

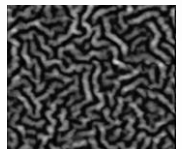
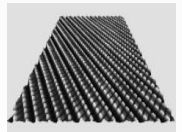


Stage pédagogique
Matériaux Polymères en Couches Minces

Procédés d'élaboration de films minces

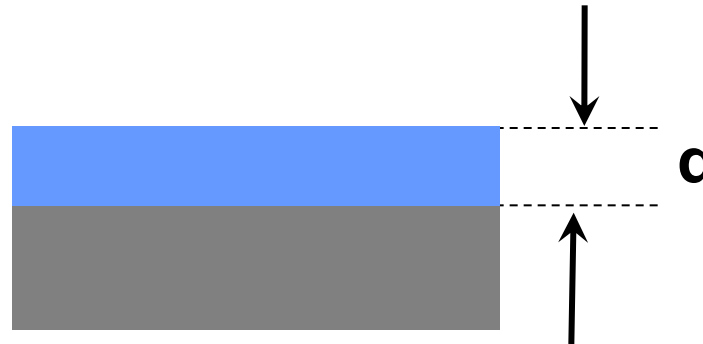
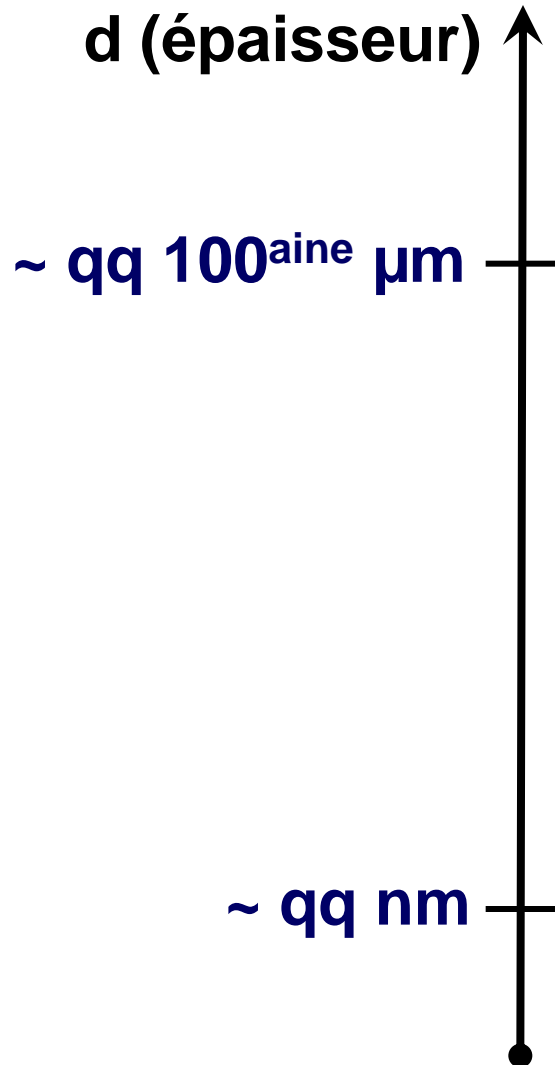
Vincent Roucoules
Maître de conférences

Université de Haute-Alsace
Institut de Science des Matériaux de Mulhouse
CNRS - LRC7228

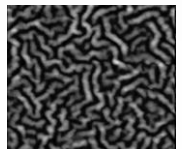
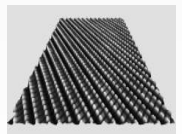




Films minces...?



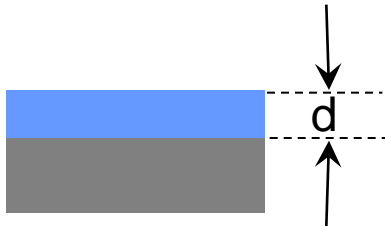
- ✓ Dépôts à partir d'une solution
- ✓ Dépôts en phase vapeur





d (épaisseur)

~ qq 100^{aine} μm



~ qq nm

✓ Dépôts à partir d'une solution

Casting

Dip-Coating et Spin-coating

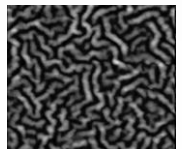
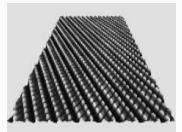
Films de Langmuir- Blodgett

Auto-assemblages

✓ Dépôts en phase vapeur

CVD

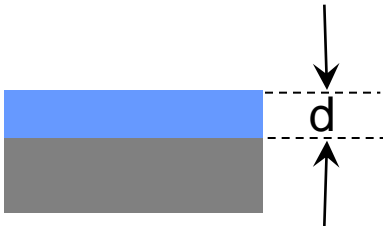
Dépôts assistés par plasma
(ou polymérisation plasma)





d (épaisseur)

~ qq 100^{aine} μm



~ qq nm

✓ Dépôts à partir d'une solution

Casting

Dip-Coating et Spin-coating

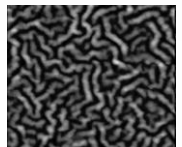
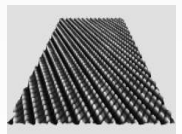
Films de Langmuir- Blodgett

Auto-assemblages

✓ Dépôts en phase vapeur

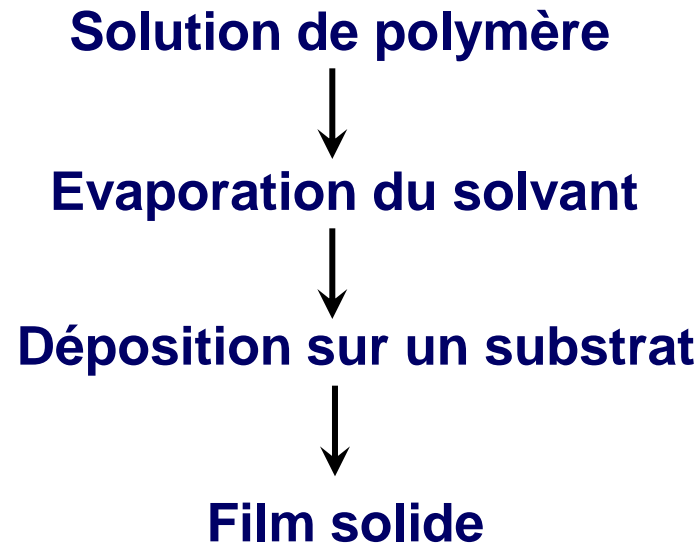
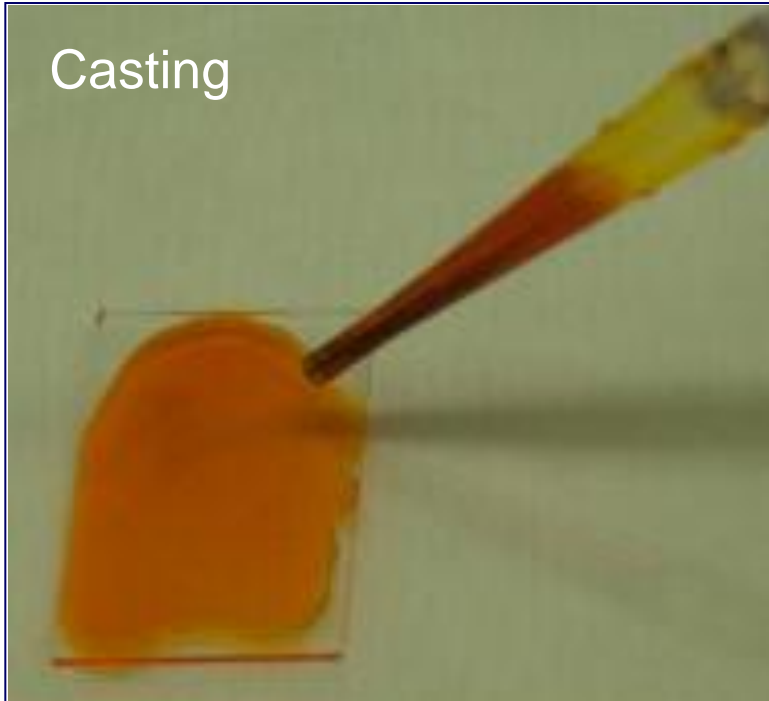
CVD

Dépôts assistés par plasma
(ou polymérisation plasma)





Casting



F.C. Krebs, Solar Energy Materials & Solar Cells 93 (2009) 394-412

- ✓ **Films de bonne qualité**
- ✓ **Aucun contrôle de l'épaisseur**
 - ❑ **Très faible reproductibilité**
 - ❑ **Films épais**

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma



Casting

Film homogène

Précipitation et
défauts de séchage

Séchage inhomogène

Cristallisation

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

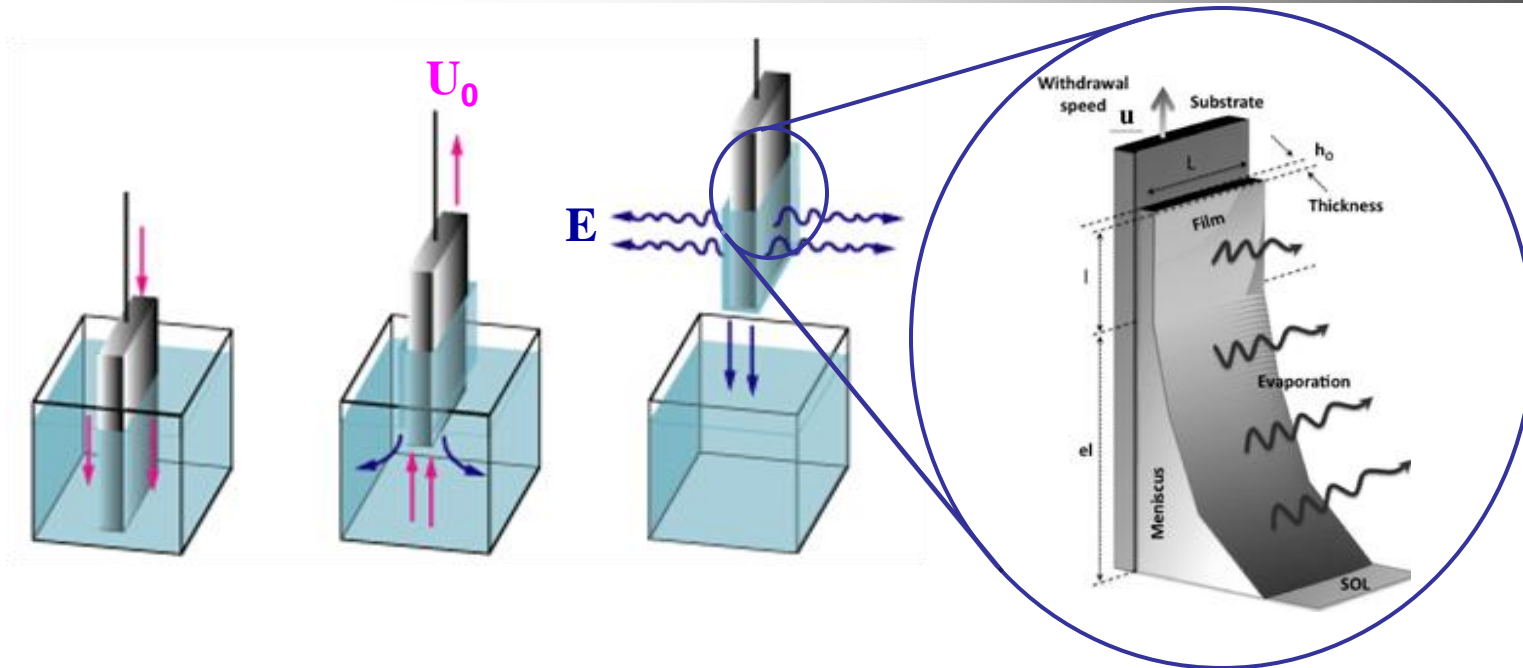
CVD

Polymérisation
Plasma

F.C. Krebs, Solar Energy Materials & Solar Cells 93 (2009) 394-412



Dip-coating



- ✓ **Bonne reproductibilité et films homogènes**
- ✓ **Très bon contrôle de l'épaisseur qui dépend :**
 - ☐ **Forces visqueuses**
 - ☐ **Tension de surface**
 - ☐ **Vitesse de retrait**
 - ☐ **Vitesse d'évaporation du solvant**

Phase liquide

Casting

**Dip-coating
et Spin-coating**

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

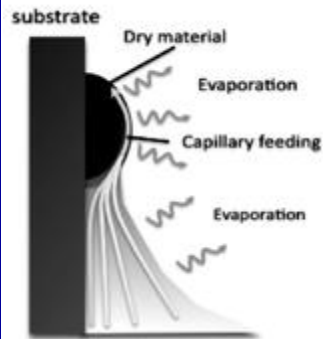
Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma

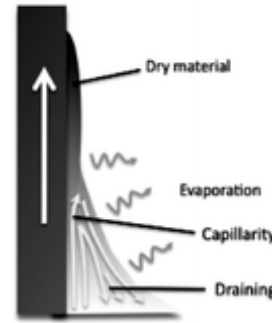


Dip-coating /Sol-Gel



$$F = \frac{C_i M_i}{\alpha_i \rho_i} E = k_i E$$

Capillarity
regime



Landau-Levich

$$h_s = \frac{0.94 \eta^{2/3}}{\gamma_s^{1/6} (\rho_s g)^{1/2}} u^{2/3}$$

Draining
regime

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

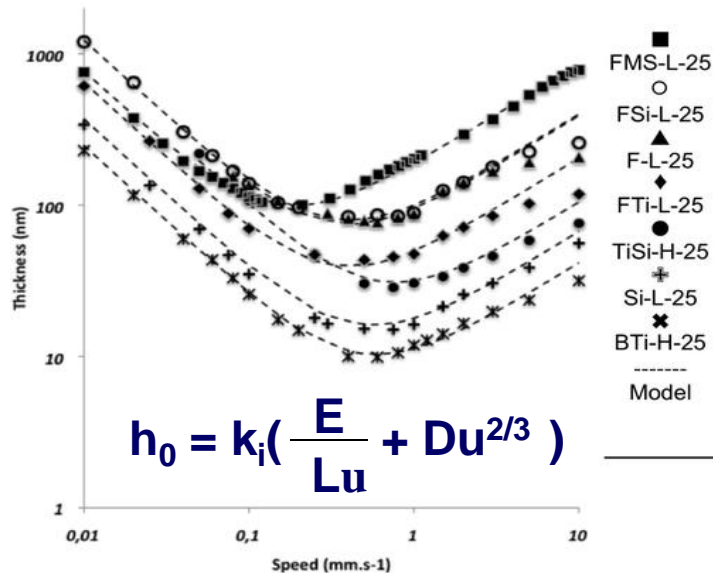
Auto-
assemblages

Phase vapeur

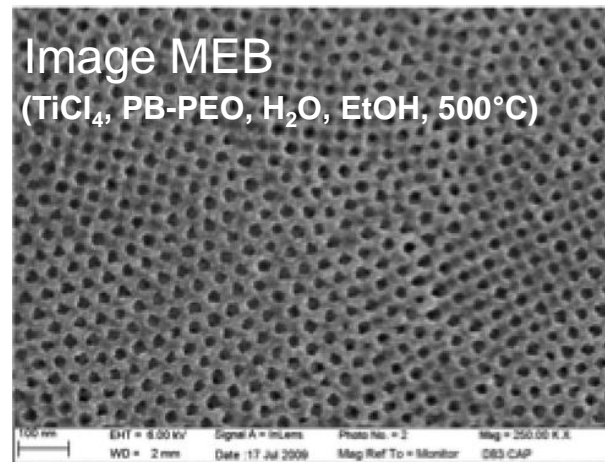
CVD

Polymérisation
Plasma

Thickness vs speed for different system at 25°C



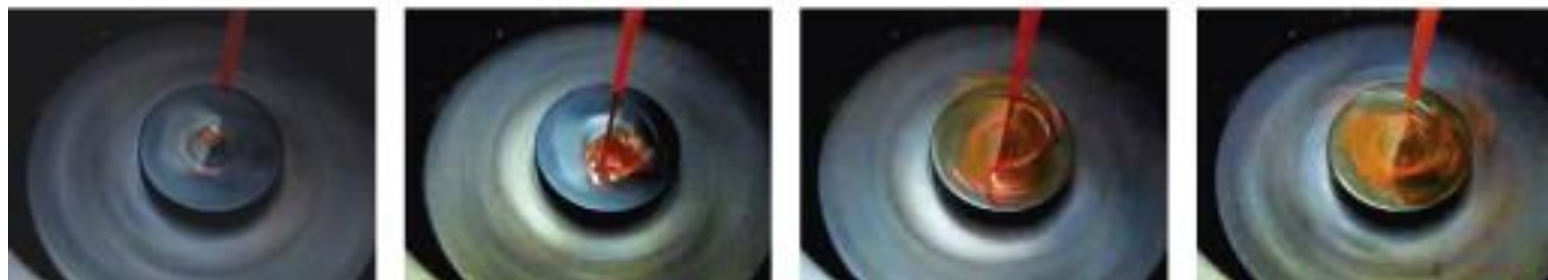
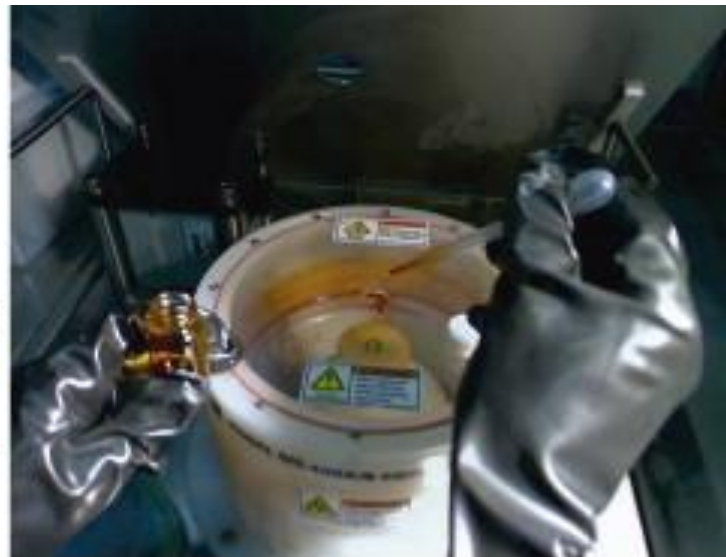
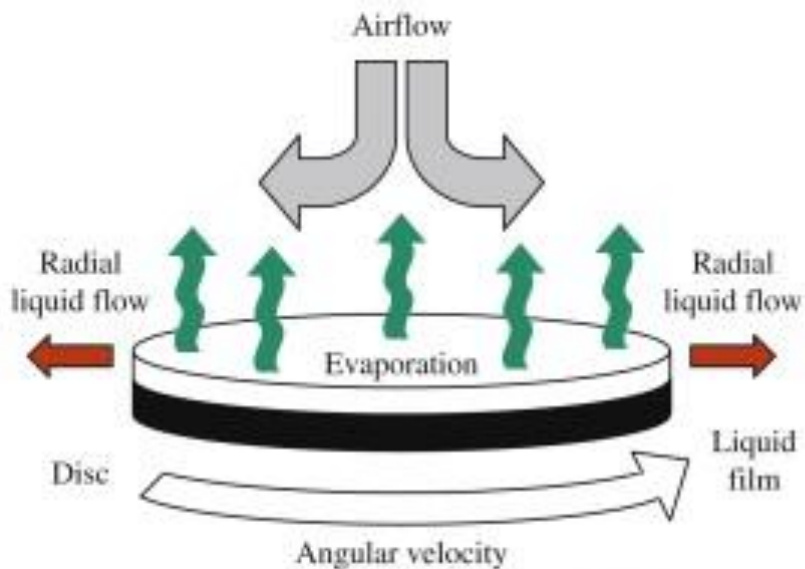
$$h_0 = k_i \left(\frac{E}{Lu} + Du^{2/3} \right)$$



Marco Faustini et al, *J. Phys. Chem. C*
114 (2010) 7637-7645



Spincoating



F.C. Krebs, Solar Energy Materials & Solar Cells 93 (2009) 394-412

K.Norrman, A. Ghanbari-Siahkali, N.B. Larsen, Ann. Rep. Prog. Chem. Sect. C 101 (2005) 174-201

Phase liquide

Casting

**Dip-coating
et Spin-coating**

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma



Spincoating

- ✓ Très bonne reproductibilité
- ✓ Très bonne homogénéité
- ✓ Films continus et homogènes sur de grandes surfaces
- ✓ Très bon contrôle de l'épaisseur qui dépend :

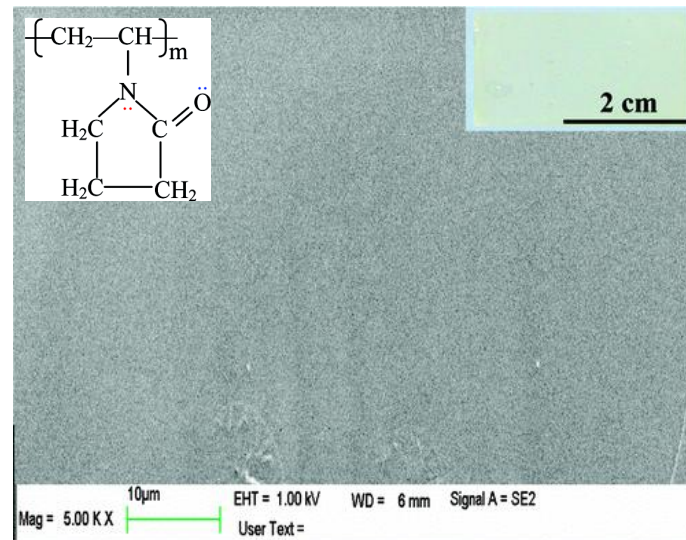
- ☐ Vitesse de rotation
- ☐ Température
- ☐ Concentration
- ☐ Poids moléculaire

- ☐ Viscosité
- ☐ Volatilité

- ✓ Relation empirique

$$d = k\omega^\alpha$$

K et α dépendent des propriétés du solvant, du soluté et du substrat.



*A. Mishra et al, J. Phys. Chem. A 113
(2009) 14067-14073*

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

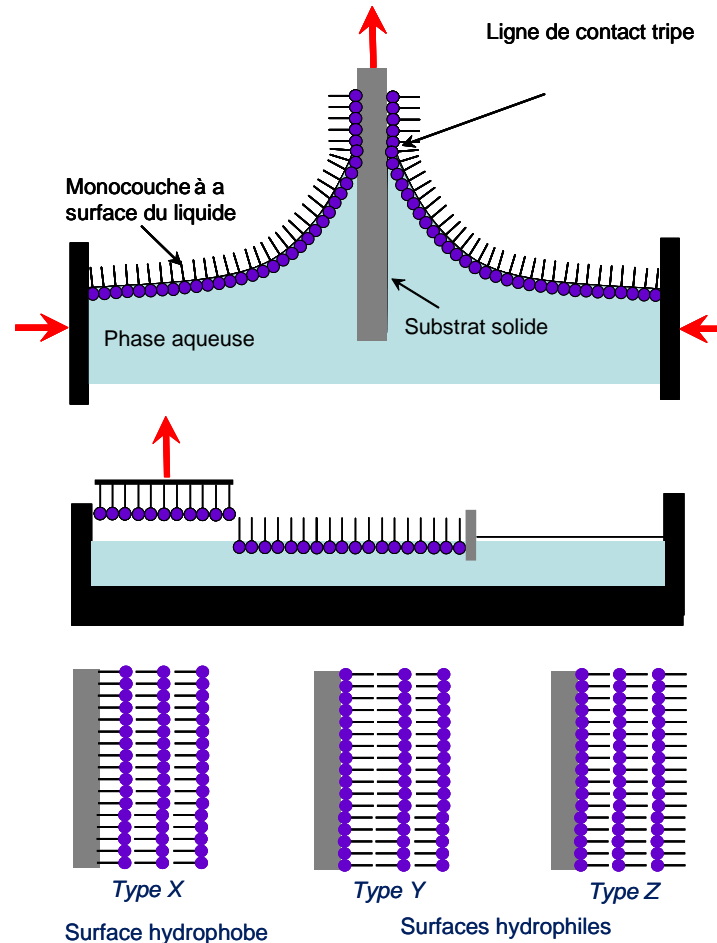
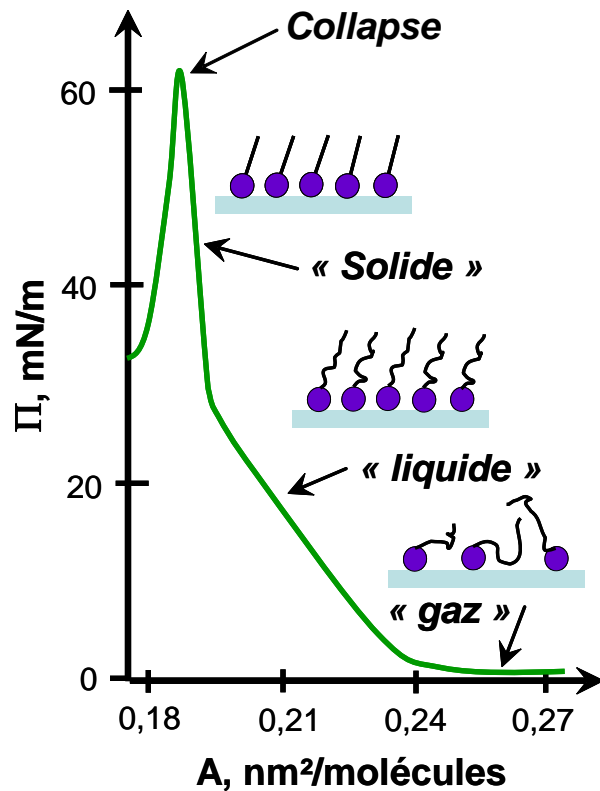
CVD

Polymérisation
Plasma



Langmuir - Blodgett

- Molécule amphiphile ou macromolécules comportant des segments amphiphiles



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

**Langmuir-
Blodgett**

Auto-
assemblages

Phase vapeur

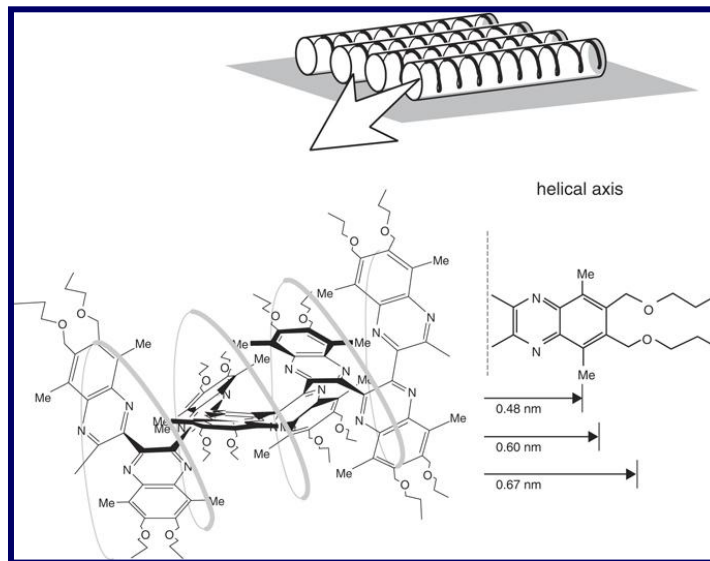
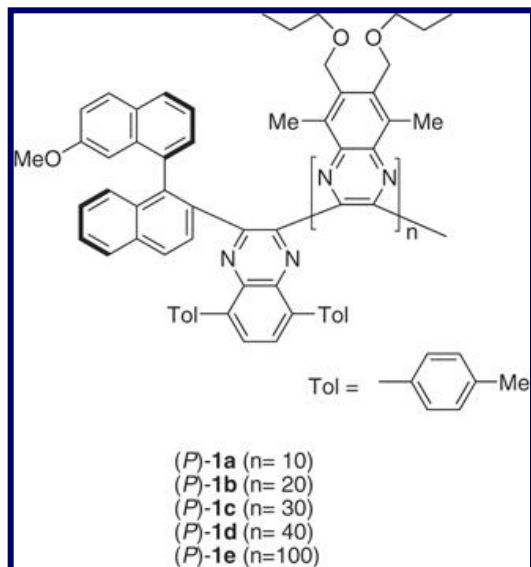
CVD

Polymérisation
Plasma



Langmuir - Blodgett

- ✓ Excellente reproductibilité
- ✓ Très bon contrôle de l'épaisseur
 - ❑ Plusieurs centaines de couches
 - ❑ Une monocouche ~ 1-5 nm
 - ❑ Faible rugosité ~ 0,3 à 3 nm
- ✓ Un exemple : la quinoxaline



Y. Ito et al, *Polymer Journal* 42 (2010) 406-410

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma



Langmuir - Blodgett

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

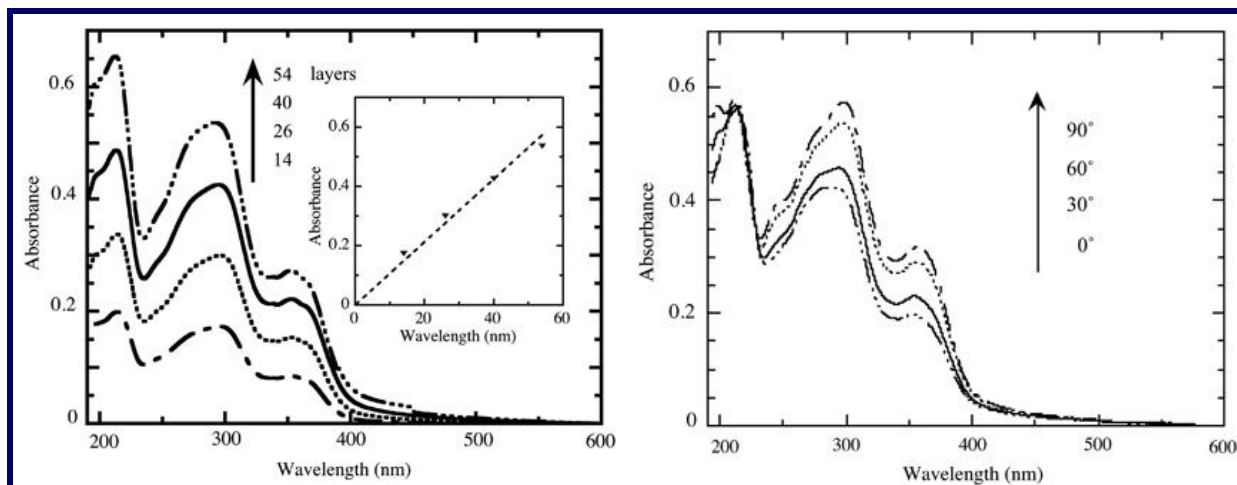
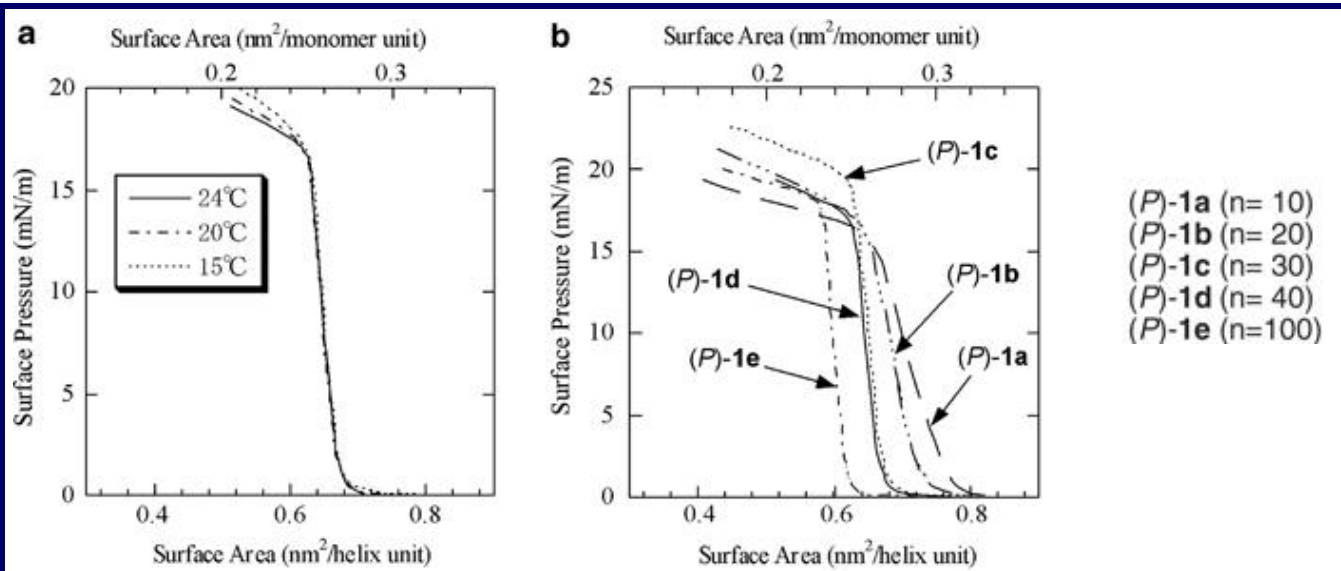
**Langmuir-
Blodgett**

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma

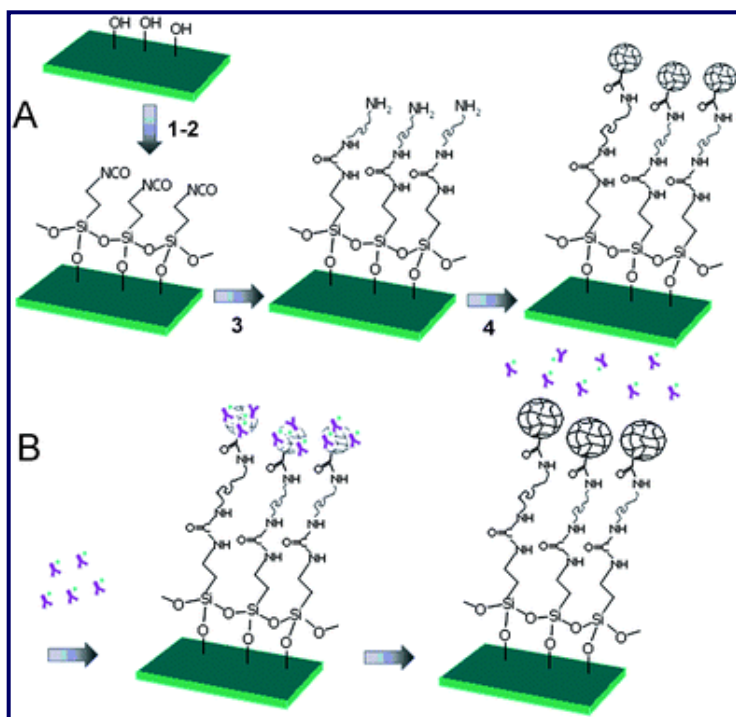


Y. Ito et al, *Polymer Journal* 42 (2010) 406-410

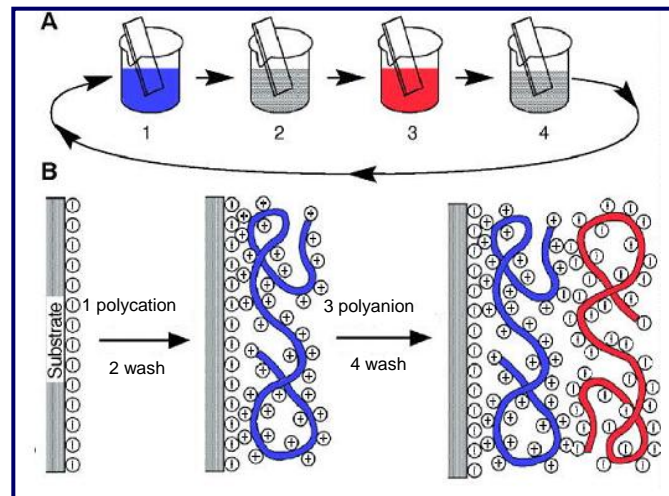


Auto-assemblage

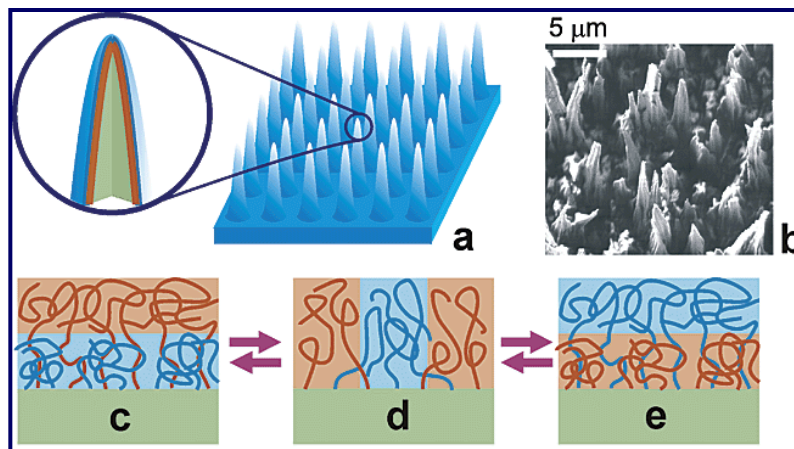
- ✓ Excellente reproductibilité
- ✓ Nécessite un contrôle strict de l'adsorption et des réactions de surface.



S. Argentièrre et al, *Soft Matter* (2009) 5, 4101.



G. Decher *Science* 277 (1997)1232



S. Minko et al, *J. Am. Chem. Soc.* (2003) 125, 3896.

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

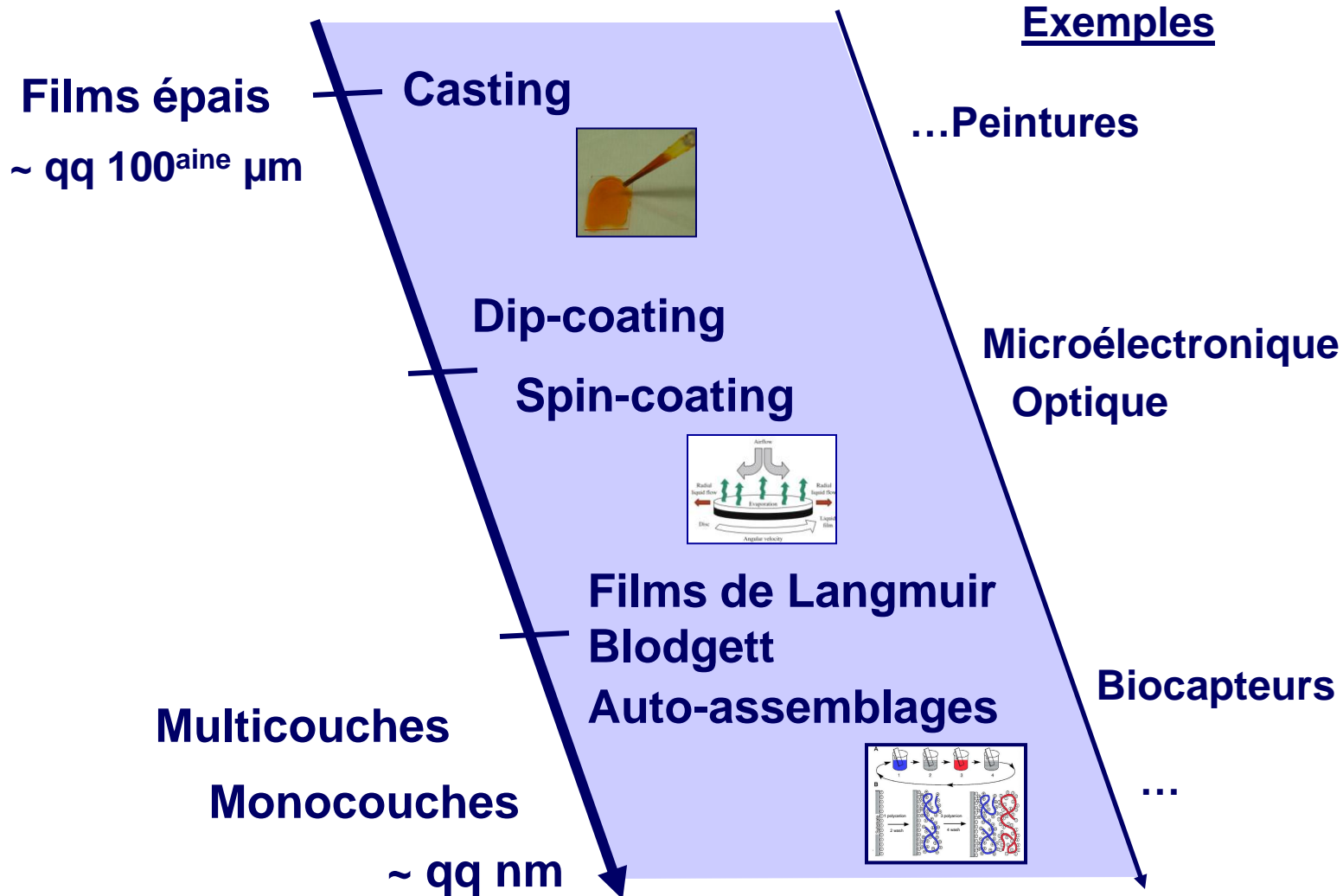
Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma



Ce qu'il faut retenir...



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

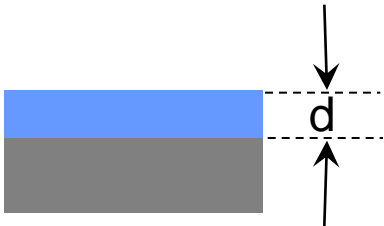
CVD

Polymérisation
Plasma



d (épaisseur) ↑

~ qq 100^{aine} μm



~ qq nm

✓ Dépôts à partir d'une solution

Casting

Dip-Coating et Spin-coating

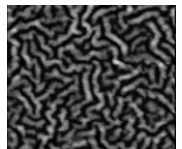
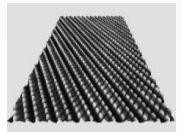
Films de Langmuir- Blodgett

Auto-assemblages

✓ Dépôts en phase vapeur

CVD

Dépôts assistés par plasma
(ou polymérisation plasma)





CVD

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

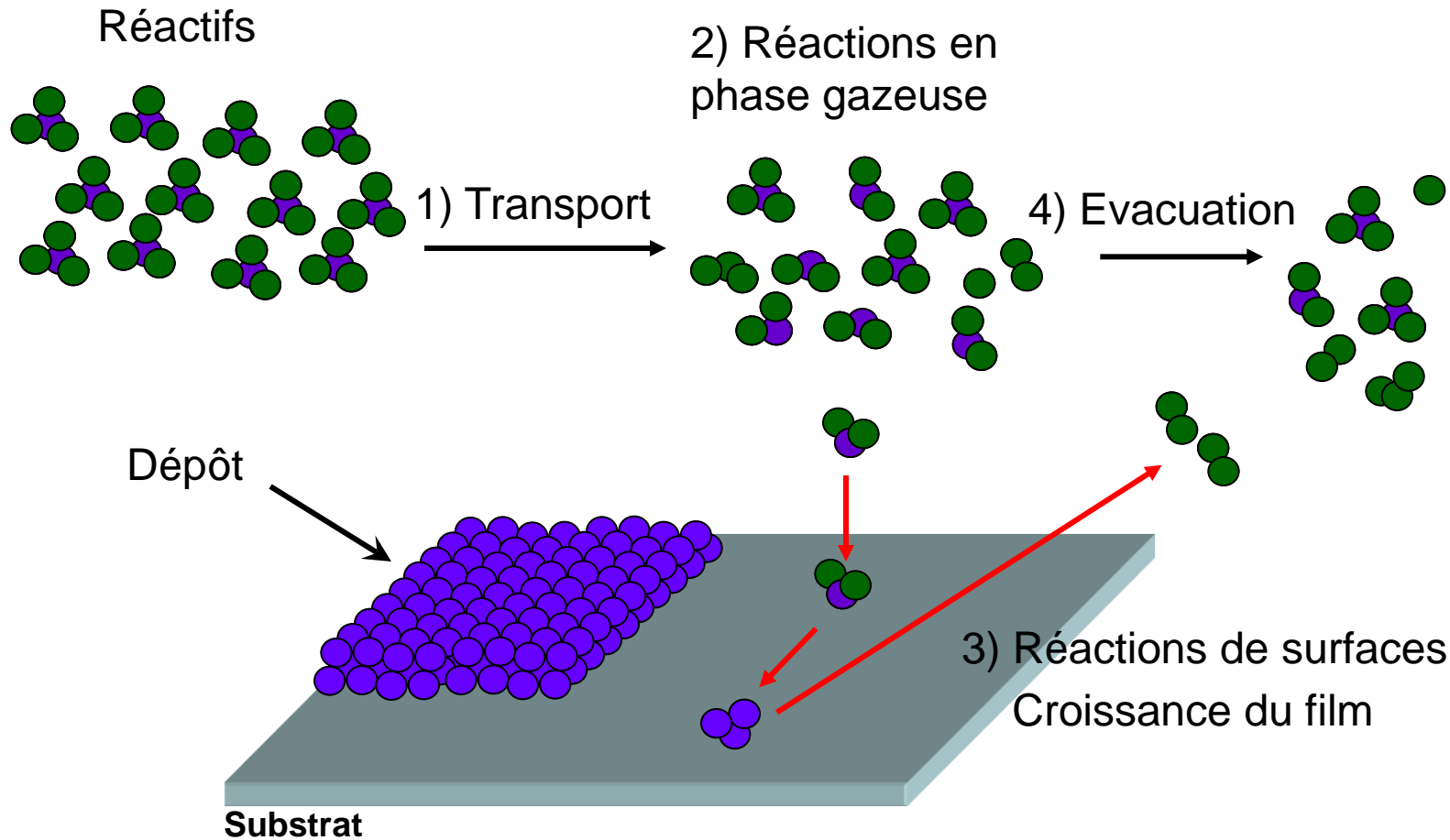
Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma





CVD

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

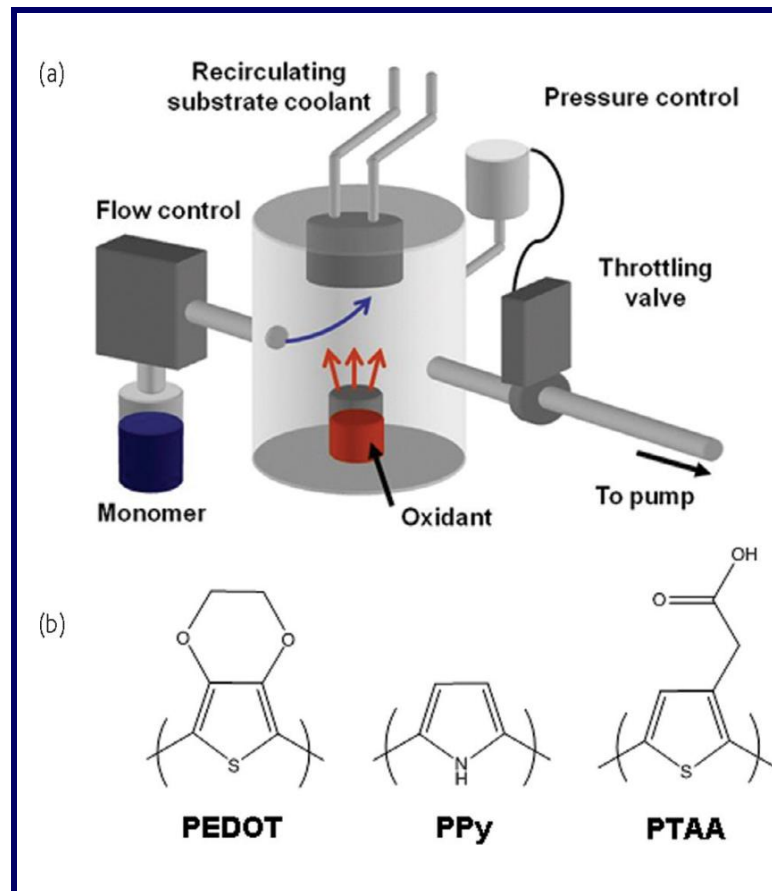
Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

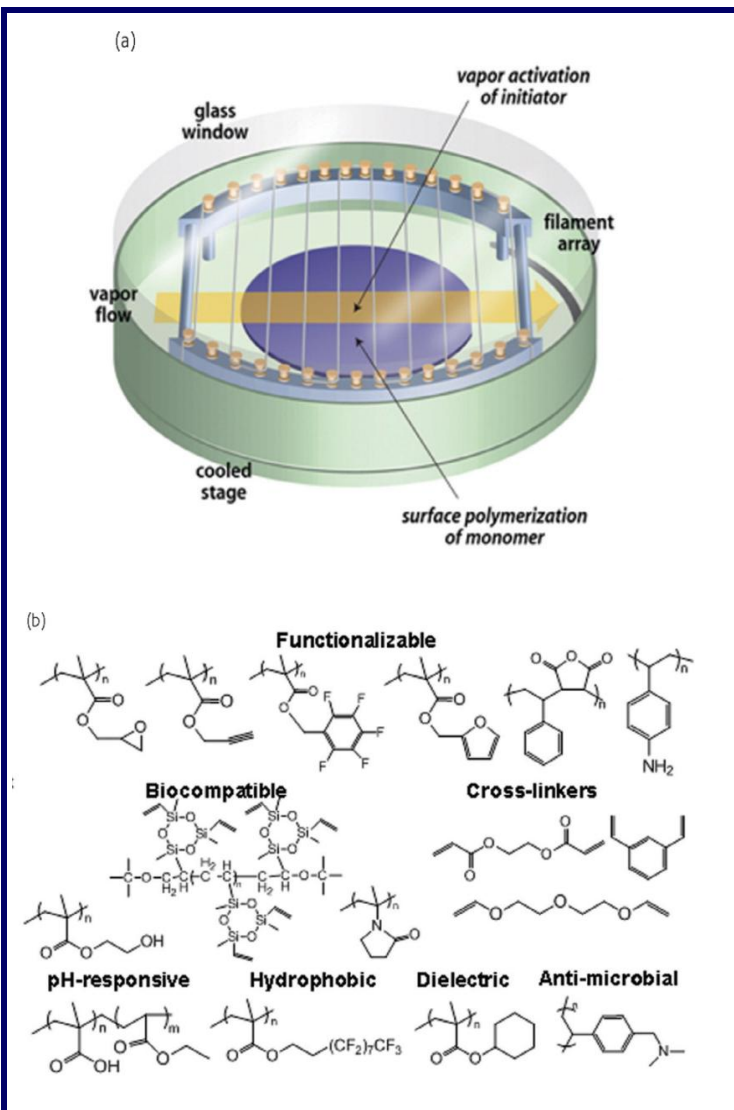
Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma



Ayse Asatekin et al, *Materialstoday* 13 (2010) 26-33





CVD

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

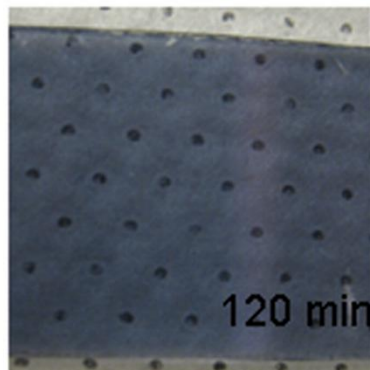
Auto-
assemblages

Phase vapeur

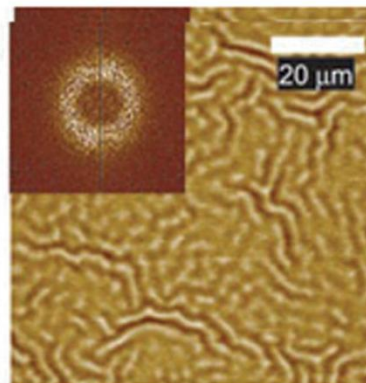
CVD

Polymérisation
Plasma

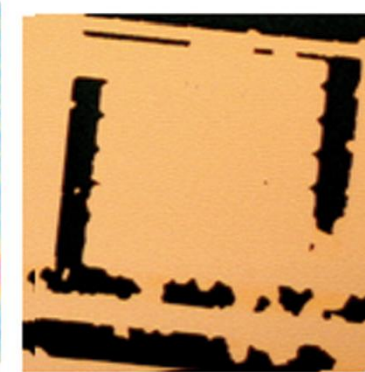
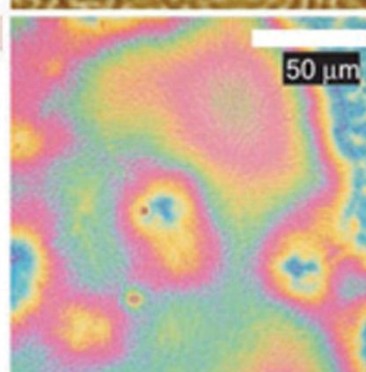
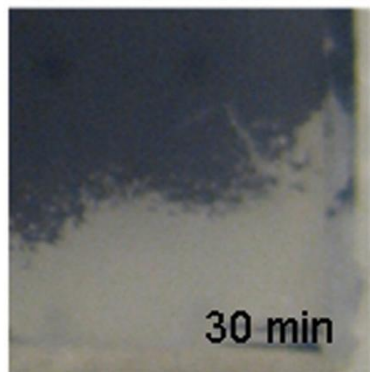
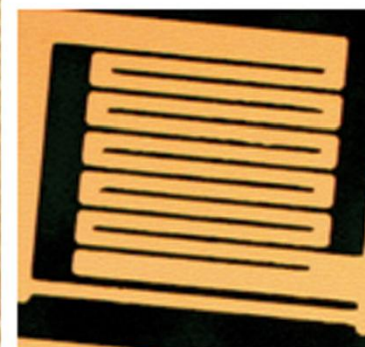
(a) ultrasonication



(b) swelling test



(c) pattern durability



Ayşe Asatekin et al, *Materialstoday* 13 (2010) 26-33

✓ Importance de l'« ancrage » du dépôt sur la surface



Synthèses de films "polymères" assistées par plasma :

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

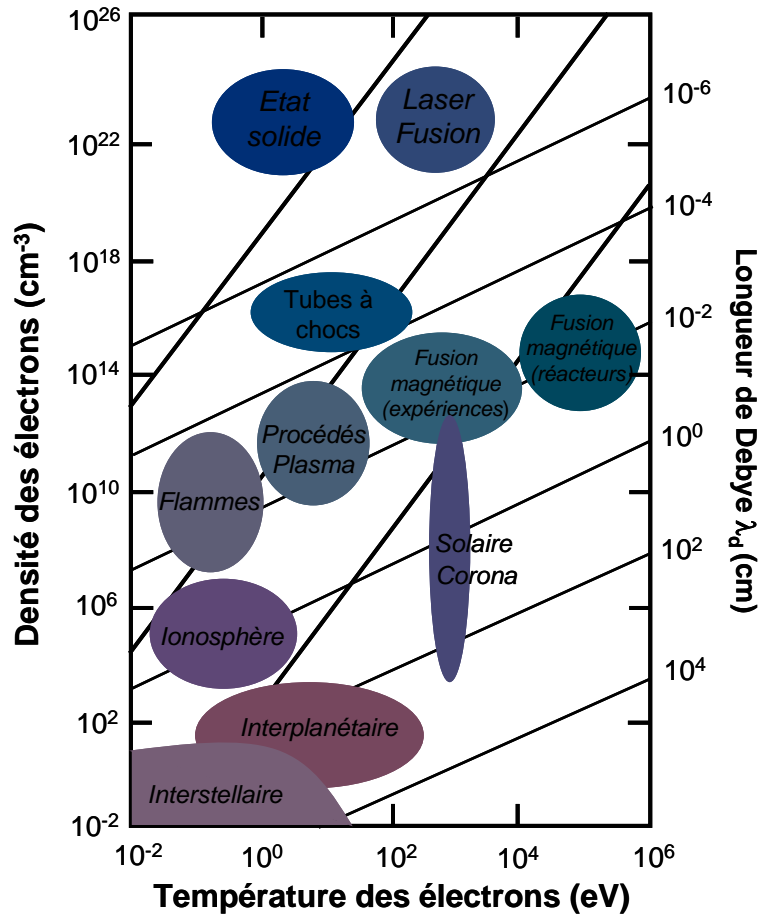
Phase vapeur

CVD

**Polymérisation
Plasma**



Dépôts assistés par plasma



✓ Milieu composé d'un mélange :

- d'électrons
- d'ions positifs et négatifs
- d'espèces neutres
 - atomes
 - molécules
 - radicaux

✓ Les Procédés Plasma :

- Plasma froid, hors équilibre thermodynamique
- Gaz partiellement ionisé (10⁻⁴% – 10%) : électrons, ions et neutres.

$$T_e > T_i = T_n$$

Phase liquide

Casting
Dip-coating
et Spin-coating
Langmuir-Blodgett
Auto-assemblages

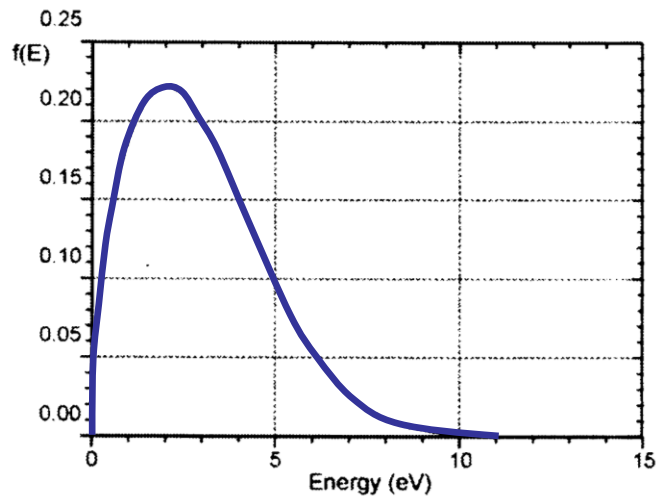
Phase vapeur

CVD
Polymérisation Plasma



Dépôts assistés par plasma

Approximation de Druyvestyn



Handbook of chemistry and physics

Bond energies and enthalpies of formation of free radicals

Bond energies

Species	Energy (eV)
---------	-------------

Diatomic molecules

C-H	3.3
C-N	7.8
C-Cl	4.0
C-F	5.7
C=O	11.2
C-C	6.3

Polyatomic molecules

C=C	7.6
C \equiv C	10.0
CH ₃ -H	4.5
C ₂ H ₅ -H	4.3
CH ₂ CH-H	4.8
CHC-H	5.7

Enthalpies of formation of free radicals

Species	Energy (kJ/mol)	Energy (eV)
---------	-----------------	-------------

·CH·	596.3	6.1
CH ₂ ·	430.1	4.4
CH ₃ ·	146.0	1.5
HC=C·	566.1	5.8
HC=CH ₂ ·	300.0	3.1
NH·	350.0	3.6

NH ₂ ·	185.4	1.9
·Si·	456.6	4.7
·SiCl·	195.0	2.0
SiCl ₂ ·	-163.0	-1.7
SiCl ₃ ·	-318.0	-3.3
C ₆ H ₅ ·	328.9	3.4
C ₆ F ₅ ·	-547.7	-5.0

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma



Dépôts assistés par plasma

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

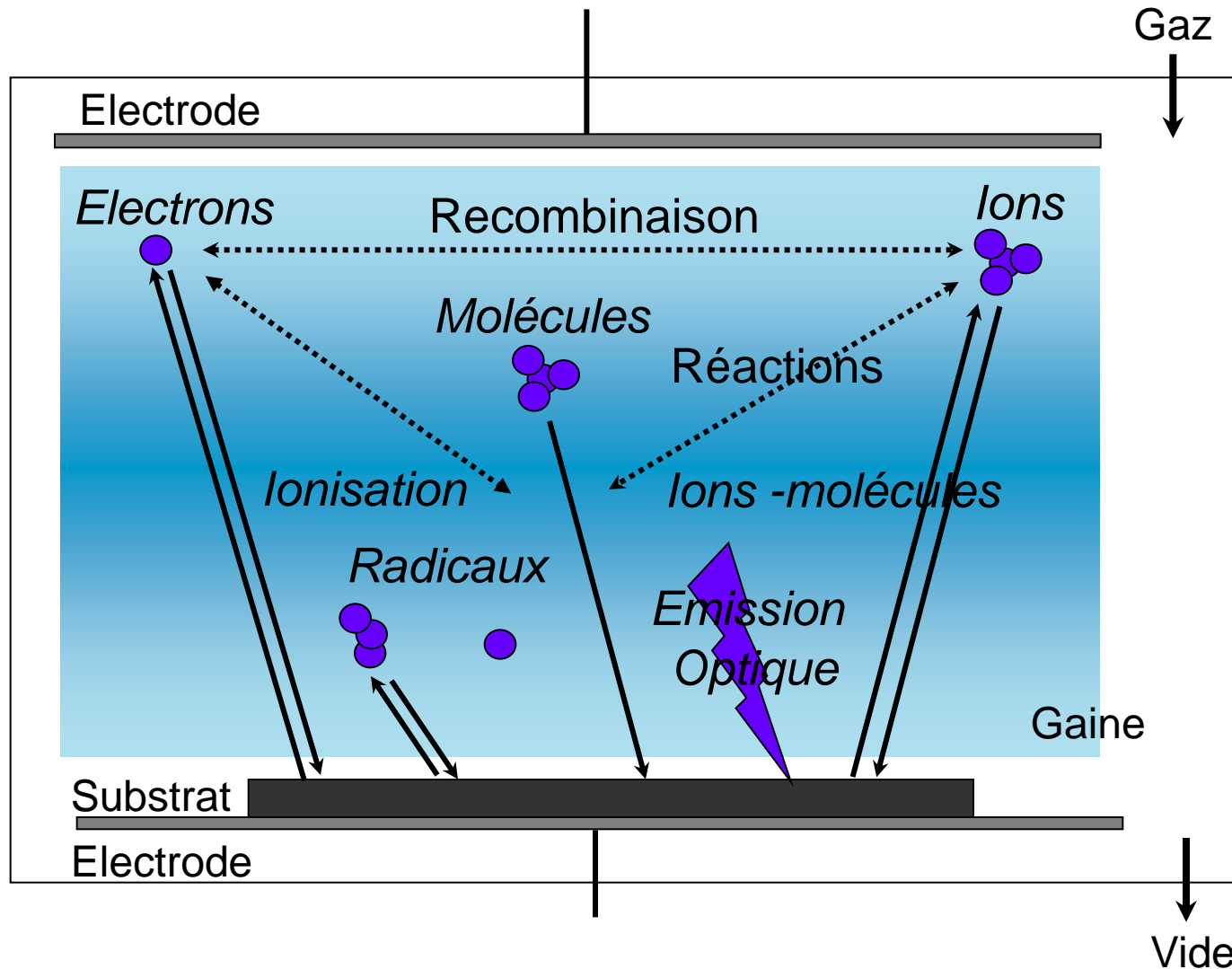
Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

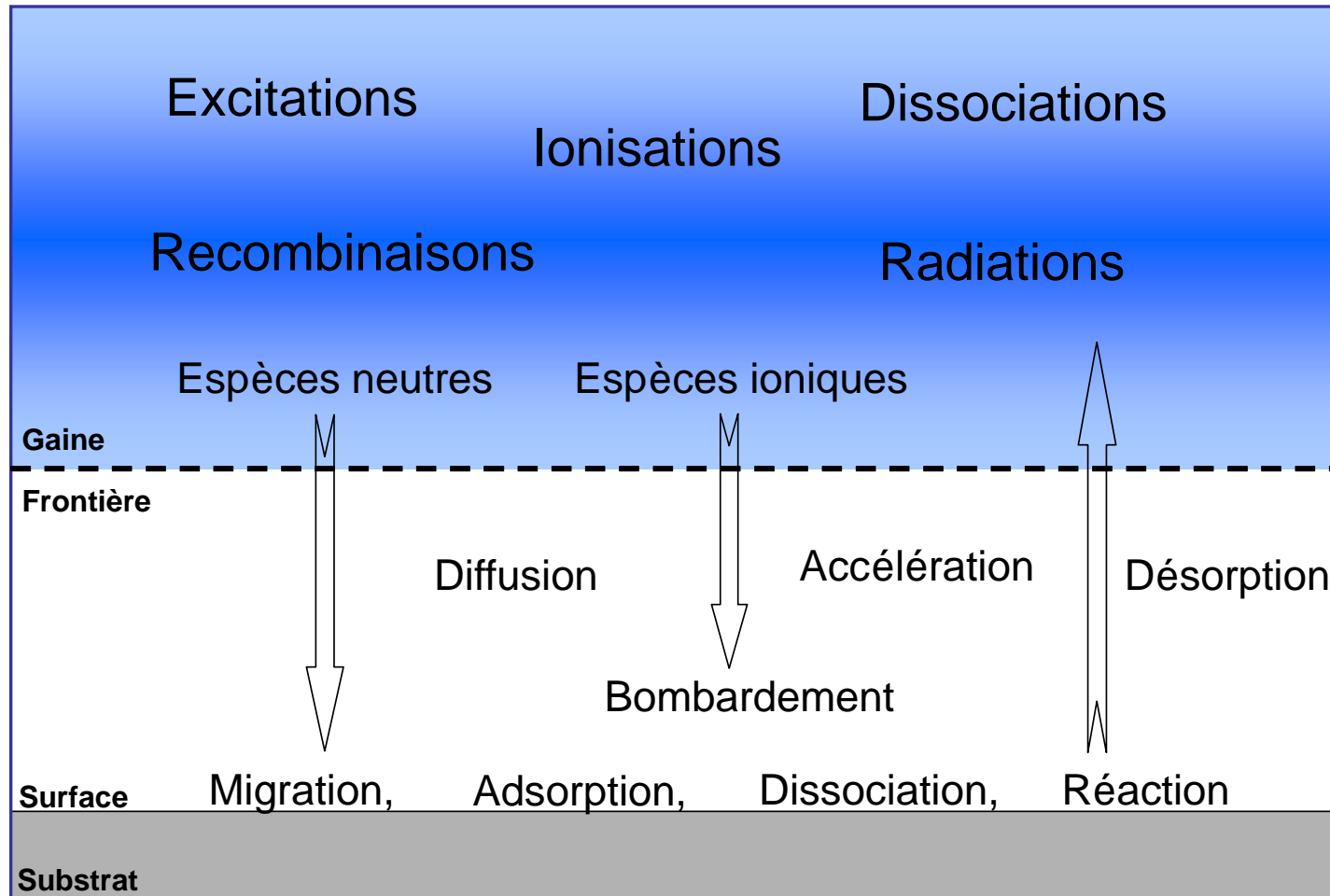
CVD

**Polymérisation
Plasma**





Dépôts assistés par plasma



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

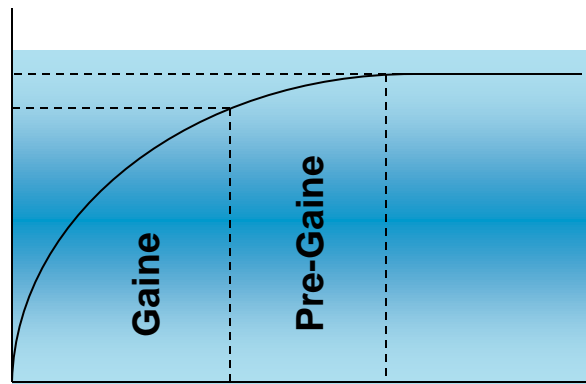
Polymérisation
Plasma



Dépôts assistés par plasma

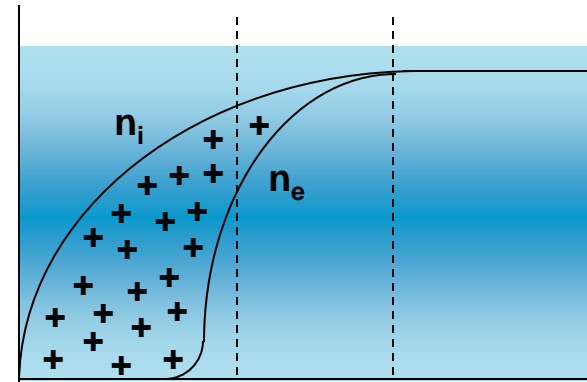
Séparation des charges au niveau de la surface

Potentiel



Distance à la surface

Potentiel



Distance à la surface

La longueur de Debye

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 K T_e}{n_e e^2}}$$

ϵ_0 : permittivité de l'espace libre

e : charge de l'électron

k : constante de Boltzmann

T_e : température des électrons

n_e : nombre d'électrons par unité de volume

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma



Dépôts assistés par plasma

Les interactions plasma-surface

- | | |
|---------------------|---|
| ✓ Les atomes | Ablation (en formant des composés volatiles)
 Traitement
 Dépôt |
| ✓ Les radicaux | Dépôt
 Traitement |
| ✓ Les ions positifs | Activation de la surface |

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma

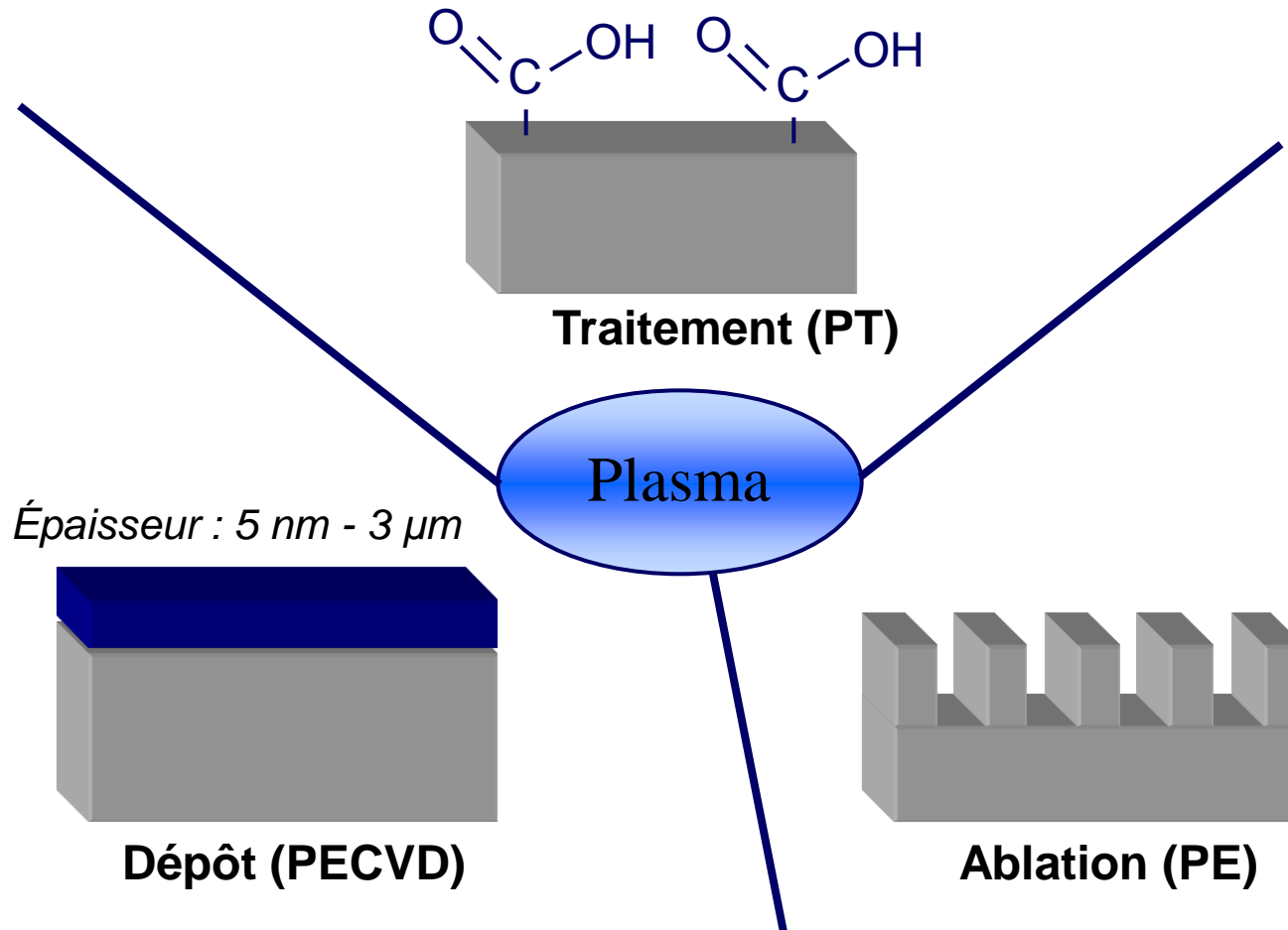
Dépôt et ablation activés par les ions

Vitesse du dépôt = K_d [radical] $f(\text{ions})$

Vitesse d'ablation = K_a [atom] $f'(\text{ions})$



Dépôts assistés par plasma



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma



Dépôts assistés par plasma

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

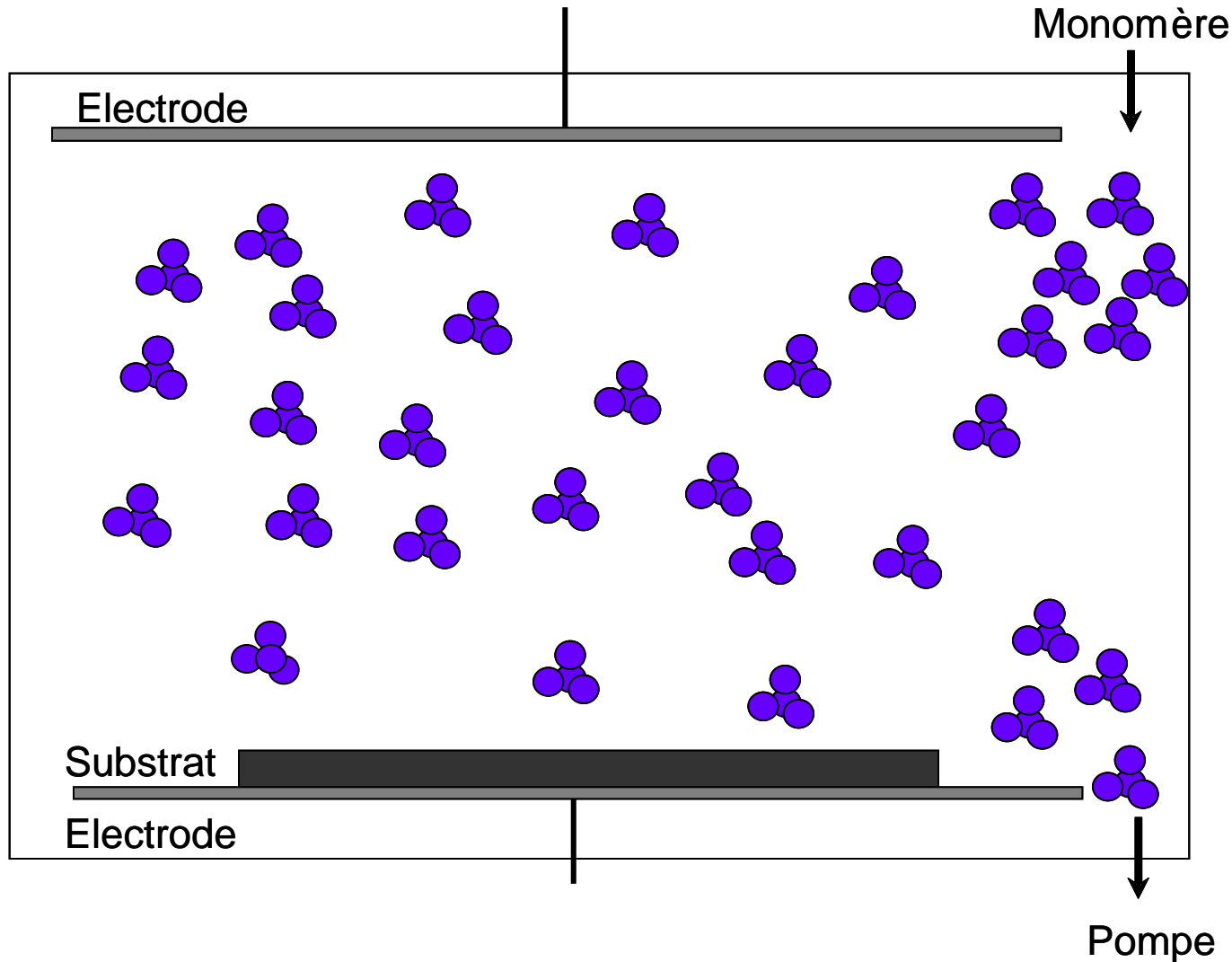
Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma





Dépôts assistés par plasma

Polymérisation Plasma

- ✓ Les pressions sont comprises entre 0.001 - 1 torr
- ✓ La décharge est généralement entretenue via un champ électrique RF (13.56 MHz)

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

**Polymérisation
Plasma**



Dépôts assistés par plasma

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

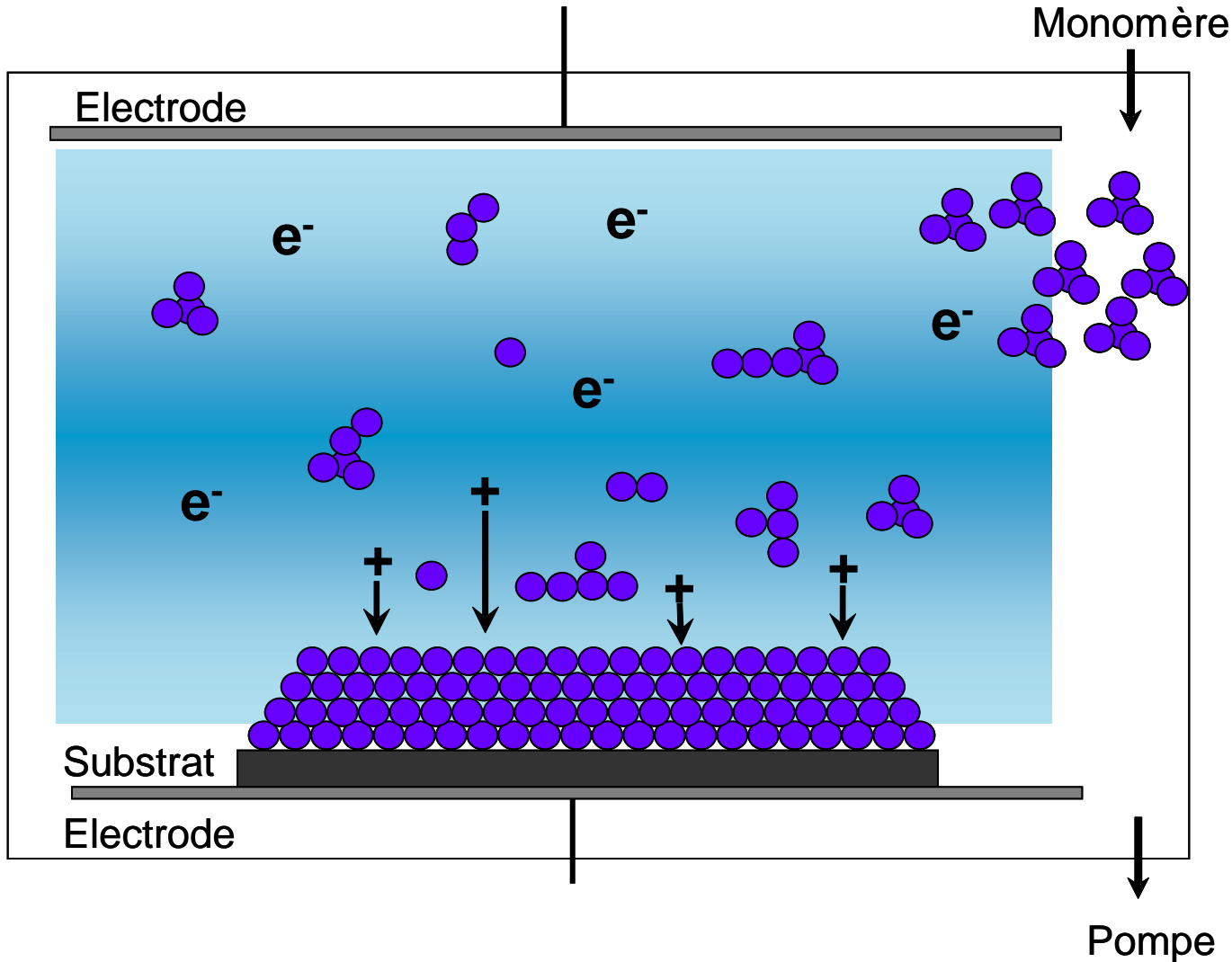
Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma





Dépôts assistés par plasma

Polymérisation Plasma

- ✓ La décharge est généralement entretenue via un champ électrique RF (13.56 MHz)
- ✓ Les pressions sont comprises entre 0.001 - 1 torr
- ✓ Le monomère se fragmente à l'intérieur de la décharge + particules chargées (10^{-6} molécules neutres).
- ✓ Les fragments peuvent constituer les futurs blocs pour la construction du polymère ou peuvent être accrochés à la surface
- ✓ Les ions positifs bombardent la surface

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma



Dépôts assistés par plasma

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

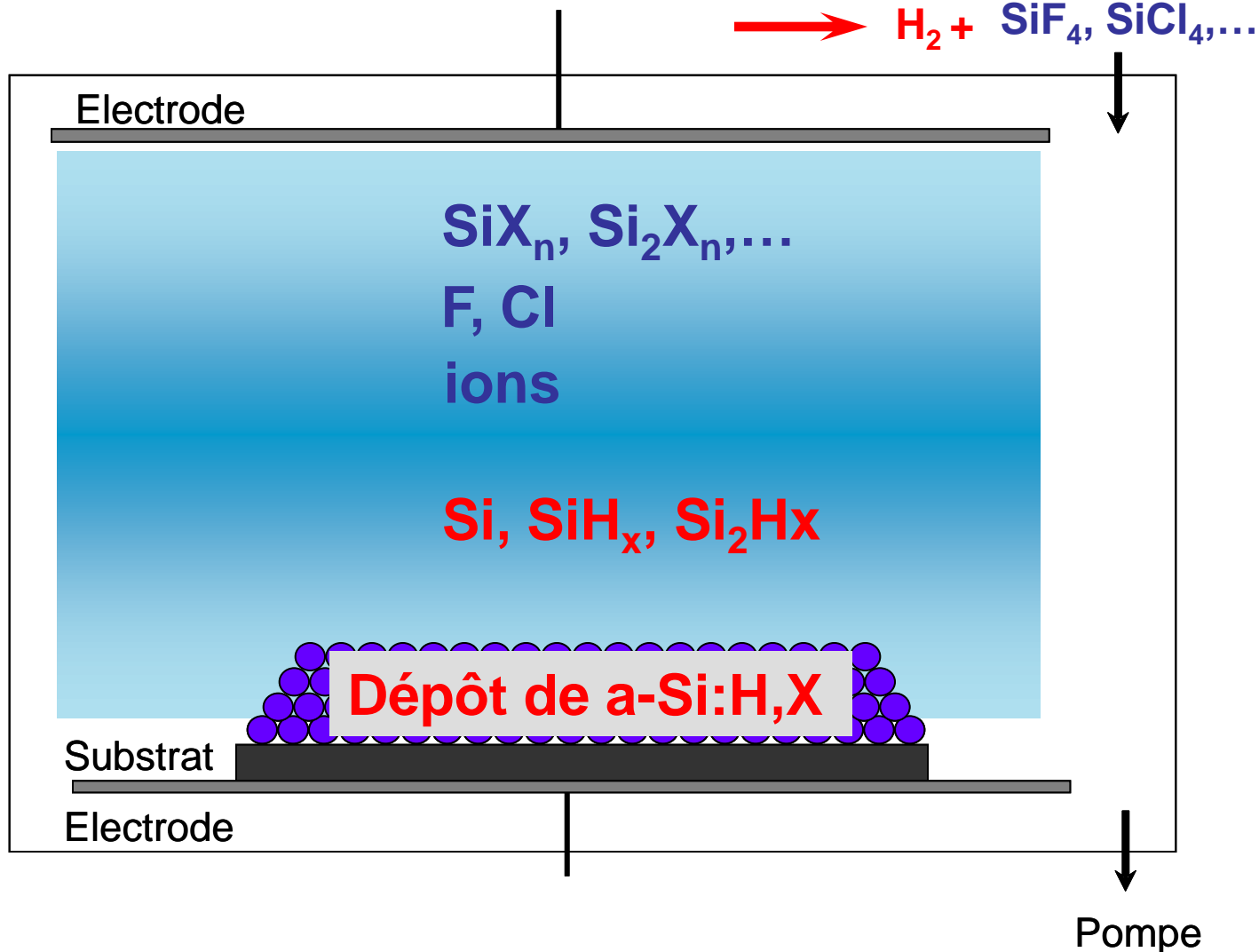
Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma





Dépôts assistés par plasma

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

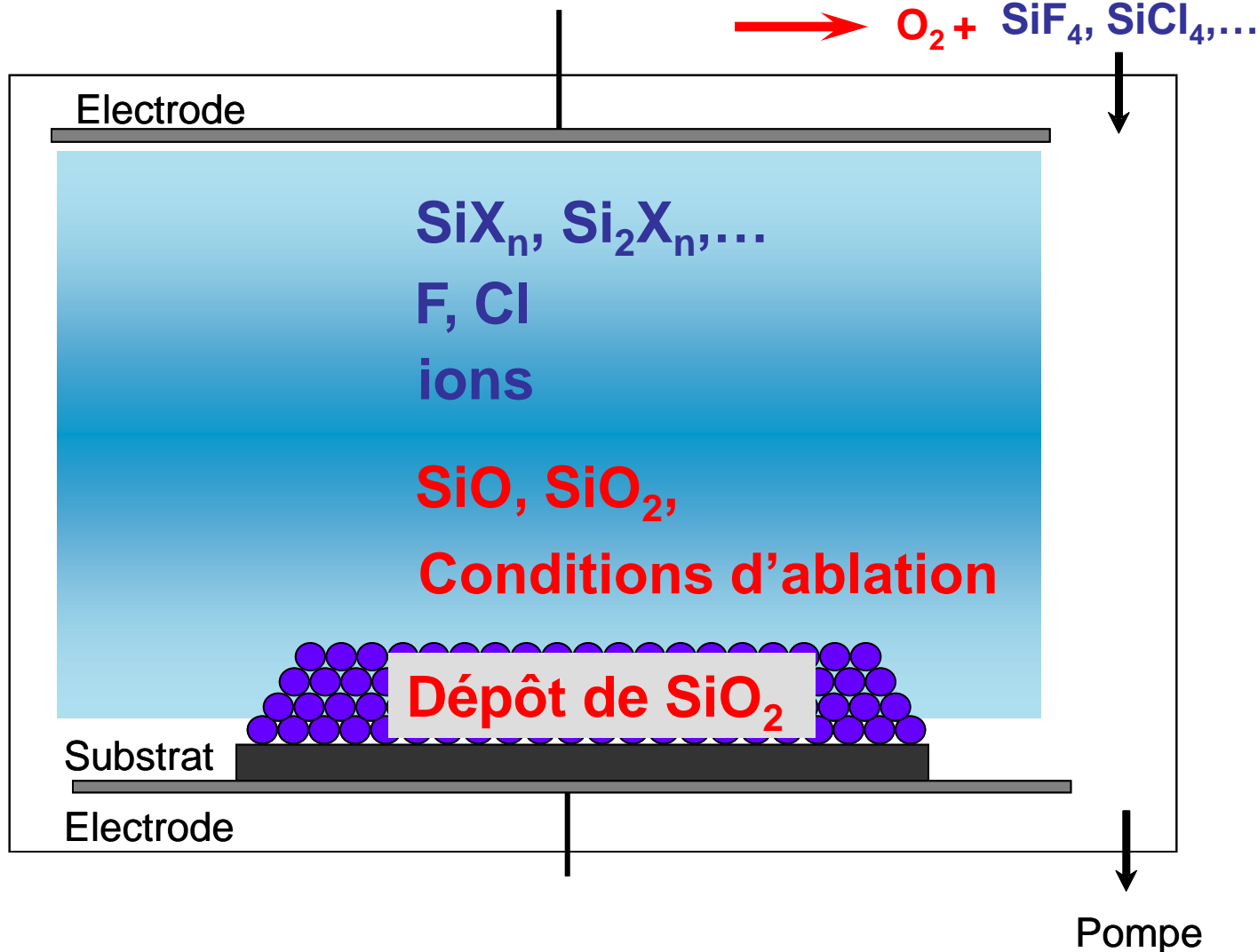
Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

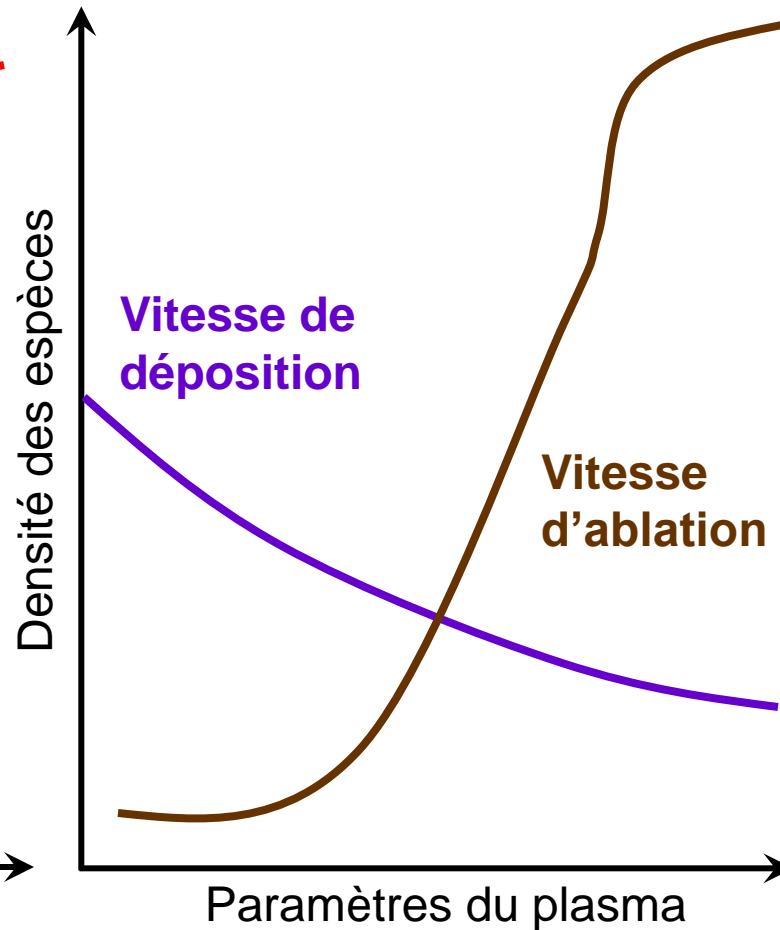
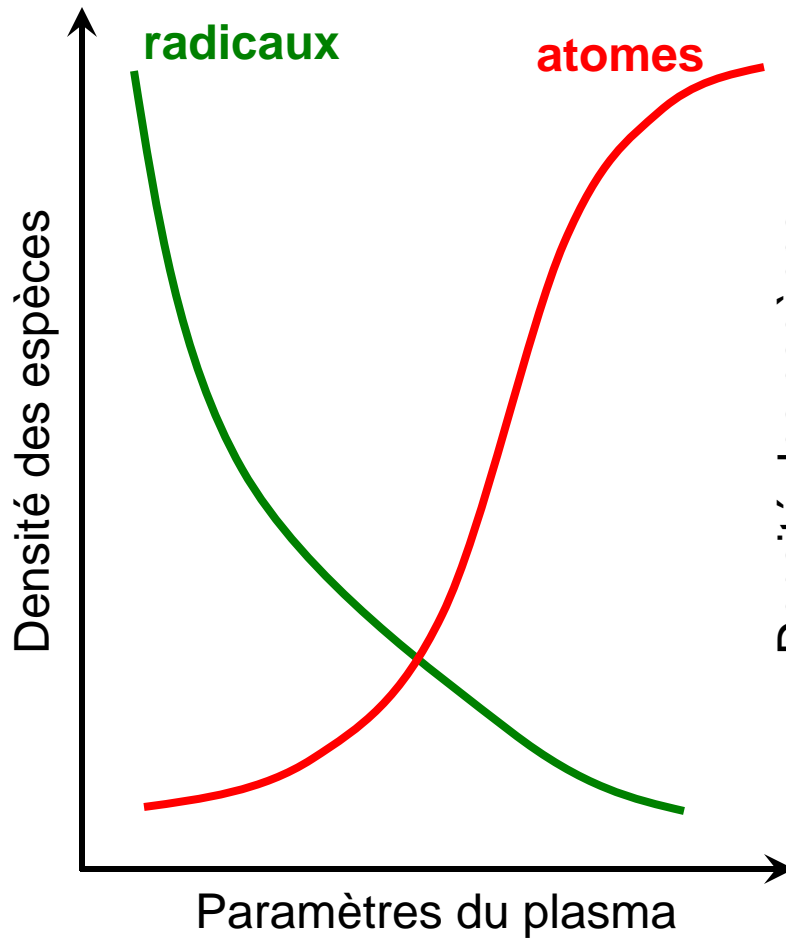
CVD

Polymérisation
Plasma





Dépôts assistés par plasma



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma



Dépôts assistés par plasma

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

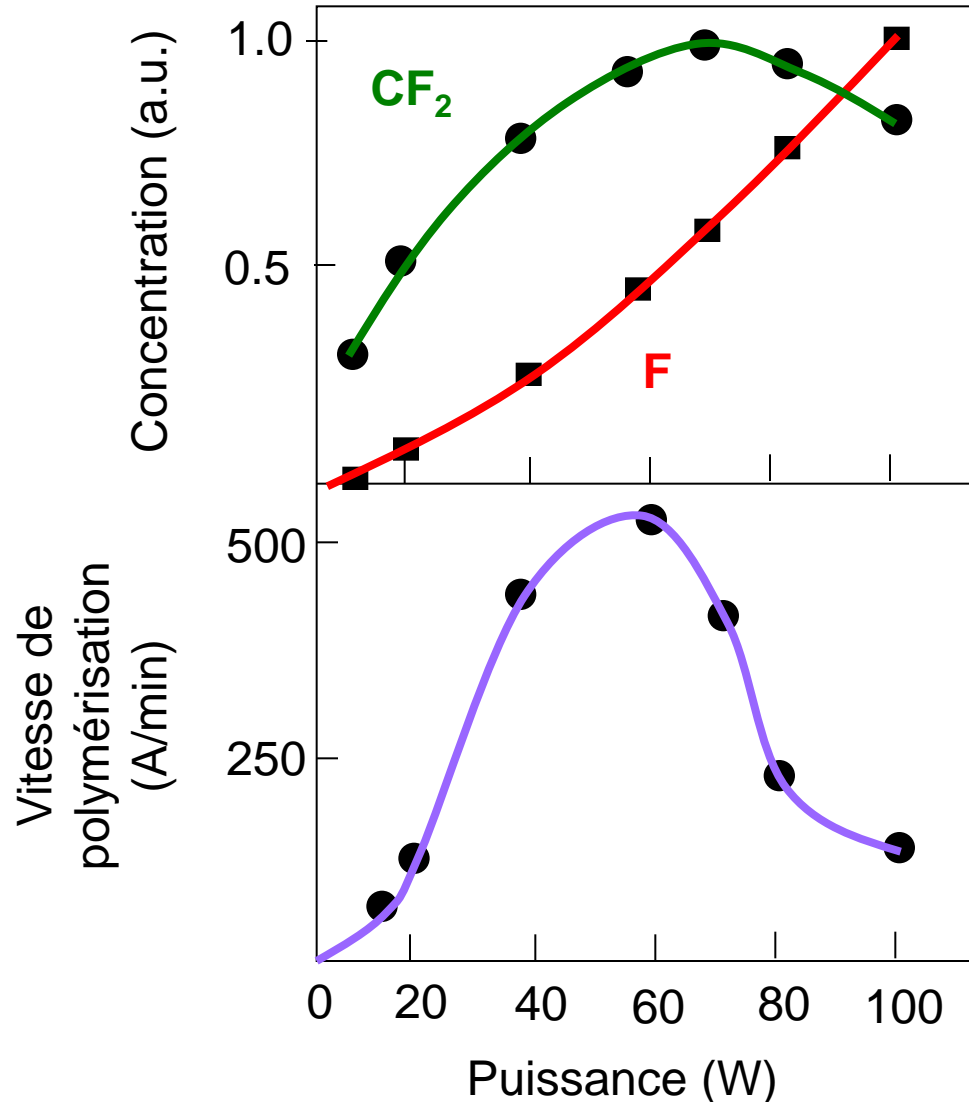
Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

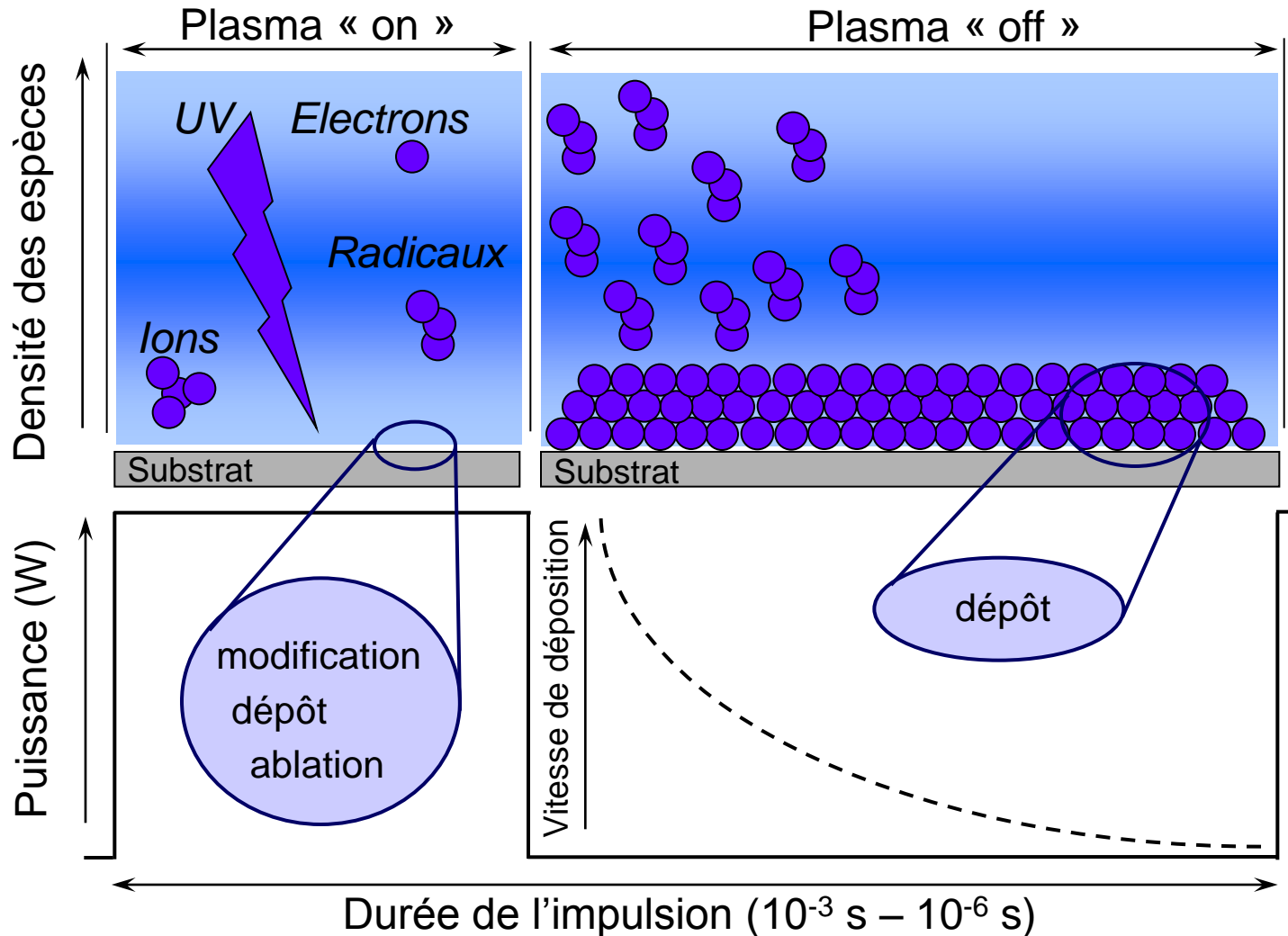
**Polymérisation
Plasma**



Effet de la
puissance dans
un plasma C_2F_6 -
 H_2



Dépôts assistés par plasma



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

**Polymérisation
Plasma**



Dépôts assistés par plasma

Quelques applications

Adhésion métal/polymère

Adhésion peinture/polymère

Film transparent à effet barrière pour l'emballage

Habillement et fibres naturelles

Revêtements super-hydrophobes

Revêtements anticorrosifs pour métaux et alliages

Revêtements anti-thrombotiques prothèses vasculaires

Revêtements anti-bactériens (emballage et appareils médicaux)

Ingénierie tissulaire

Micro-détecteurs

Systèmes diélectriques en microélectroniques

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

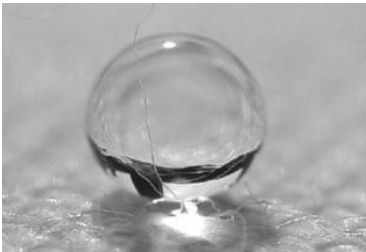
Polymérisation
Plasma



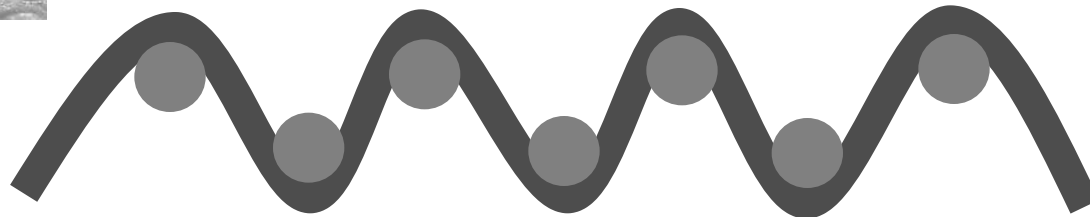
Un exemple

**Revêtement textile
(décor)**

- Energie de surface très faible
- Fort pouvoir adhésif
- Issu d'un procédé " vert "



Hydrophobe ou Superhydrophobe



Hydrophile et réactive

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma



Un exemple

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

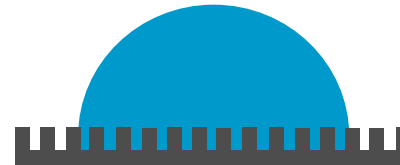
Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma

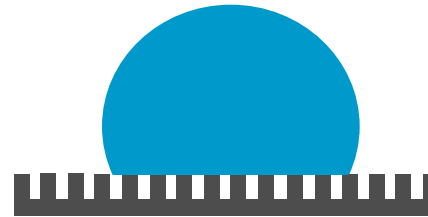
Équation de Wenzel

$$\cos \theta_W = r \cos \theta_E \quad r \geq 1$$



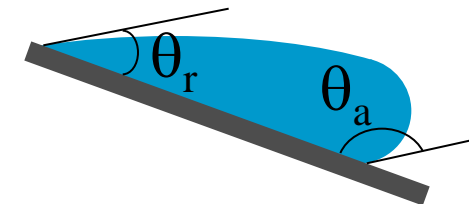
Régime de Cassie-Baxter

$$\cos \theta_{CB} = -1 + \varphi_S(1 + \cos \theta_E)$$



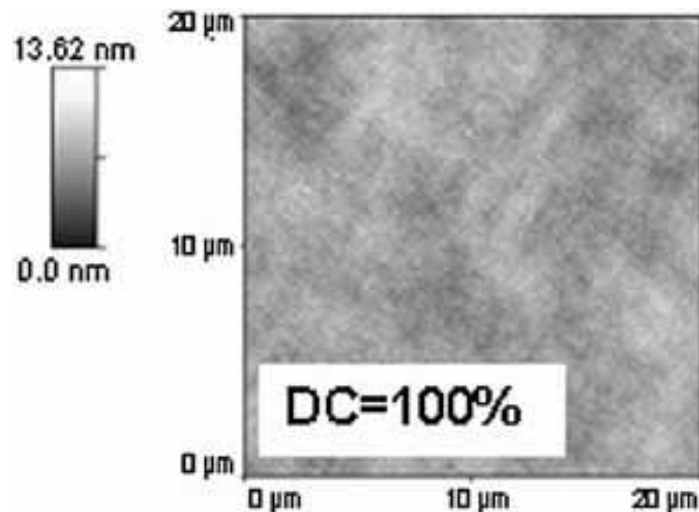
Force d'adhésion

$$F = \gamma_{lg} (\cos \theta_r - \cos \theta_a)$$

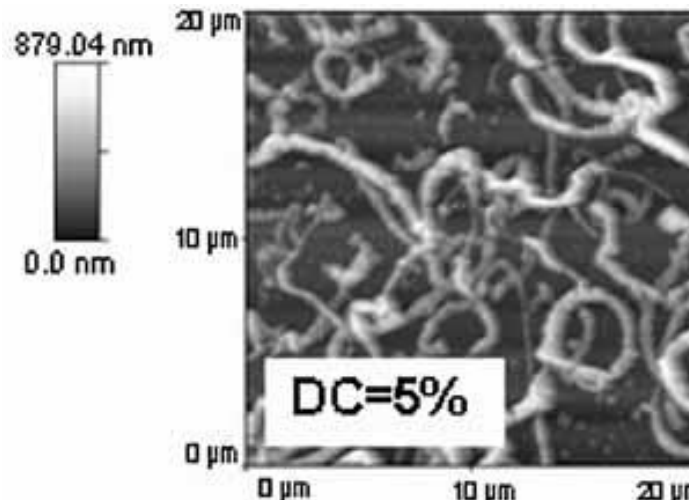
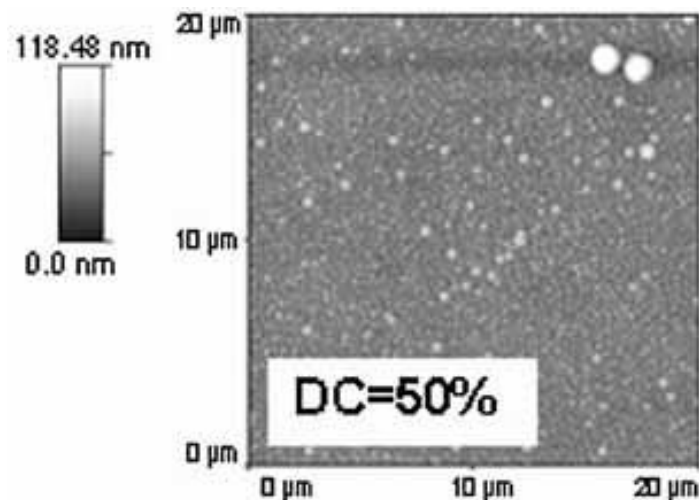




Un exemple



$$DC = \frac{\text{on}}{\text{on} + \text{off}}$$



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

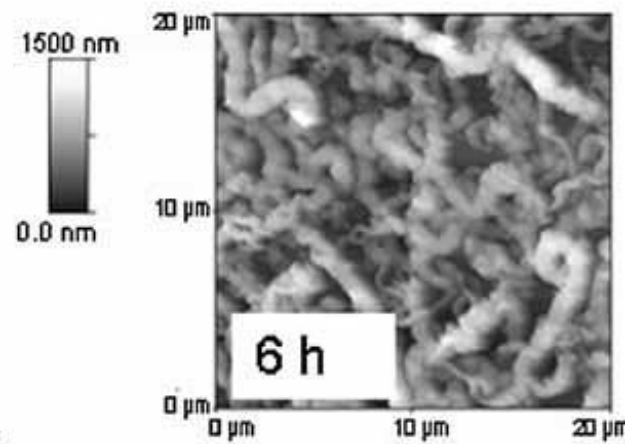
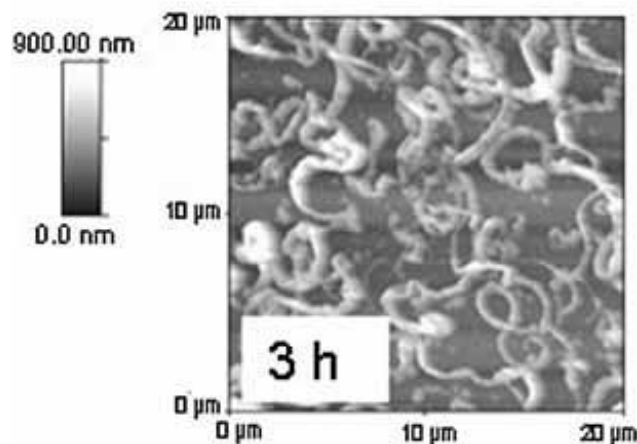
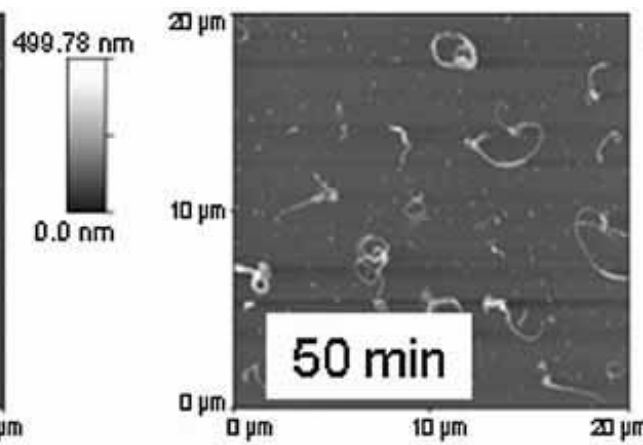
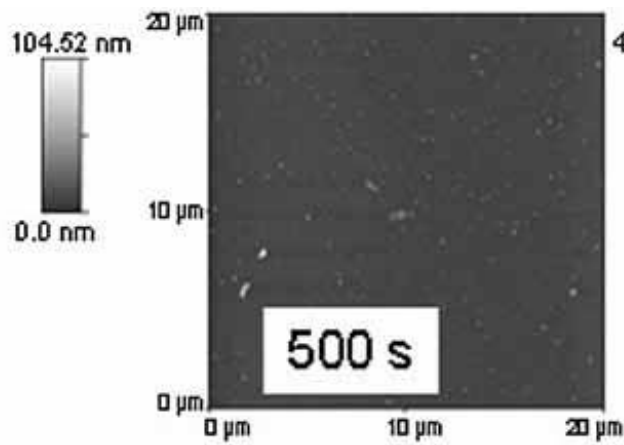
CVD

Polymérisation
Plasma

D'Agostino et al. Plasma Process. Polym. 2009, 6, 460



Un exemple



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

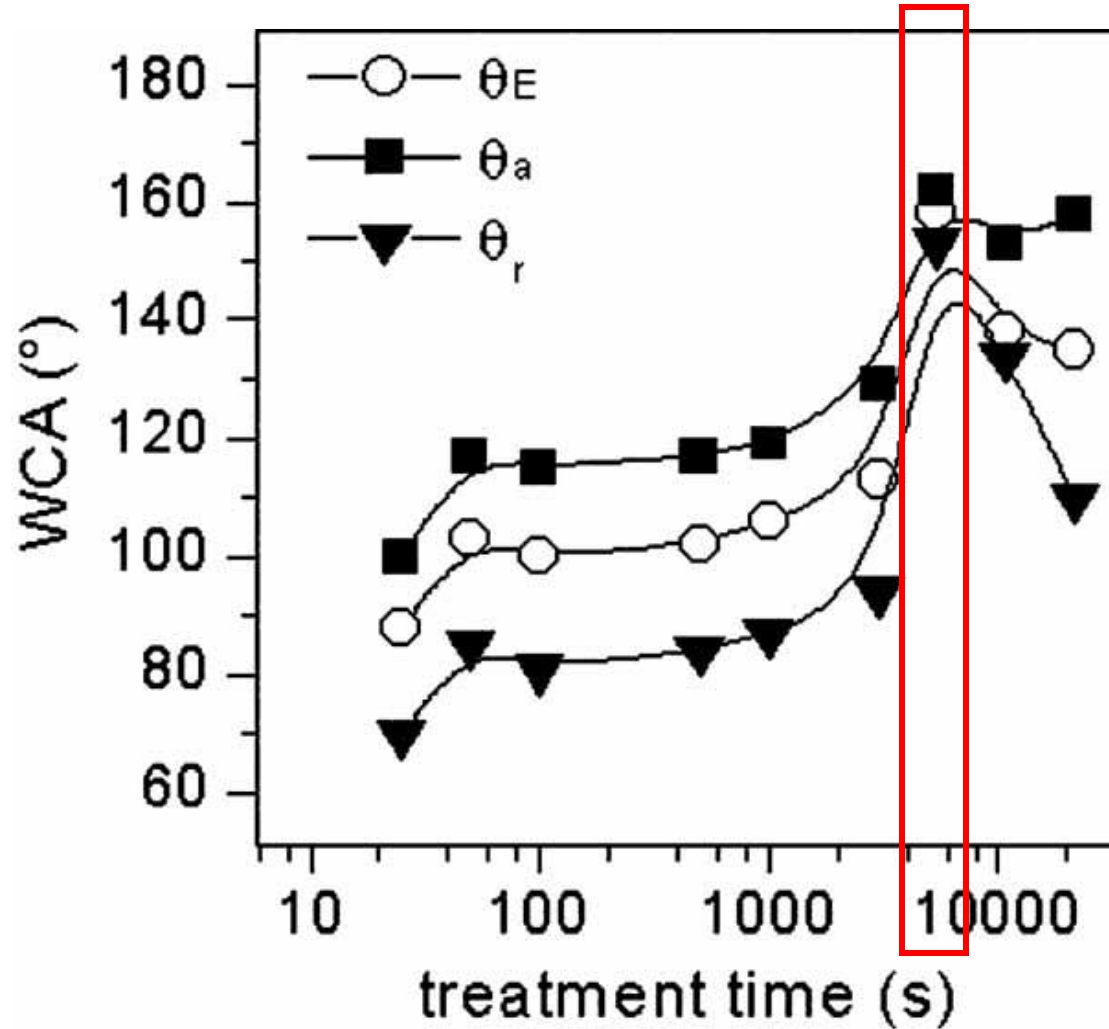
CVD

**Polymérisation
Plasma**

D'Agostino et al. Plasma Process. Polym. 2009, 6, 460



Un exemple



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma

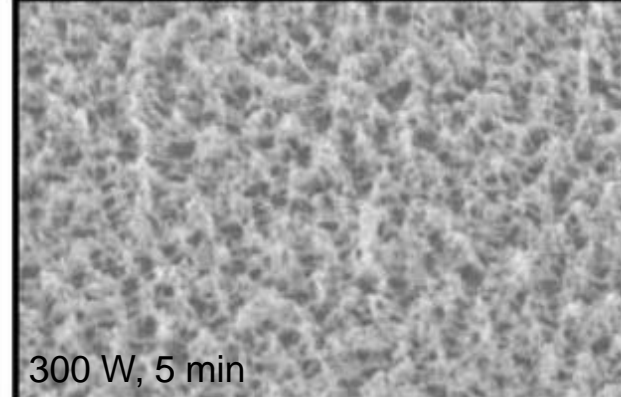
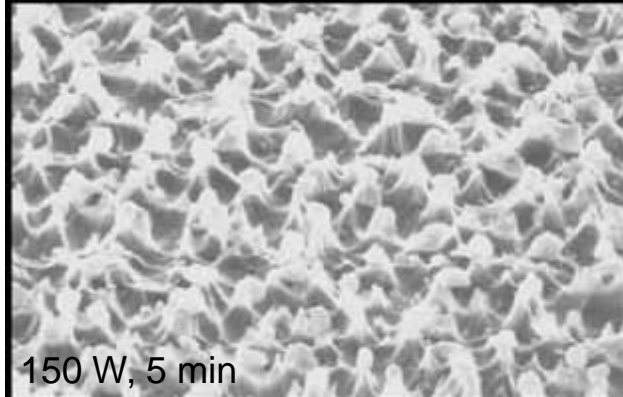
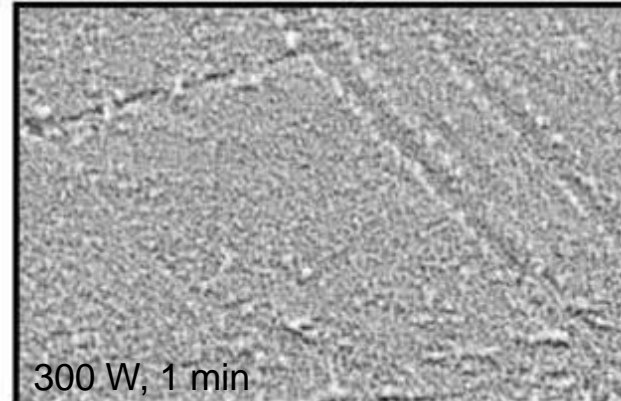
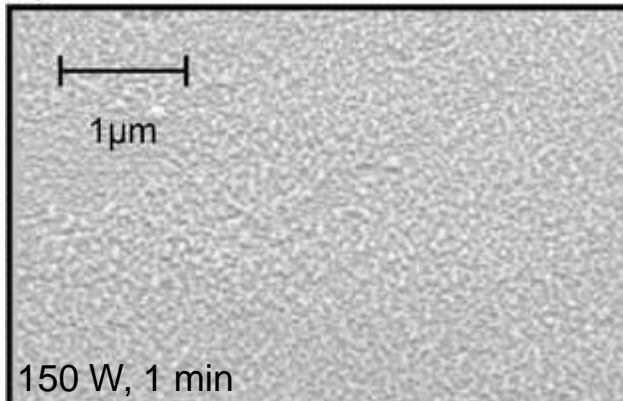
D'Agostino et al. Plasma Process. Polym. 2009, 6, 460



Un exemple

Polystyrene

CF_4 / O_2



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

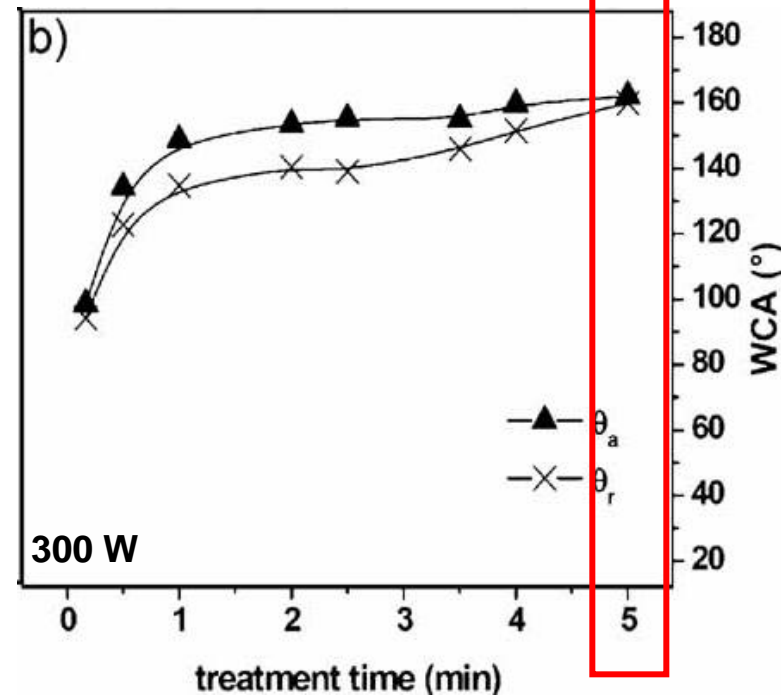
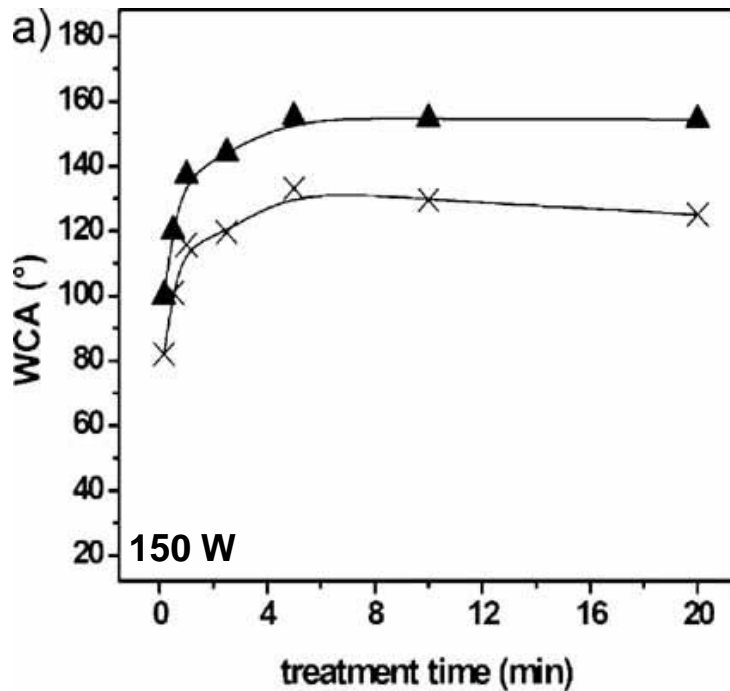
Polymérisation
Plasma

D'Agostino et al. Plasma Process. Polym. 2009, 6, 460



Un exemple

CF_4 / O_2



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

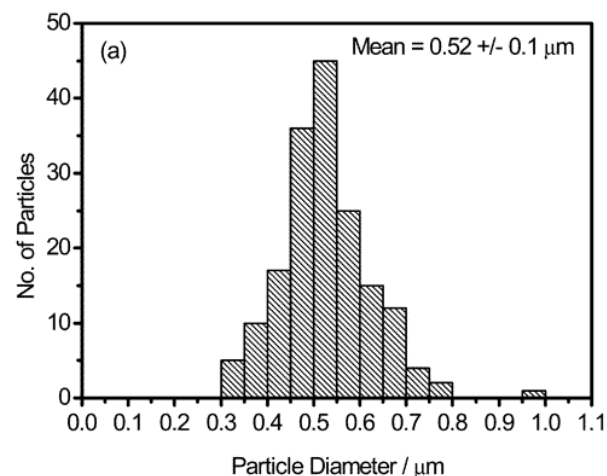
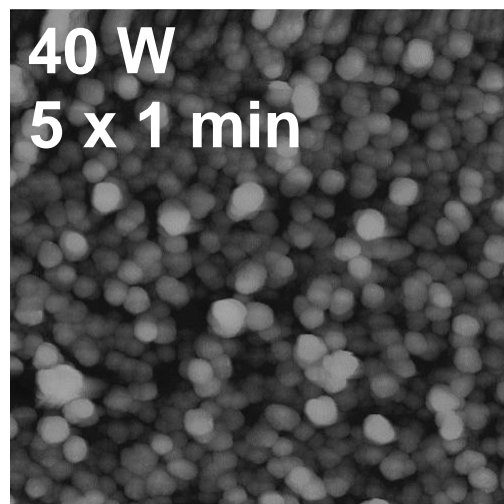
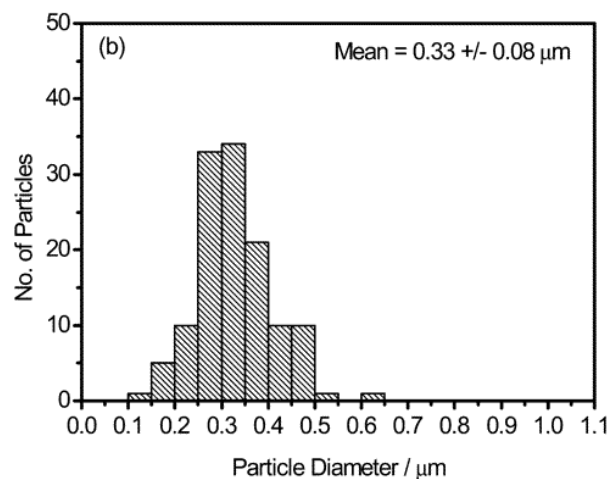
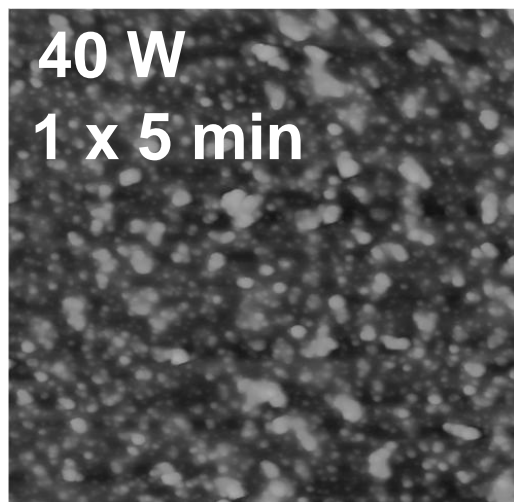
Polymérisation
Plasma

D'Agostino et al. Plasma Process. Polym. 2009, 6, 460



Un exemple

Perfluoroacrylate



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

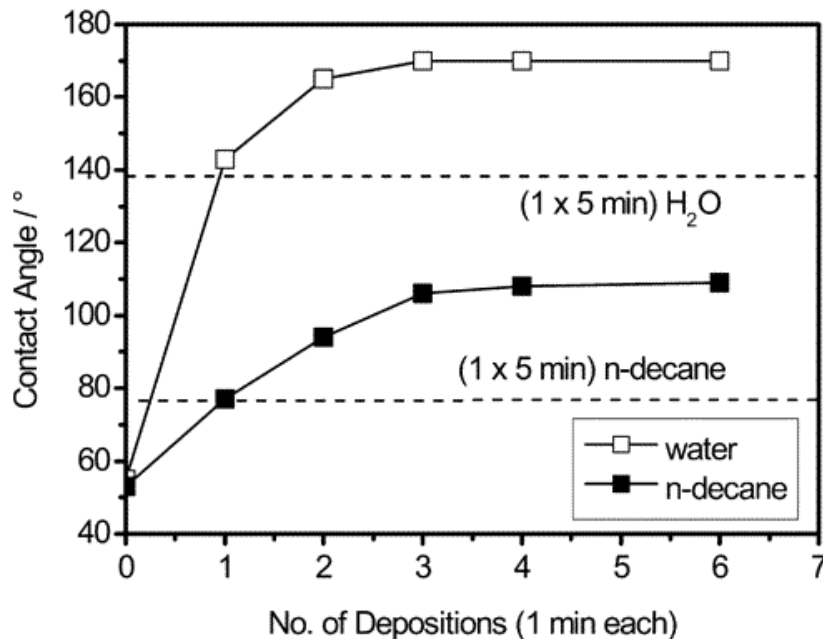
Polymérisation
Plasma

V.Roucoules et al Chem. Mater. **2002**, 14, 4566



Un exemple

Perfluoroacrylate



deposition	contact angle/deg			
	water		n-decane	
	advancing	receding	advancing	receding
5 × 1 min	168 ± 0.8	165 ± 1.2	105 ± 1.0	42 ± 1.7
1 × 5 min	145 ± 1.2	47 ± 1.5	80 ± 1.4	32 ± 1.3

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma

V.Roucoules et al Chem. Mater. **2002**, 14, 4566



Un exemple

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

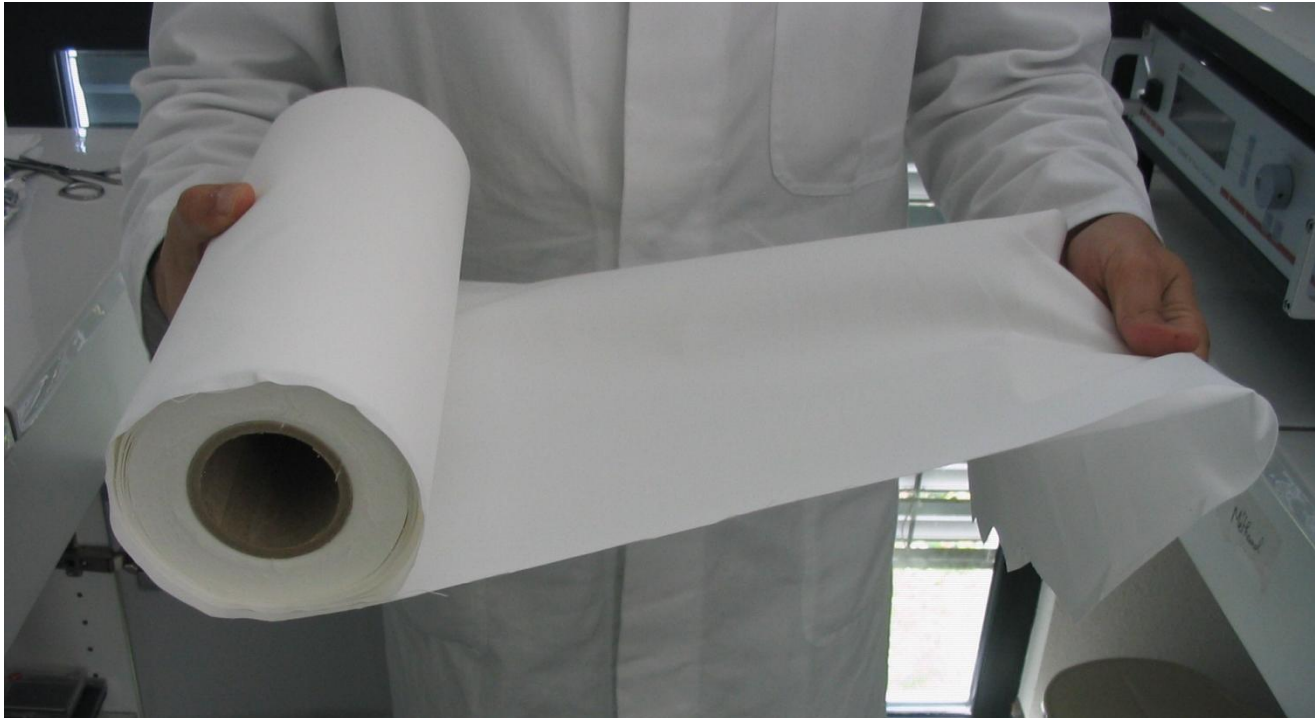
Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma



Hydrophobe ou superhydrophobe ?



Hydrophile et réactive ?



Un exemple

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

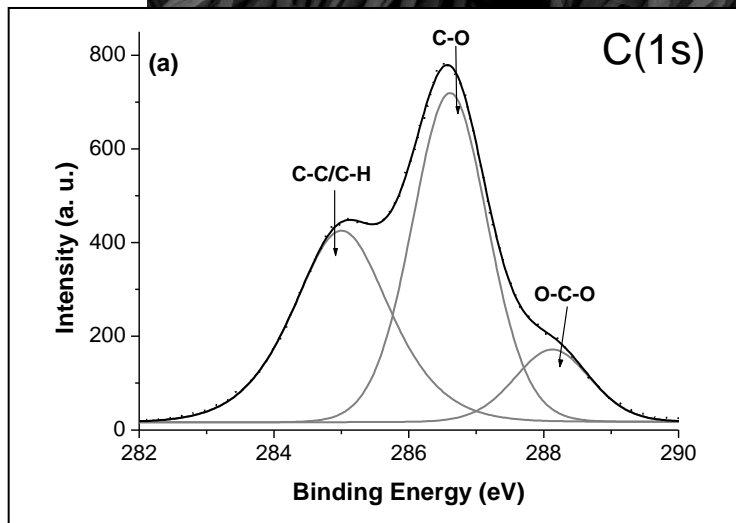
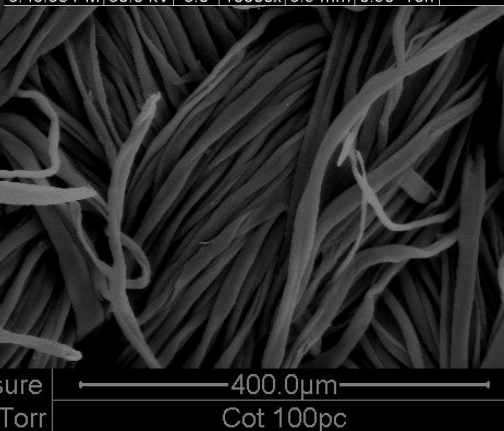
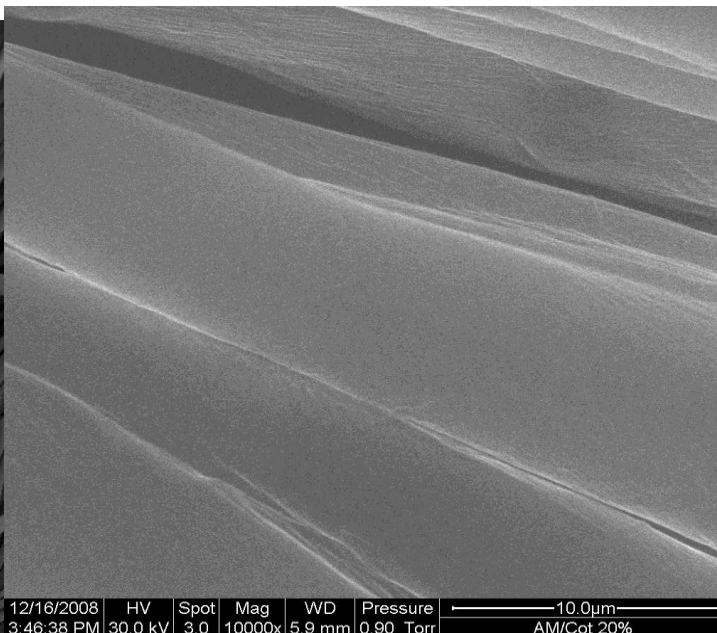
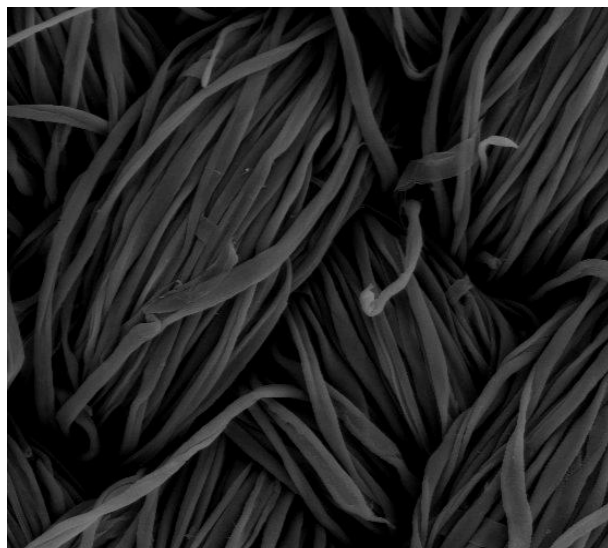
Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

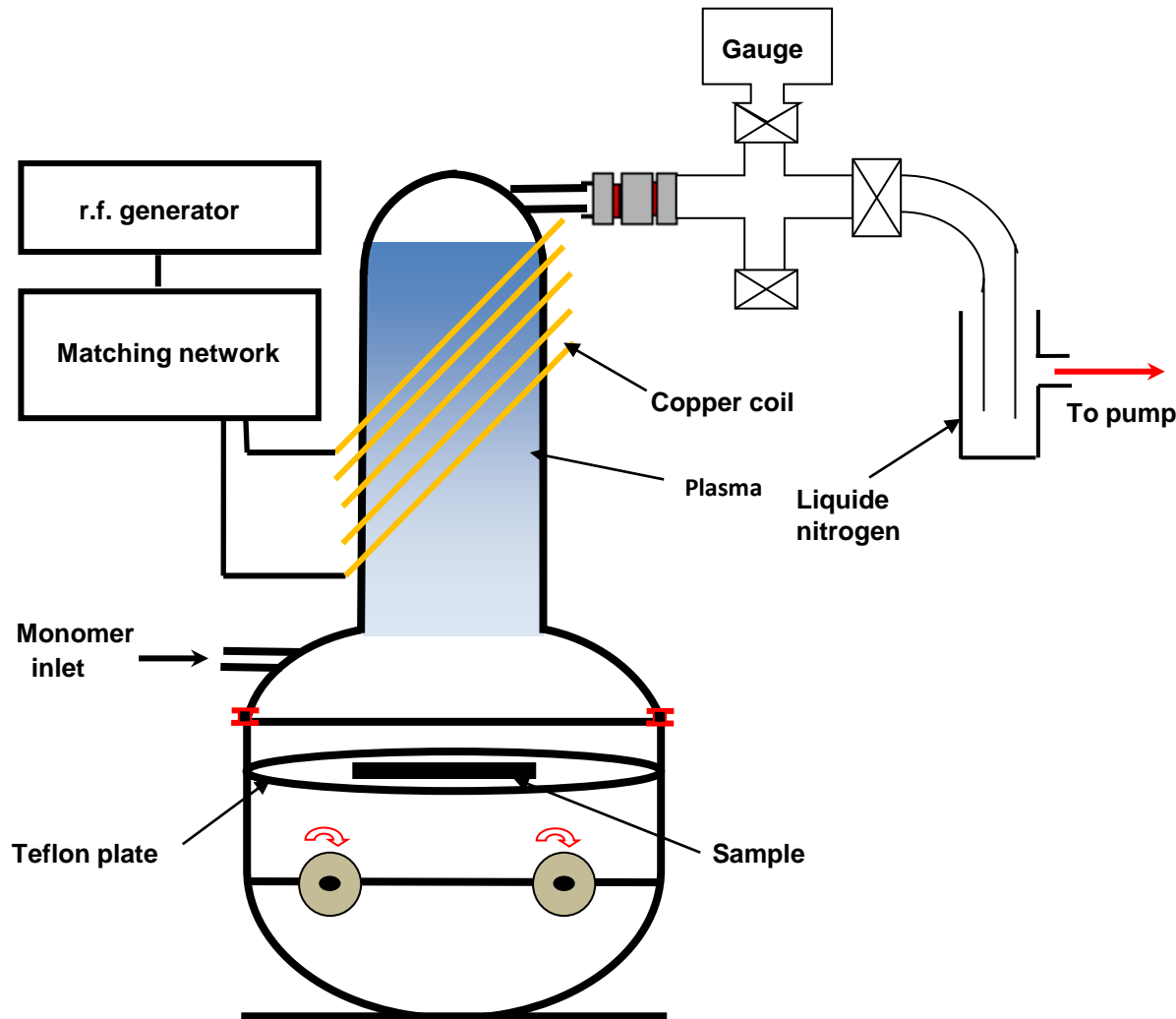
CVD

Polymérisation
Plasma





Un exemple



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

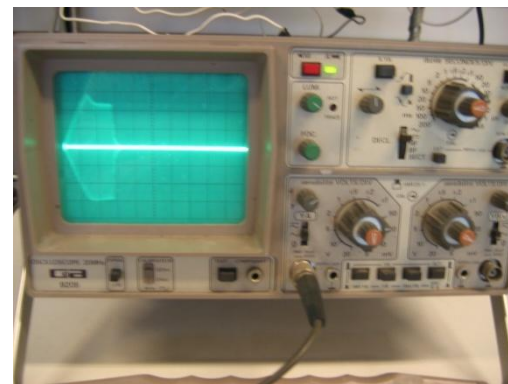
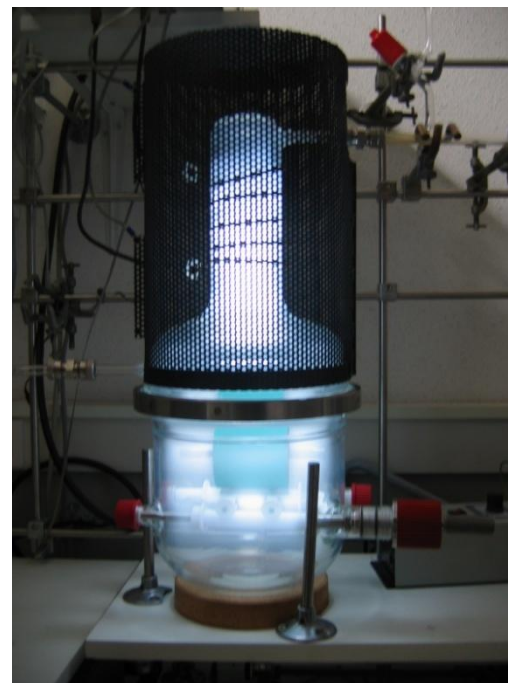
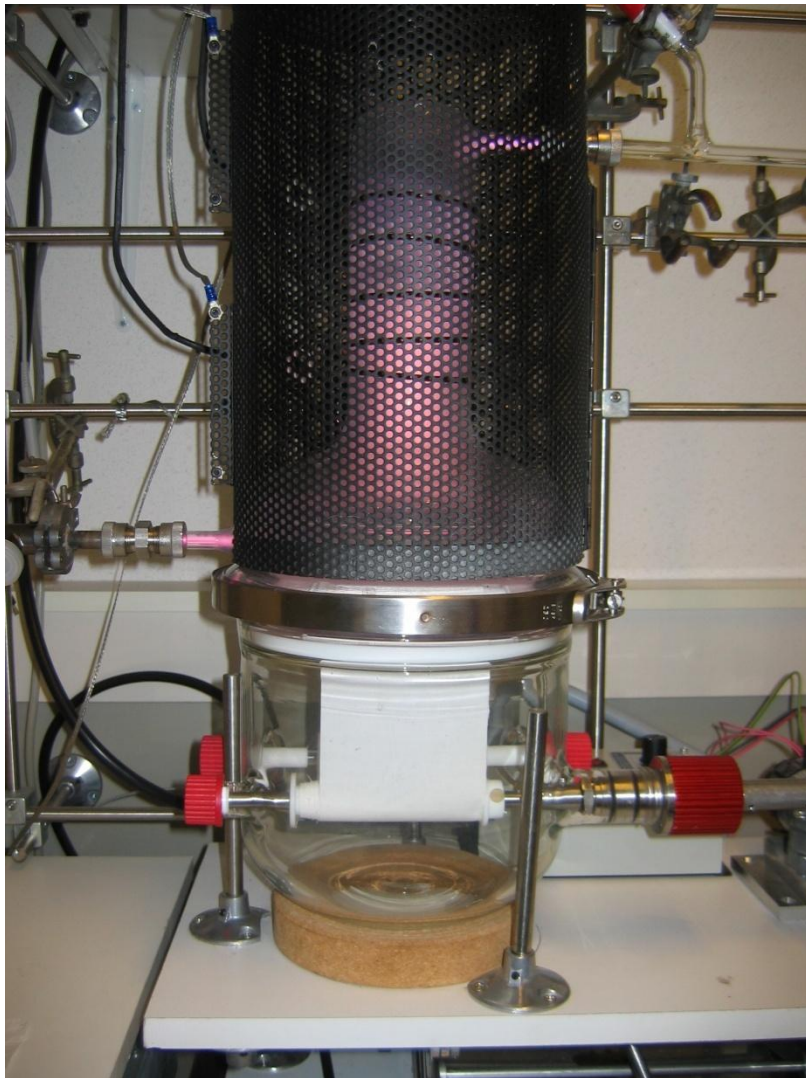
Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma



Un exemple



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

**Polymérisation
Plasma**



Un exemple

Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

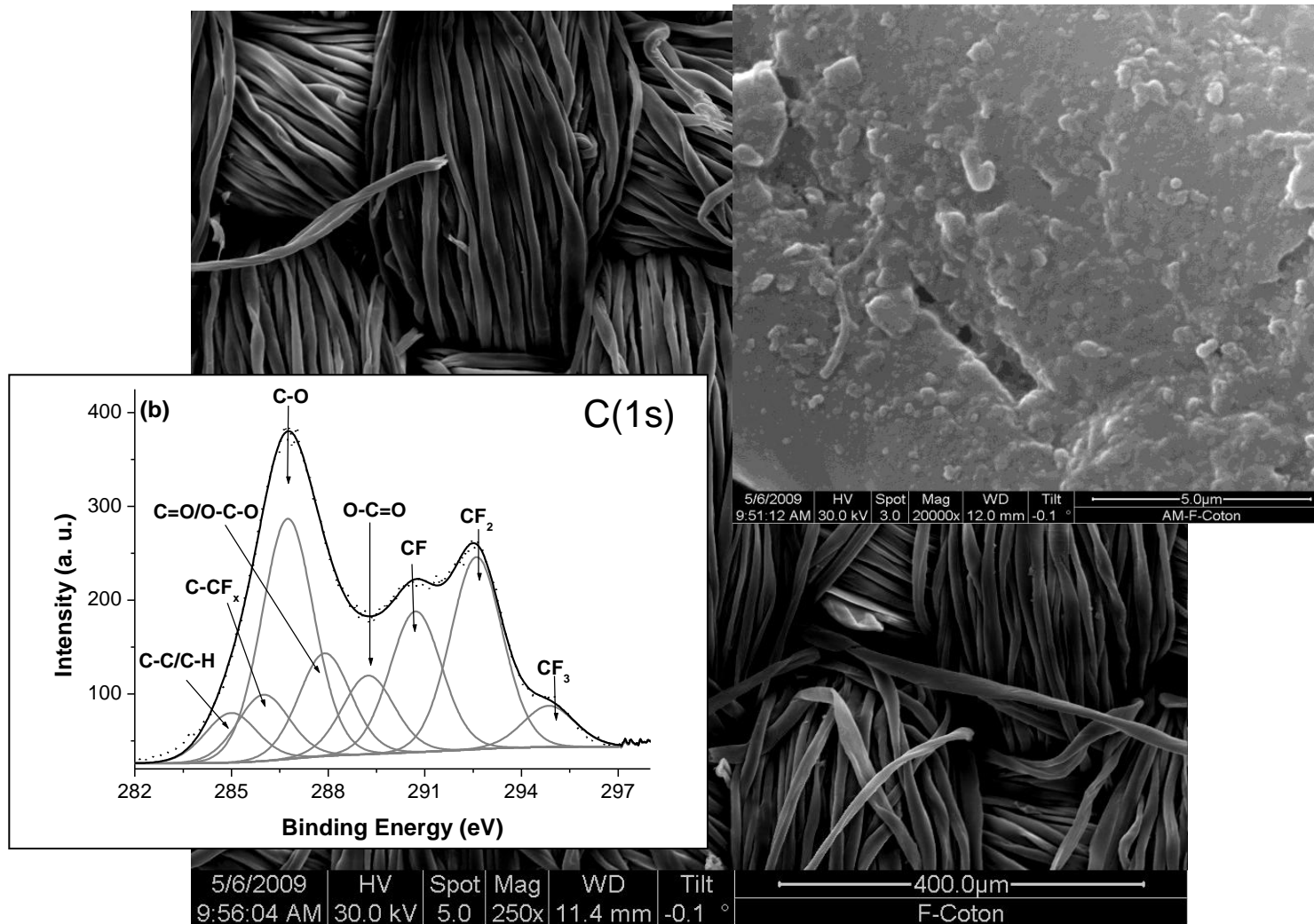
Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

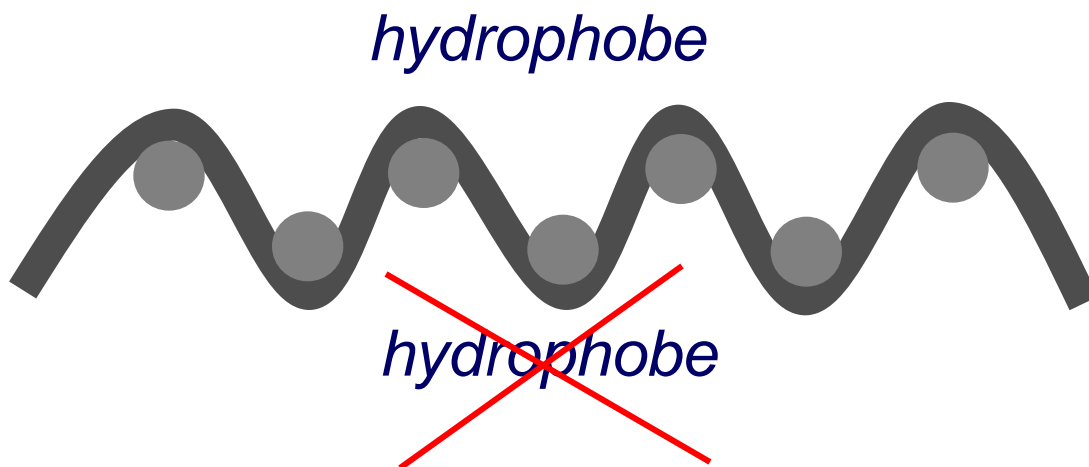
Polymérisation
Plasma





Un exemple

		Water static contact angle [°]			Hexadecane static contact angle [°]		
Sample	Side	5 µl	10 µl	15 µl	5 µl	10 µl	15 µl
C _{PA}	No exposed plasma surface	171 ± 1	169 ± 2	170 ± 3	159 ± 2	159 ± 2	159 ± 3
	Exposed plasma surface	169 ± 2	167 ± 3	167 ± 4	157 ± 3	158 ± 2	154 ± 3



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

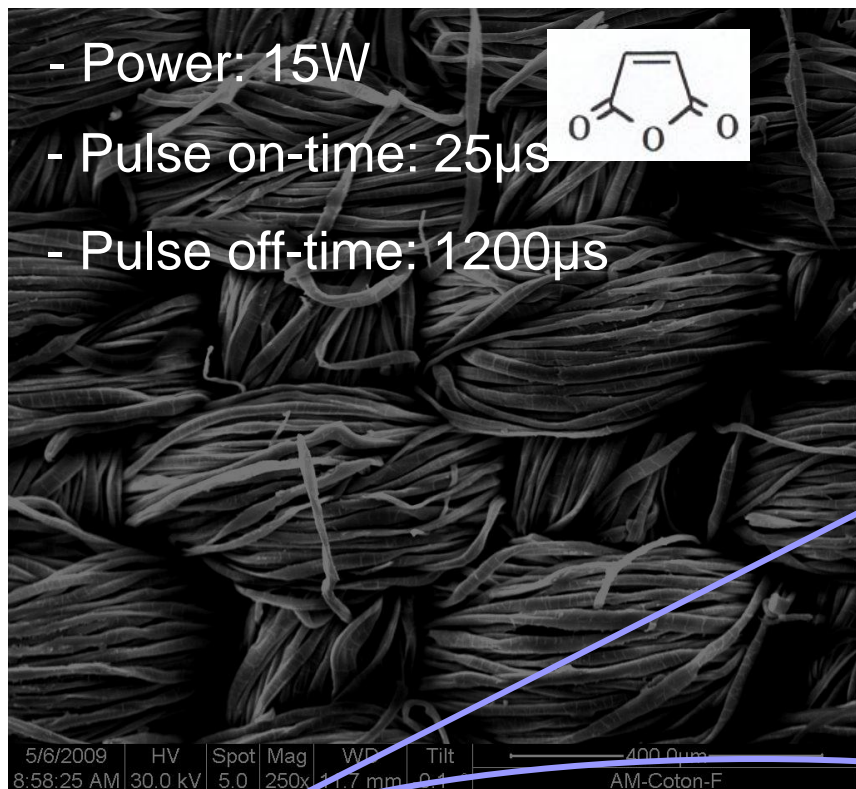
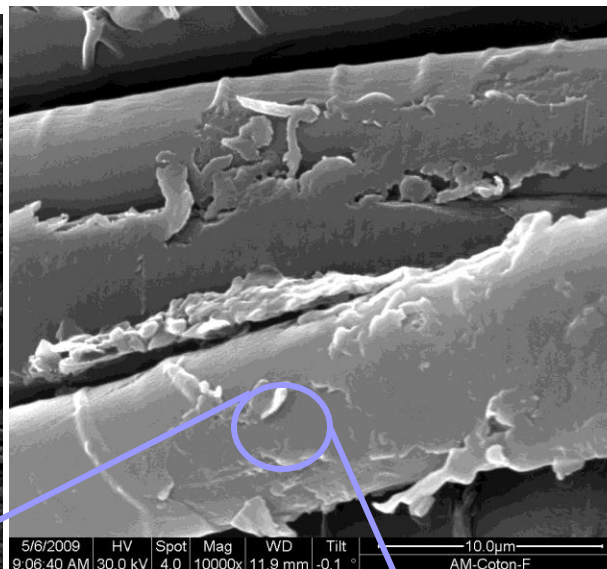
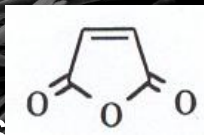
CVD

Polymérisation
Plasma



Un exemple

- Power: 15W
- Pulse on-time: 25 μ s
- Pulse off-time: 1200 μ s



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

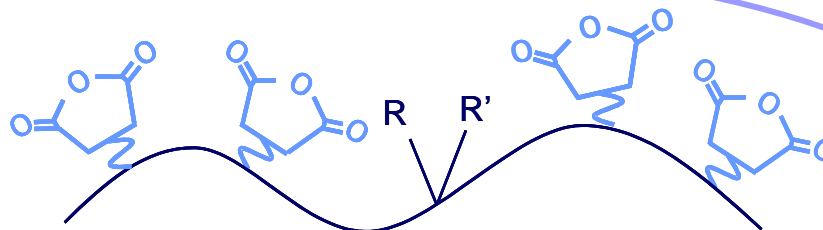
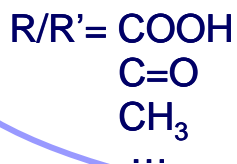
Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

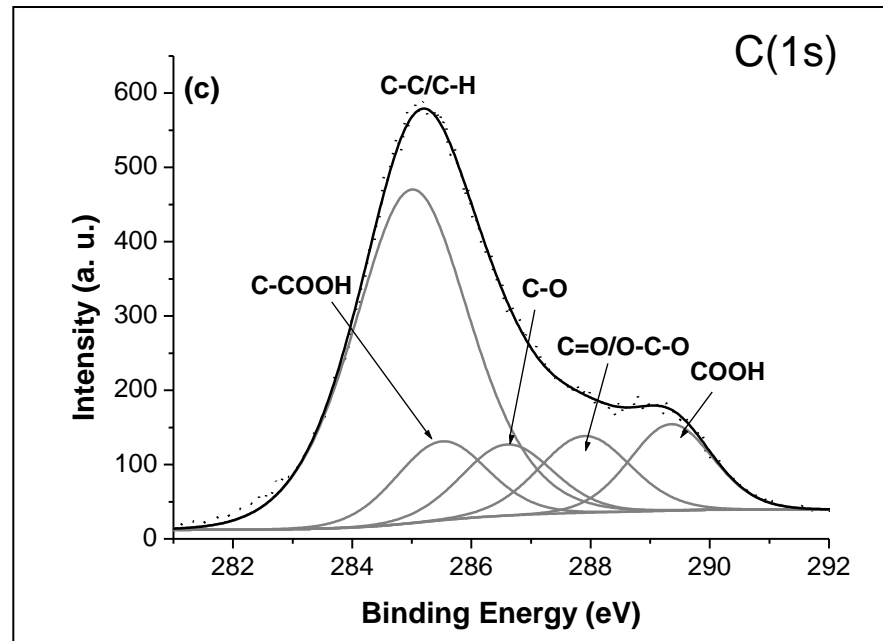
Polymérisation
Plasma





Un exemple

		Water static contact angle [°]			Hexadecane static contact angle [°]		
Sample	Side	5 μ l	10 μ l	15 μ l	5 μ l	10 μ l	15 μ l
C_{PAMA}	PA treated surface	169 ± 4	162 ± 3	162 ± 3	162 ± 2	157 ± 2	155 ± 2
	MA treated surface	0	0	0	0	0	0



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

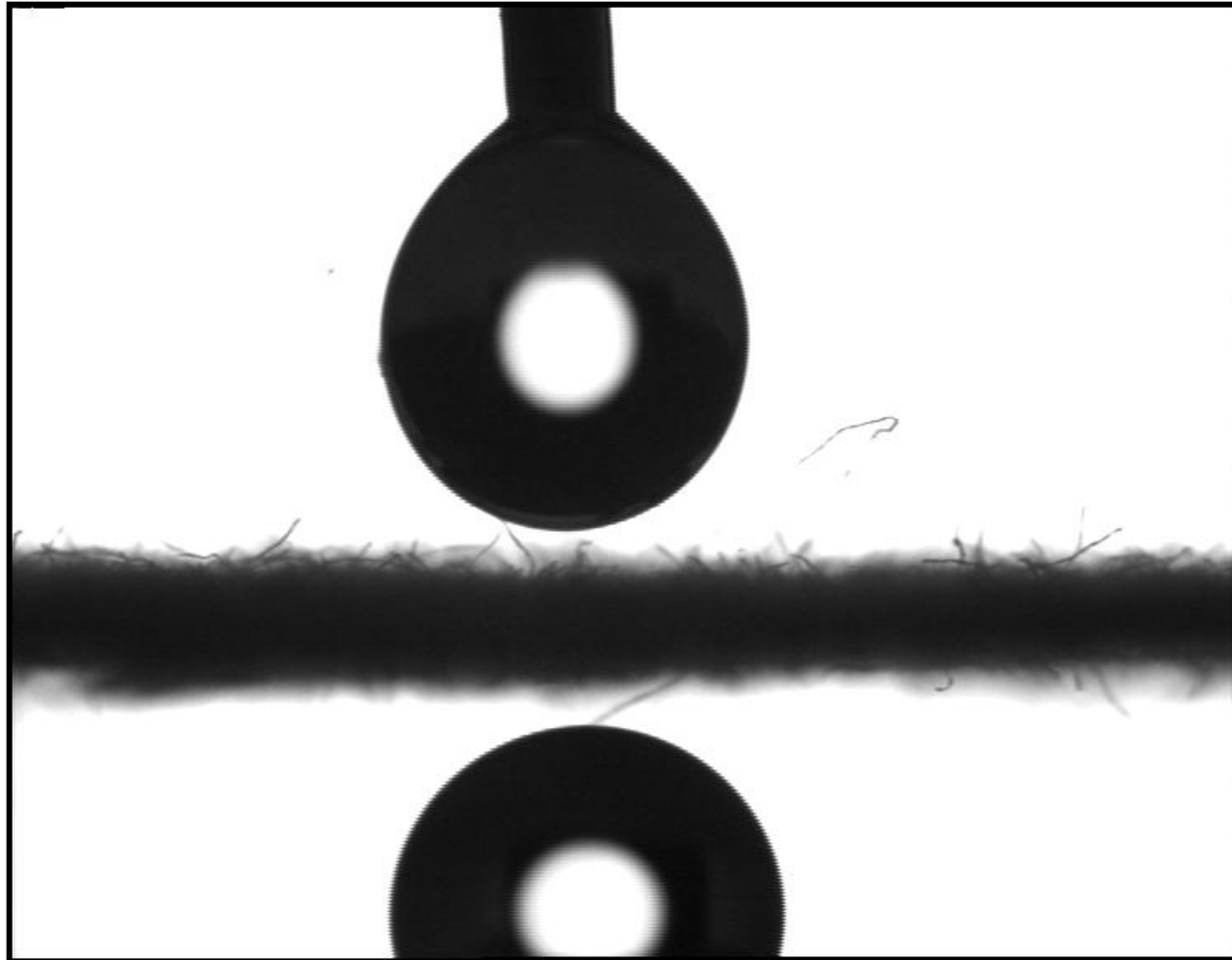
Phase vapeur

CVD

Polymérisation
Plasma



Un exemple



Phase liquide

Casting

Dip-coating
et Spin-coating

Langmuir-
Blodgett

Auto-
assemblages

Phase vapeur

CVD

**Polymérisation
Plasma**



Ce qu'il faut retenir...

- Procédé unique
- Diffère des polymérisations conventionnelles
- Utilise de faibles niveaux d'énergie
-
- Méthode indépendante du substrat
- Une seule étape de traitement
- Voie sèche – absence de pollution, COV, ...
-
- Très bonne adhésion polymère plasma – substrat
- La densité des groupes fonctionnels peut être contrôlée par la puissance utilisée, la fréquence des impulsions...
- Propriétés multifonctionnelles ...

