

# Les modes électriques - apport de la modélisation pour l'interprétation des mesures

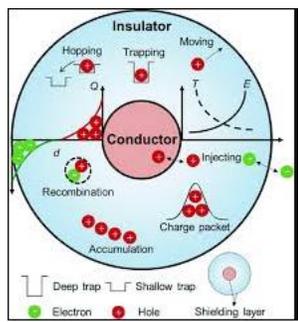
Christina Villeneuve-Faure

Forum 2024

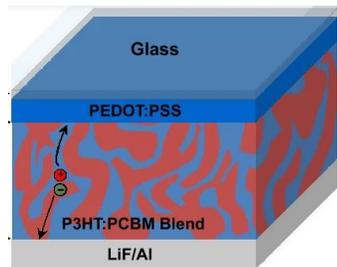
Pourquoi des mesures électriques locales quantitatives?

**Production, transport et stockage d'énergie**

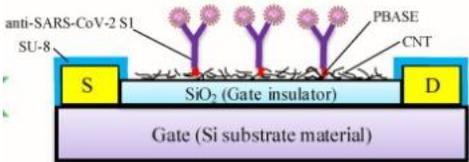
*Câbles HVDC<sup>4</sup>*



*Photovoltaïque organique<sup>3</sup>*



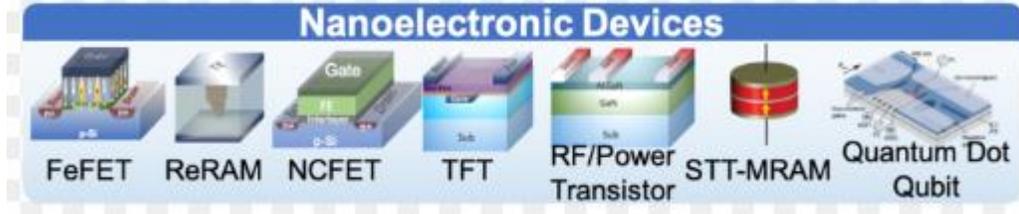
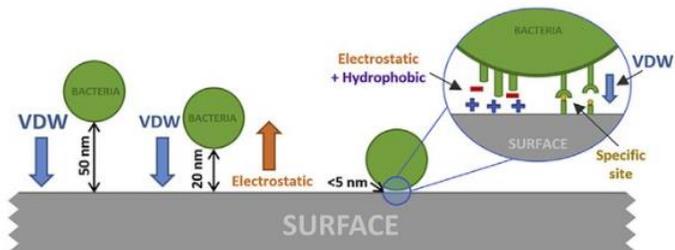
*Nano-capteur biologique*



*CNT-FET pour détection Covid19<sup>1</sup>*

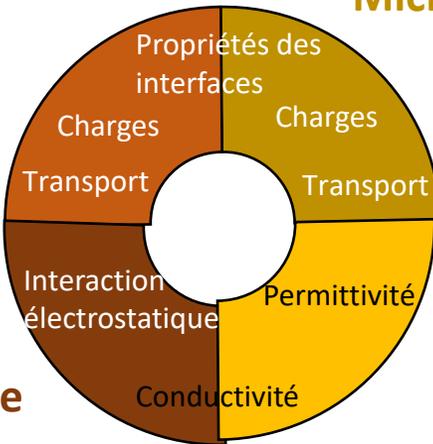
*Interaction en jeu dans l'adhésion<sup>2</sup>*

*Adhésion cellule/bactéries*

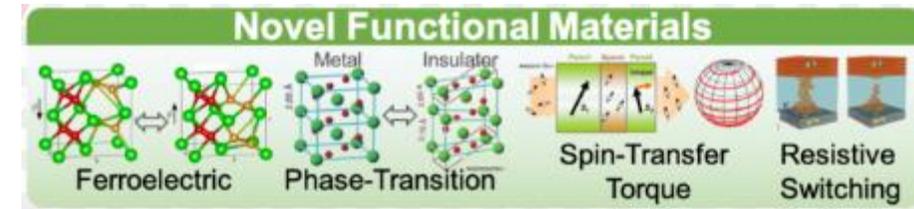


**Micro/nano électronique**

*Réduction d'échelle et architecture 3D en nanoelectronique<sup>4</sup>*



**Matériaux**



- Caractériser les propriétés électriques à l'échelle locale
- Quantification : comparaison avec propriétés fonctionnelles

<sup>1</sup> M.A. Zamzami et al., *Bioelectrochemistry* 143, 107982 (2022)

<sup>2</sup> J. Queen et al, *iScience* 23, 101745 (2020)

<sup>3</sup> H. Movla et al. *Sc. Report* 13, 2031 (2023)

<sup>4</sup> L. Zhang et al., book chapter (doi.org/10.1007/978-981-15-9731-2\_2)

<sup>5</sup> S. Salahuddin et al., *Nature electronics* 1, 442 (2018)

## 1. Courant, conductivité et mobilité des charges

- A. SSRM, résiscope, C-AFM, et TUNA
- B. Détermination propriétés physiques et limitations

## 2. Permittivité diélectrique et impédance

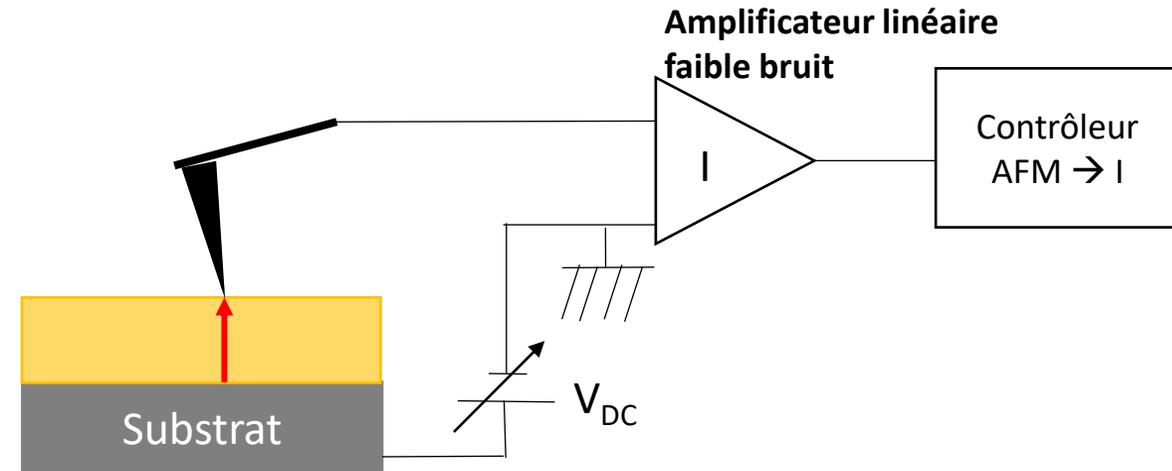
- A. Introduction
- B. EFM et modes dérivées
- C. sMIM

## 3. Charges électriques surface/volume

- A. Le KPFM dans tous ses états
- B. Cartographie de potentiel réel?
- C. Détermination de densité de charges

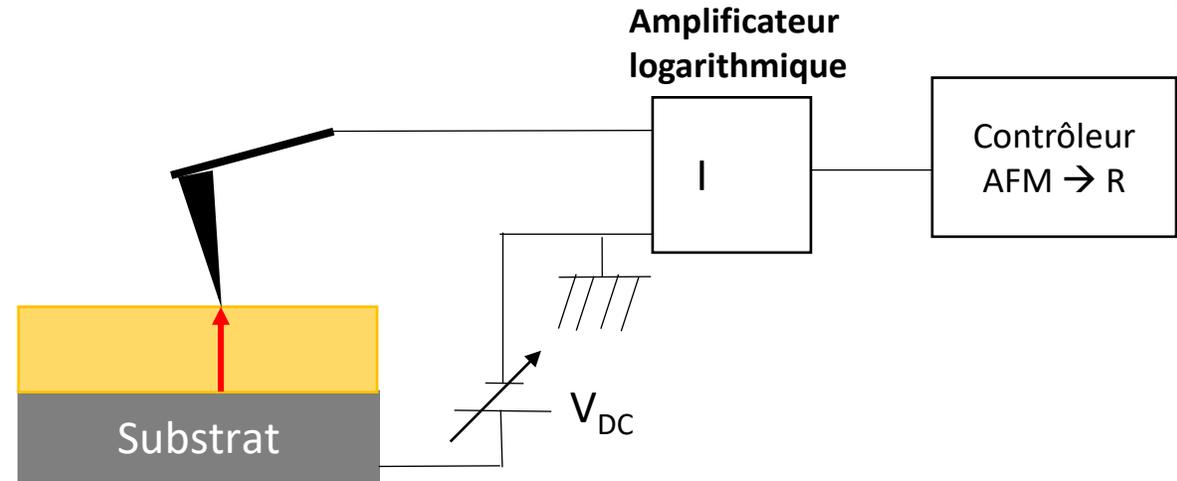
## 4. Mesures en dynamique

## Conductive AFM (C-AFM) : courant



- Mesures en contact ou en mode Peak Force
  - Spectroscopie :  $I=f(V_{DC})$
  - Cartographie de  $I$  (pour  $V_{DC}$  fixe)  $\rightarrow$  chemin de conduction
- Résolution spatiale  $\sim$  rayon de la pointe AFM
- Sensibilité : quelques fA (TUNA)  $\rightarrow$  quelques  $\mu$ A (C-AFM)
  - Isolant / semi-conducteurs

## Spreading resistance (SSRM) : résistance

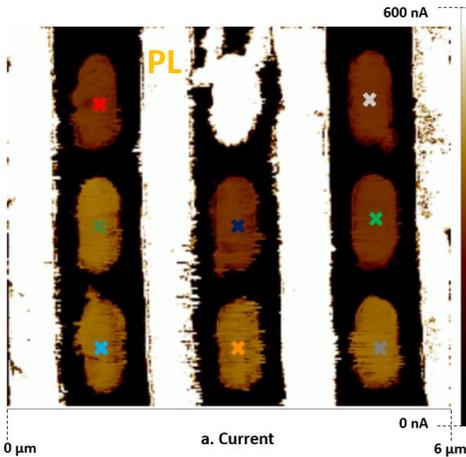


- Mesures en contact ou en mode Peak Force
  - Spectroscopie :  $R=f(V_{DC})$
  - Cartographie de  $R$  (pour  $V_{DC}$  fixe)
- Résolution spatiale  $\sim$  rayon de la pointe AFM
- Sensibilité :  $1\Omega \rightarrow 10^{19}\Omega$ 
  - Semi-conducteurs / métaux

# 1.2. Courant et résistance : mesures

Lecture de données sur des mémoires → conduction dans les métaux

## Conductive AFM (C-AFM)

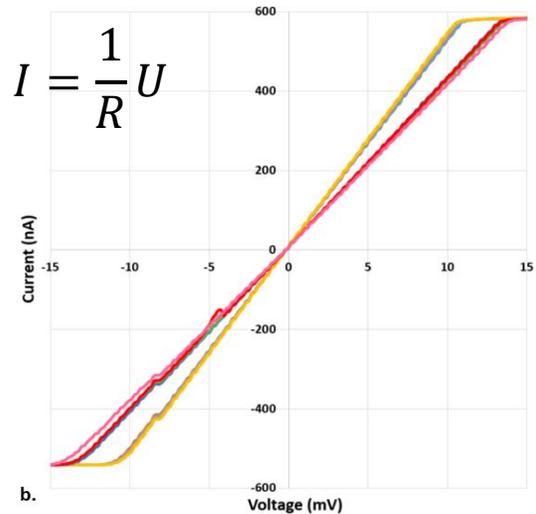
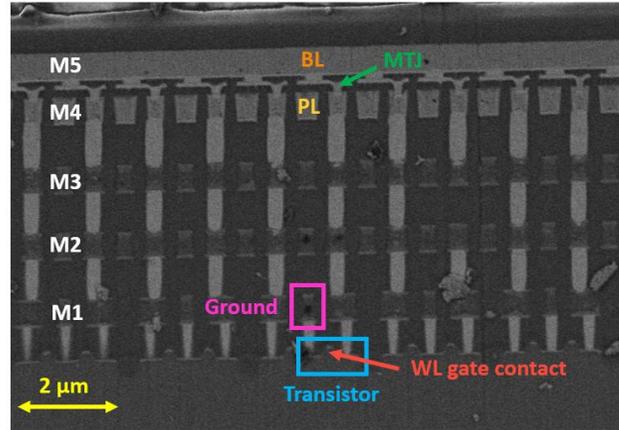


Cartographie de courant @ 6.8mV sur BL ( $F_c = 3\mu N$ )

$$R("0") = 19\text{ k}\Omega$$

$$R("1") = 24\text{ k}\Omega$$

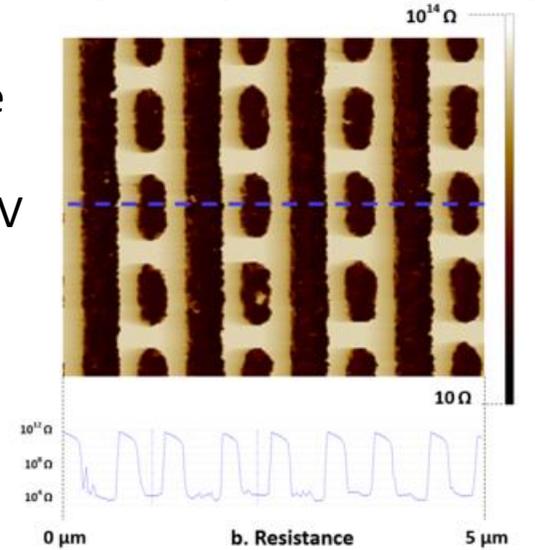
Visualisation facile des états mémoires



I-V sur différents plot mémoire

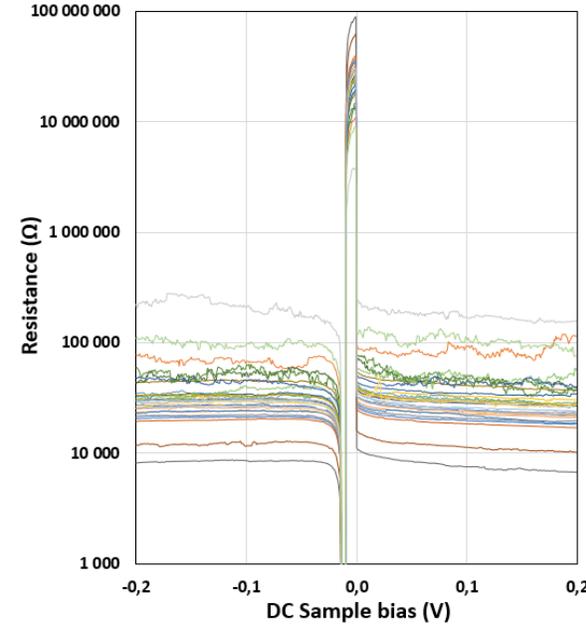
## Spreading resistance (SSRM)

Visualisation difficile des états mémoires  
→ Résistance @ 0.1V  
→  $F_c = 3.7\mu N$



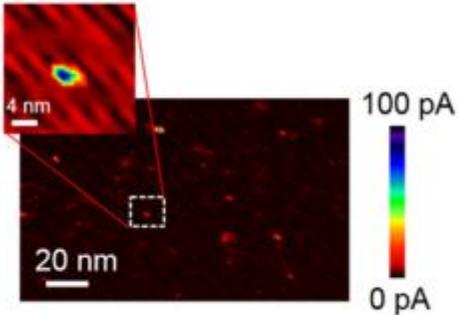
$$R("0") = 15.54\text{ k}\Omega (\sigma = 0.49\text{ k}\Omega)$$

$$R("1") = 18,61\text{ k}\Omega (\sigma = 0.46\text{ k}\Omega)$$



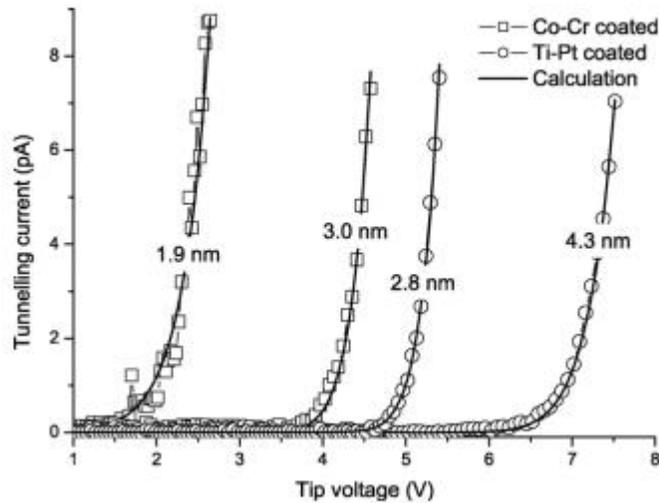
# 1.2. Courant et résistance : mesures

## Conductive AFM (C-AFM) : diélectrique



Cartographie de courant  $SiO_2$  (1.5 nm)

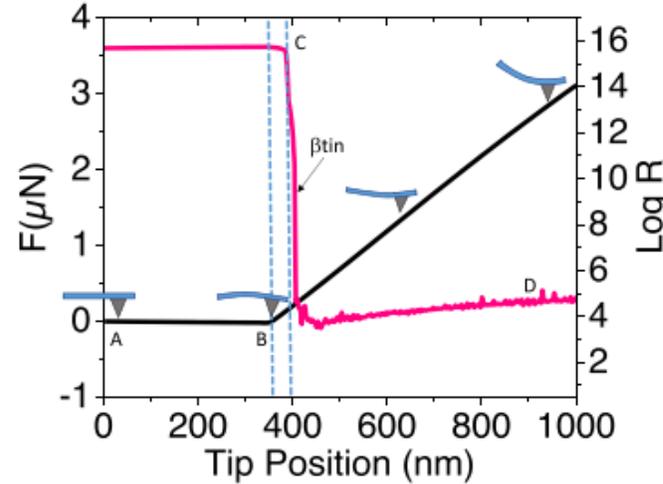
Résolution spatiale < rayon sonde  
( $R_c \approx 25$  nm – PtIr)



I-V pour différence épaisseur  $SiO_2$  et différents revêtement de sonde

U. Celano et al., JAP 117, 214305 (2015)  
W. Frammelsberger et al., ASS 253, 3615 (2007)

## Spreading resistance (SSRM) : semi-conducteur



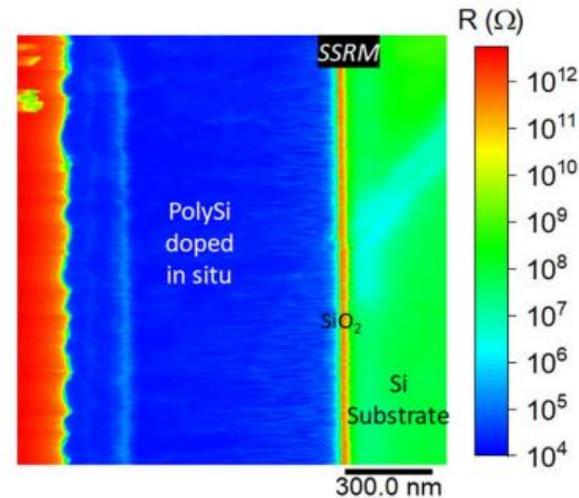
Résistance:

$$R = R_C + R_{SR} + R_M$$

$R_C$ : résistance contact

$R_{SR}$ : spreading resistance

$R_M$ : résistance matériaux

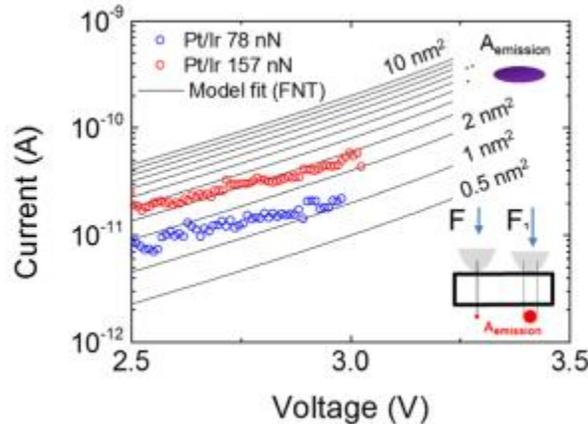
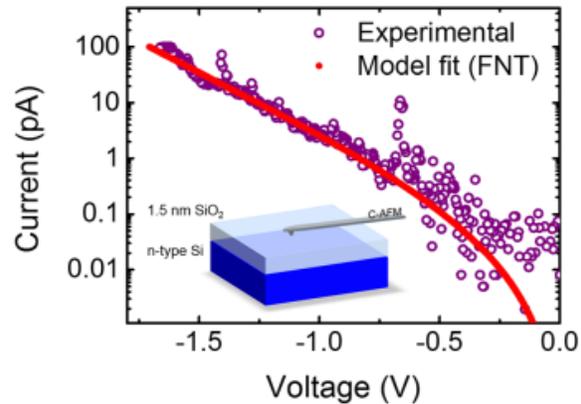


Force de contact importante (qqes  $\mu N$ )

Cartographie de la résistance d'un empilement

R. Coq Germanicus et al., NanoExpress 2, 010037 (2021)

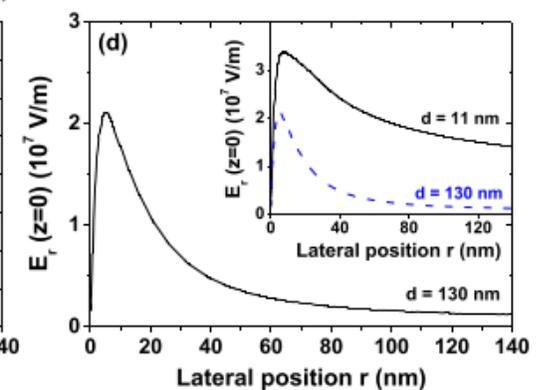
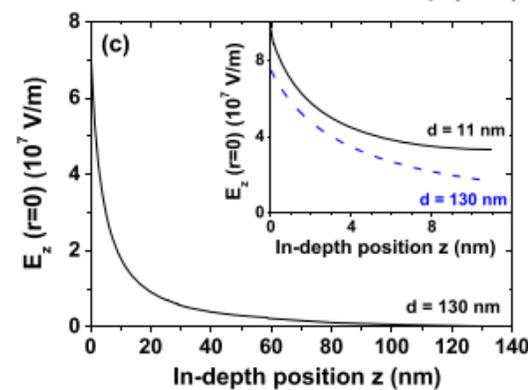
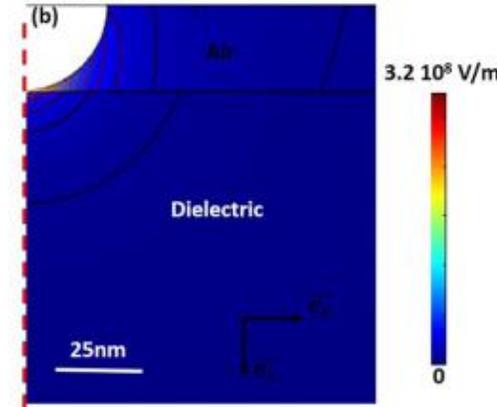
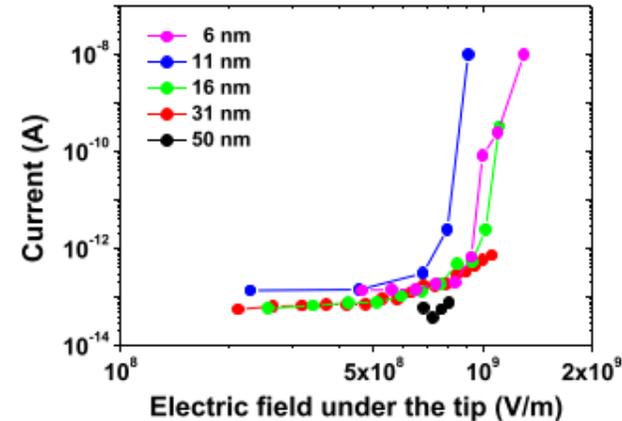
## Isolant – Films ultra mince (qqes nm)



## Isolant – Films « épais » (> 10nm)

C-AFM :  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  ( $F_c \sim 10 \text{ nN}$ )

Épaisseur variable --> comment comparer?



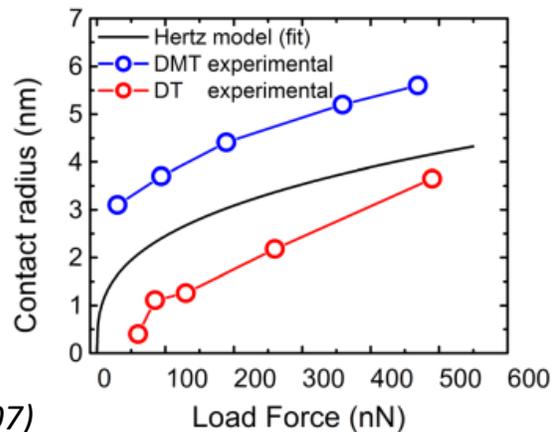
- Surface de collection
- Champ divergeant

F. Mortreuil et al., Nanotechnology 32, 065706 (2021)

Rayon pointe > épaisseur isolant  $\approx$  configuration plan – plan

$$I_{FN} \propto A_{eff} \left( \frac{V_{ox}}{d_{ox}} \right)^2 \frac{1}{\varphi_B} \exp \left( -\alpha \frac{V_{ox}}{d_{ox}} \varphi_B^{3/2} \right)$$

- $A_{eff}$ : surface effective de collection électrique
  - Influence :  $F_C$ ,  $V$  et nature pointe
- $\varphi_B$  : barrière d'injection



U. Celano et al., JAP 117, 214305 (2015)

W. Frammelsberger et al., ASS 253, 3615 (2007)

# 1.3. Du courant à la résistivité/mobilité

## Semi-conducteur - organique

### Lois décrivant le transport de charges

Mobilité dans les semiconducteurs

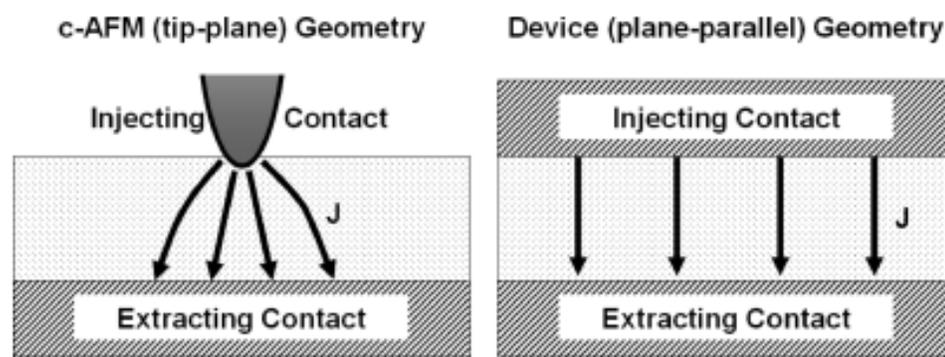
organiques : Loi de Mott-Gurnet (SCLC)

$$J = \frac{8}{9} \epsilon_r \epsilon_0 \mu \frac{U^2}{L^3}$$

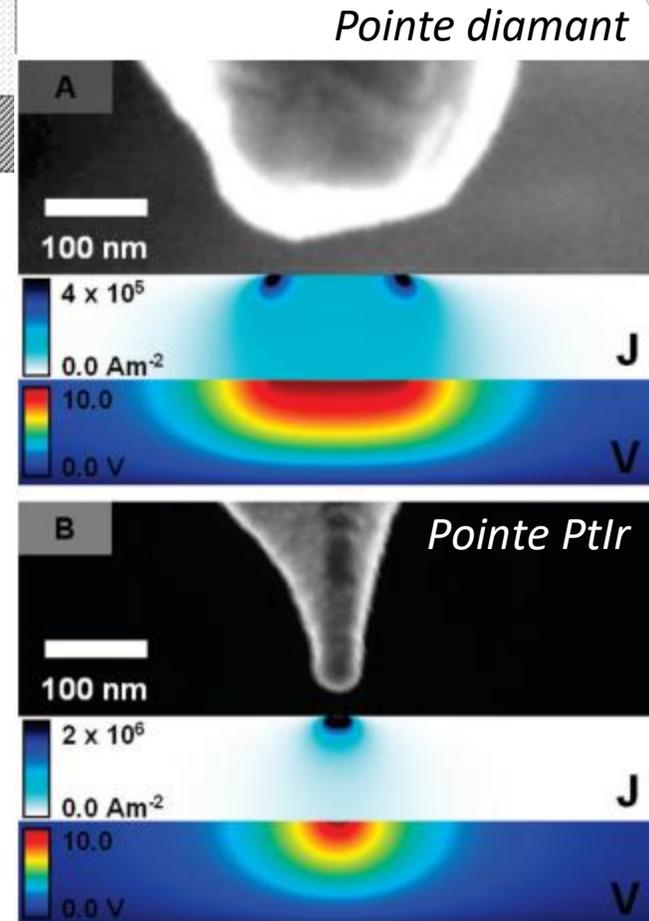
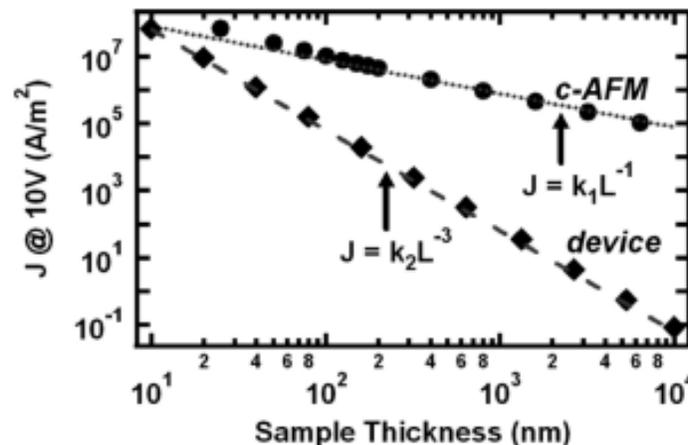
- Densité de courant  $J = I/S$ 
  - Surface de collection  $S$  ?
  - Contact & divergence de  $J$
- Champ électrique  $E = U/L \rightarrow$  divergeant
- Permittivité  $\epsilon_r \rightarrow$  inconnue si matériau hétérogène

**$\rightarrow$  Impossible d'utiliser les lois classiques de transport  $\rightarrow$  erreur mobilité**

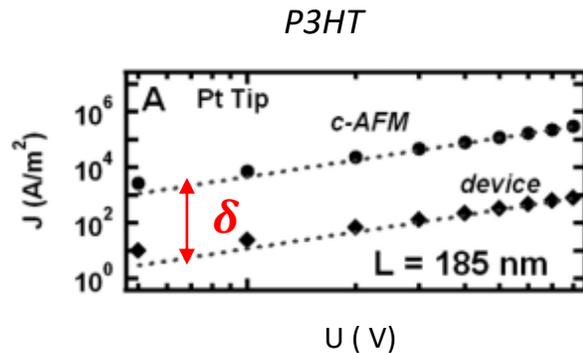
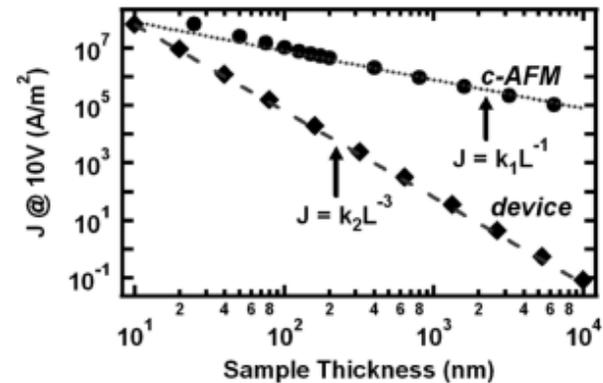
**$\rightarrow$  Nouvelles approches adaptées à la configuration pointe - plan**



Densité de courant sur du P3HT



## Méthode empirique



### Loi de Mott-Gurnet corrigée

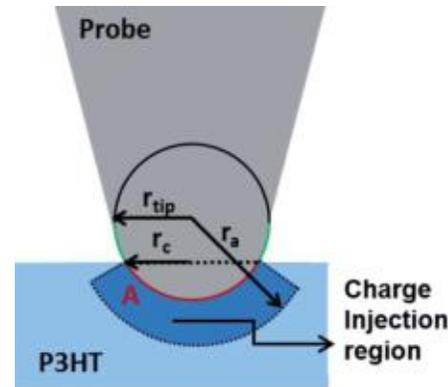
$$J = \alpha \epsilon_r \epsilon_0 \mu \frac{U^2}{L^3} \delta \left( \frac{L}{d} \right)^{1.6}$$

- $\alpha$  : préfacteur (calcul numérique  $\neq 8/9$ )
- $\delta$  : facteur empirique (offset entre C-AFM et device)
- $d$  : surface de collection du courant (estimation)
- **1.6** : coefficient correcteur pour la dépendance J-L

- + Transposable à d'autres polymères (PFB et MDMO-PPV)
- Signification physique des facteurs correctifs
- Estimation de la surface de collection

O. Reid et al., NanoLetter 8, 1602 (2008)

## Méthode Numérique



3 paramètres pour le contact:

- Rayon de la pointe  $r_{tip}$
- Rayon du contact  $r_c \rightarrow$  estimation model de Hertz
- Rayon de la zone où se produit le SCLC :  $r_a$

- Prise en compte de la composante radiale du champ électrique
- Pour large  $r_a$  et faible indentation (meilleure résolution spatiale) :  $J = \frac{3\pi}{8} \epsilon_r \epsilon_0 \mu \frac{r_c^2}{r_{tip}^2 r_a} V^2$

- + Valeur de mobilité conforme à la configuration « devices »
- Estimation de  $r_a$  difficile
- Difficilement applicable aux inorganiques

D. Moerman et al., Nanoscale 6, 10596 (2014)

## Conclusions et perspectives

- C-AFM et SSRM :
  - imagerie de courant / résistance : chemin de conduction)
  - Spectroscopie : propriétés électriques (résistivité, mobilité,...)
- Métaux: extraction résistance (SSRM) → OK
- Semi-conducteur :
  - SSRM : Mesure de résistance OK → extraction de la résistivité??
  - C-AFM : mesure de courant OK → extraction mobilité/résistivité
    - Divergence du champ électrique → modification nécessaire des lois classiques
      - Organique : approche empirique / numérique. Estimation de la surface de contact
      - Inorganique : estimation de la surface de contact???
- Isolant : même problématique que les semi-conducteurs
  - Tout reste à faire sur les isolants inorganiques
    - Surface de contact
    - Modélisation du transport
    - ...

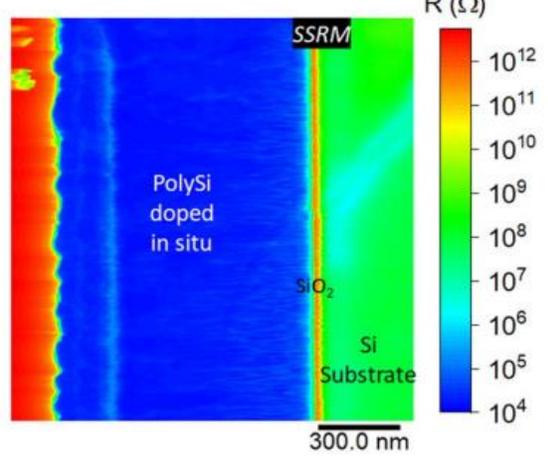
# 2.1. Mesure d'impédance par AFM

Résistance

Capacité / Permittivité

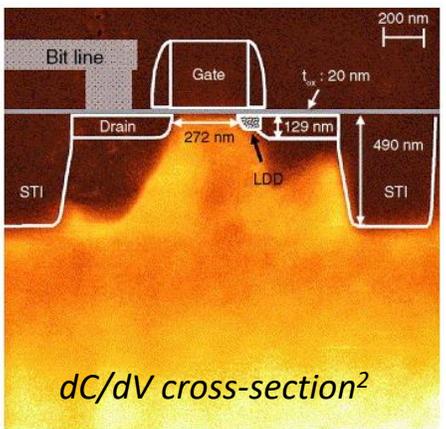
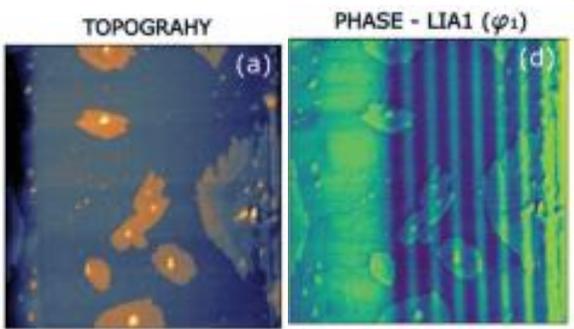
Impédance

SSRM  
→ Mesure directe<sup>1</sup>



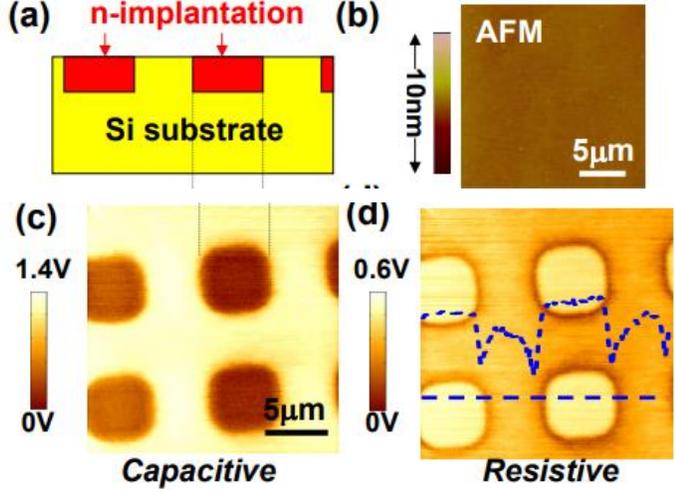
- Scanning Capacitance Microscopy (SCM) :  $dC/dV \rightarrow$  dopant
- Electrostatic Force Microscopy (EFM) : décalage phase/fréquence
- Kelvin Probe Force Microscopy (KPFM) : potentiel surface  
→ Pas de mesure directe (modélisation)

GaAs dopé (cross-section)<sup>3</sup>



- Scanning Microwave Impedance Microscopy (sMIM) : sMIM-R et sMIM-C
- Scanning Microwave Microscopy + VNA

→ Mesure semi-directe (modélisation)

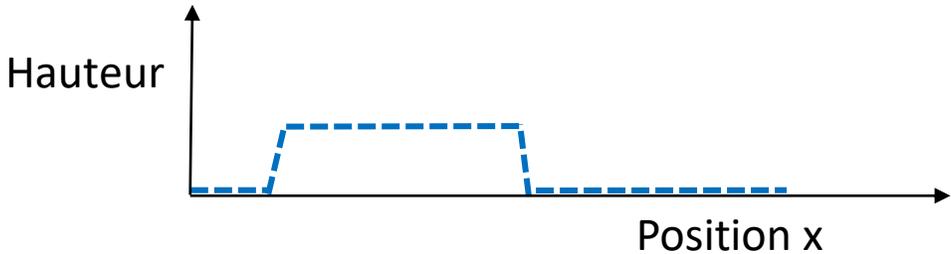
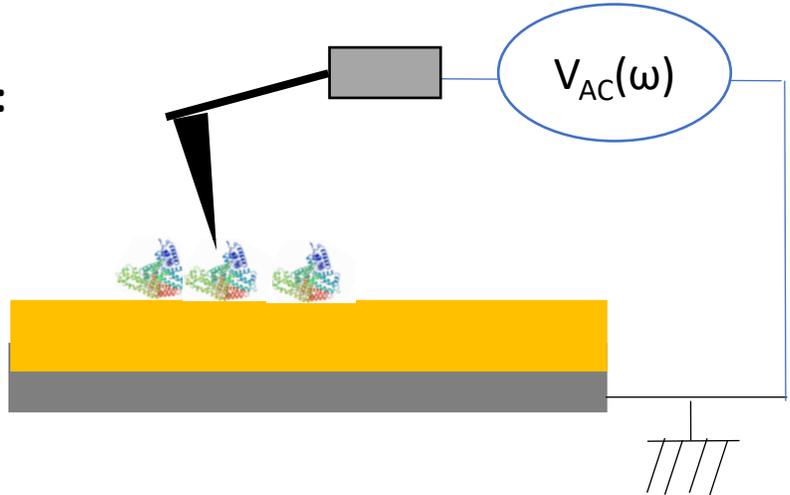


<sup>1</sup> R. Coq Germanicus et al., NanoExpress 2, 010037 (2021)  
<sup>2</sup> J. Heo et al., MSE B 124-145, 301 (2004)  
<sup>3</sup> K. Kadja et al., Adv. Mat. Int. 11, 2300503 (2024)  
<sup>4</sup> K. Lai et al. Rev. Sci. Instrum. 79, 063703 (2008)

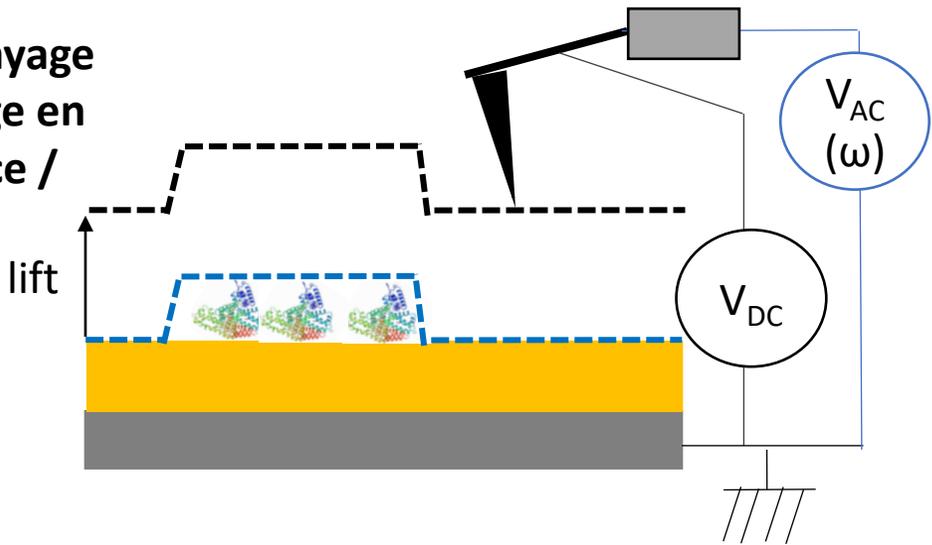
# 2.2.a. Permittivité relative par EFM - principe

Principe de l'EFM DC en mode "lift"

1<sup>er</sup> balayage :  
topographie  
→ Tapping



2<sup>ème</sup> balayage :  
décalage en  
fréquence /  
phase



Force électrostatique  $F_e$  induite par  $V_{DC}$ :

- Statique:  $F_0 = \frac{\partial C}{\partial z} (V_{DC} + V_S)^2$

$V_S$  le potentiel de la surface

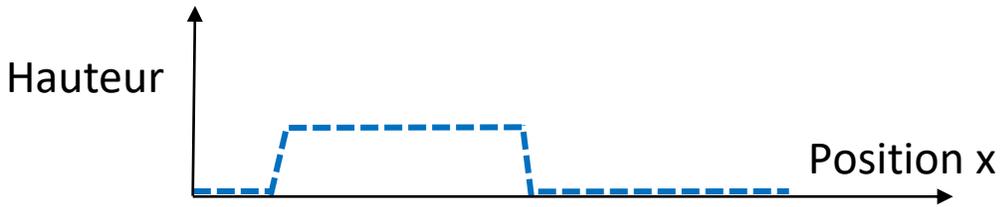
$C$  : capacité sonde AFM - échantillon

Permittivité diélectrique  $\leftrightarrow$  capacité

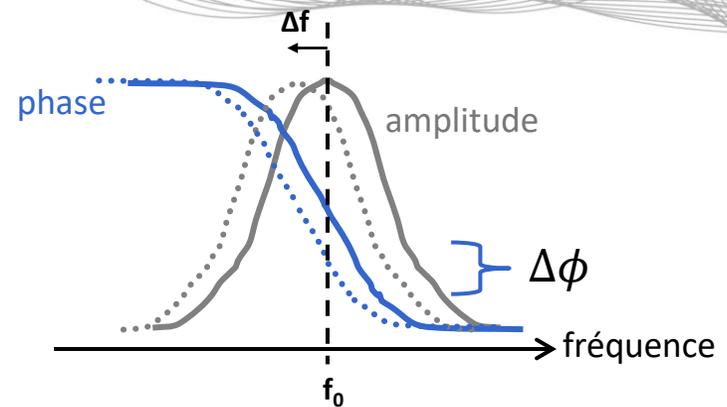
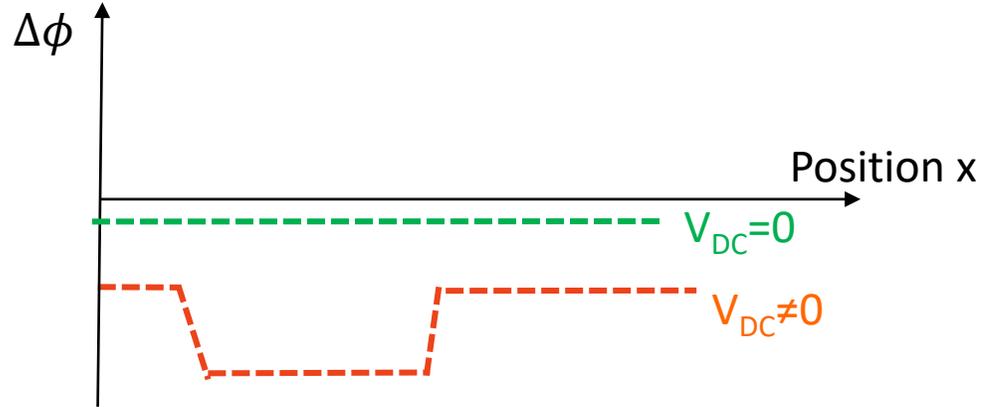
# 2.2.a. Permittivité relative par EFM - principe

Principe de l'EFM DC en mode "lift"

1<sup>er</sup> balayage :  
topographie  
→ Tapping



2<sup>ème</sup> balayage :  
décalage en  
fréquence / phase

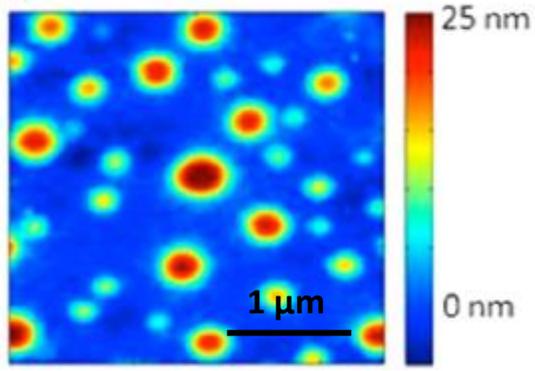


Détection du décalage (à  $f_0$ )

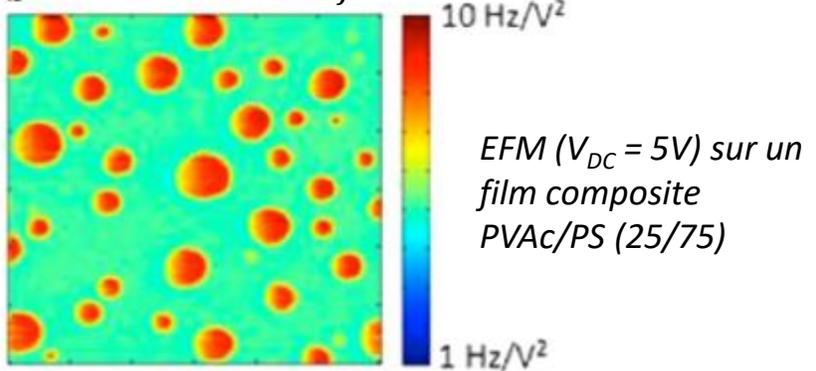
En phase :  $\Delta\phi \propto \frac{\partial F_e}{\partial z}$

En fréquence :  $\frac{\Delta f}{f_0} \propto \frac{\partial F_e}{\partial z}$

a Topographie



b Paramètre  $a_{\Delta f}$



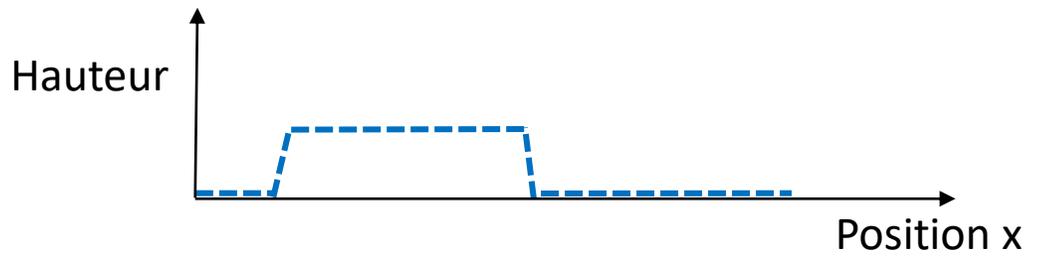
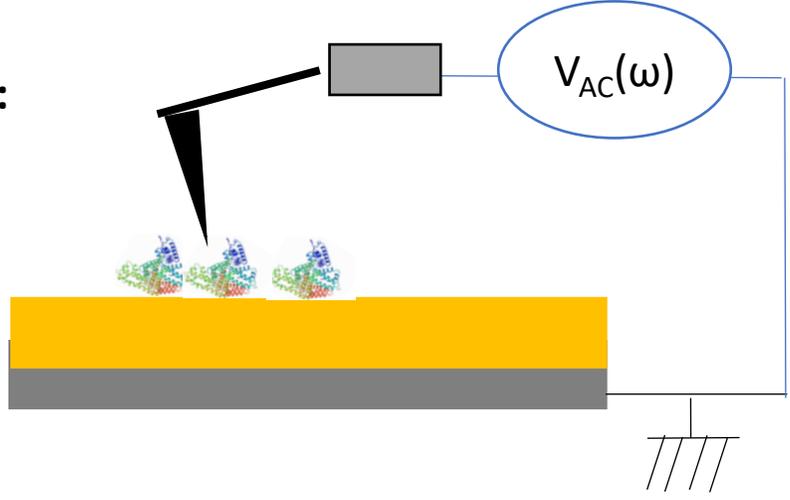
Paramètre  $a_{\Delta f}$

- Expérimentalement : pente de la courbe  $\Delta f = g(V_{DC}^2)$
- Théoriquement :  $a_{\Delta f} = \frac{f_0}{4k} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$

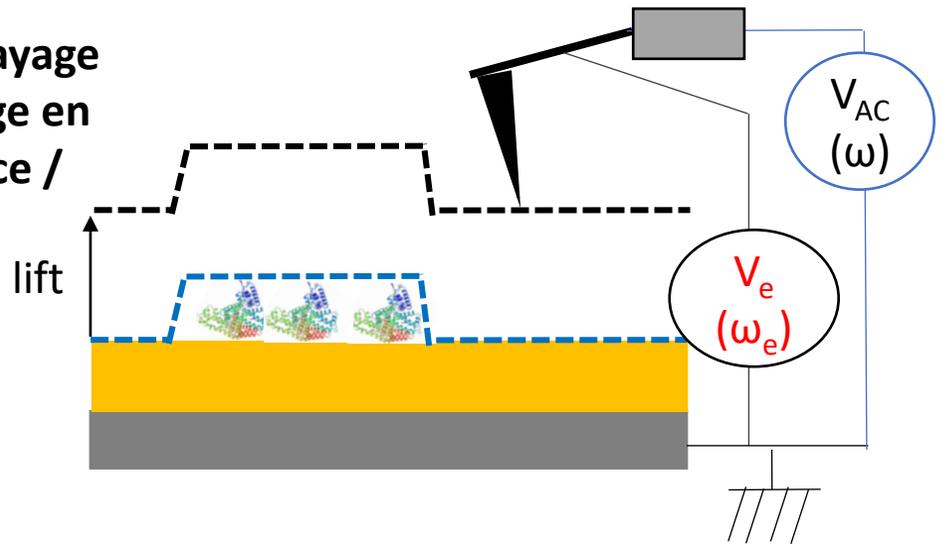
# Laplace 2.2.a. Permittivité relative par EFM - principe

Principe de l'EFM AC en mode "lift" (ou pas !)

1<sup>er</sup> balayage :  
topographie  
→ Tapping



2<sup>ème</sup> balayage :  
décalage en  
fréquence /  
phase  
lift



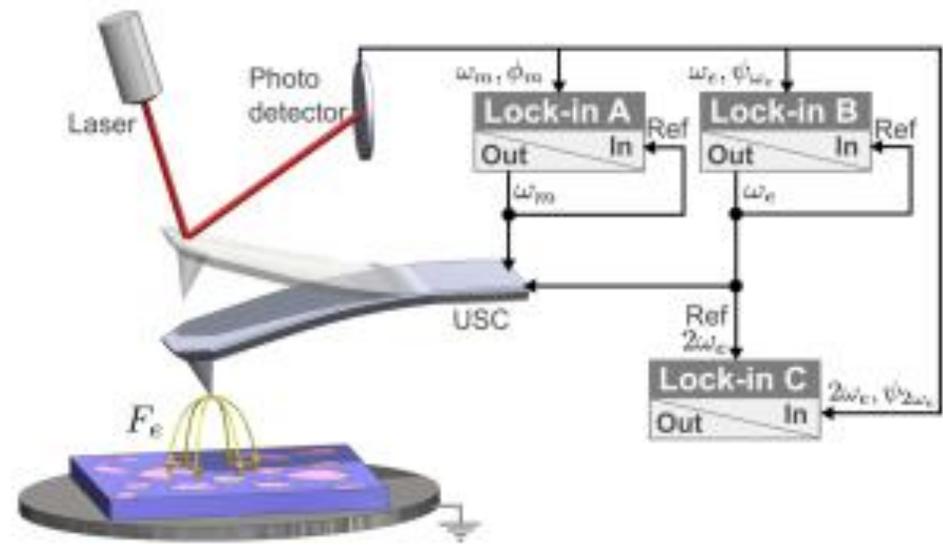
Force électrostatique  $F_e$  avec  $V_e(\omega_e) = V_{DC} + V_e \cos(\omega_e t)$ :

- Statique:  $F_0 = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} ((V_{DC} + V_S)^2 + V_e^2)$
- Dynamique ( $\omega_e$ ):  $F_{\omega_e} = \frac{\partial C}{\partial z} (V_{DC} + V_S) V_e$
- Dynamique ( $2\omega_e$ ):  $F_{2\omega_e} = \frac{1}{4} \frac{\partial C}{\partial z} V_e^2$

Avantage: pas de contribution du potentiel de surface  $V_S$   
Condition :  $\omega_e < \omega$

# Laplace 2.2.a. Permittivité relative par EFM - principe

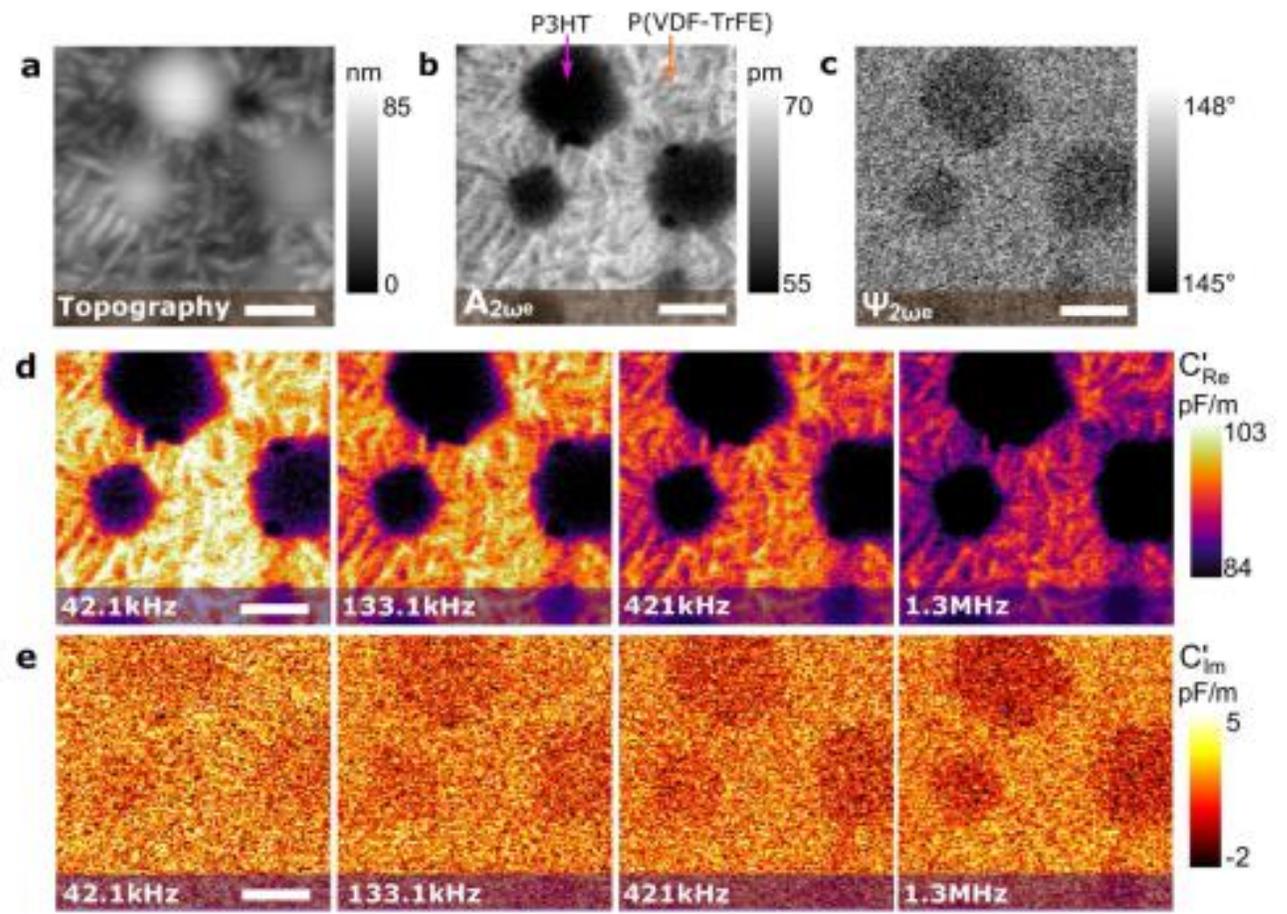
Principe de l'EFM AC en "single pass"



La variation de  $\omega_e \rightarrow$  spectroscopie  
 Détermination de la capacité réelle et imaginaire

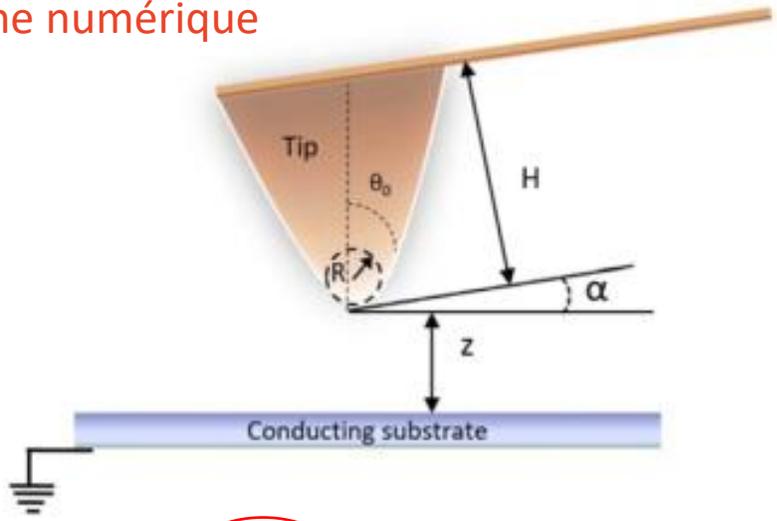
$$C'_{Re} \propto \left| \frac{\partial C}{\partial z} \right| \cos(\Psi_e) \propto kA_{2\omega_e} \cos(\Psi_{2\omega_e})$$

$$C'_{Im} \propto \left| \frac{\partial C}{\partial z} \right| \sin(\Psi_e) \propto kA_{2\omega_e} \sin(\Psi_{2\omega_e})$$



# Laplace 2.2.b. Permittivité relative EFM - quantification

Approche numérique

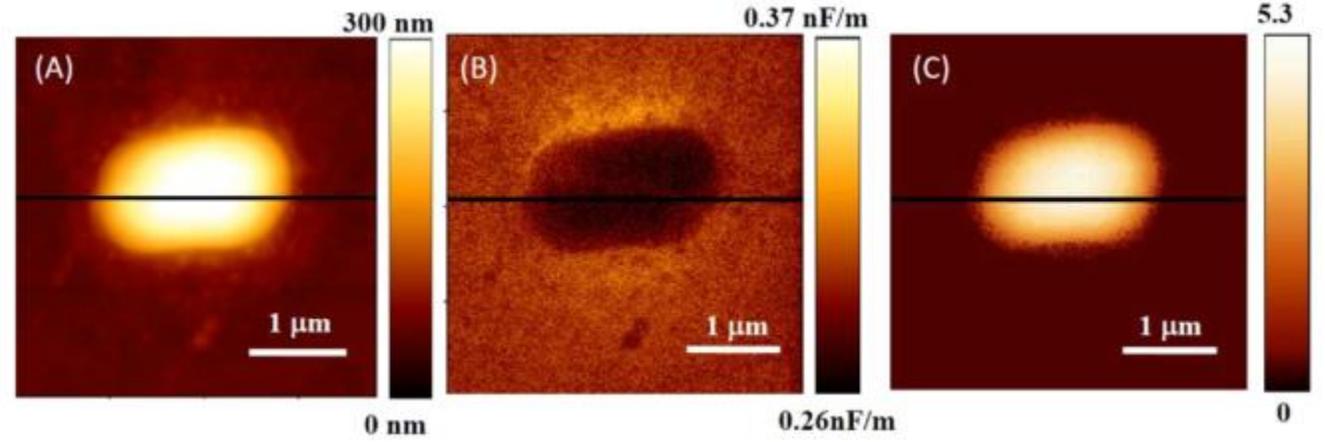


$$F_e = F_{apex} + F_{cone} + F_{cant}$$

Modèle de Hudlet modifié

$$F_{tip-apex} = \pi \epsilon_0 R V^2 \times \left[ \frac{R(1 - \sin \theta_0)}{\left(z + \frac{h}{\epsilon_r}\right) \left[z + \frac{h}{\epsilon_r} + R(1 - \sin \theta_0)\right]} \right]$$

Dielectrique : épaisseur h / permittivité  $\epsilon_r$



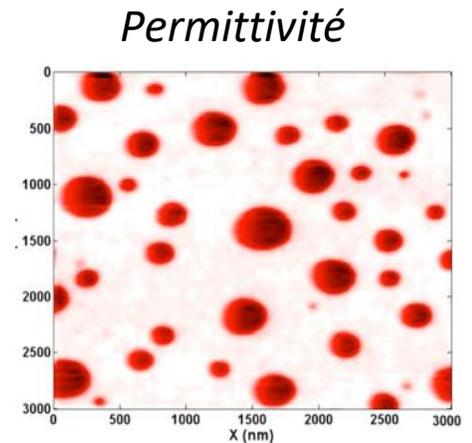
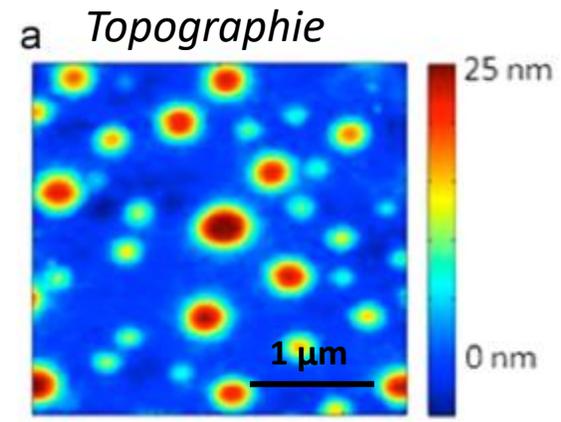
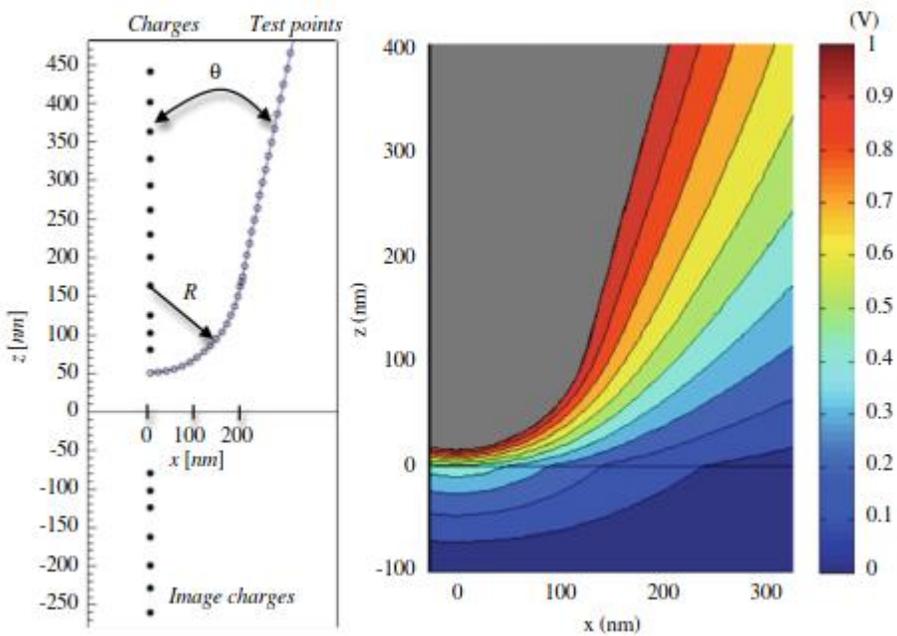
Bacterie E.Coli : (A) Topographie, (B) EFM dC/dz et (c)  $\epsilon_r$ . Mesure en EFM 2 $\omega$

- Beaucoup d'autres modèles
- **Avantages :**
  - rapidité
  - prise en compte facile des variations d'épaisseur
- **Inconvénients:**
  - Non prise en compte du cône et du cantilever
  - Détermination des paramètres de la pointe → calibration métal
  - Limité au matériaux homogènes → permittivité inclusions?

A.V. Valavade et al. Biomed. Phys. Eng. Express 4, 055023 (2016)

# Laplace 2.2.b. Permittivité relative EFM - quantification

## Méthode des charges images



EFM ( $V_{DC} = 5V$ ) sur un film composite PVAc/PS (25/75) @ 70°C

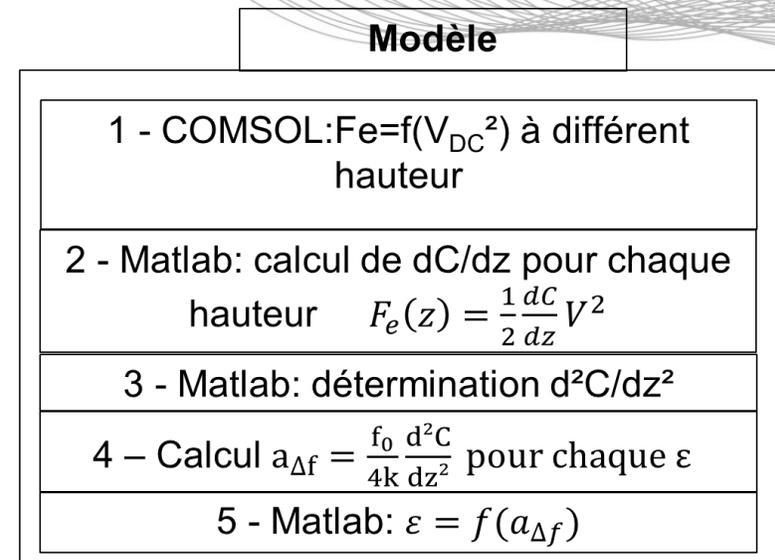
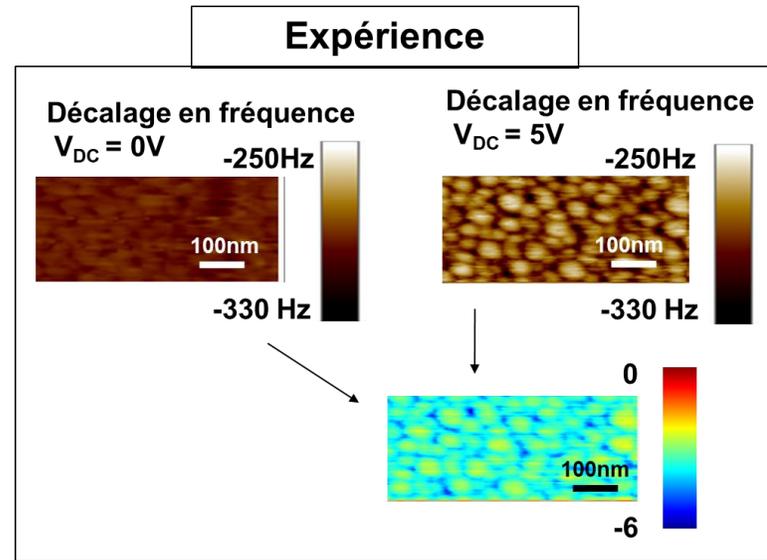
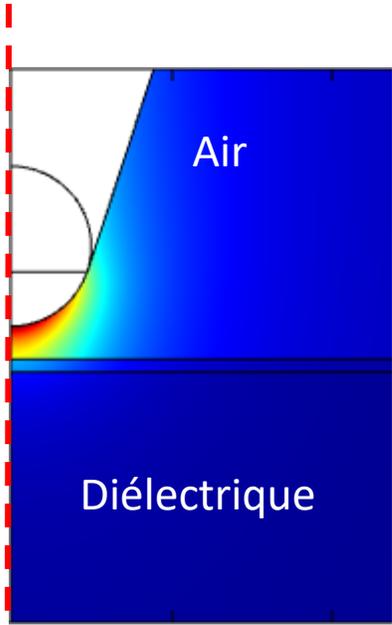
**Permittivité**  
- PVAc :  $8.2 \pm 1.0$   
- PS:  $2.6 \pm 0.3$

- Trouver la distribution de charges ponctuelles reproduisant le potentiel appliqué + conditions limites
- Calcul du champ électrique
- Calcul de la force électrostatique

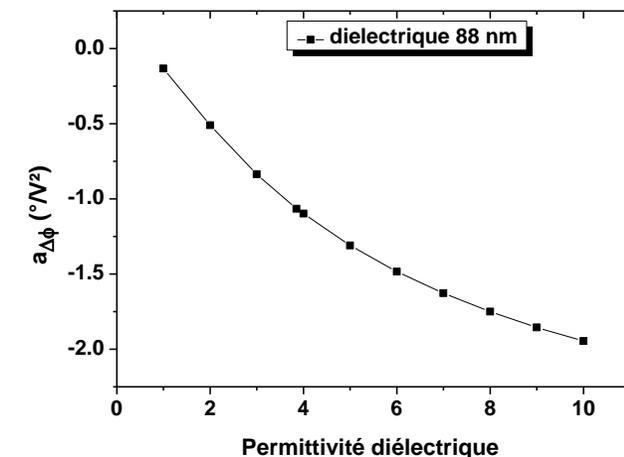
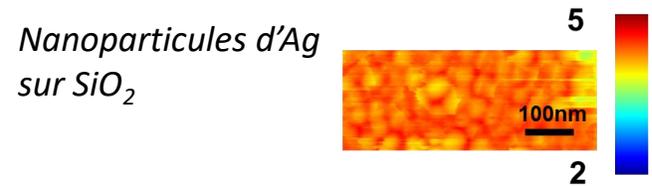
- **Avantages :**
  - Prise en compte cône
- **Inconvénients:**
  - détermination des paramètres de la pointe
  - Modélisation d'un matériau hétérogène difficile

# Laplace 2.2.b. Permittivité relative EFM - quantification

## Approche éléments finis



### Cartographie de permittivité diélectrique

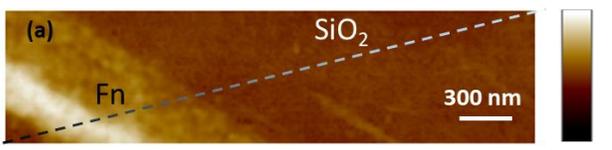


- **Avantages :**
  - Prise en compte cône
  - Modélisation de matériaux hétérogènes
- **Inconvénients:**
  - détermination des paramètres de la pointe → calibration sur  $SiO_2$  (ou référence)
  - Prise en compte des différences d'épaisseur fastidieuse

# Laplace 2.2.b. Permittivité relative EFM - quantification

## Approche éléments finis

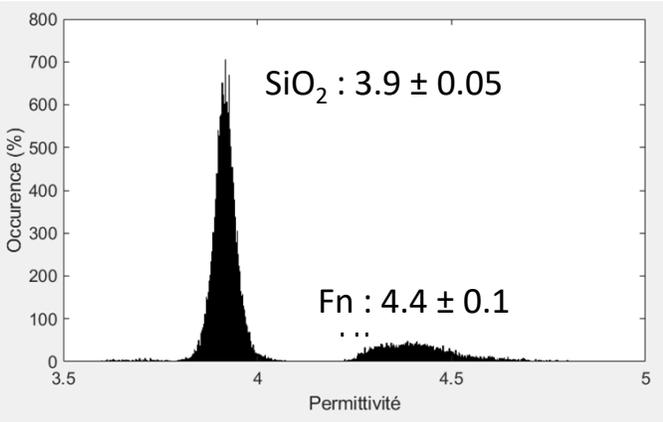
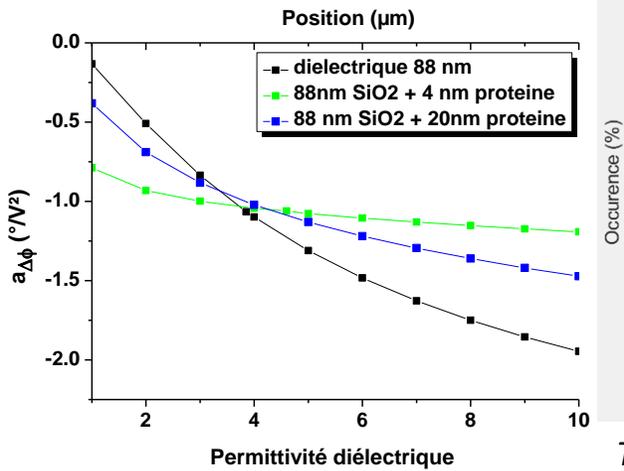
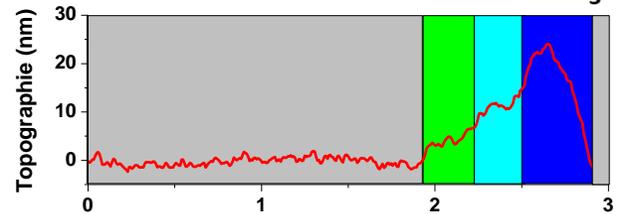
Topographie sur Fn (0.11μM) sur SiO<sub>2</sub>



Permittivité sur Fn (0.11μM) sur SiO<sub>2</sub>



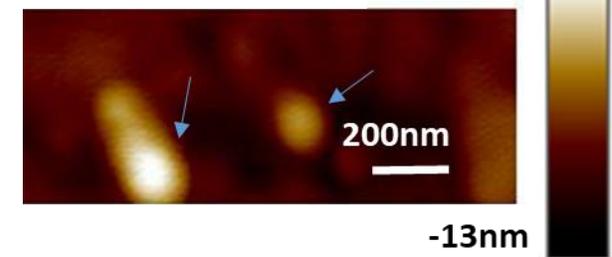
Prise en compte des différence d'épaisseur  
Mesure de la permittivité de chaque couche



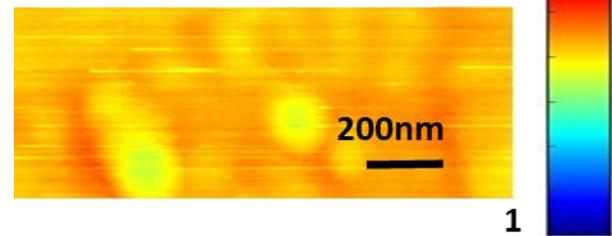
To be published (ANR BENDIS)

Nanocomposite : SiNx (20nm) dans PI

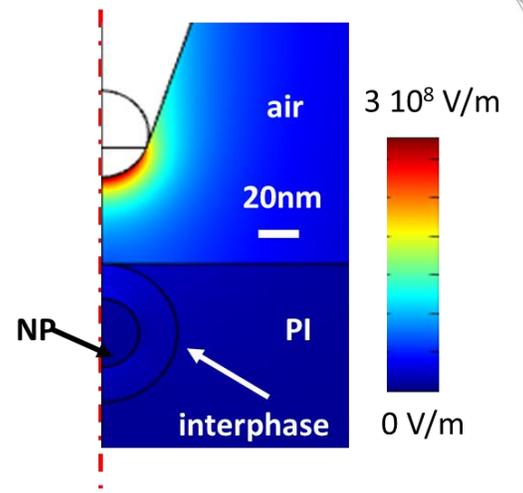
Topographie



Permittivité

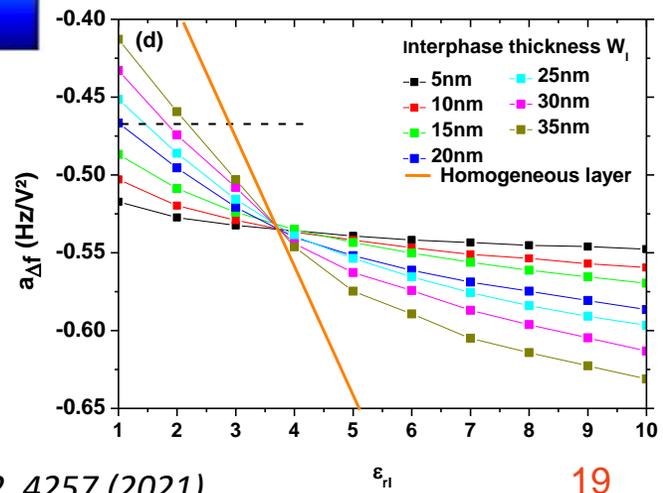


Champ électrique



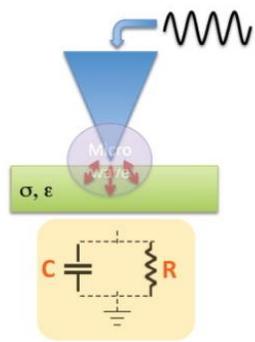
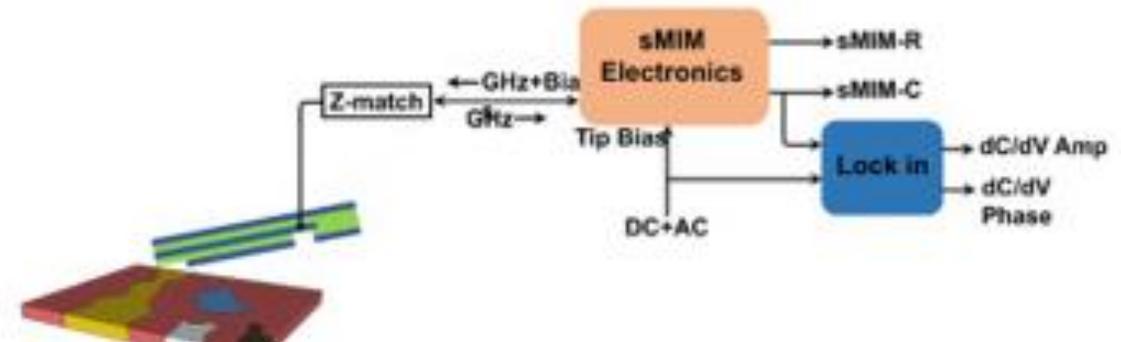
## Permittivité

- PI :  $\epsilon_r \approx 3.8 \rightarrow$  OK
- SiNx :  $\epsilon_r \approx 7.5 \neq 3$
- Interphase :  $1.5 \pm 0.4$

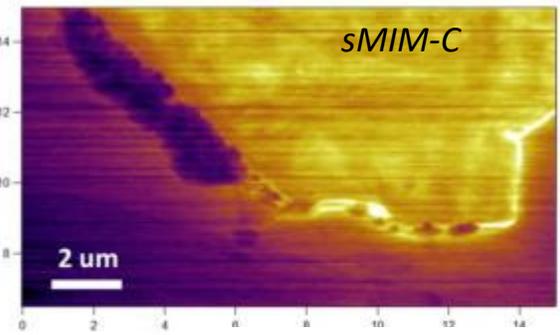


M. Houssat et al., Nanotechnology 32, 4257 (2021)

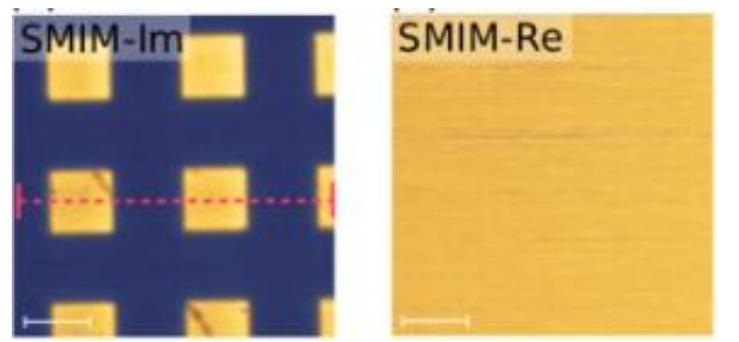
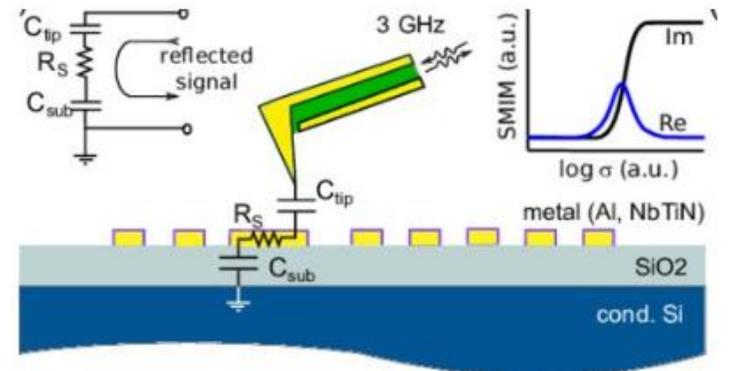
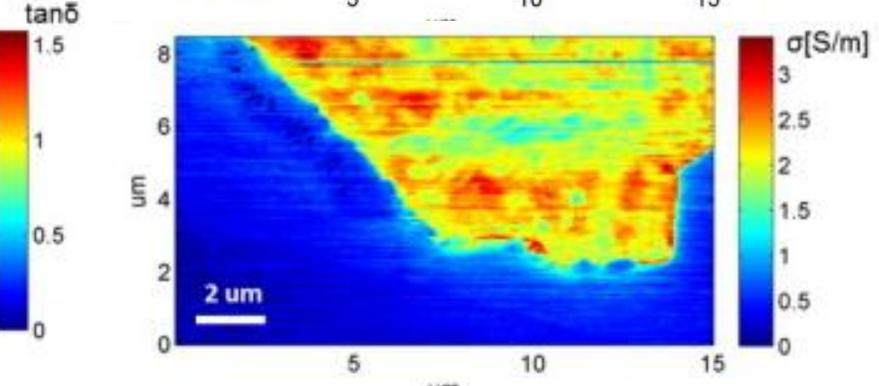
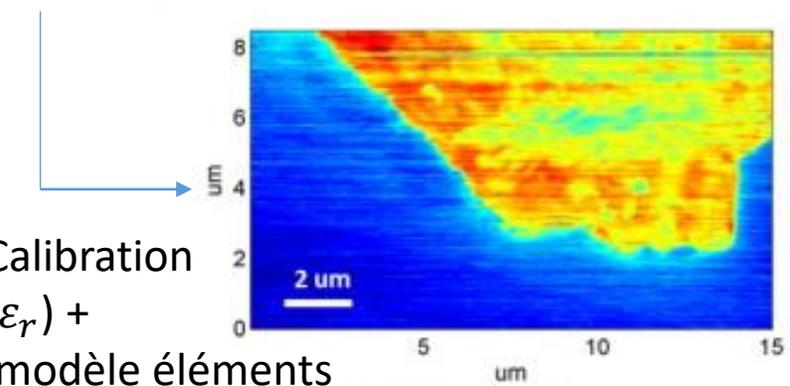
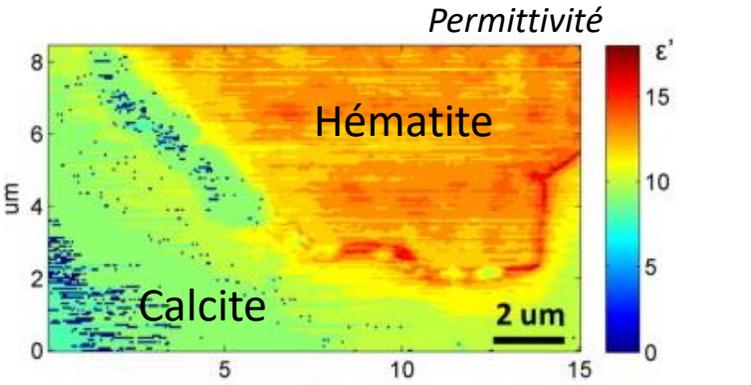
# 2.3. Permittivité diélectrique -sMIM



Plots métalliques sur SiO<sub>2</sub>  
 - Uniquement sMIM-C car substrat SiO<sub>2</sub>



Calibration sur  $\epsilon_r$  connu



H. Thierschmann et al., Phys. Rev. Appl. 13, 014039 (2020)

T. Monti et al., Int. J. Mineral Proc. 151, 8 (2016)

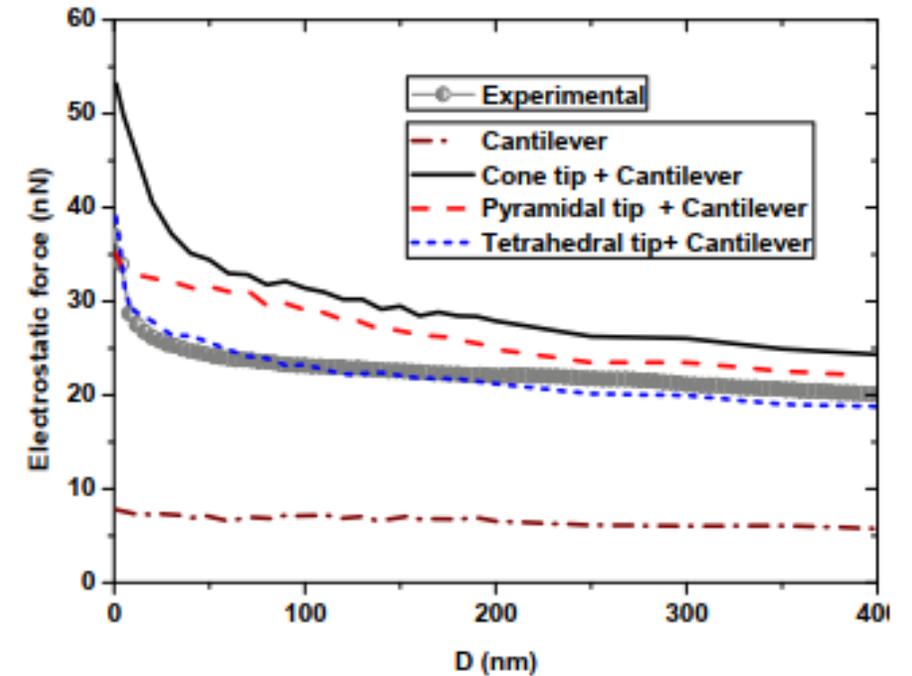
Calibration ( $\epsilon_r$ ) + modèle éléments finis (AC/DC)

### Mesures de permittivité

- Grande variété de méthode disponible
- Détermination de la permittivité → modélisation nécessaire
  - Modèle numérique.
    - + Prise en compte facile des différences de hauteurs
    - Mesure quantitative difficile : Non prise en compte du cône et du cantilever
  - Méthode des charges images.
    - + Prise en compte du cône
    - Difficile de prendre en compte différence de hauteur / hétérogénéités du matériaux
  - Méthode par éléments finis.
    - + Mesure quantitative
    - + Prise en compte de l'hétérogénéité des échantillons
    - Difficile de prendre en compte les différences d'épaisseur

### Nécessité de modéliser la configuration réelle

Force électrostatique en fonction de la distance  $D$  –  
Modélisation éléments finis

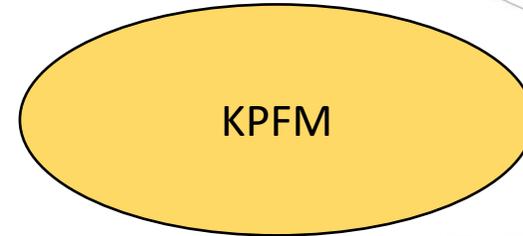
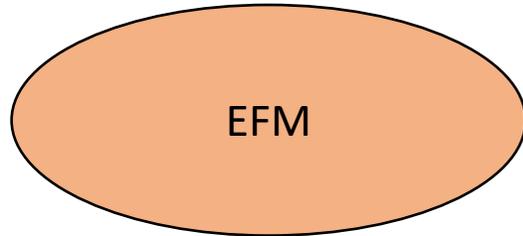


- Meilleur modèle : tétraèdre + cantilever
- $dC/dV$  : modèle cône suffit

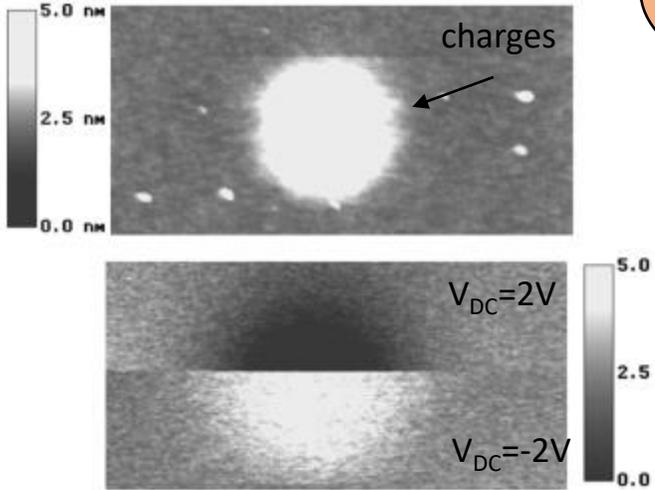
A. Boularas et al., TDEI 23, 705 (2016)

# 3.1. Mesures de charges

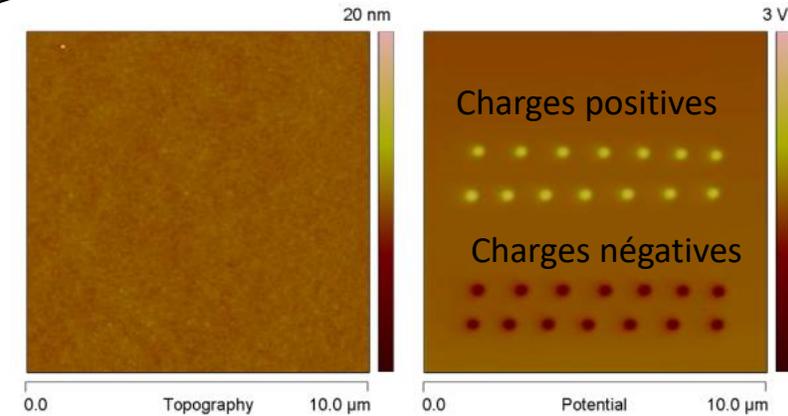
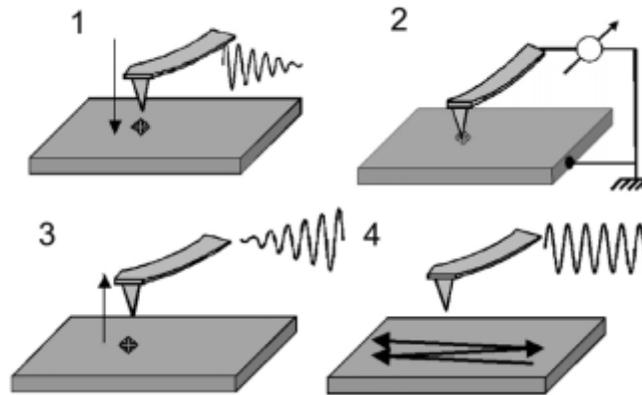
Topographie et décalage en fréquence pour différent  $V_{DC}$



Topographie et potentiel de surface pour différentes quantité de charge injectée dans PMMA



Injection de charge localement (pointe AFM)



- Décalage en fréquence ou en phase  $\rightarrow$  densité de charge
- Le signal lu dépend de la tension  $V_{DC} \rightarrow$  signe des charges non « évident »

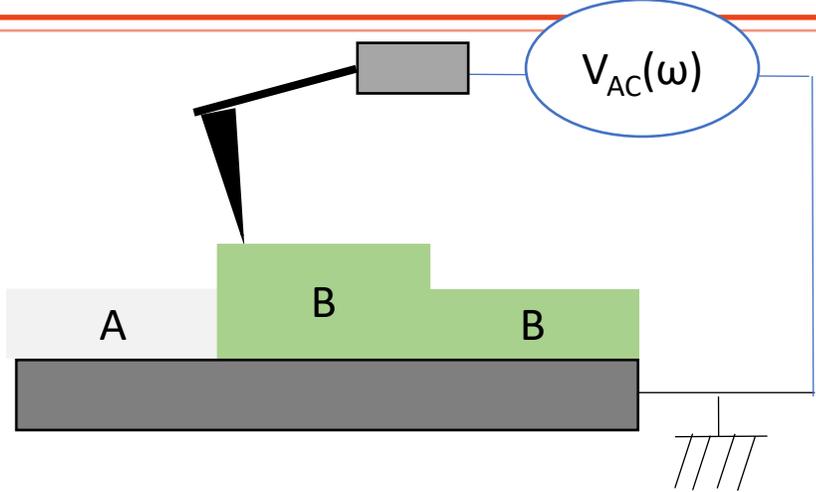
- Modification du potentiel de surface  $\rightarrow$  densité de charge
- Signe du potentiel de surface  $\rightarrow$  signe des charges

F. Marchi et al., J. Electrostat. 66, 358 (2006)

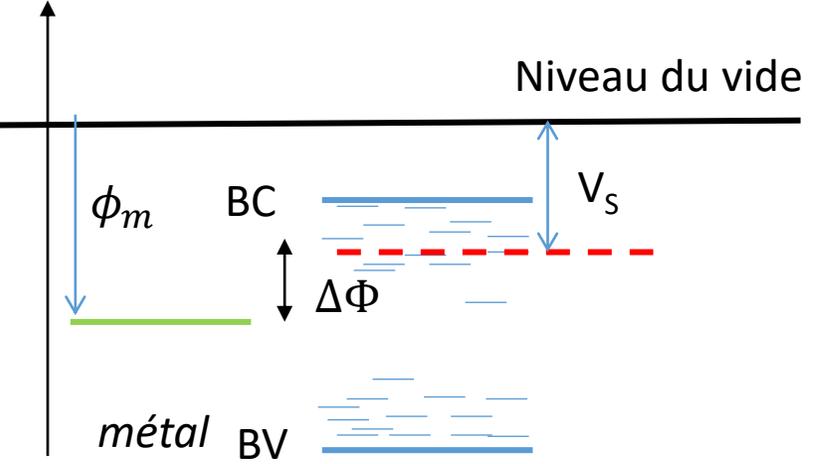
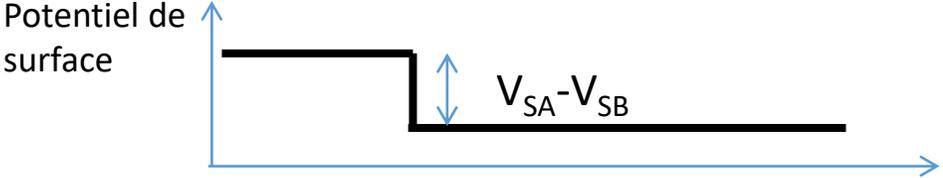
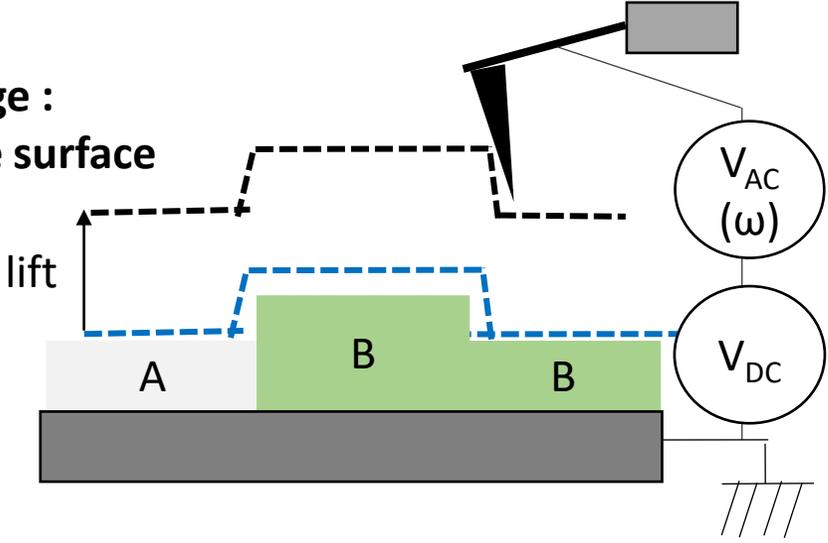
L. Ressier et al., Nanotechnol. 19, 135301 (2008)

# 3.2. Principe du KPFM – mode lift

1<sup>er</sup> balayage :  
topographie  
→ Tapping



2<sup>ème</sup> balayage :  
potentiel de surface



**Modulation d'amplitude (AM-KPFM)**

Annulation de la force électrostatique par  $V_{DC}$

$$F(\omega) = -\frac{dC}{dz} \cdot (\Delta\Phi - V_{DC}) \cdot V_{AC}\sin(\omega t)$$

**Modulation de fréquence (FM-KPFM)**

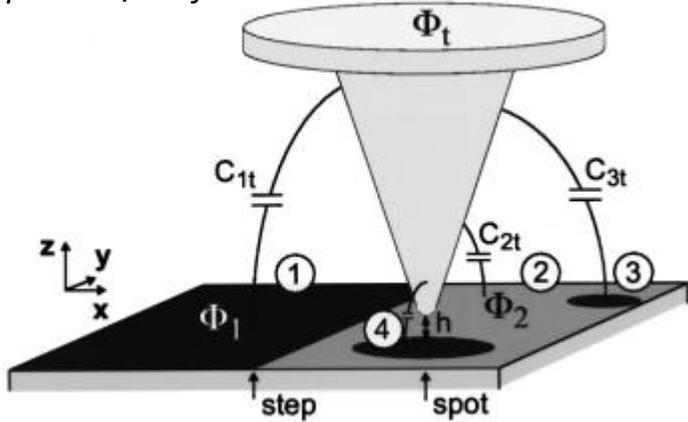
Annulation du gradient de force électrostatique

$$\frac{dF(\omega)}{dz} = -\frac{d^2C}{dz^2} \cdot (\Delta\Phi - V_{DC}) \cdot V_{AC}\sin(\omega t)$$

# 3.3. Potentiel de surface : mesuré vs réel

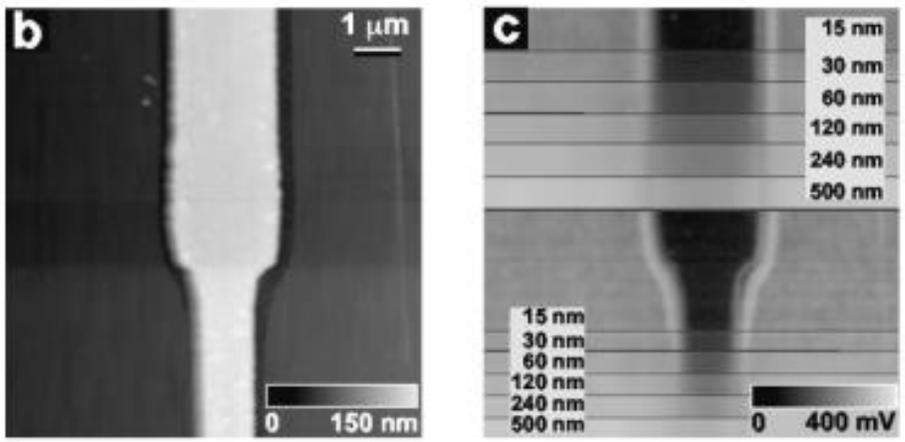
Capacités parasites

Schématisation des interactions pointes / surface<sup>1</sup>



Effet de la hauteur de lift

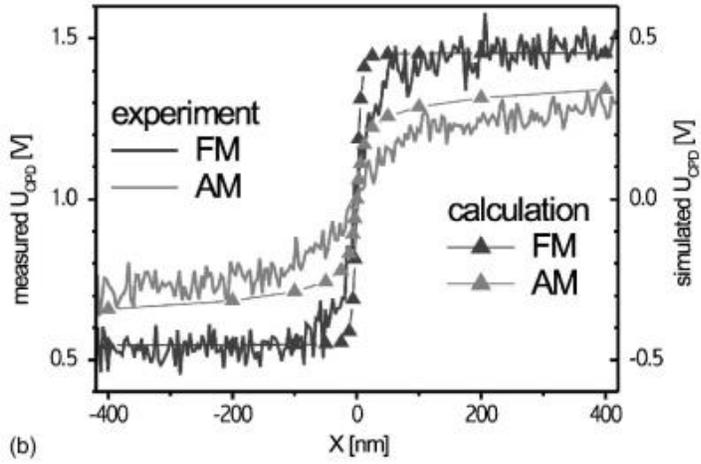
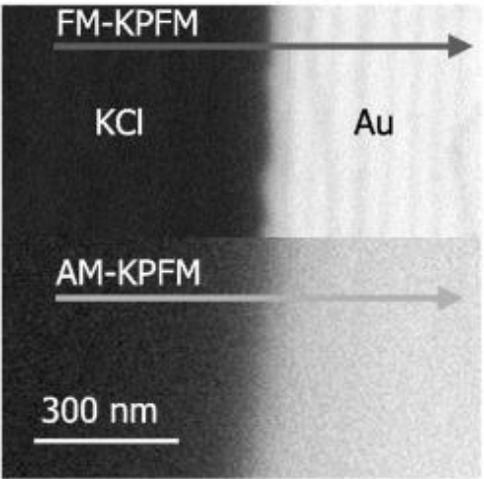
Topographie et potentiel de surface en fonction du lift<sup>1</sup>



- Amélioration résolution spatial
  - Diminution du lift
  - FM-KPFM
- Amélioration rapport signal / bruit : AM-KPFM

Effet du mode

Profil de potentiel de surface entre KCl et Au<sup>2</sup>

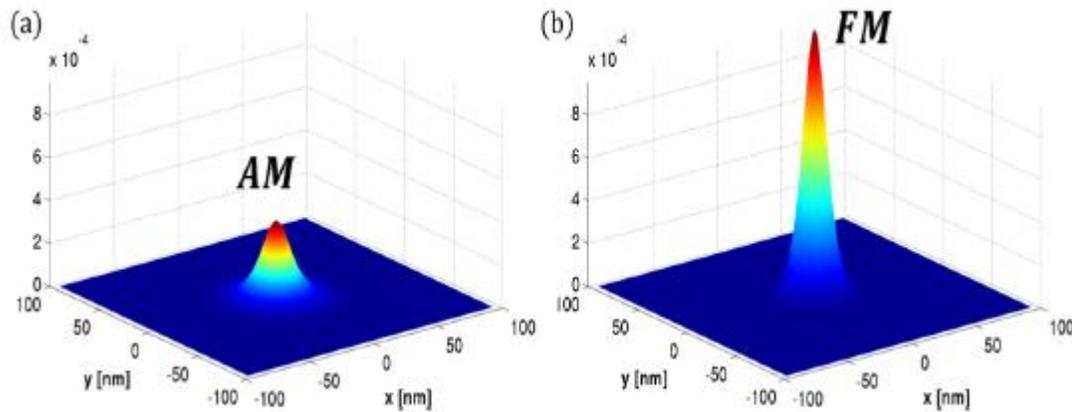


Comment connaitre le potentiel de surface réel?

<sup>1</sup> H.O. Jacobs et al., JAP84, 1169 (1998)  
<sup>2</sup> U. Zerweck et al., PRB 71, 125424 (2005)

## Méthode de déconvolution

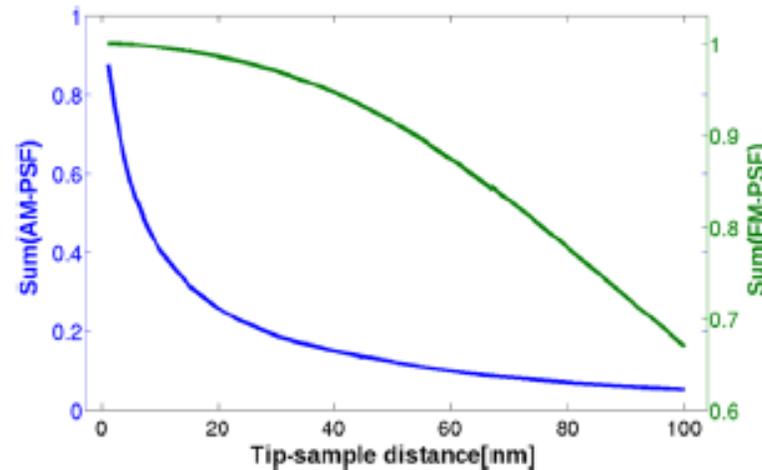
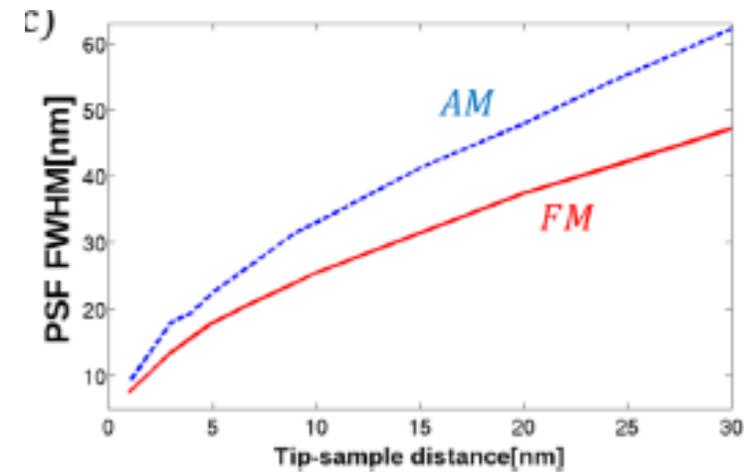
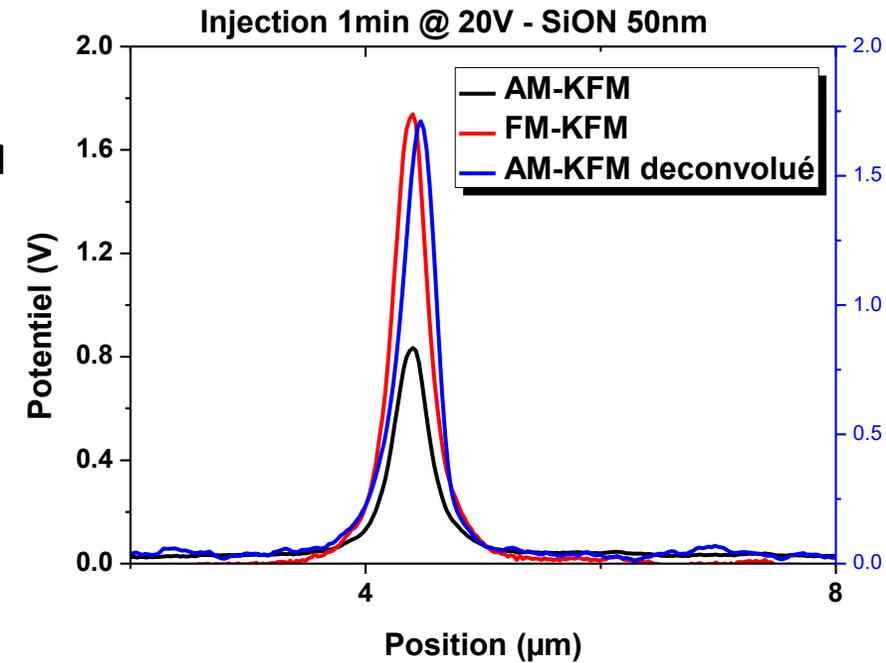
Point Spreading Function → fonction de transfert de la mesure KPFM<sup>1</sup>



### Potentiel « réel »

- Mesure en FM-KFM
- Déconvolution du potentiel en AM-KPFM

Application à l'étude des charges injectées localement (résultats non publiés)

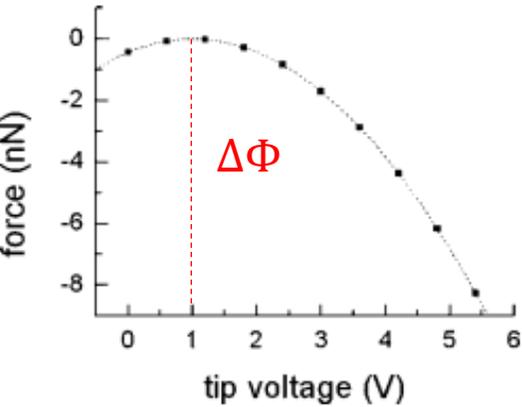
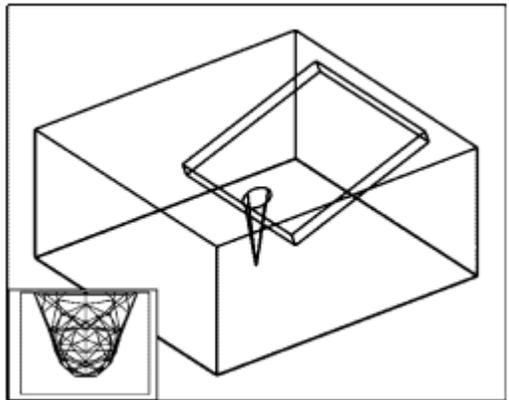


<sup>1</sup> G. Cohen et al., Nanotechnol. 24, 295702 (2013)

# 3.4. Modélisation du KPFM

## Calcul de force électrostatique

Calcul de la force verticale par éléments finis<sup>1</sup>



<sup>1</sup> D.S.H. Charrier et al, ACS Nano 2, 622 (2008)

<sup>2</sup> E. Palleau et al., Nanotechnology 21, 225706 (2010)

<sup>3</sup> L. Borowik et al., APL 96, 103199 (2010)

## Prise en compte des termes croisés

Modélisation du potentiel en AM-KPFM<sup>2-3</sup>

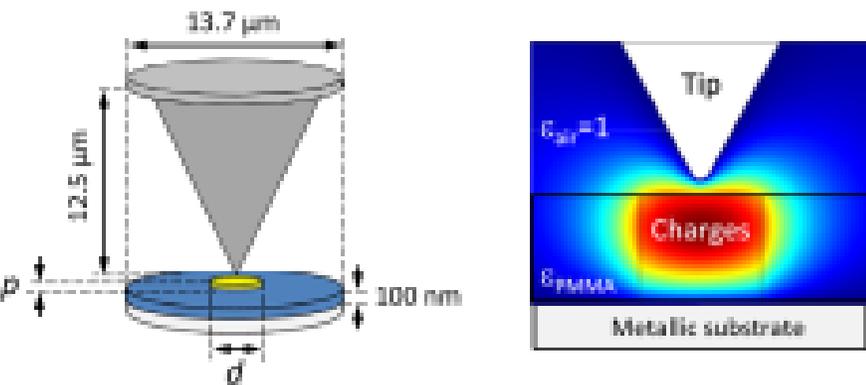
$$\Delta\Phi = -V_{DC} \frac{F_{Q,V_{DC}} - F_{Q,V_{DC}=0} - F_{Q=0,V_{DC}}}{2F_{Q=0,V_{DC}}}$$

- $F_{Q,V_{DC}}$ : terme croisé (influe  $V_{DC}$  et  $Q$ )
- $F_{Q,V_{DC}=0}$ : contribution des charges images
- $F_{Q=0,V_{DC}}$ : force électrostatique induite par  $V_{DC}$

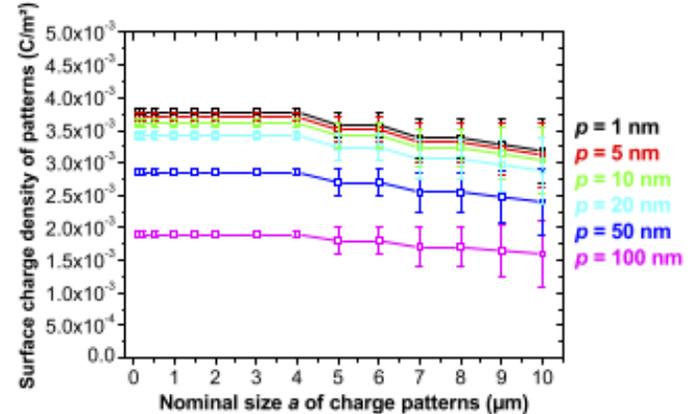
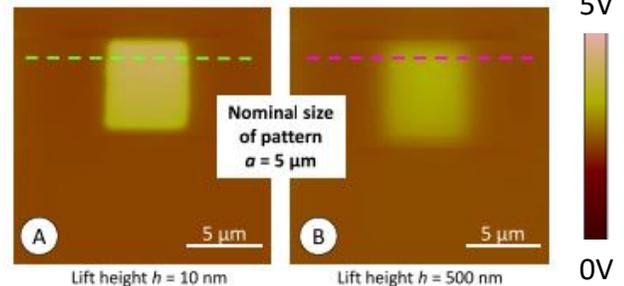
← Limitation : KPFM non sensible aux charges images →

Modélisation existante pour FM-KPFM<sup>3</sup>

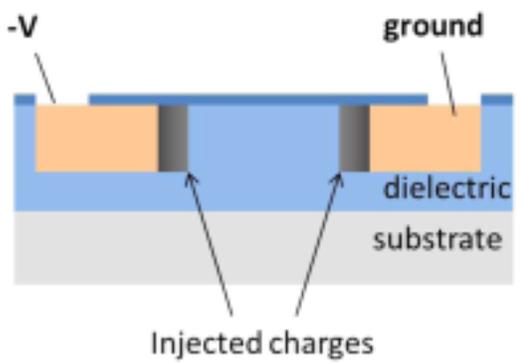
Etude des charges injectées localement dans le PMMA<sup>2</sup>



- Détermination de la densité de charge
- Profondeur de pénétration → inconnue



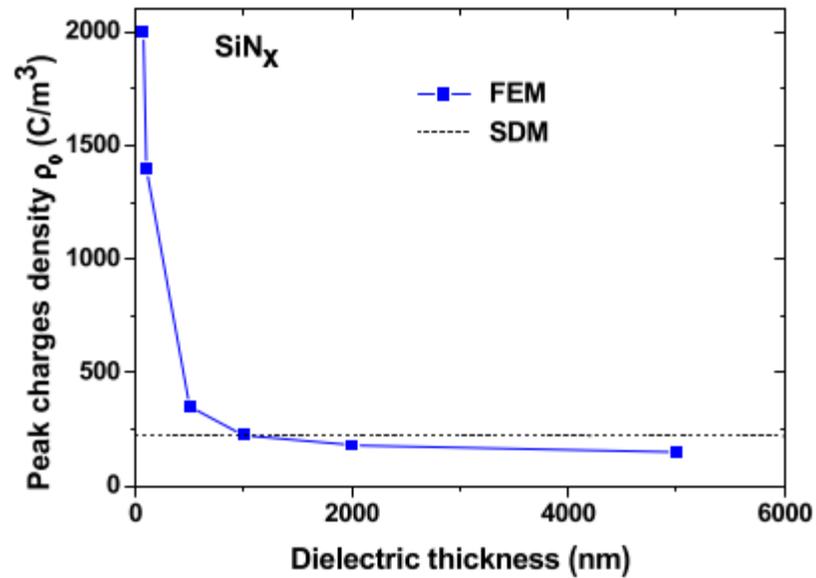
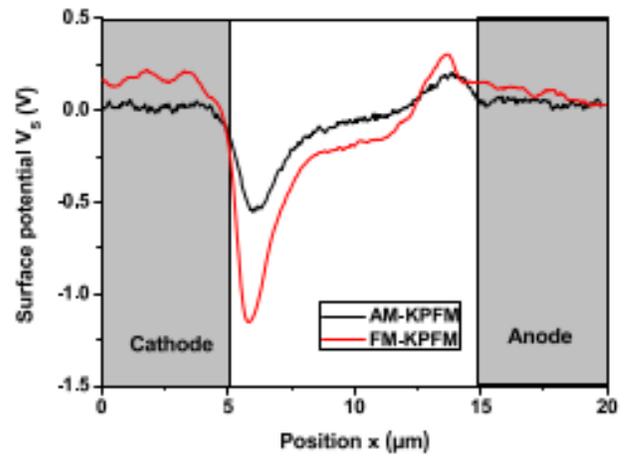
## Charges injectées – Electrodes latérales



- Détermination des profils de charges injectées
- Méthode dépend de l'épaisseur
  - Film mince (<1µm): FEM
  - Film épais (> 1µm): SDM
- Applicable à l'étude des charges d'interface

→ poster Antonella Hugo

Charges injectées dans SiNx (1h @ -40V)<sup>1</sup>

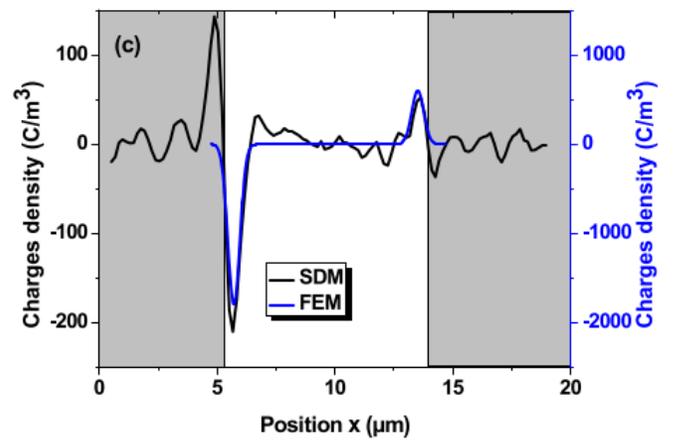
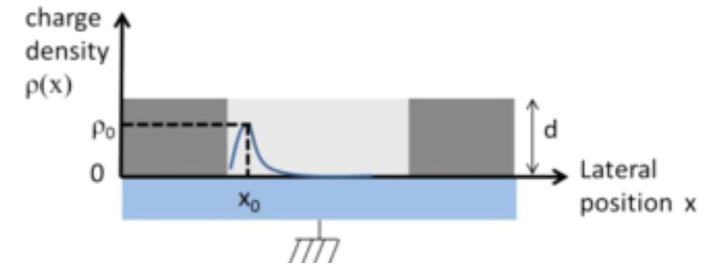


KPFM : potentiel de surface réel

### Détermination de la densité de charges

- Modèle de la dérivée seconde (SDM)
- Modélisation par éléments finis (FEM)

$$\rho(x) = -\epsilon_0 \epsilon_r \frac{d^2 V_s}{dx^2}$$



<sup>1</sup> C. Villeneuve-Faure et al, Nanotechnology 28, 505701 (2017)

### Mesures de charges 1D – Charges de surface

- Modélisation de la force électrostatique : éléments finis ou analytique

### Mesures de charges 2D – Electrodes latérales

Deux approches

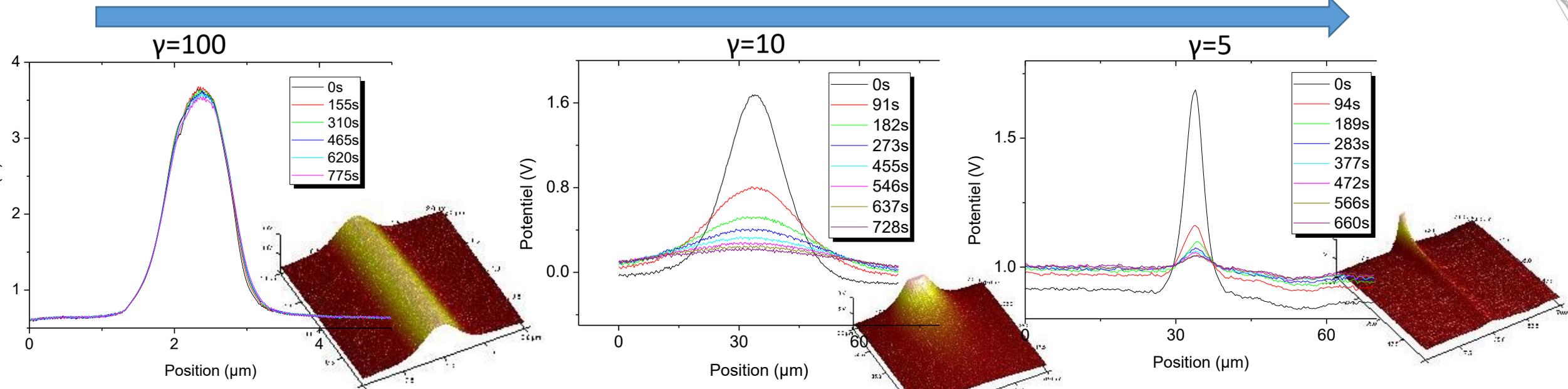
- Méthode de la dérivée seconde : film épais ( $> 1\mu\text{m}$ )
  - Méthode par éléments finis : film mince ( $< 1\mu\text{m}$ )
- + Mesure en FM-KPFM : plus proche du potentiel de surface réel

### Mesures de charges 3D – Injection charges localisée en volume

- Modélisation par éléments finis nécessaires pour calcul de la force électrostatique
- Détermination de la densité de charges possible si profondeur de pénétration connue
  - Profondeur de pénétration inconnue en général
  - Nécessite de nouvelles approches
    - Nouvelle méthode de mesures?
    - Combiner plusieurs mesures? KPFM + EFDC
    - Autres?

Identification des mécanismes de dissipation des charges dans SiOxNy

Augmentation de la concentration en Si →



Charges piégées

Diminution de l'aire →  
Dissipation en volume  
Augmentation de la largeur  
→ dissipation latérale

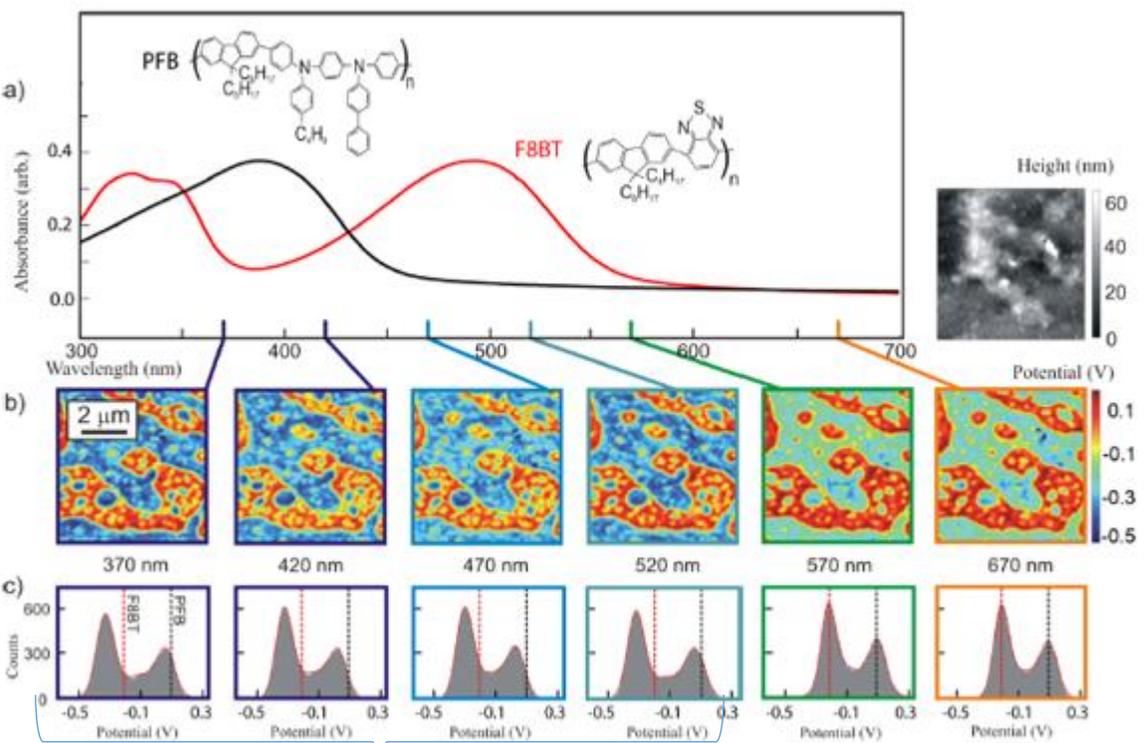
Diminution de l'aire →  
Dissipation en volume

<sup>1</sup> C. Villeneuve-Faure et al, Proc. Int. Conf. Dielec. (ICD 2013)

<sup>2</sup> C. Villeneuve-Faure et al, JAP 113, 204102 (2013)

## Mesure sous illumination - statique

Evolution du potentiel de surface de PFB:F8BT en fonction de la longueur d'onde d'illumination



Diminution du potentiel de surface → création d'excitons

Pas de modification

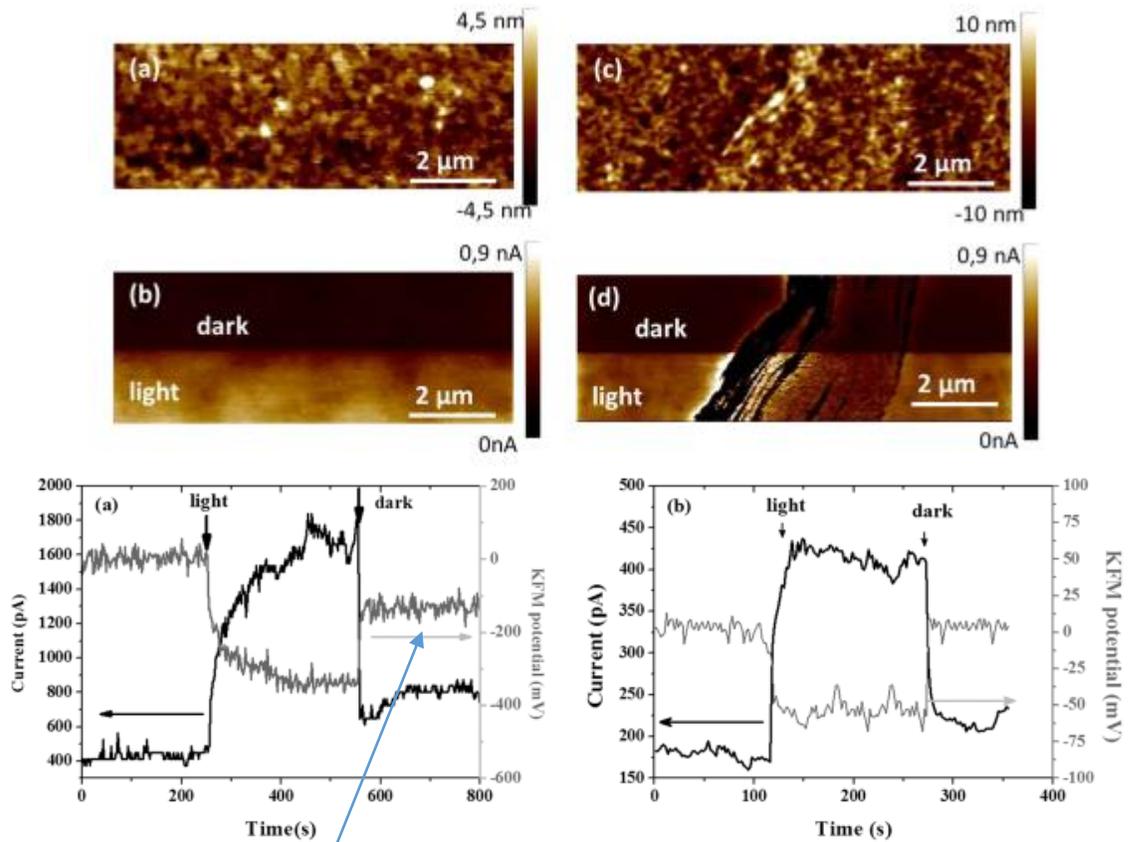
J. Luria et al., (2012)

## Mesure sous illumination - dynamique

Cartographie de courant avec/sans illumination @ 3V

P3HT:PCBM

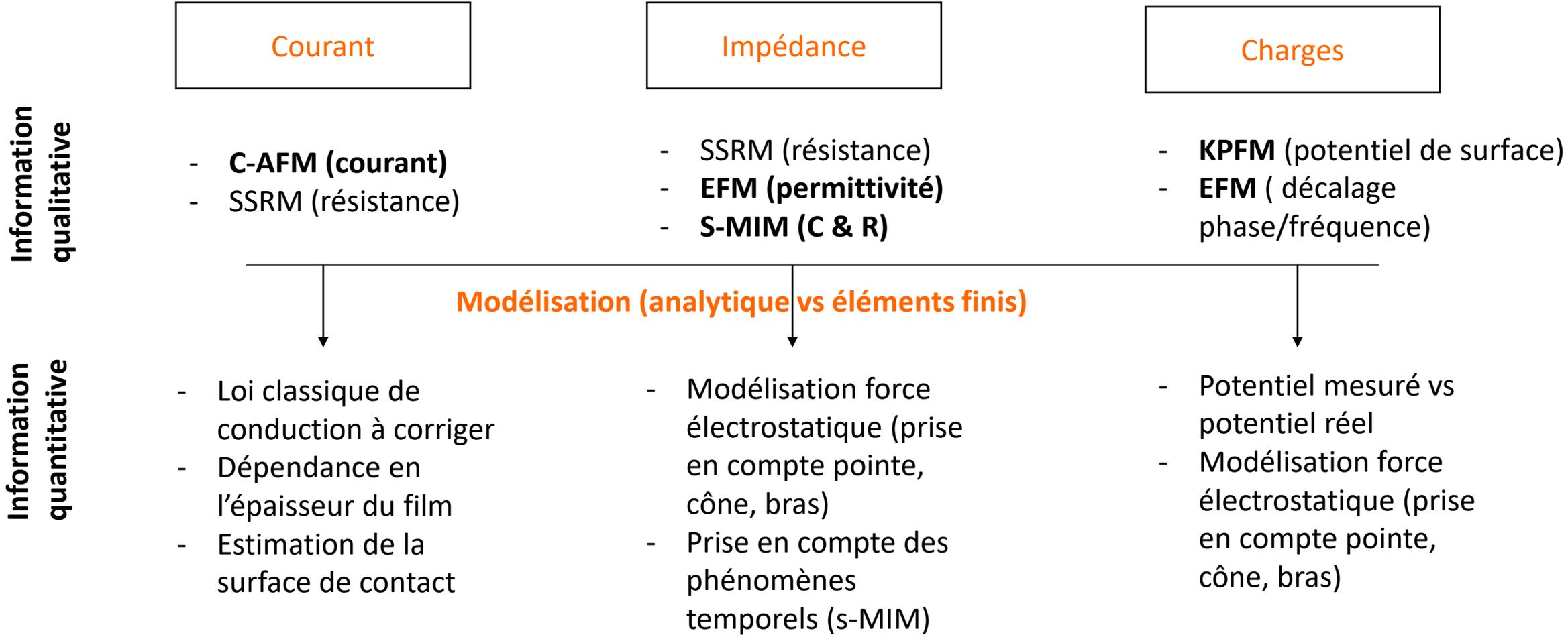
P3HT:BT22



Charges piégées

C. Villeneuve-Faure et al., JAP 117, 055501 (2015)

# 4. Conclusions



# Biofilms 2024

10<sup>e</sup> édition du colloque du Réseau National Biofilms

Toulouse - 27 au 29 novembre 2024

Université Toulouse III - Paul Sabatier

Bâtiment administratif - Auditorium Marthe Condat



<https://biofilms2024.sciencesconf.org>

- Adhésion, formation des biofilms, matrices extracellulaires
- Méthodes et techniques innovantes de caractérisation des biofilms
- Conception, fabrication, caractérisation de surfaces/matériaux (antimicrobiens, anti-adhésifs, pour la dépollution et la bioproduction)
- Biophysique des biofilms, Ecoulement et phénomènes de transport, Microfluidique

UNIVERSITÉ PAUL SABATIER  
Bât. 3R3, 118 route de Narbonne  
31062 Toulouse Cedex 9

<http://www.laplace.univ-tlse.fr>