction ne sont pas forcément associées ici à des interactions de type électrostatique.



# Organisation des molécules à l'interface

- Exemple d'analyse d'un système

Dans l'exemple ci-dessous, la substance active (DCTN) en mélange avec un phospholipide (DOPC) forme des monocouches très expansées (à gauche). Cependant, le calcul de  $\Delta G^{\text{excès}}$  (à droite) montre que l'interaction n'est pas répulsive; Au contraire, elle est légèrement attractive à toutes les pressions et toutes les fractions molaires.



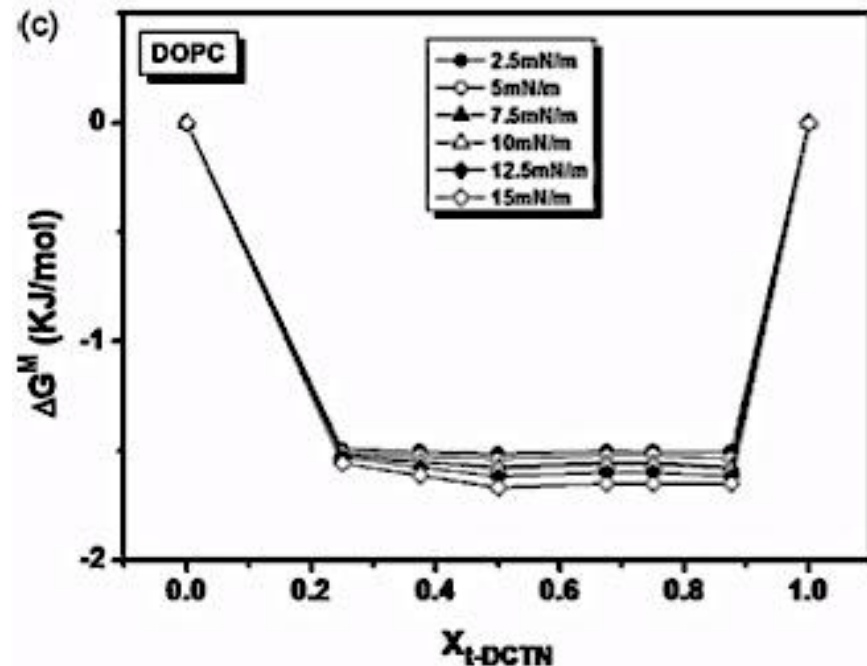
# Organisation des molécules à l'interface

## • Exemple d'analyse d'un système

L'énergie libre de mélange est la somme de l'énergie libre d'excès et de l'énergie libre du mélange idéal. Pour que deux composants soient considérés miscibles, l'énergie libre de mélange doit être négative. Elle peut l'être même si  $\Delta G^{\text{excès}}$  est positif.

$$DG_m^{\rho} = \int_0^{\rho} (A_{12}^{\text{Exp}} - X_1 A_1 - X_2 A_2) d\rho + RT(X_1 \ln X_1 + X_2 \ln X_2)$$

DCTN et DOPC sont miscibles.



# Isothermes $\pi - A$

- Module de compressibilité ( $1/C_s$ )

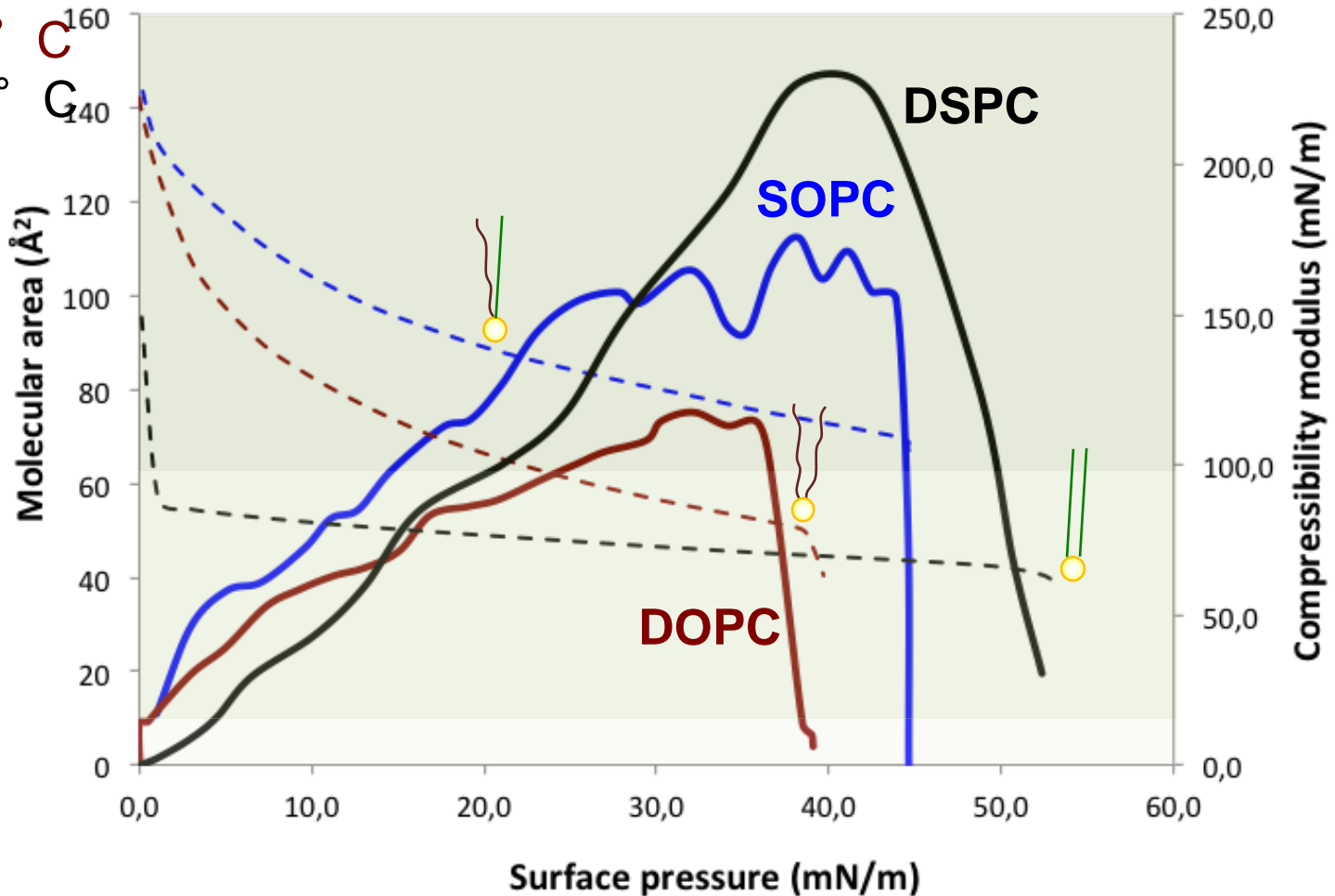
$T = 22 \pm 1^\circ \text{ C}$

$T_m = 6^\circ \text{ C}$

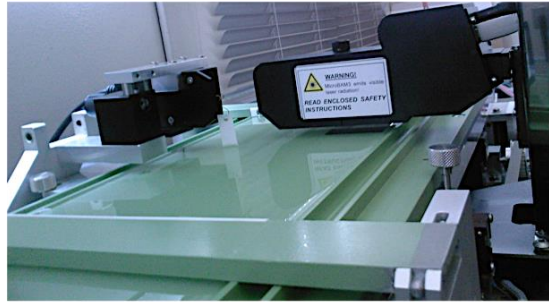
$T_m = -20^\circ \text{ C}$

$T_m = 55^\circ \text{ C}$

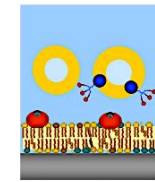
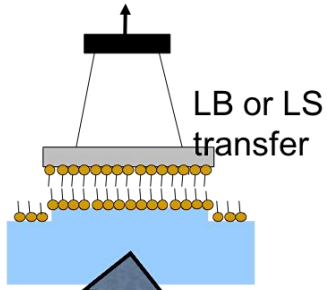
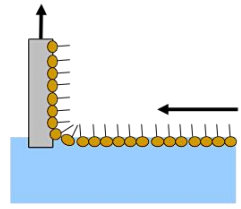
$$C_s^{-1} = \frac{1}{C_s} = -A \frac{dp}{dA}$$



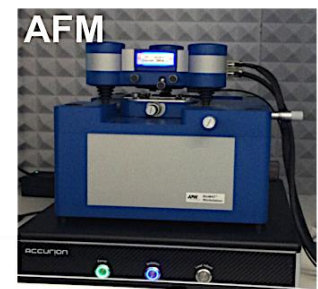
# Techniques couplées à la balance de Langmuir



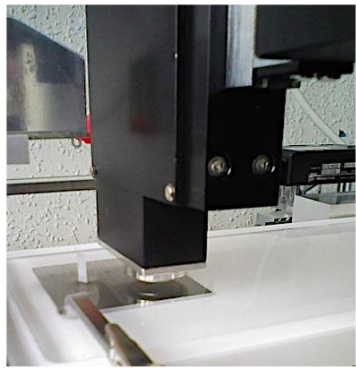
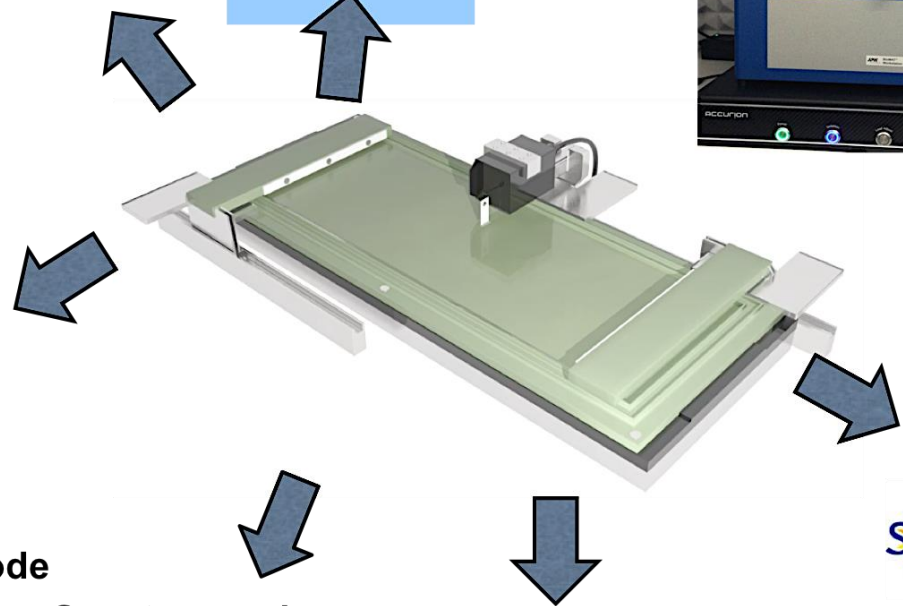
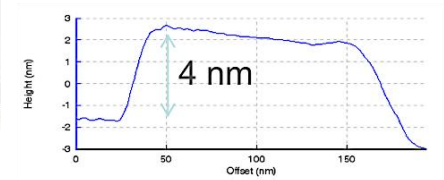
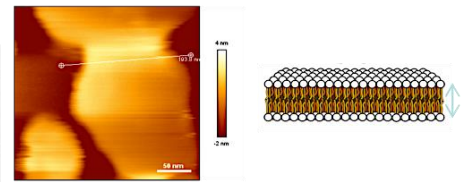
Brewster angle microscopy



QCM-D / EIS



AFM



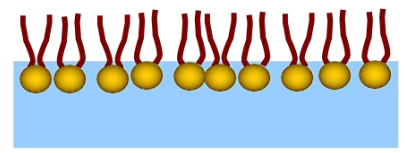
Surface potential electrode

Spectroscopies  
(Fluorescence,  
PM-IRRAS)

Neutron reflectivity



X-Rays



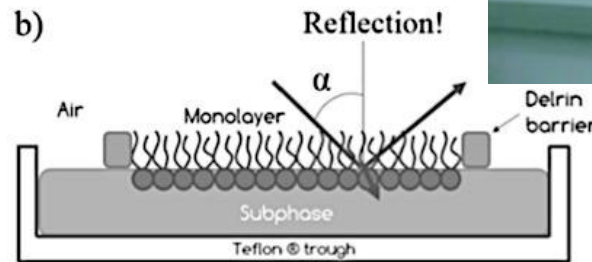
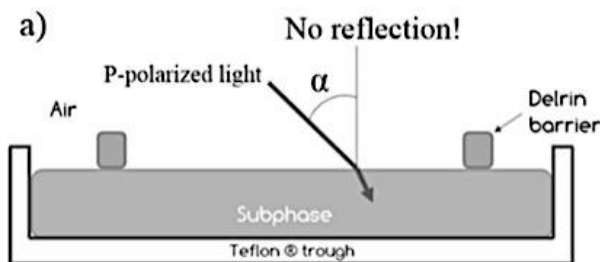
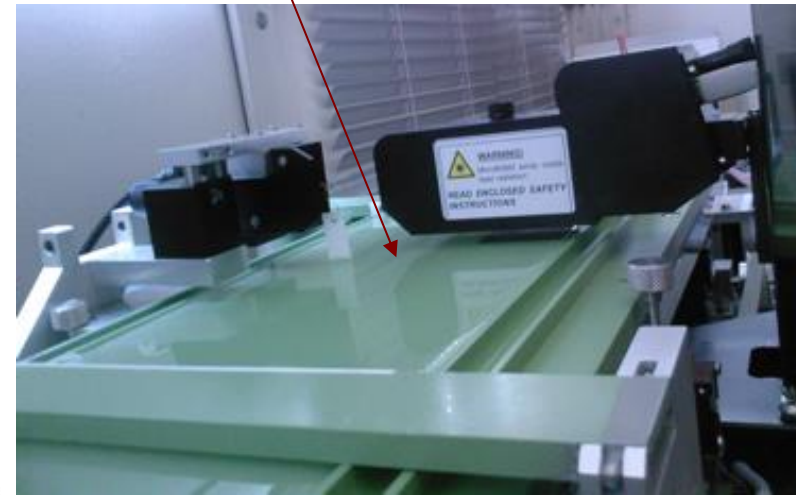
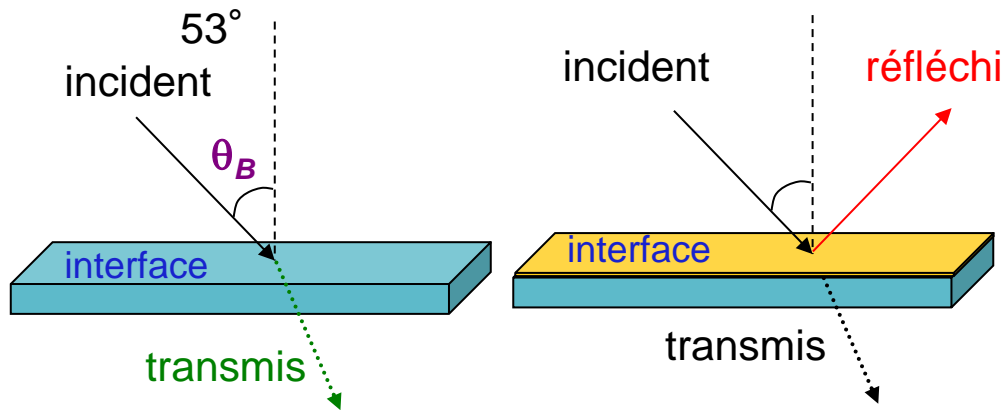
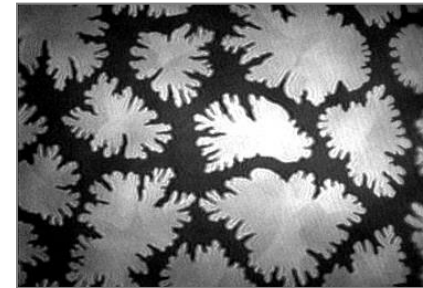
Grazing incidence X-ray  
diffraction (GIXD)

# Analyse morphologique des monocouches

## • Microscopie à l'angle de Brewster

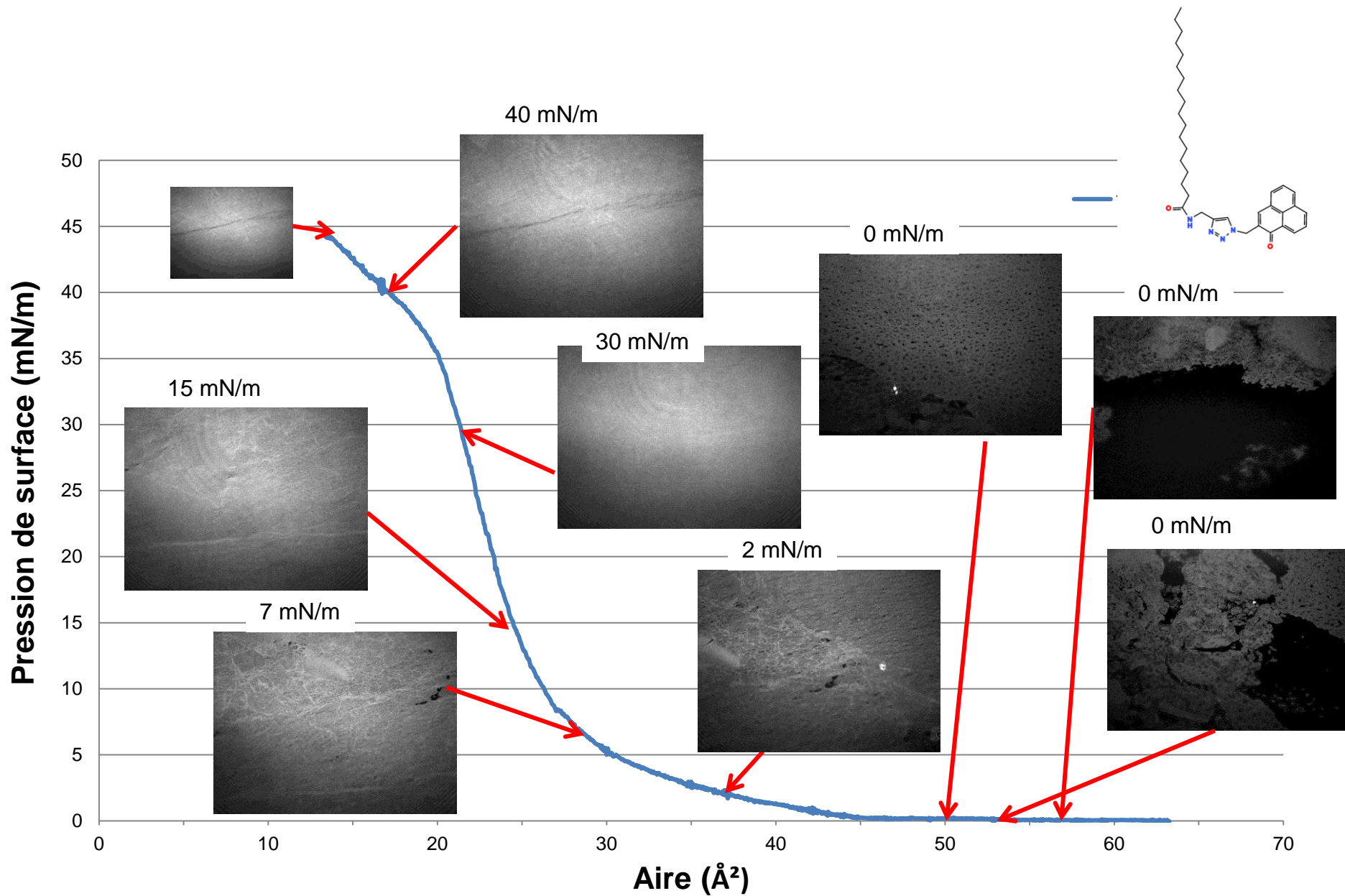
- Fondée sur la propriété de réflectivité de la lumière à l'interface

$$R = \frac{I_R}{I_0} \quad R_p^F = \left( \frac{\tan(\alpha_i - \alpha_r)}{\tan(\alpha_i + \alpha_r)} \right)^2 = 0 \quad \text{à} \quad \alpha_i = \alpha_B$$





# Analyse morphologique des monocouches



# Analyse structurale des monocouches

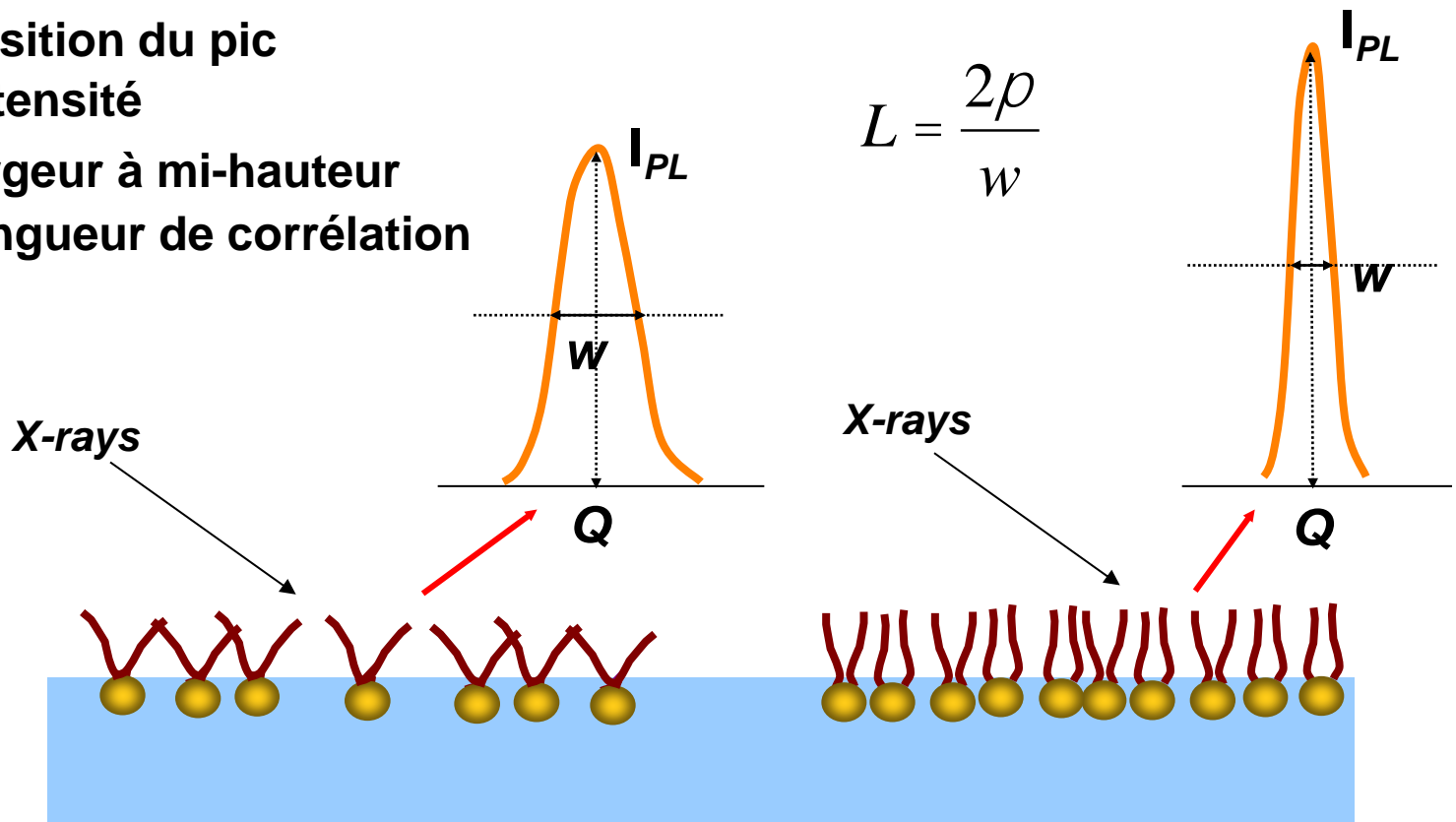
- Diffraction des rayons X à incidence rasante

Q = position du pic

$I_{PL}$  = intensité

w = largeur à mi-hauteur

L = longueur de corrélation

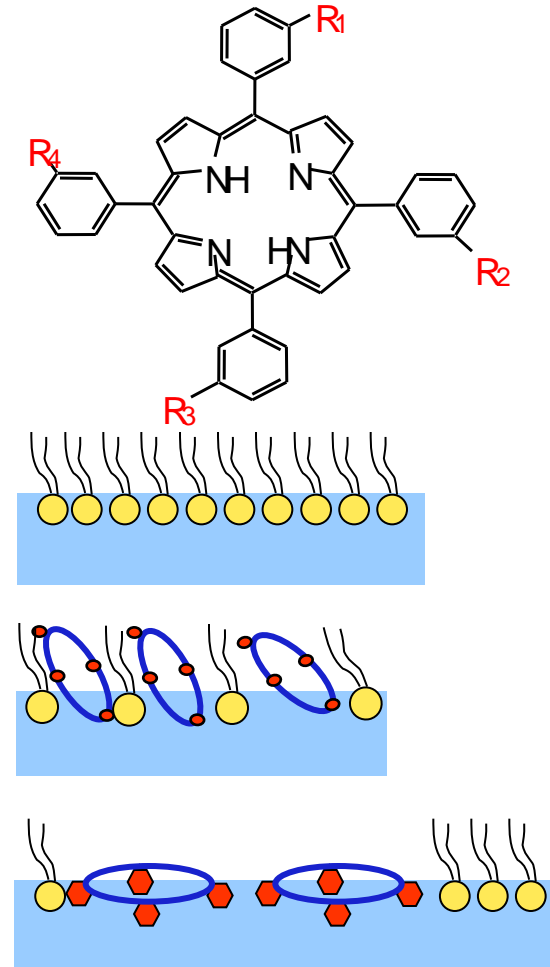


# Application à l'absorption d'un API

- Analyse structurale de la monocouche

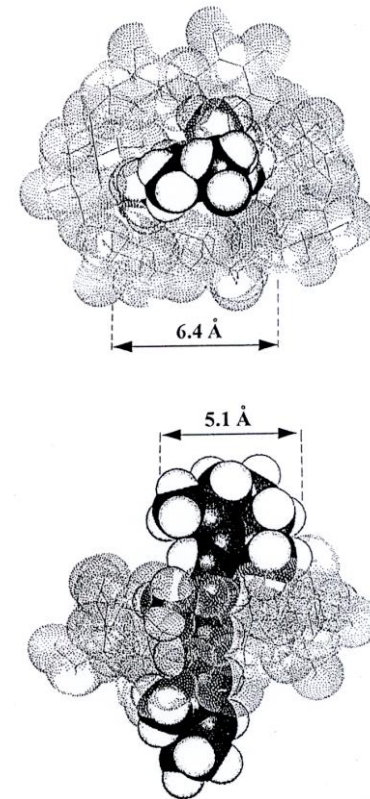
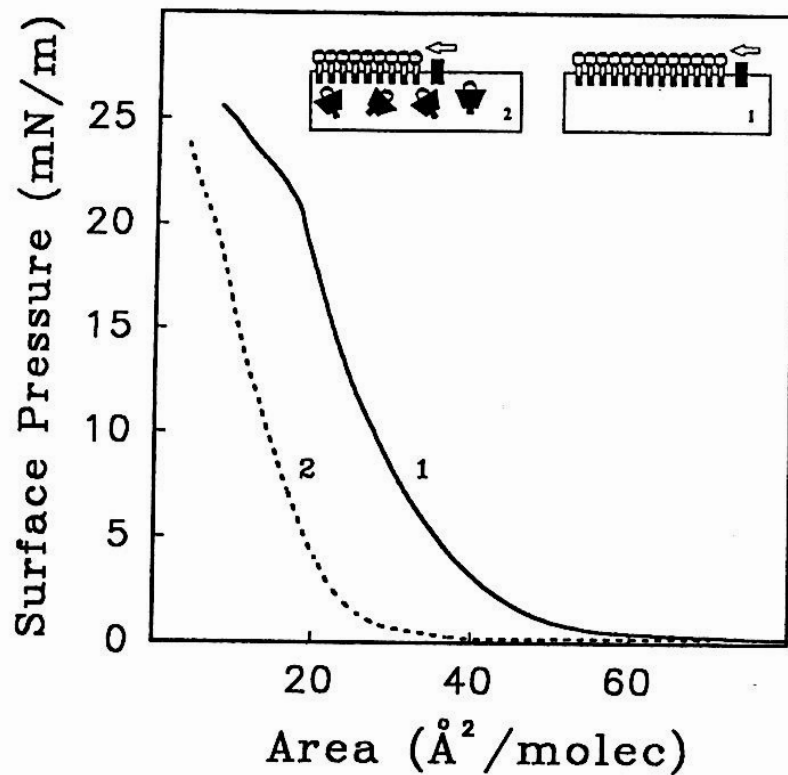
- Phospholipide-porphyrine

Monocouche ( $\pi=15$ mN/m)	Position Q (nm <sup>-1</sup> )	$\frac{I_{MIXTURE}}{I_{DSPC}}$	FWHM w (nm <sup>-1</sup> )
DSPC	14.54	1	0.09
DSPC/ <i>m</i> -THPP	Disparition du pic de diffraction	-	-
DSPC/ <i>m</i> -TPP(Glu) <sub>4</sub>	14.58	0.03	0.11





- **Complexation du rétinol par la  $\beta$ -cyclodextrine**



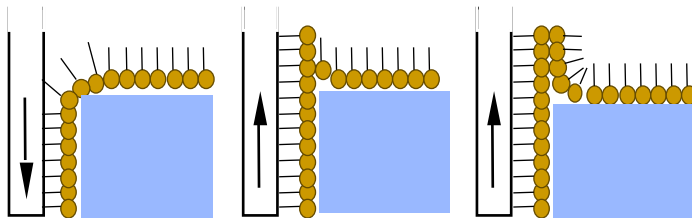
# Méthodes de transfert de monocouches sur support

- **Prélèvements Langmuir-Blodgett**

- Transferts de monocouches ou de
- sur support solide



## Prélèvement vertical



mesure des angles de contact

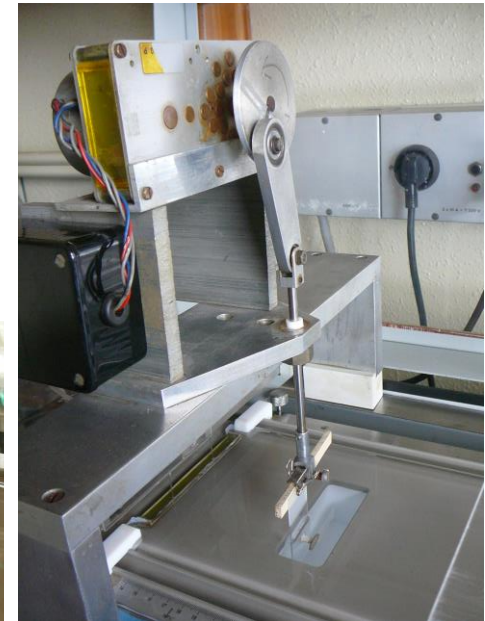
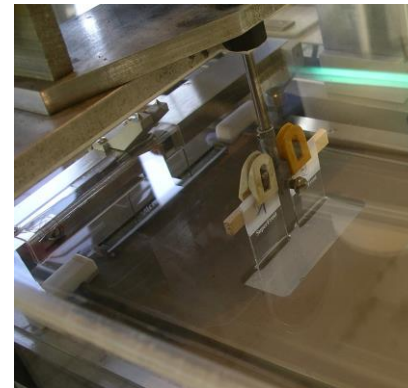
SEM-TEM

STM-AFM

Ellipsométrie

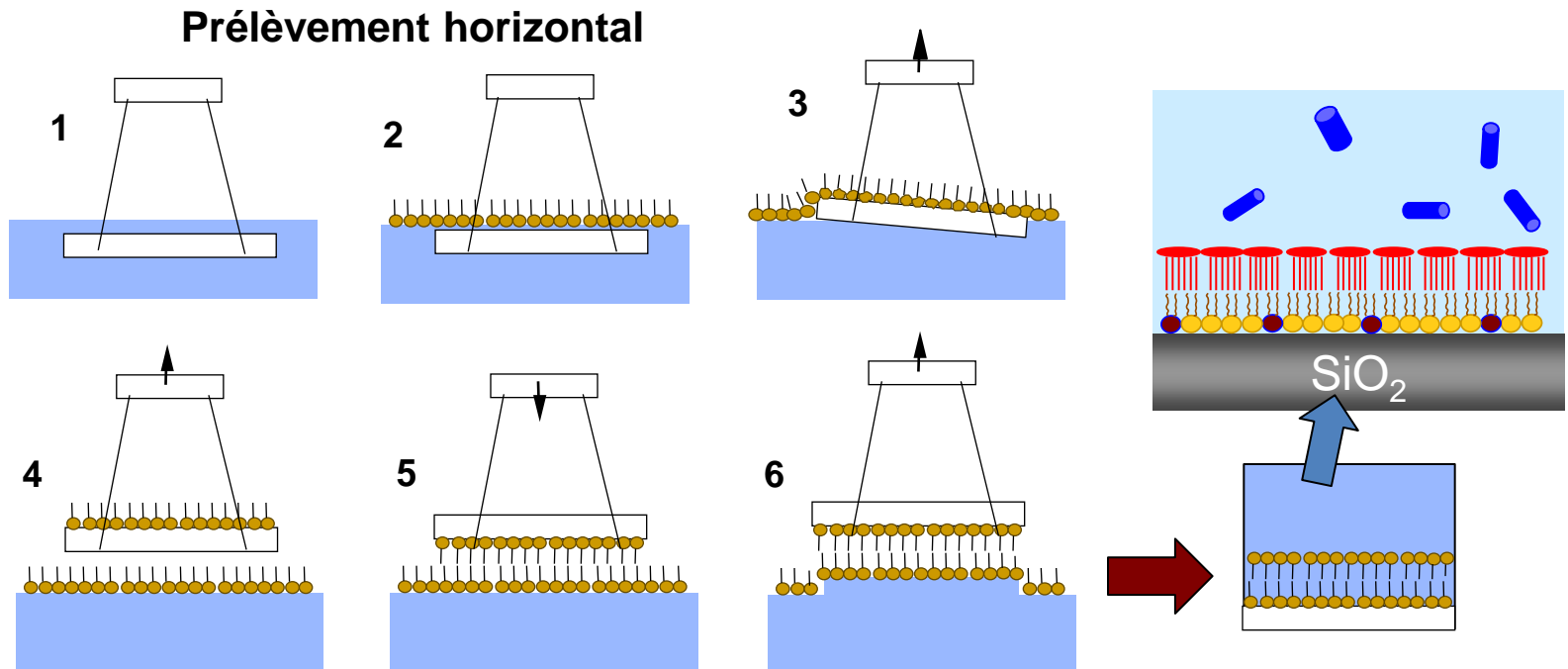
FTIR

QCM-D

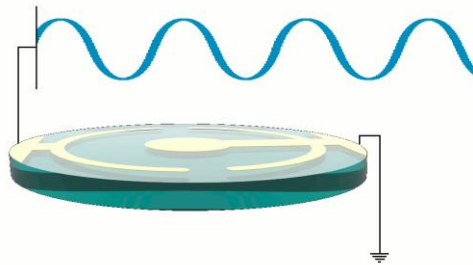
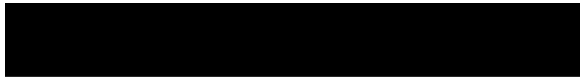
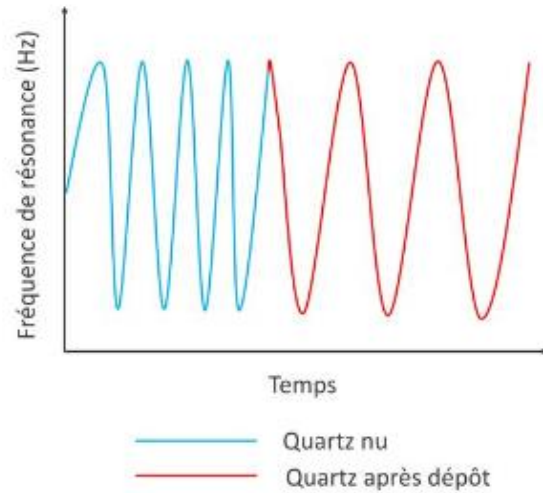
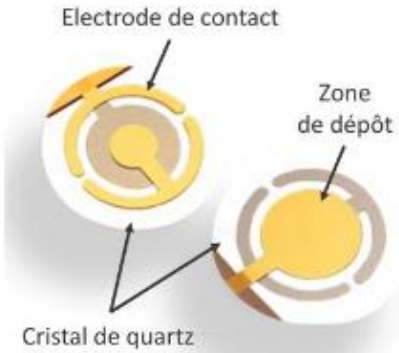


## • Prélèvements Langmuir-Schaefer

- Transferts de monocouches ou de multicouches sur support solide



# Microbalance à cristal de quartz (QCM-D)



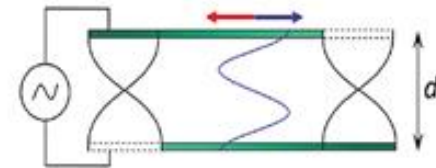
QCM OPEN



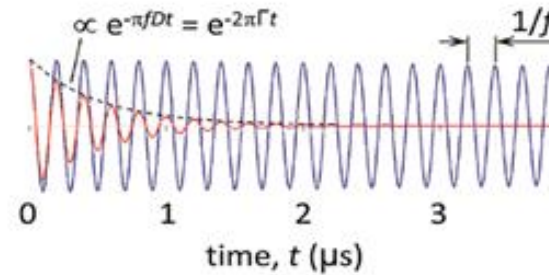
A



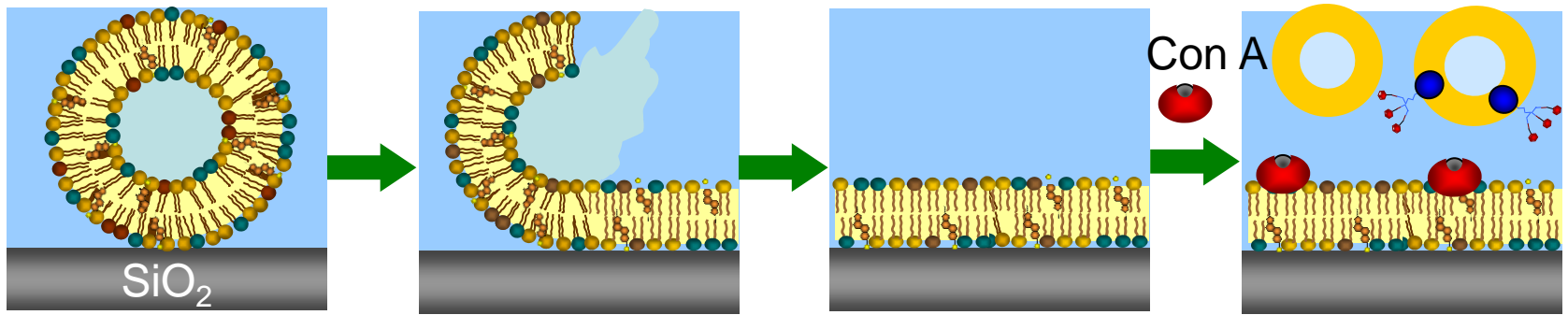
B



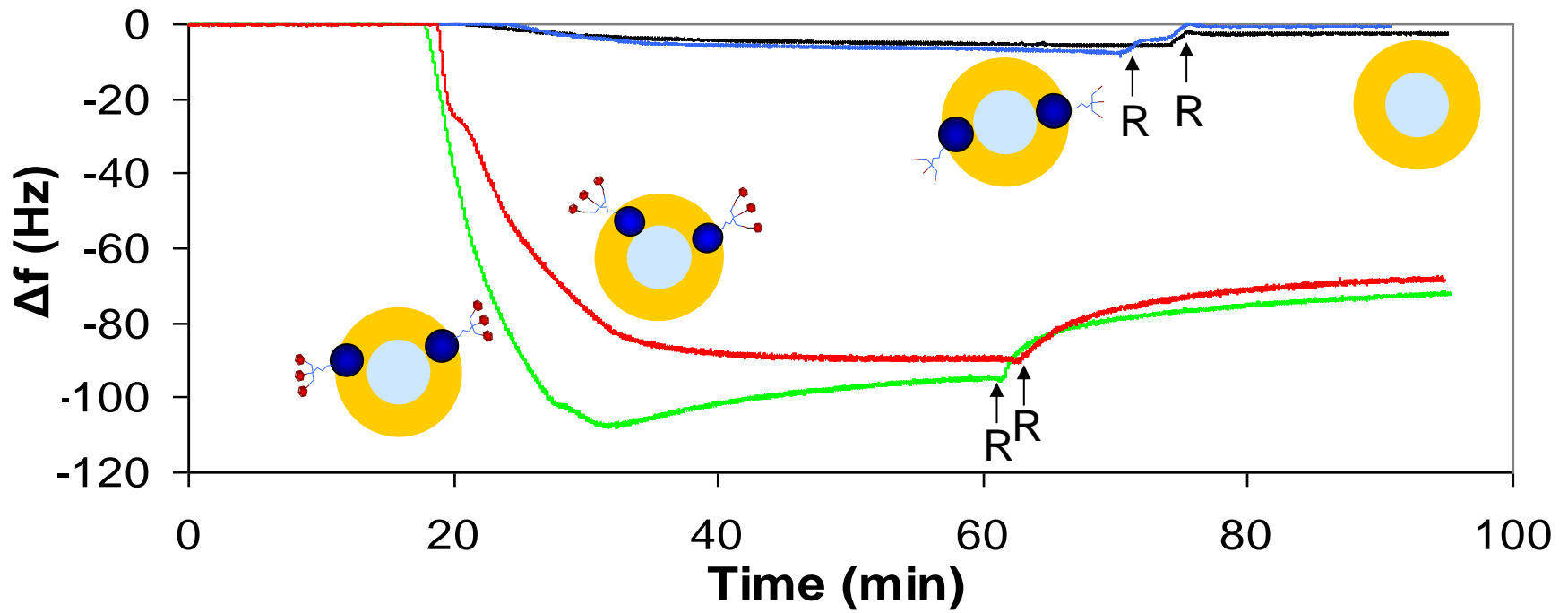
C



# Microbalance à cristal de quartz (QCM-D)



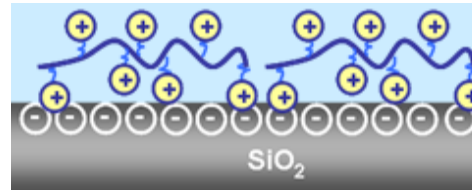
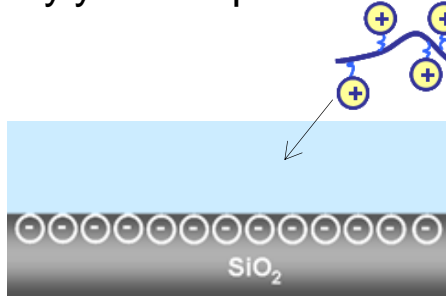
Interaction entre des liposomes portant des molécules glycoconjuguées et la concanavoline A



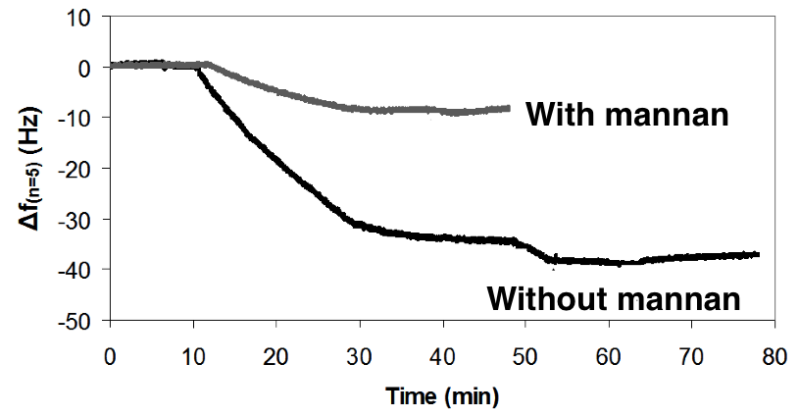
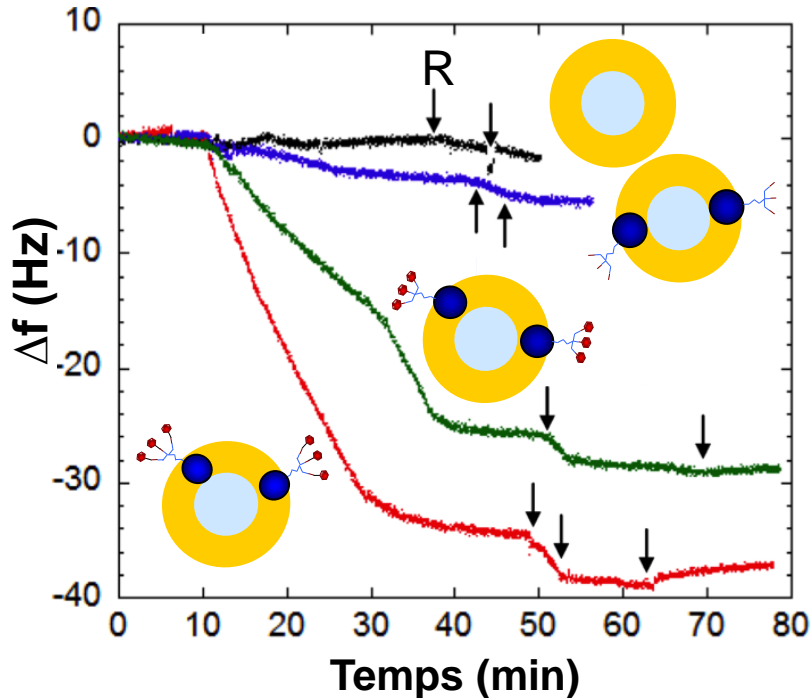
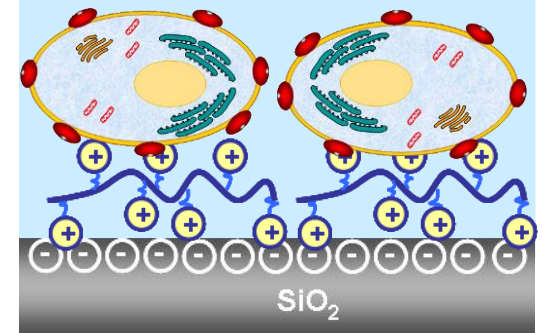
# Microbalance à cristal de quartz (QCM-D)

Interaction entre des liposomes portant des molécules glycoconjuguées et les cellules cibles

Polylysine deposition



Cells deposition



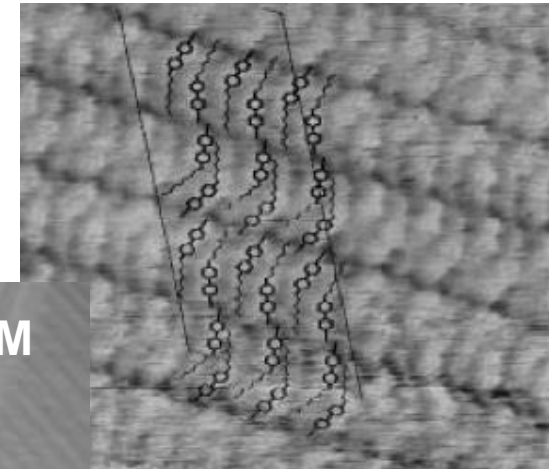
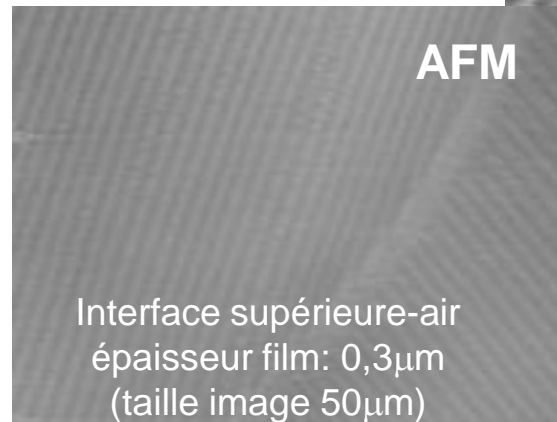
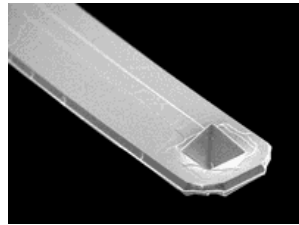


# Méthodes de caractérisation des films LB

mesure des angles de contact

SEM-TEM

STM-AFM



Monocouche smectique sur substrat MoS<sub>2</sub>  
(taille image: 14nm x 14nm)

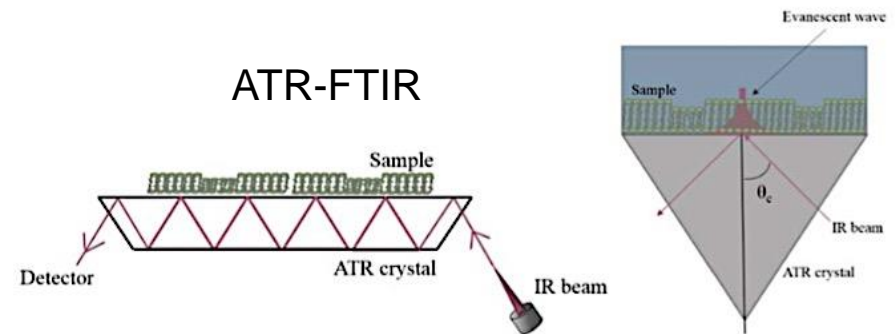
J.P. Michel, thèse 2002

Ellipsométrie

FTIR

Réflexion des neutrons/RX

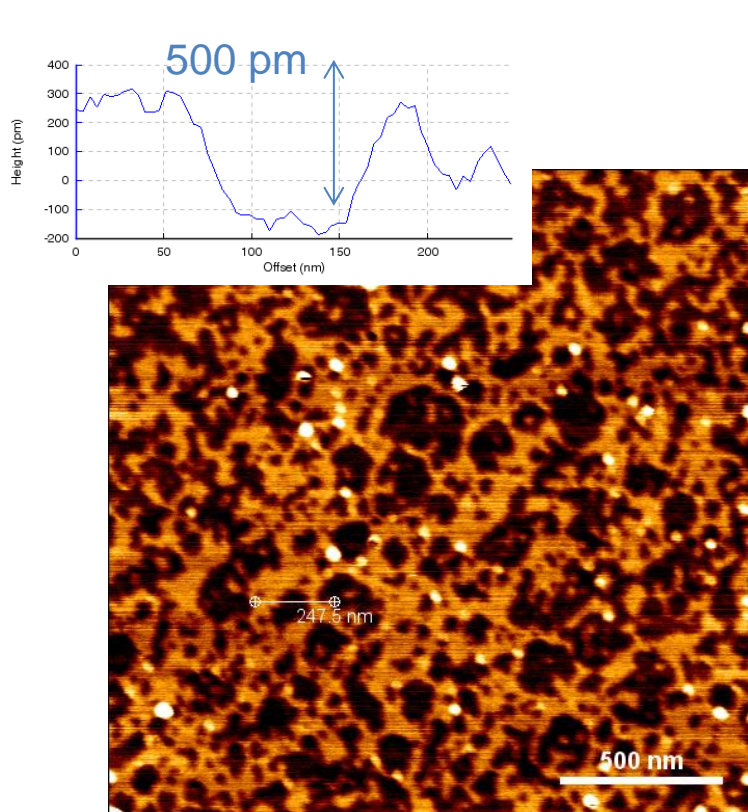
...



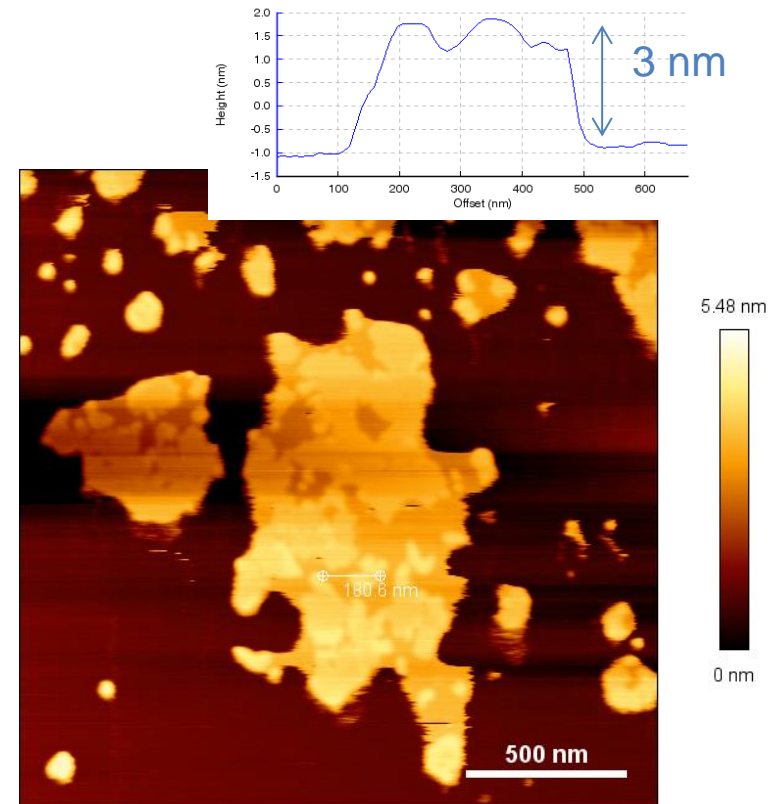
O. Freudenthal, thèse 2016

# Méthodes de caractérisation des films LB

- **Exemples de morphologies observées avec l'AFM**
  - Bicouches planes formées à partir de liposomes



POPC-Cholesterol-stéarylamine (7:2:1)



POPC-Cholesterol-stéarylamine-  
DSPE-PEG (5%) (7:2:1)