

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

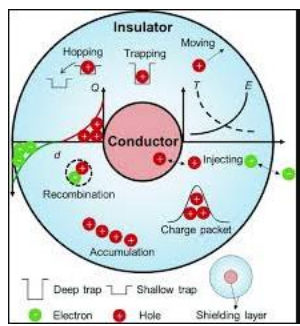
Christina Villeneuve-Faure

Forum 2024

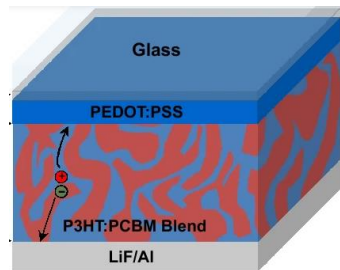
Pourquoi des mesures électriques locales quantitatives?

Production, transport et stockage d'énergie

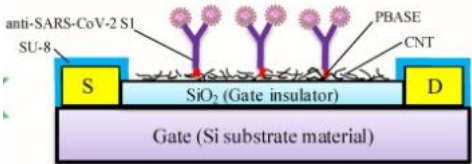
Câbles HVDC⁴



Photovoltaïque organique³



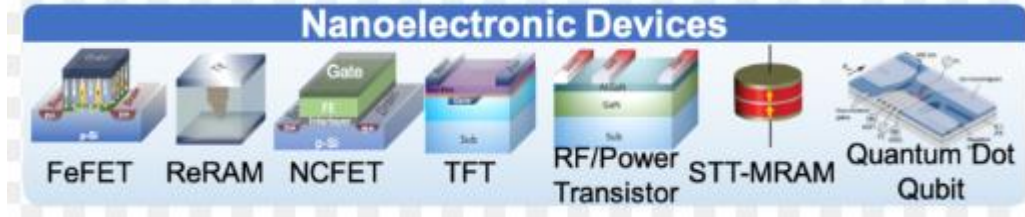
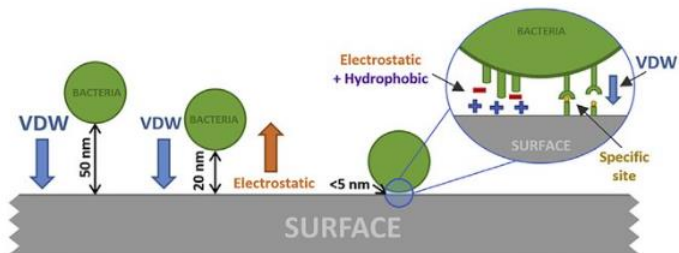
Nano-capteur biologique



CNT-FET pour détection Covid19¹

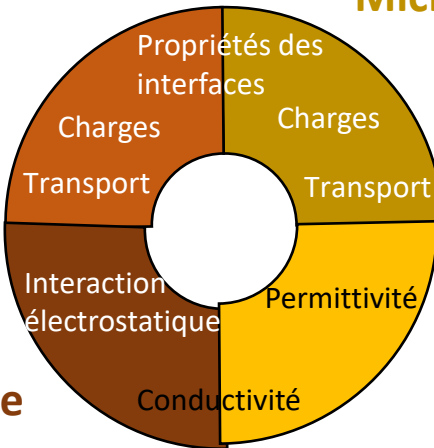
Interaction en jeu dans l'adhésion²

Adhésion cellule/bactéries



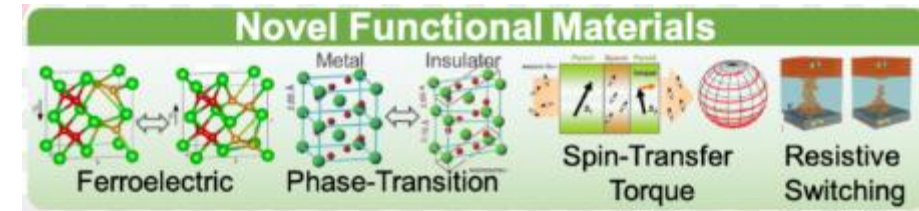
Micro/nano électronique

Réduction d'échelle et architecture 3D en nanoelectronique⁴



Biologie

Matériaux



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

¹ M.A. Zamzami et al., *Bioelectrochemistry* 143, 107982 (2022)

² J. Queen et al, *iScience* 23, 101745 (2020)

³ H. Movla et al. *Sc. Report* 13, 2031 (2023)

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

⁵ 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

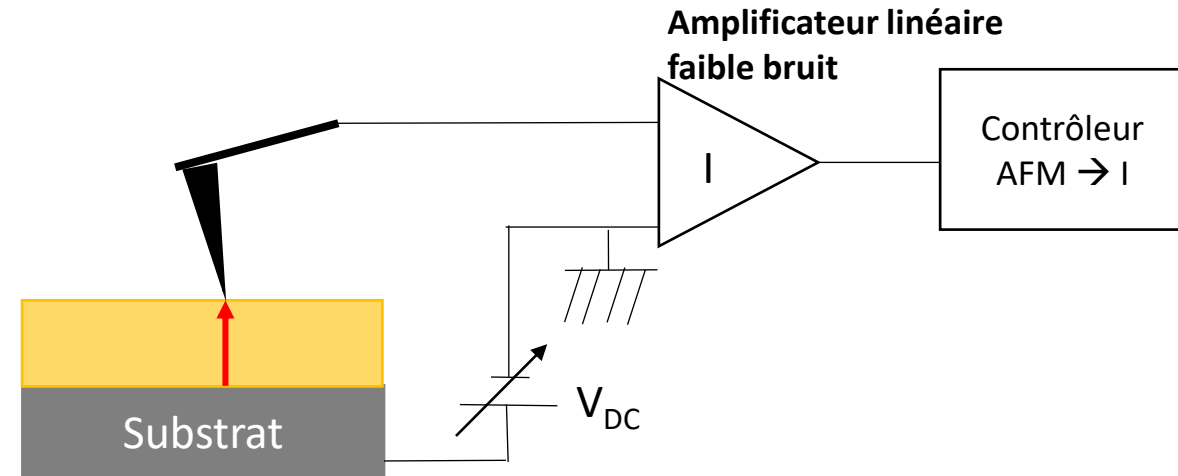
- A. Introduction
- B. EFM et modes dérivées
- C. sMIM

3. Charges électriques surface/volume

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

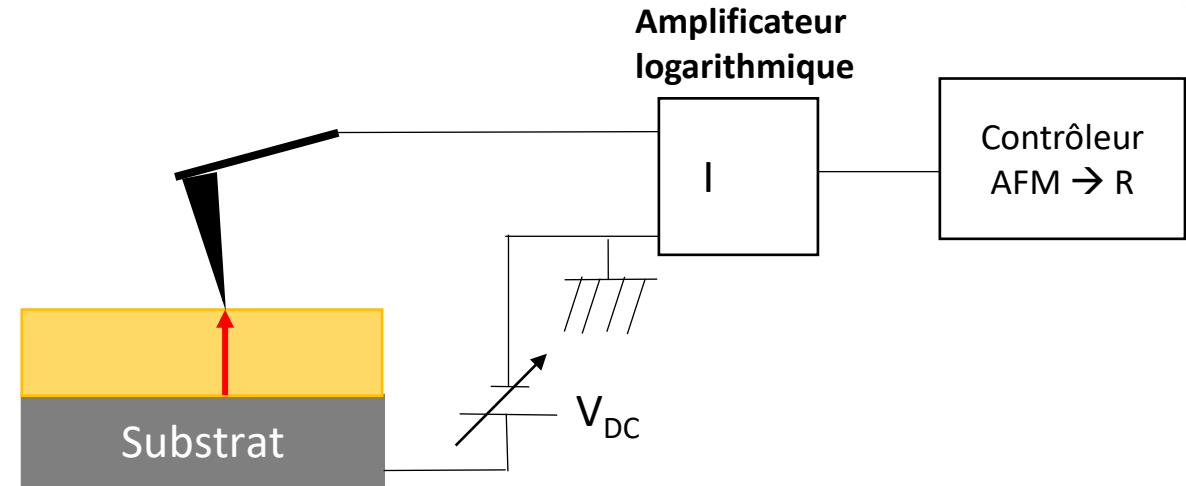
4. Mesures en dynamique

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 μ A (C-AFM)
 - Isolant / semi-conducteurs

Spreading resistance (SSRM) : résistance

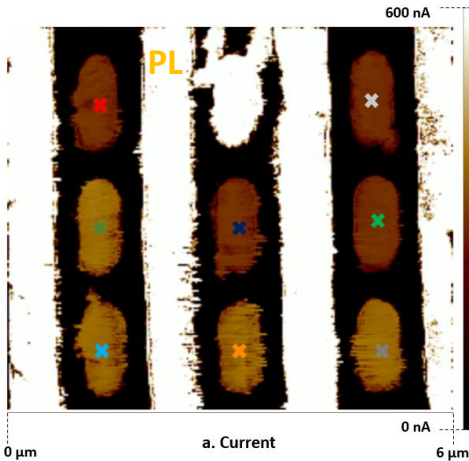


- Mesures en contact ou en mode Peak Force
 - Spectroscopie : $R=f(V_{DC})$
 - Cartographie de R (pour V_{DC} fixe)
- Résolution spatiale \sim rayon de la pointe AFM
- Sensibilité : $1\Omega \rightarrow 10^{19}\Omega$
 - Semi-conducteurs / métaux

1.2. Courant et résistance : mesures

Lecture de données sur des mémoires → conduction dans les métaux

Conductive AFM (C-AFM)

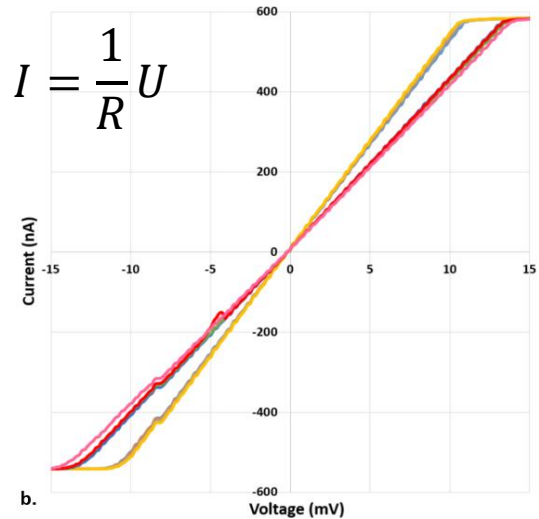
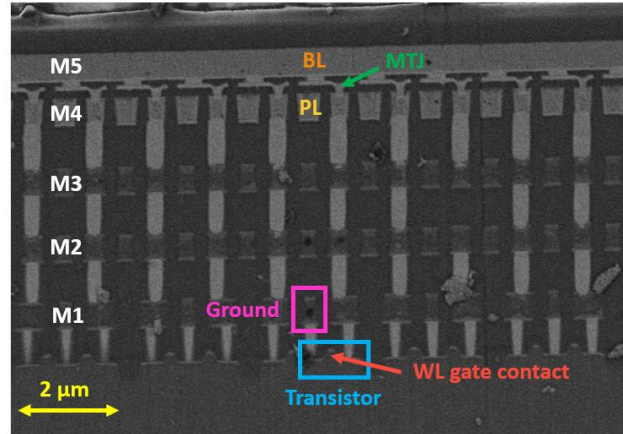


Visualisation facile des états mémoires

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

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

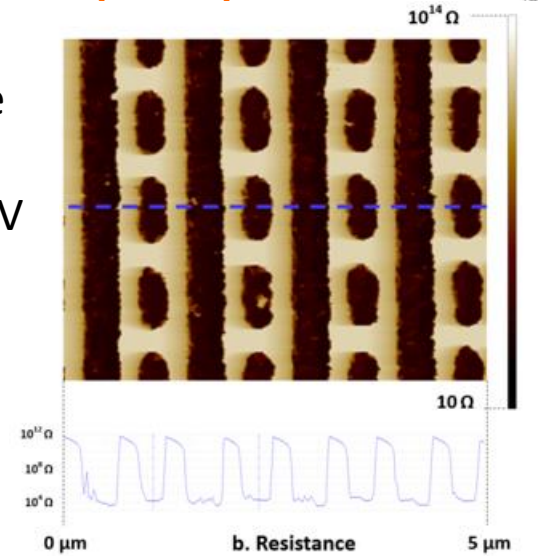
$$R("1") = 24\text{ k}\Omega$$



I-V sur différents plot mémoire

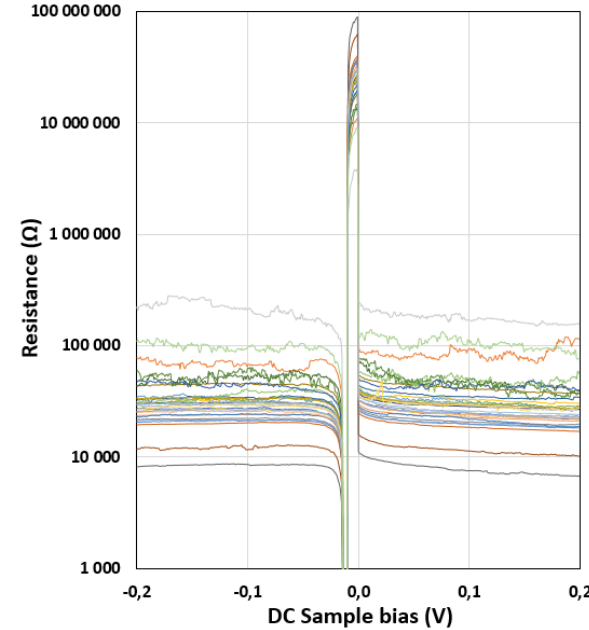
Spreading resistance (SSRM)

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



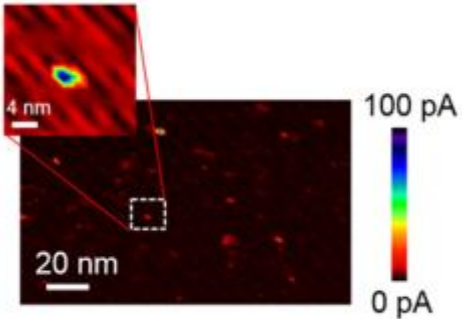
$$R("0") = 15.54\text{ k}\Omega (\sigma = 0.49\text{ k}\Omega)$$

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



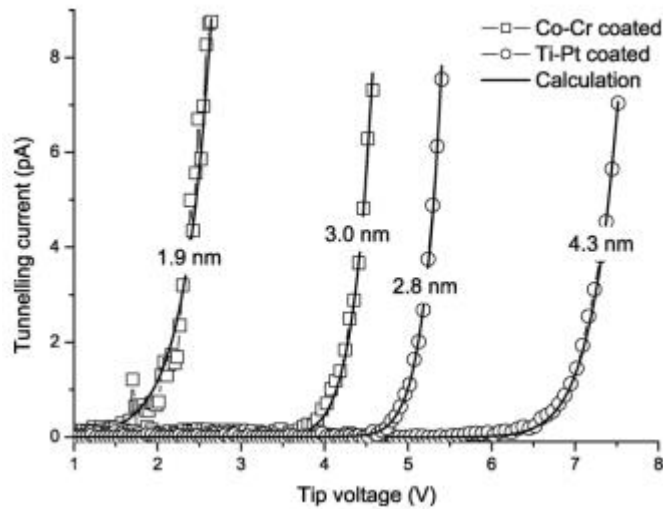
1.2. Courant et résistance : mesures

Conductive AFM (C-AFM) : diélectrique



Cartographie de courant SiO_2 (1.5 nm)

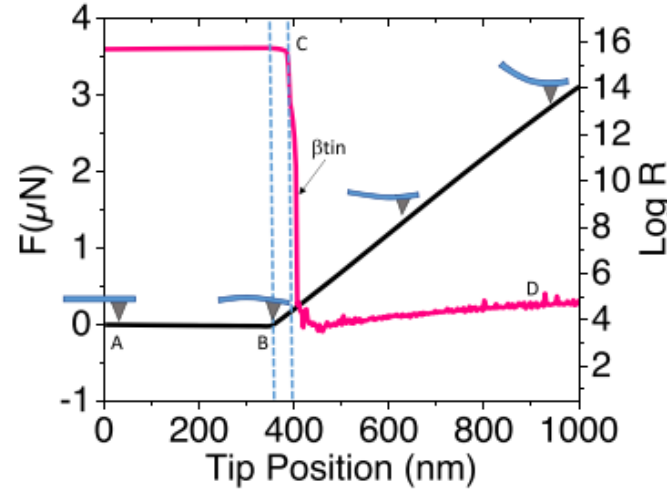
Résolution spatiale < rayon sonde
($R_c \approx 25 \text{ nm} - \text{PtIr}$)



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)

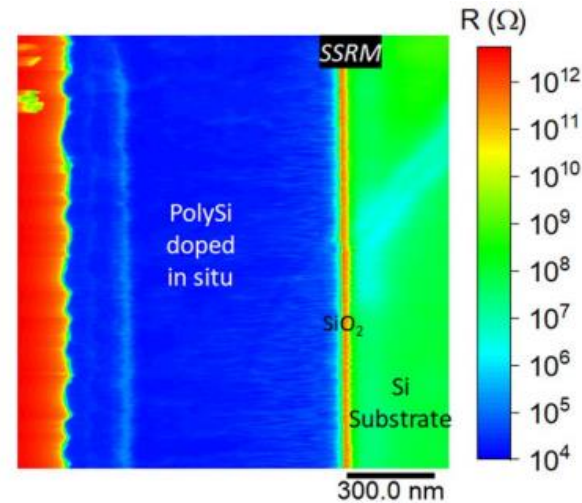
Spreading resistance (SSRM) : semi-conducteur



Résistance:

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

R_C : résistance contact
 R_{SR} : spreading resistance
 R_M : résistance matériaux

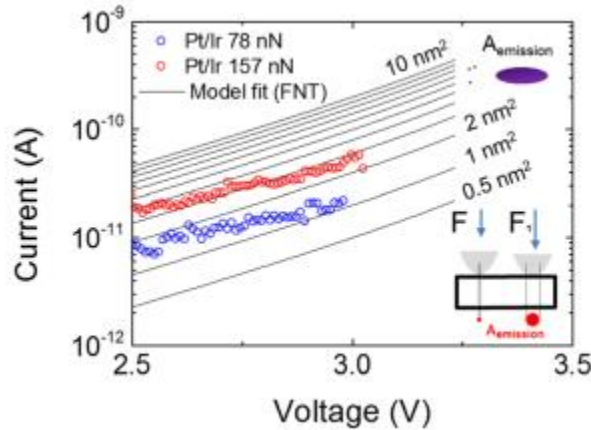
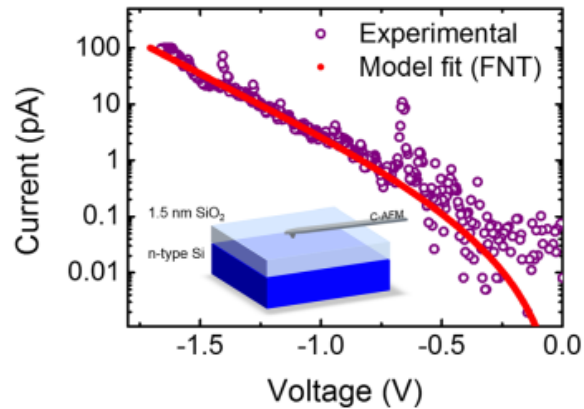


Force de contact importante (qqes μN)

Cartographie de la résistance d'un empilement

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

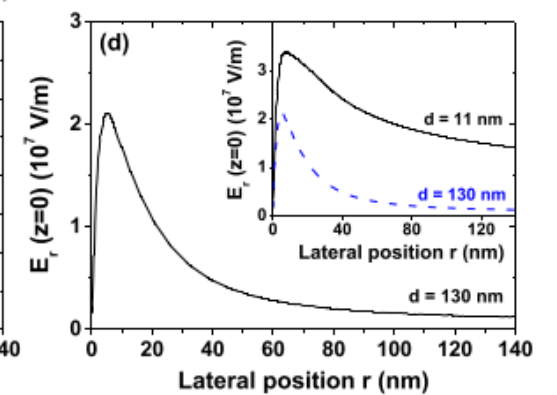
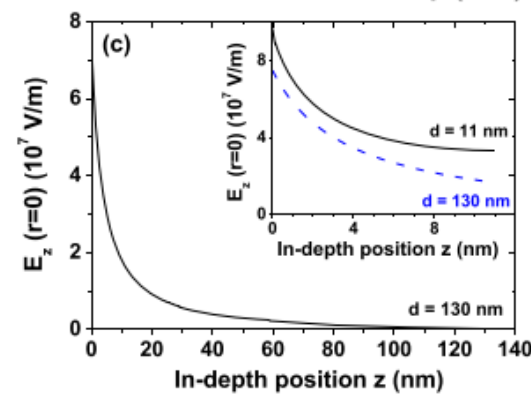
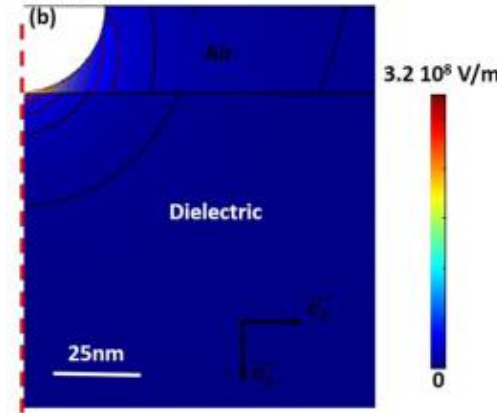
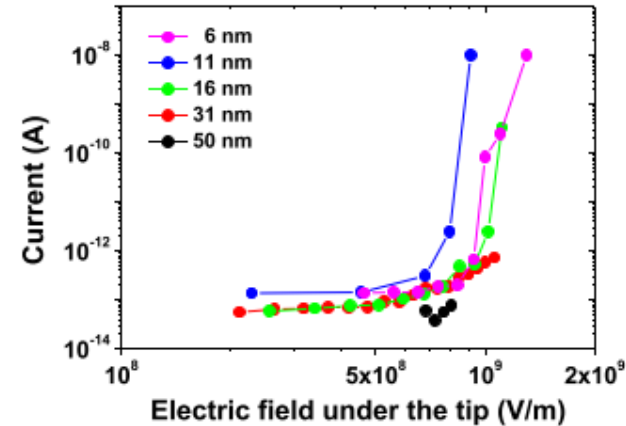
Isolant – Films ultra mince (qqes nm)



Isolant – Films « épais » (> 10nm)

C-AFM : SiO_xN_y ($F_c \sim 10 \text{ nN}$)

Épaisseur variable --> comment comparer?



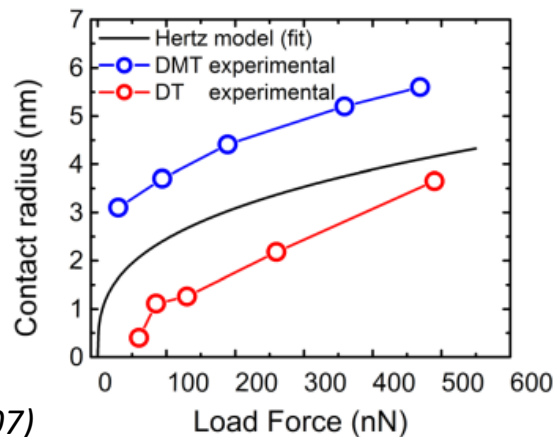
- Surface de collection
- Champ divergeant

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
- φ_B : barrière d'injection



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

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

Semi-conducteur - organique

Lois décrivant le transport de charges

Mobilité dans les semiconducteurs

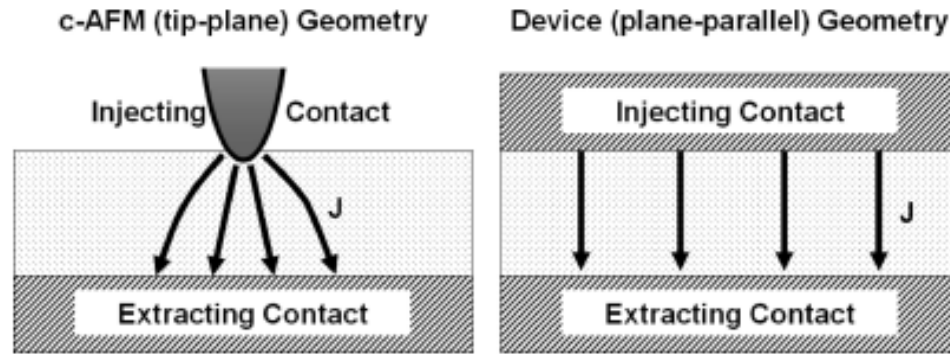
organiques : Loi de Mott-Gurnet (SCLC)

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

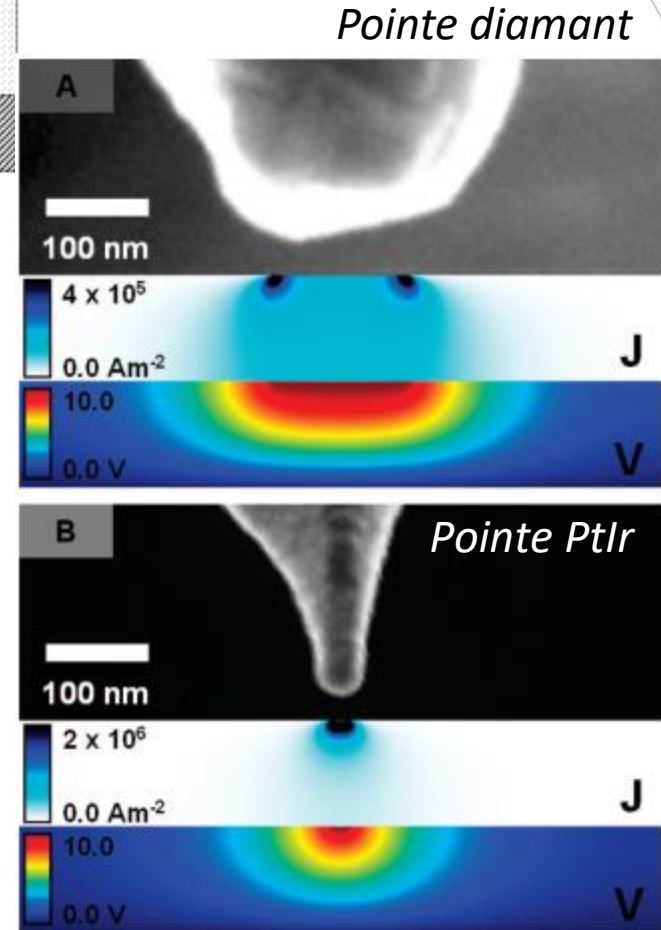
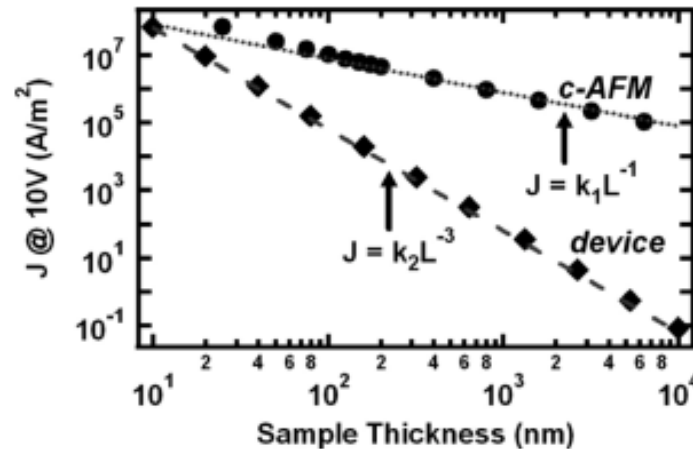
- Densité de courant $J = I/S$
 - Surface de collection S ?
 - Contact & divergence de J
- Champ électrique $E = U/L \rightarrow$ divergeant
- Permittivité $\epsilon_r \rightarrow$ inconnue si matériau hétérogène

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

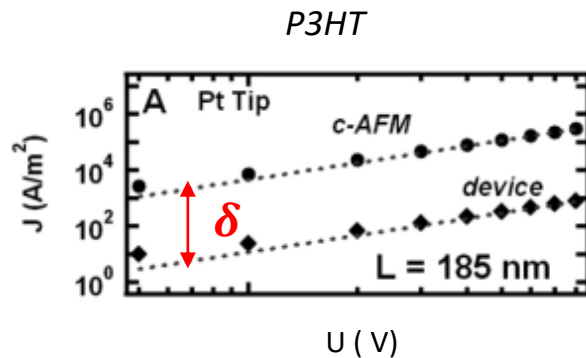
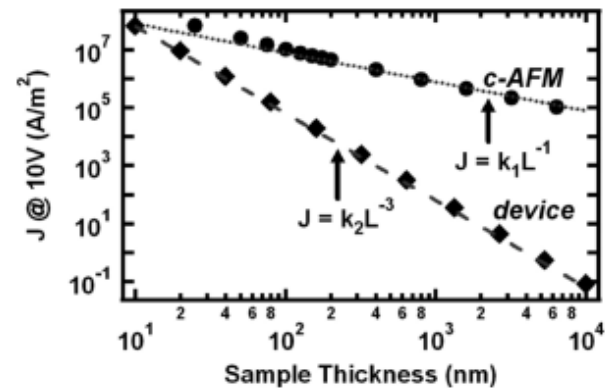
\rightarrow Nouvelles approches adaptées à la configuration pointe - plan



Densité de courant sur du P3HT



Méthode empirique



Loi de Mott-Gurnet corrigée

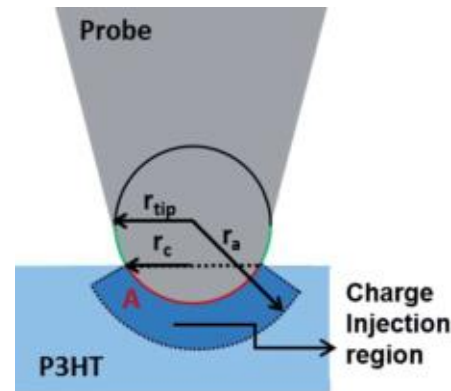
$$J = \alpha \epsilon_r \epsilon_0 \mu \frac{U^2}{L^3} \delta \left(\frac{L}{d} \right)^{1.6}$$

- α : préfacteur (calcul numérique $\neq 8/9$)
- δ : 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
 - ...

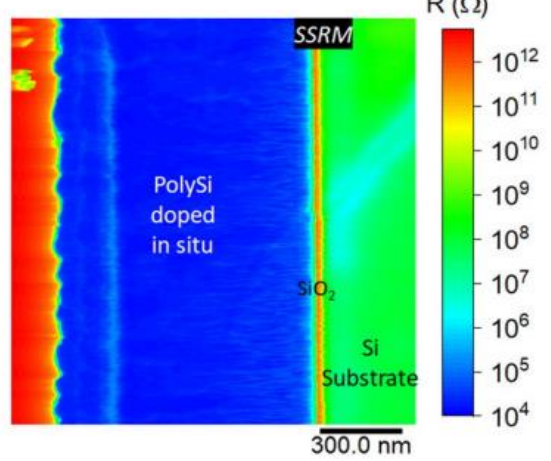
2.1. Mesure d'impédance par AFM

Résistance

Capacité / Permittivité

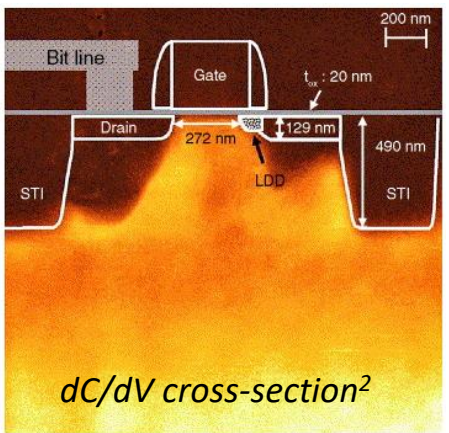
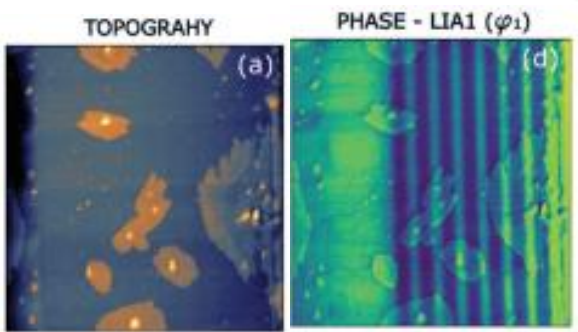
Impédance

SSRM
→ Mesure directe¹



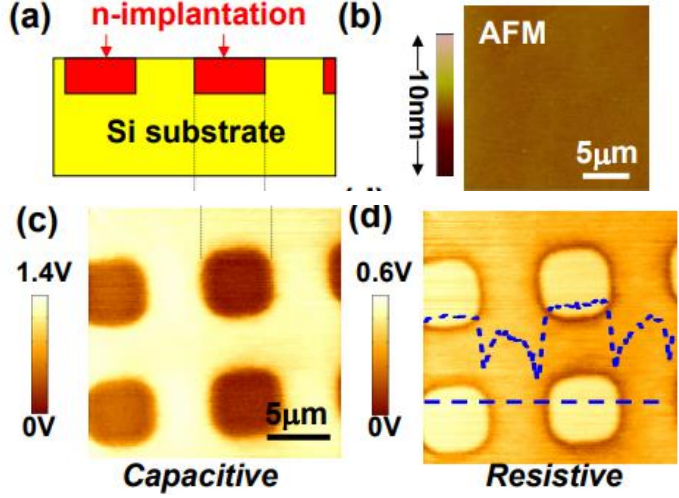
- Scanning Capacitance Microscopy (SCM) : $dC/dV \rightarrow$ dopant
- Electrostatic Force Microscopy (EFM) : décalage phase/fréquence
- Kelvin Probe Force Microscopy (KPFM) : potentiel surface
→ Pas de mesure directe (modélisation)

GaAs dopé (cross-section)³



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

→ Mesure semi-directe (modélisation)

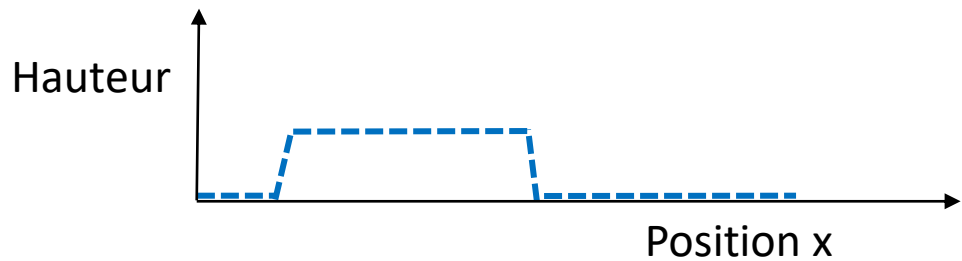
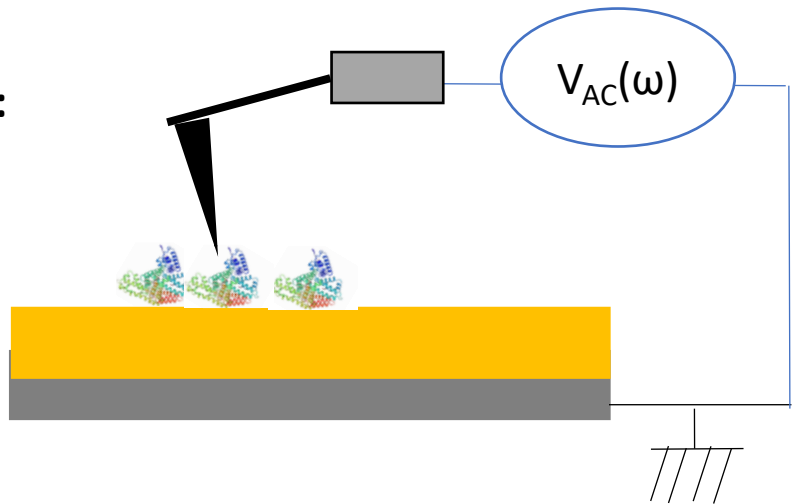


¹ R. Coq Germanicus et al., NanoExpress 2, 010037 (2021)
² J. Heo et al., MSE B 124-145, 301 (2004)
³ K. Kadja et al., Adv. Mat. Int. 11, 2300503 (2024)
⁴ K. Lai et al. Rev. Sci. Instrum. 79, 063703 (2008)

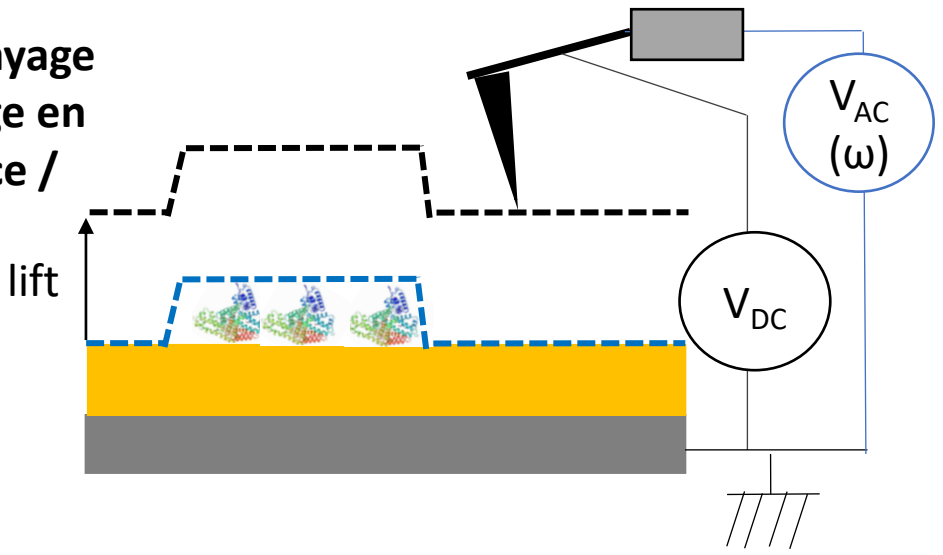
2.2.a. Permittivité relative par EFM - principe

Principe de l'EFM DC en mode "lift"

1^{er} balayage :
topographie
→ Tapping



2^{ème} balayage :
décalage en
fréquence /
phase



Force électrostatique F_e induite par V_{DC} :

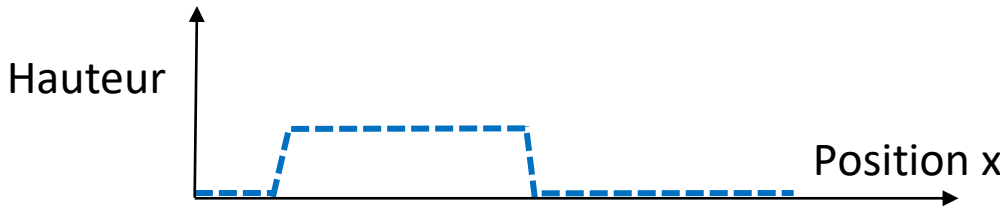
- Statique: $F_0 = \frac{\partial C}{\partial z} (V_{DC} + V_S)^2$
- V_S le potentiel de la surface
- C : capacité sonde AFM - échantillon

Permittivité diélectrique \leftrightarrow capacité

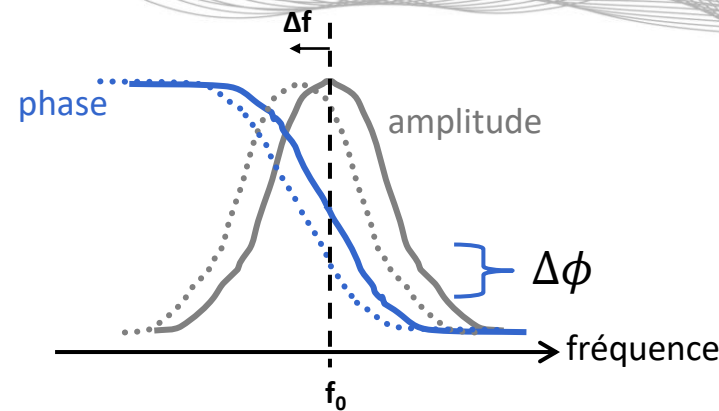
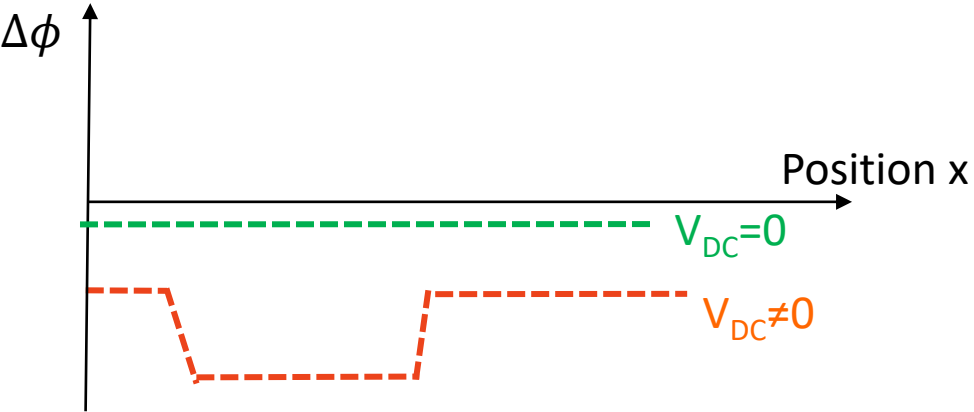
2.2.a. Permittivité relative par EFM - principe

Principe de l'EFM DC en mode "lift"

1^{er} balayage :
topographie
→ Tapping



2^{ème} balayage :
décalage en
fréquence / phase

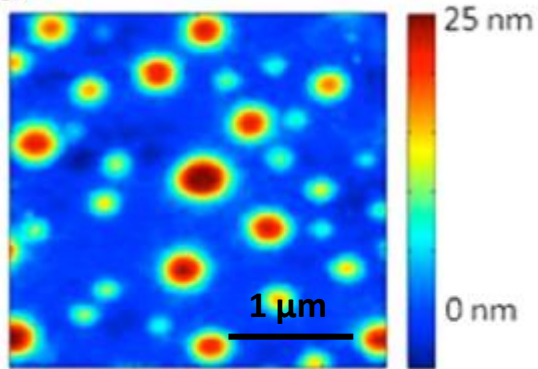


Détection du décalage (à f_0)

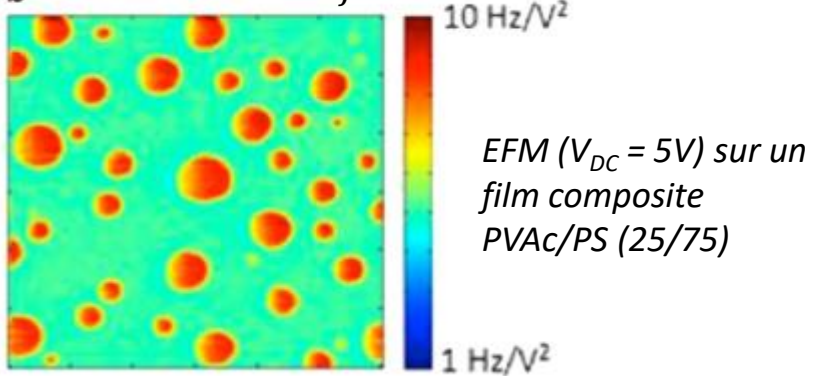
En phase : $\Delta\phi \propto \frac{\partial F_e}{\partial z}$

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

a Topographie



b Paramètre $a_{\Delta f}$



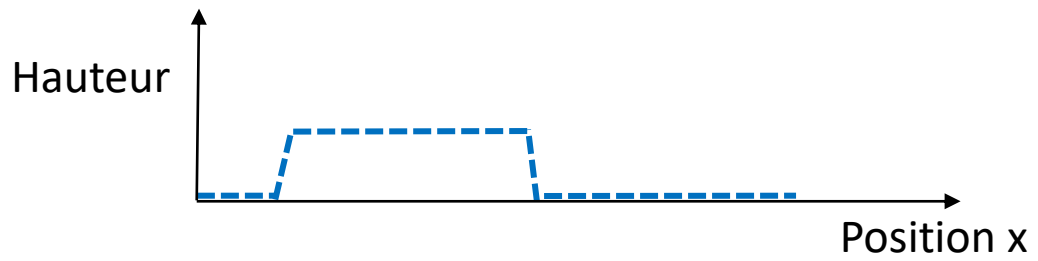
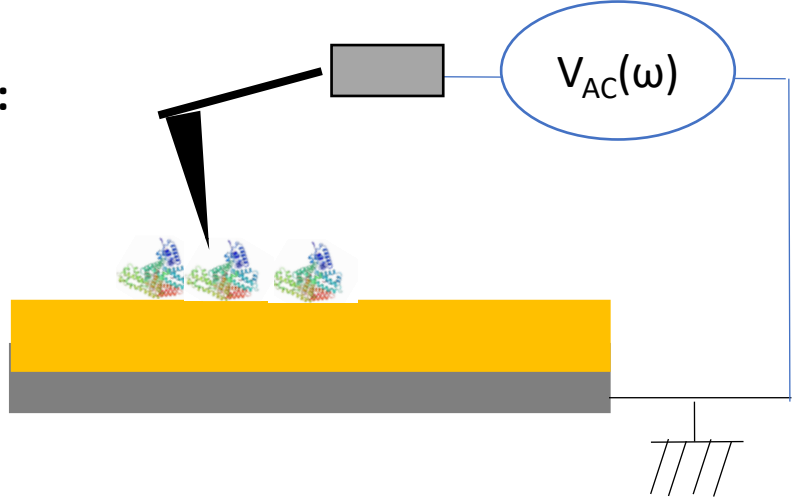
Paramètre $a_{\Delta f}$

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

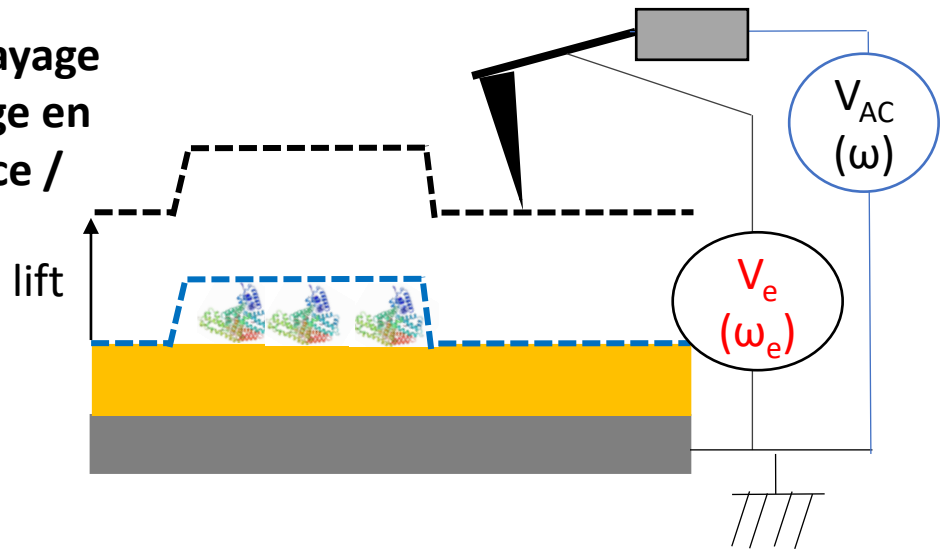
Laplace 2.2.a. Permittivité relative par EFM - principe

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

1^{er} balayage :
topographie
→ Tapping



2^{ème} balayage :
décalage en
fréquence /
phase



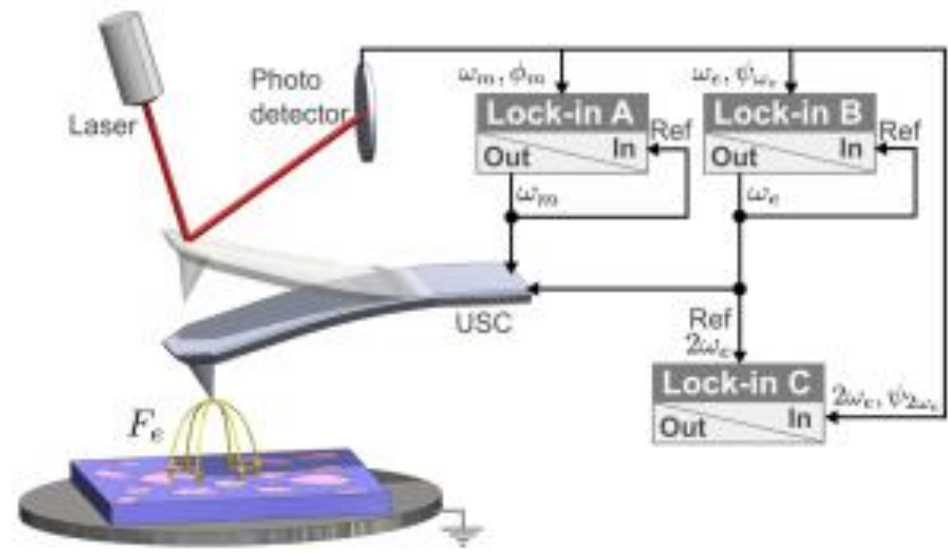
Force électrostatique F_e avec $V_e(\omega_e) = V_{DC} + V_e \cos(\omega_e t)$:

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

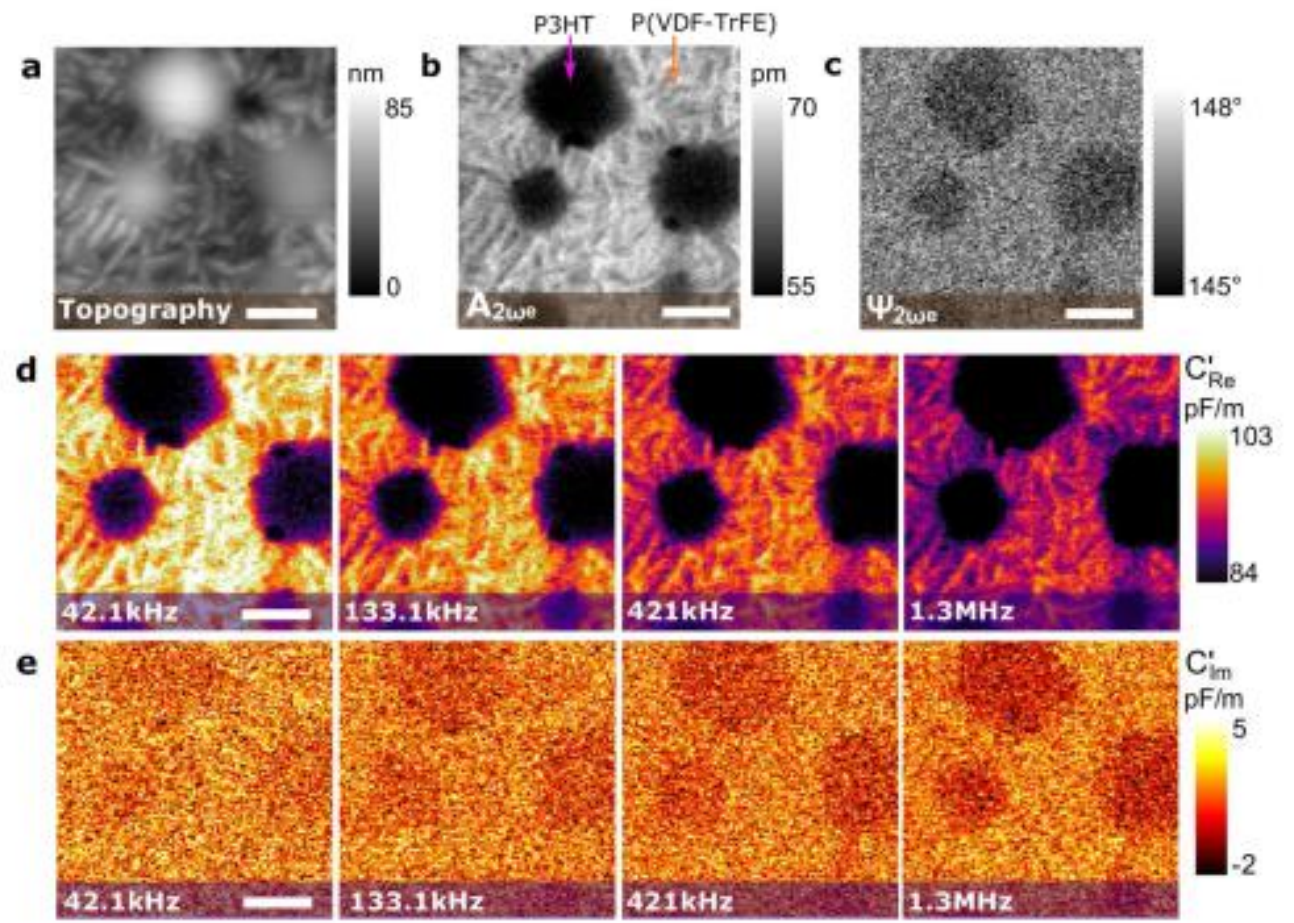
Principe de l'EFM AC en "single pass"



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

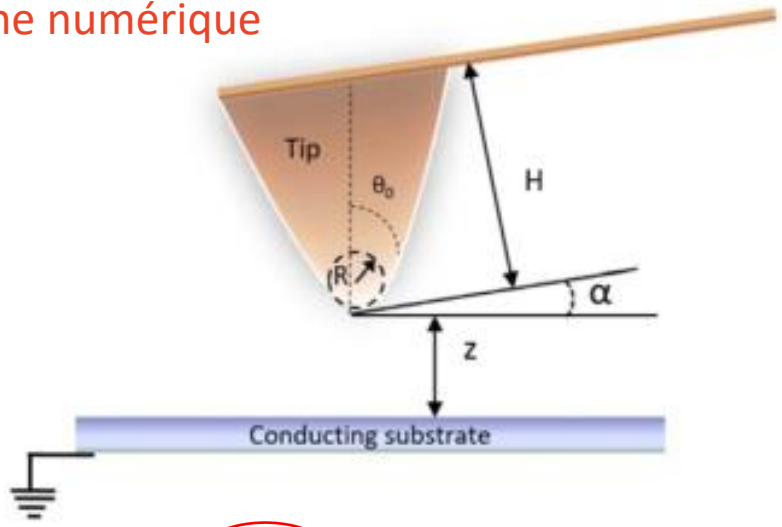
$$C'_{Re} \propto \left| \frac{\partial C}{\partial z} \right| \cos(\Psi_e) \propto kA_{2\omega_e} \cos(\Psi_{2\omega_e})$$

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



Laplace 2.2.b. Permittivité relative EFM - quantification

Approche numérique

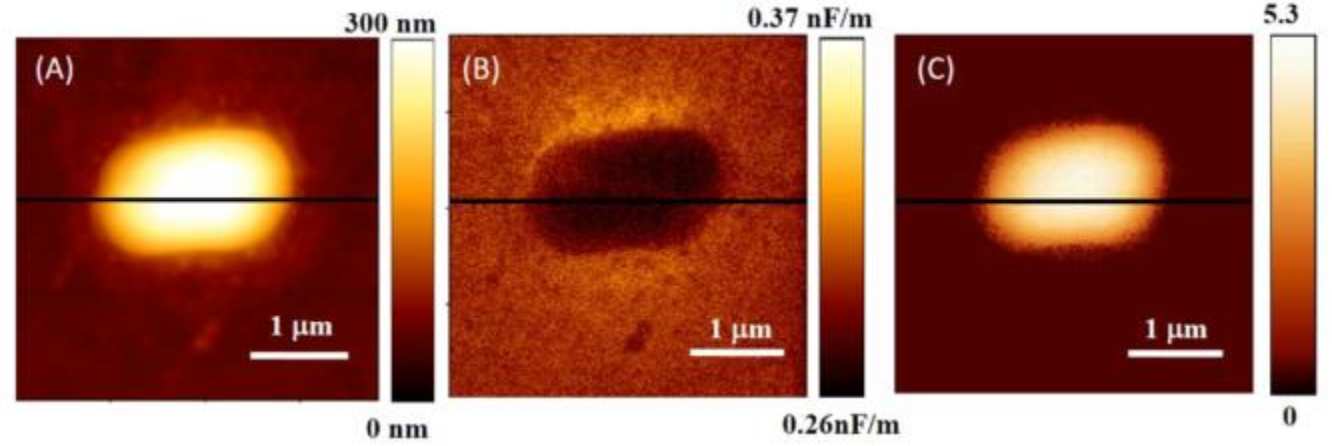


$$F_e = F_{apex} + F_{cone} + F_{cant}$$

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 ϵ_r



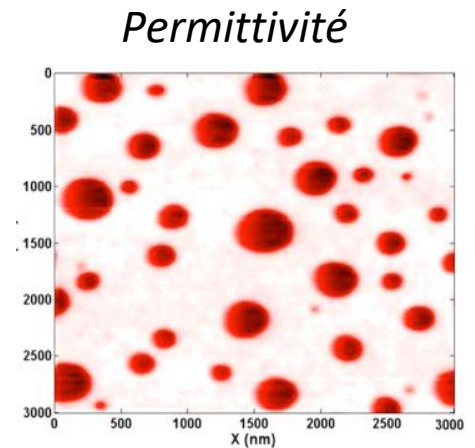
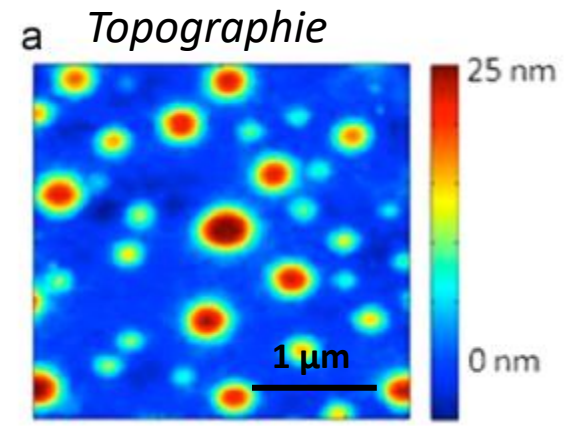
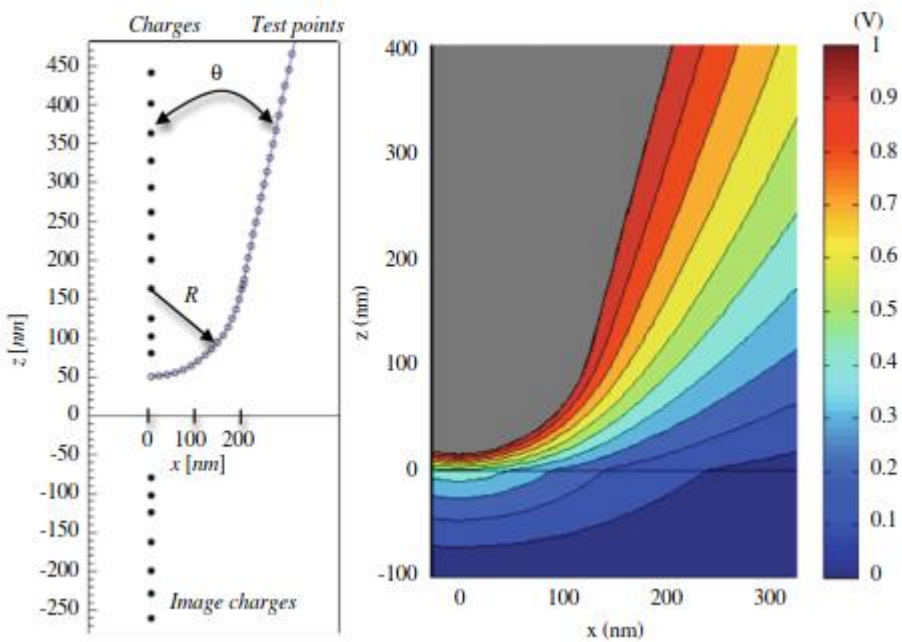
Bacterie E.Coli : (A) Topographie, (B) EFM dC/dz et (c) ϵ_r . Mesure en EFM 2 ω

- 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

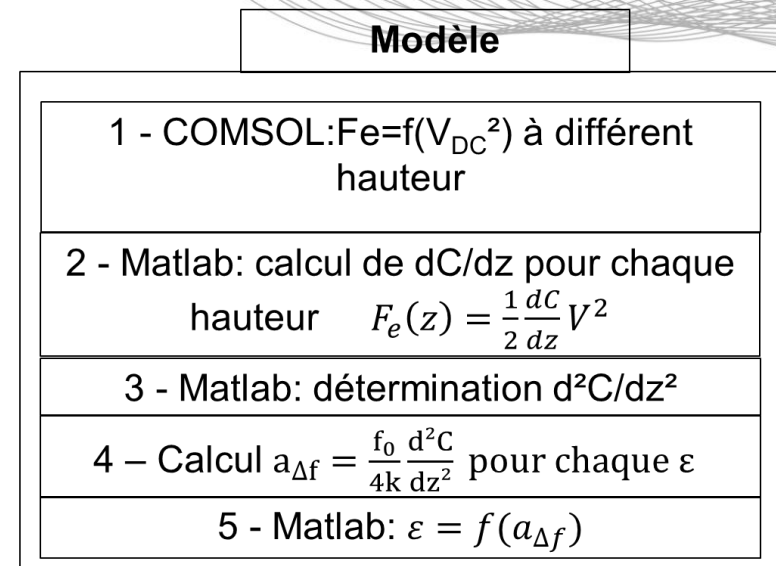
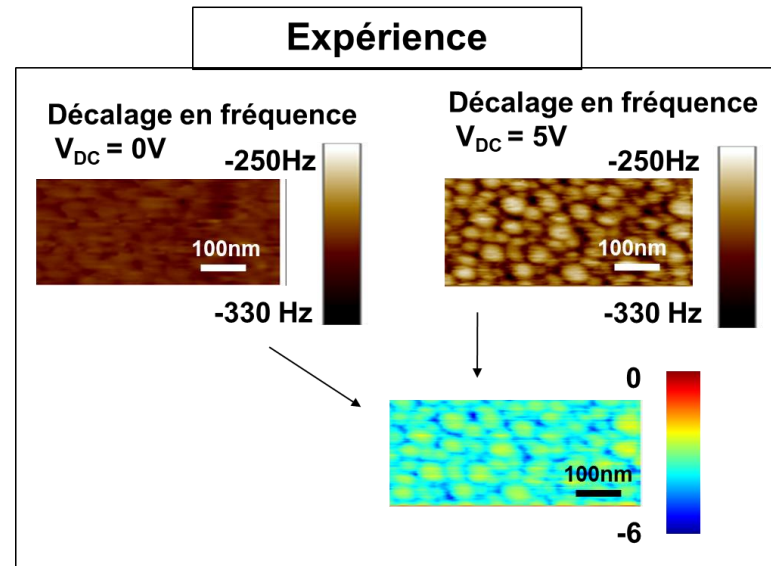
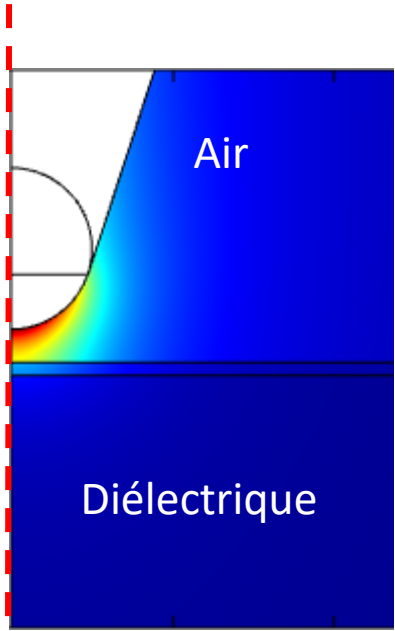
- PVAc : 8.2 ± 1.0
- PS: 2.6 ± 0.3

- 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

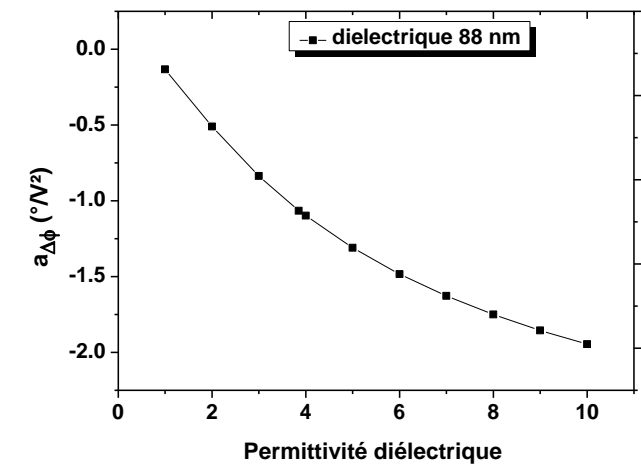
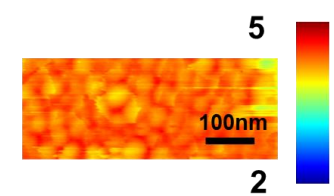
Laplace 2.2.b. Permittivité relative EFM - quantification

Approche éléments finis



Cartographie de permittivité diélectrique

Nanoparticules d'Ag sur SiO_2

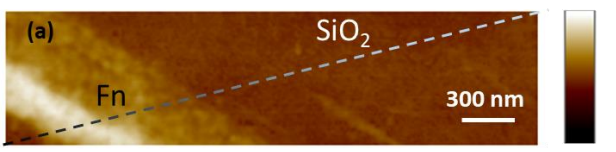


- **Avantages :**
 - Prise en compte cône
 - Modélisation de matériaux hétérogènes
- **Inconvénients:**
 - détermination des paramètres de la pointe → calibration sur SiO_2 (ou référence)
 - Prise en compte des différences d'épaisseur fastidieuse

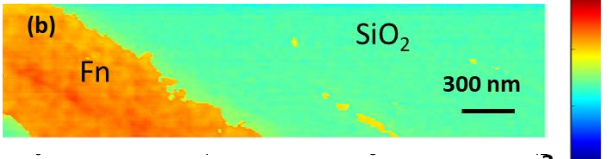
Laplace 2.2.b. Permittivité relative EFM - quantification

Approche éléments finis

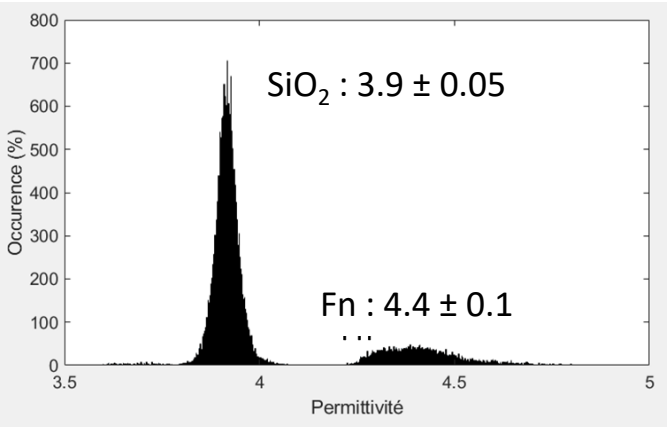
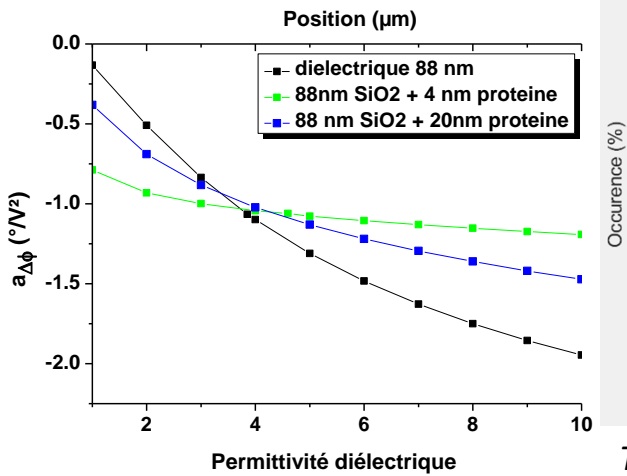
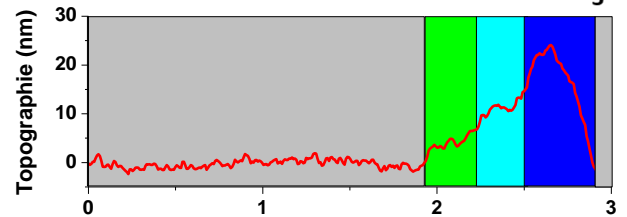
Topographie sur Fn (0.11μM) sur SiO₂



Permittivité sur Fn (0.11μM) sur SiO₂



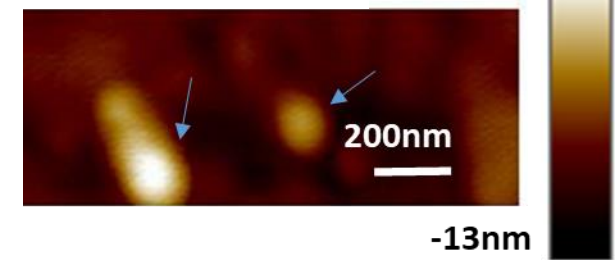
Prise en compte des différence d'épaisseur
Mesure de la permittivité de chaque couche



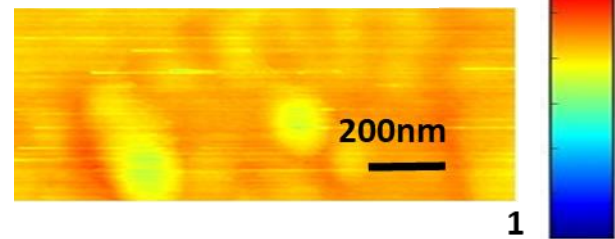
To be published (ANR BENDIS)

Nanocomposite : SiNx (20nm) dans PI

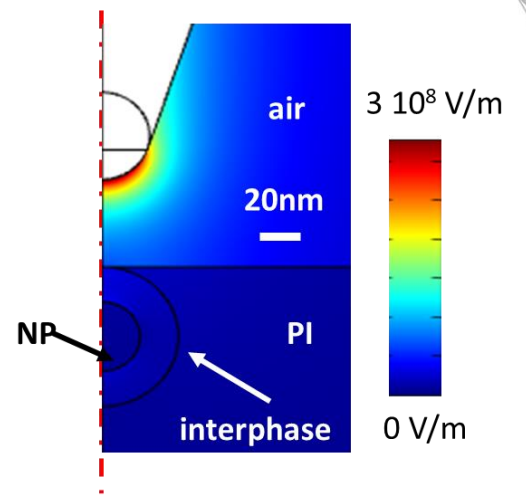
Topographie



Permittivité

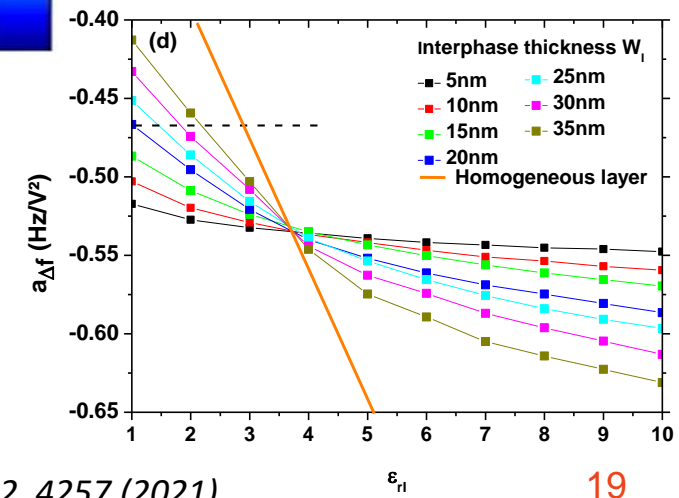


Champ électrique



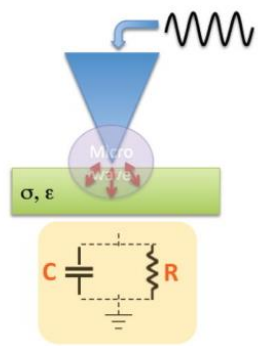
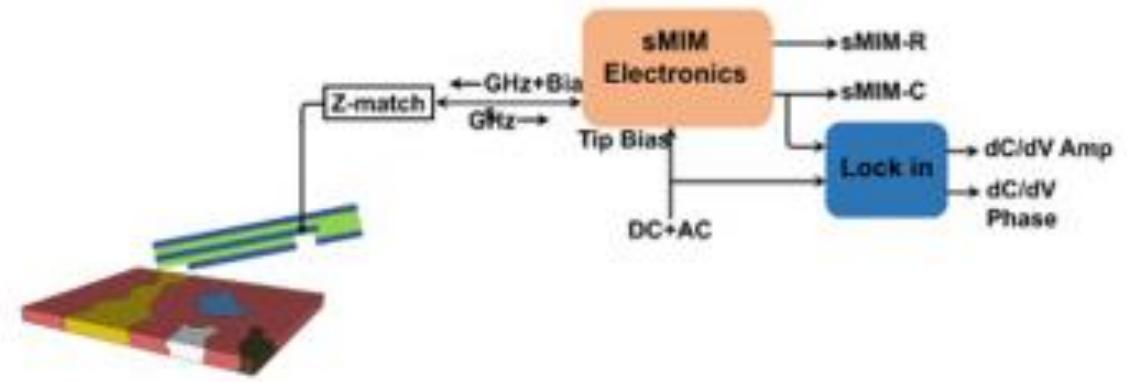
Permittivité

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

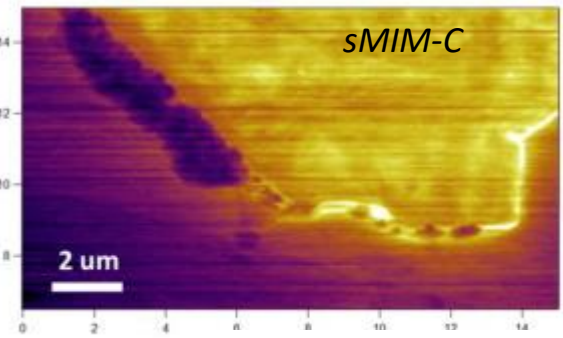


M. Houssat et al., Nanotechnology 32, 4257 (2021)

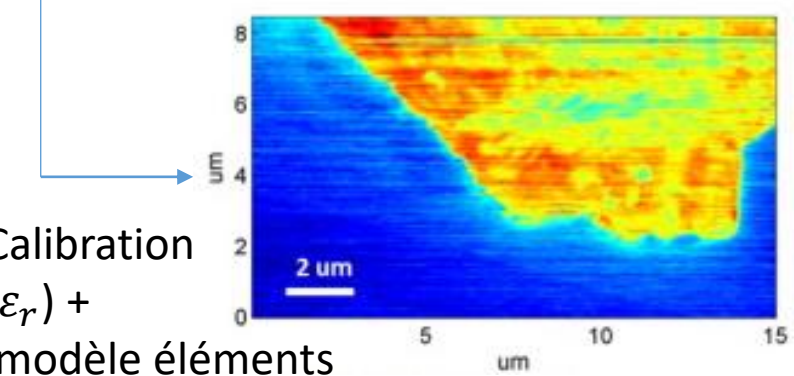
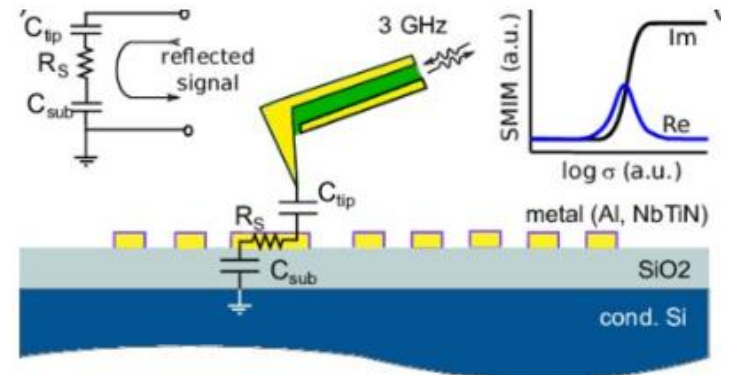
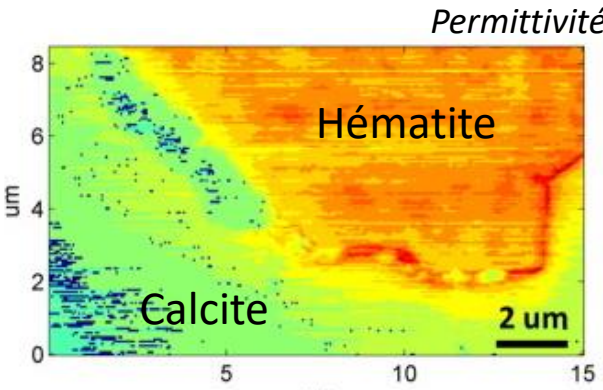
2.3. Permittivité diélectrique -sMIM



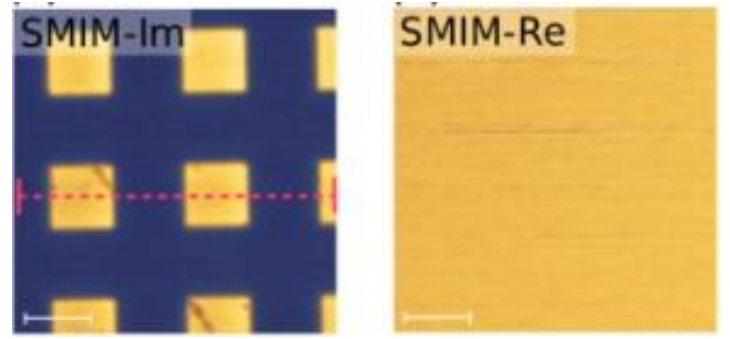
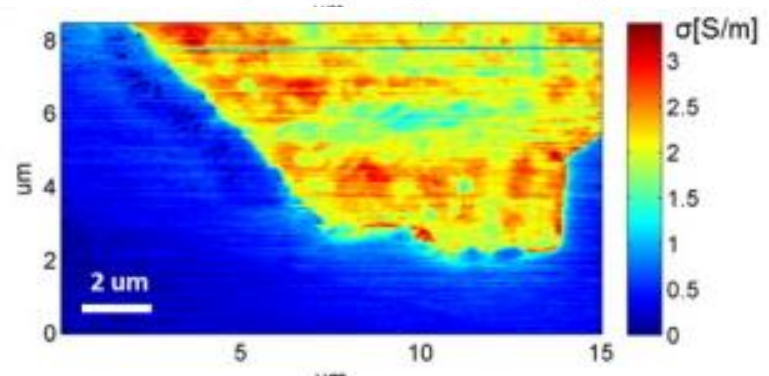
Plots métalliques sur SiO₂
 - Uniquement sMIM-C car substrat SiO₂



Calibration sur ϵ_r connu



Calibration (ϵ_r) + modèle éléments finis (AC/DC)



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

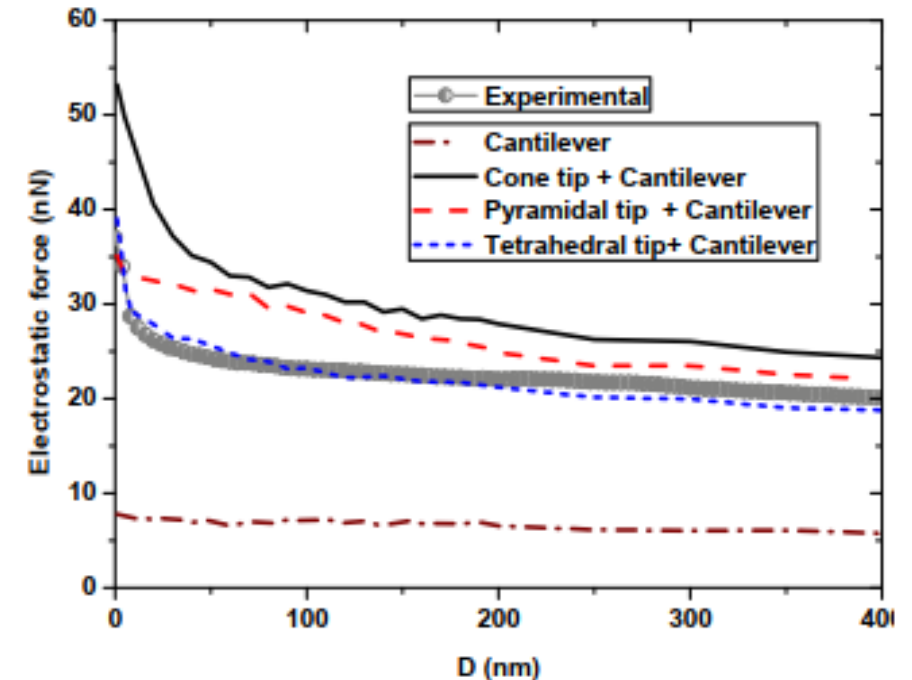
T. Monti et al., Int. J. Mineral Proc.151, 8 (2016)

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

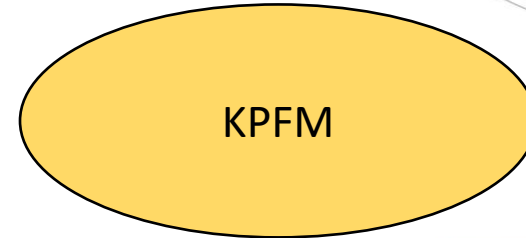
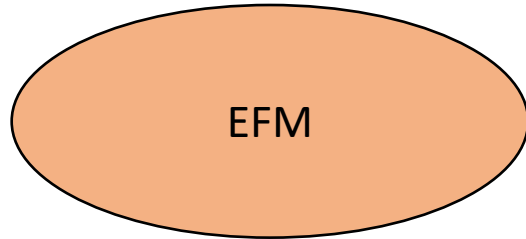


- Meilleur modèle : tétraèdre + cantilever
- dC/dV : modèle cône suffit

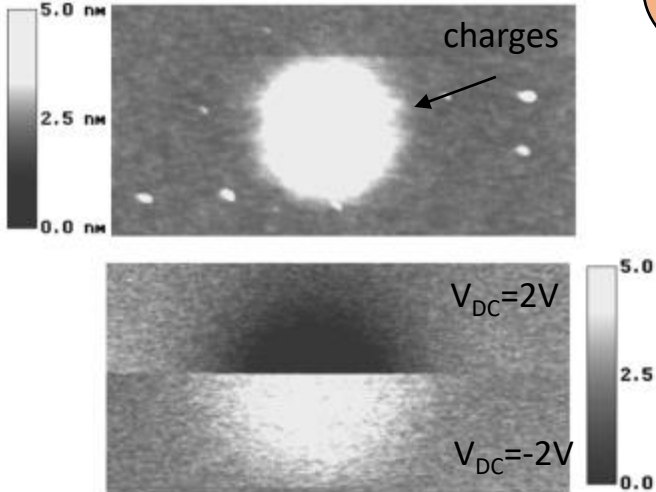
A. Boularas et al., TDEI 23, 705 (2016)

3.1. Mesures de charges

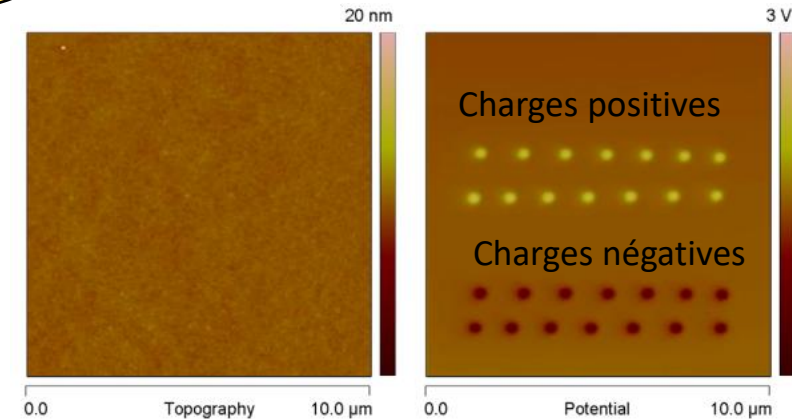
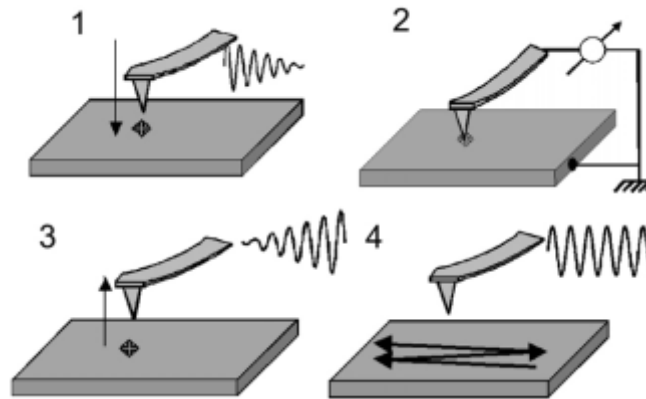
Topographie et décalage en fréquence pour différent V_{DC}



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 → densité de charge
- Le signal lu dépend de la tension V_{DC} → signe des charges non « évident »

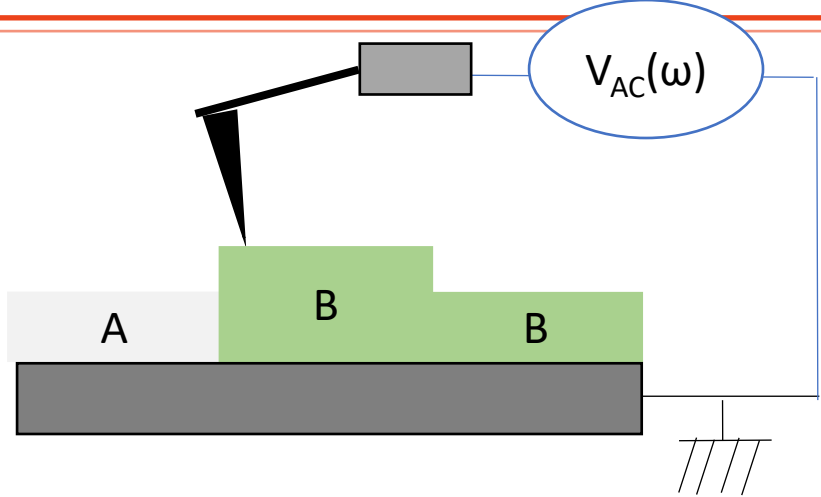
- Modification du potentiel de surface → densité de charge
- Signe du potentiel de surface → signe des charges

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

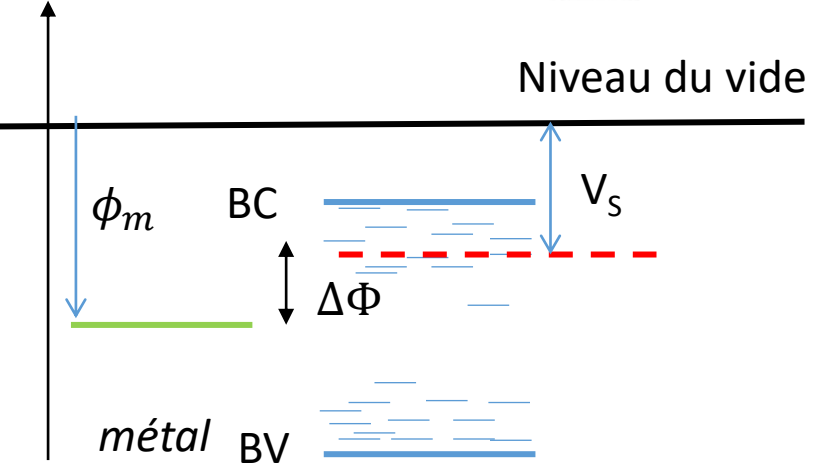
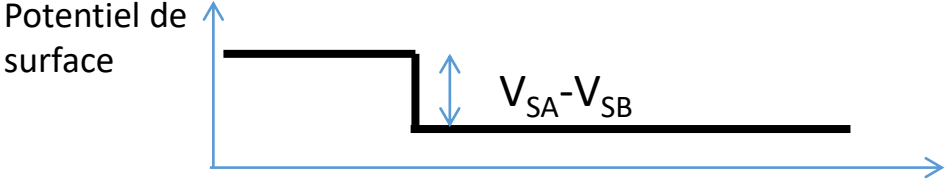
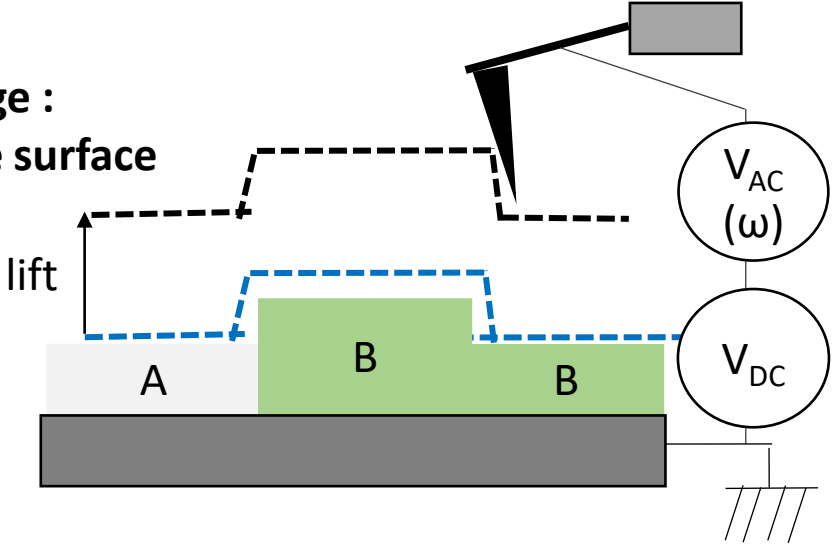
L. Ressier et al., Nanotechnol. 19, 135301 (2008)

3.2. Principe du KPFM – mode lift

1^{er} balayage :
topographie
→ Tapping



2^{ème} 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)

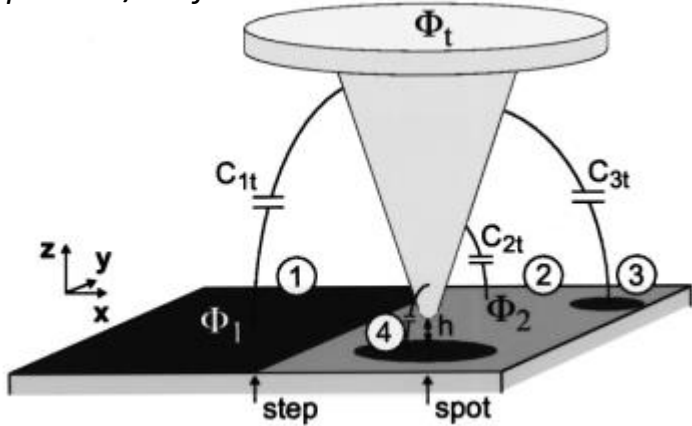
Annulation du gradient de force électrostatique

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

3.3. Potentiel de surface : mesuré vs réel

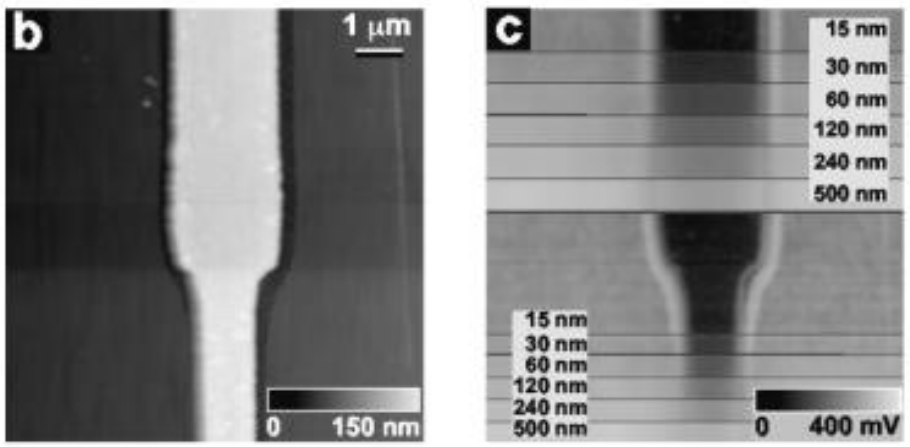
Capacités parasites

Schématisation des interactions pointes / surface¹



Effet de la hauteur de lift

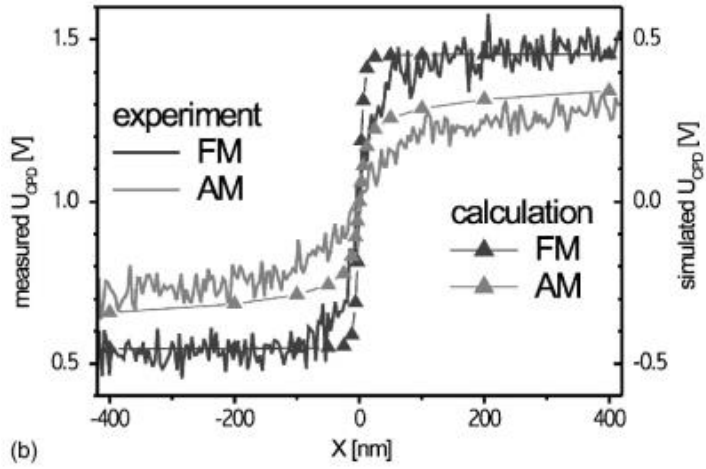
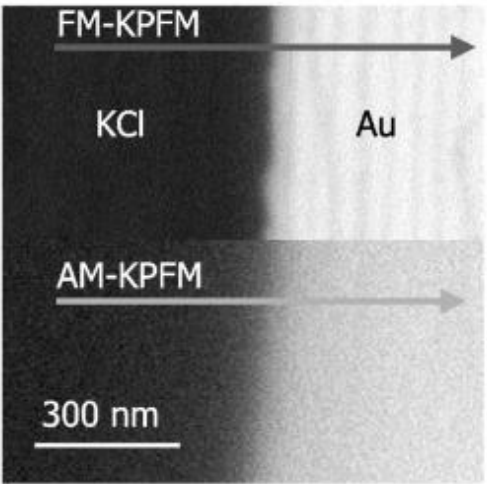
Topographie et potentiel de surface en fonction du lift¹



- 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 Au²

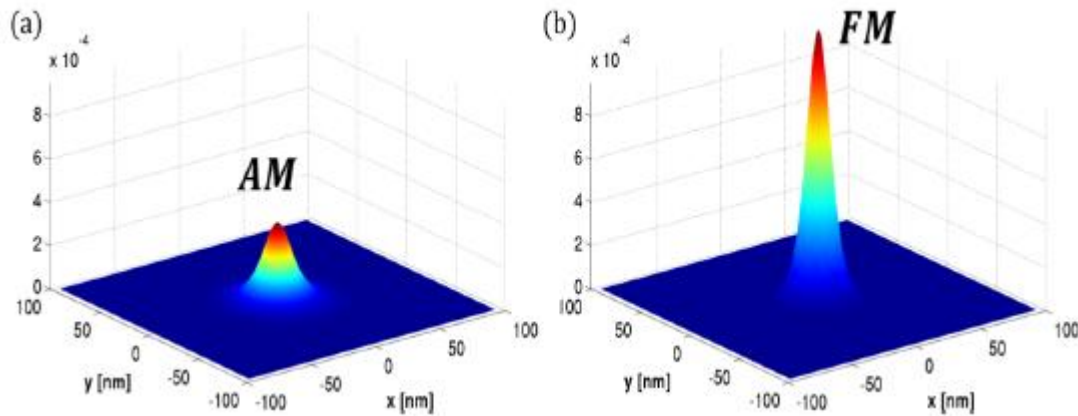


Comment connaitre le potentiel de surface réel?

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

Méthode de déconvolution

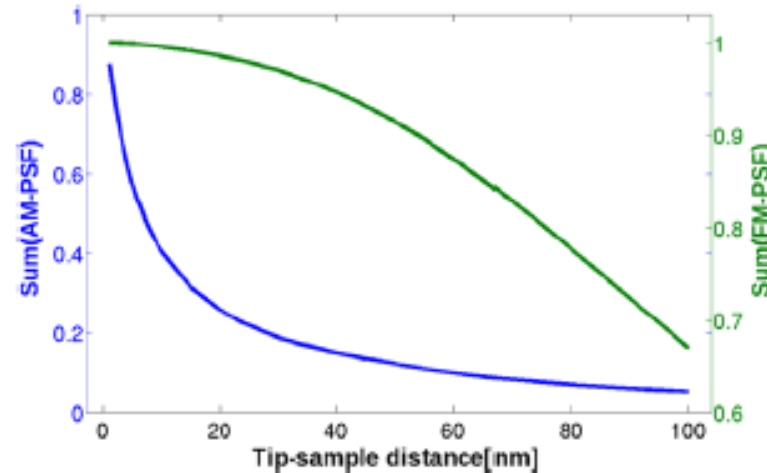
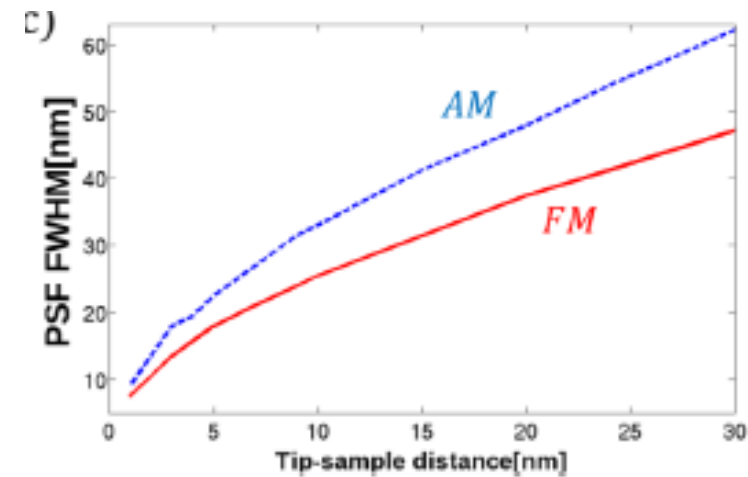
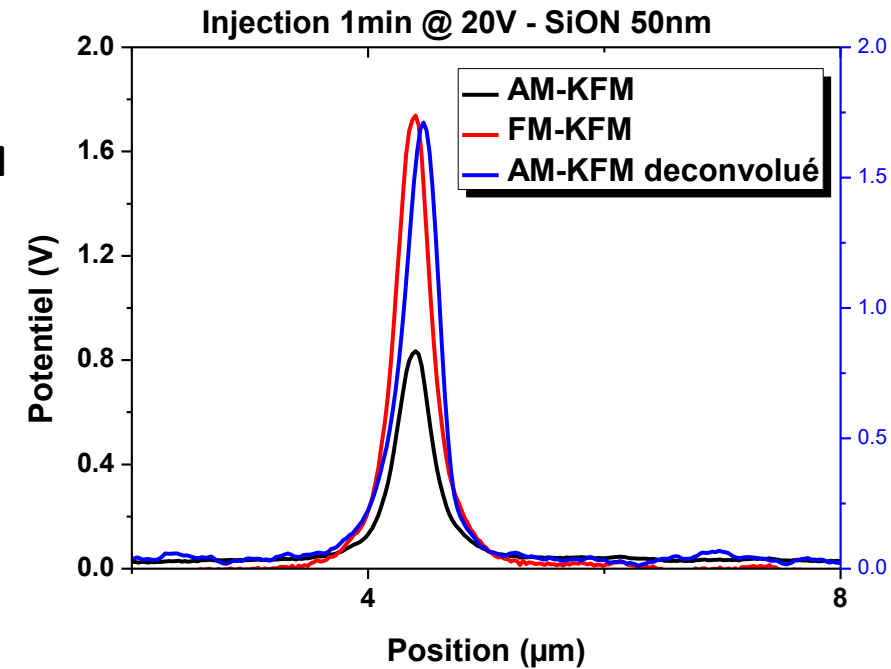
Point Spreading Function → fonction de transfert de la mesure KPFM¹



Potentiel « réel »

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

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

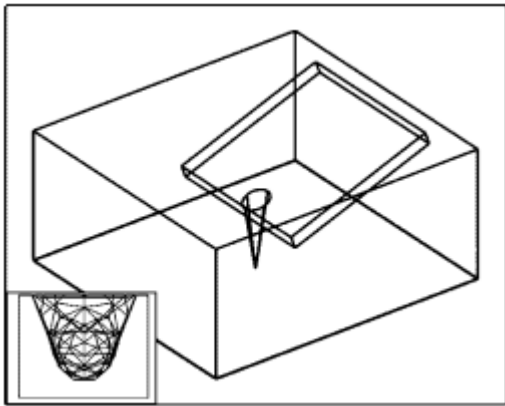


¹ G. Cohen et al., Nanotechnol. 24, 295702 (2013)

3.4. Modélisation du KPFM

Calcul de force électrostatique

Calcul de la force verticale par éléments finis¹



Limitation : KPFM non sensible aux charges images

Prise en compte des termes croisés

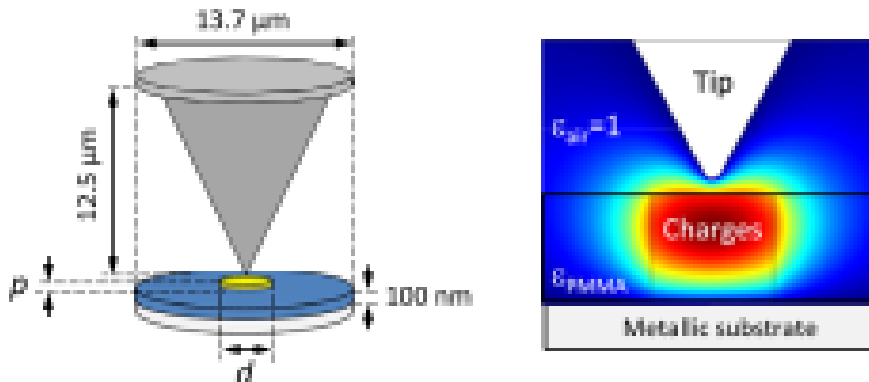
Modélisation du potentiel en AM-KPFM²⁻³

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

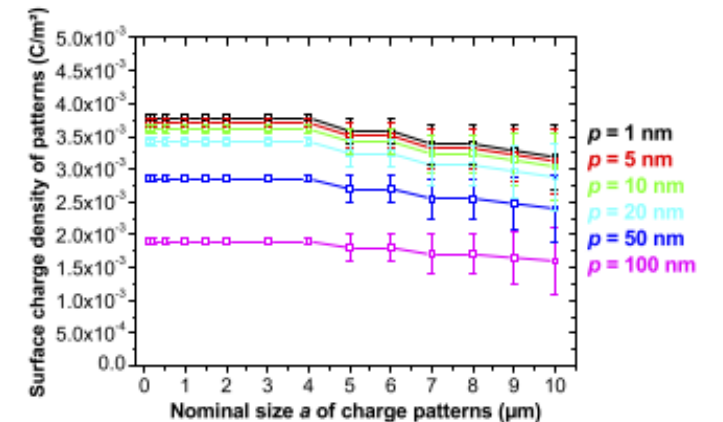
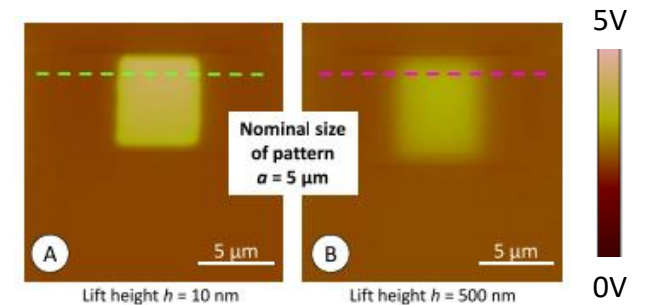
- $F_{Q,V_{DC}}$: terme croisé (influe V_{DC} et Q)
- $F_{Q,V_{DC}=0}$: contribution des charges images
- $F_{Q=0,V_{DC}}$: force électrostatique induite par V_{DC}

Modélisation existante pour FM-KPFM³

Etude des charges injectées localement dans le PMMA²



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

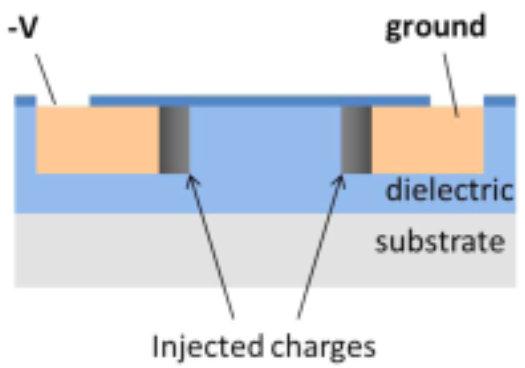


¹ D.S.H. Charrier et al, ACS Nano 2, 622 (2008)

² E. Palleau et al., Nanotechnology 21, 225706 (2010)

³ L. Borowik et al., APL 96, 103199 (2010)

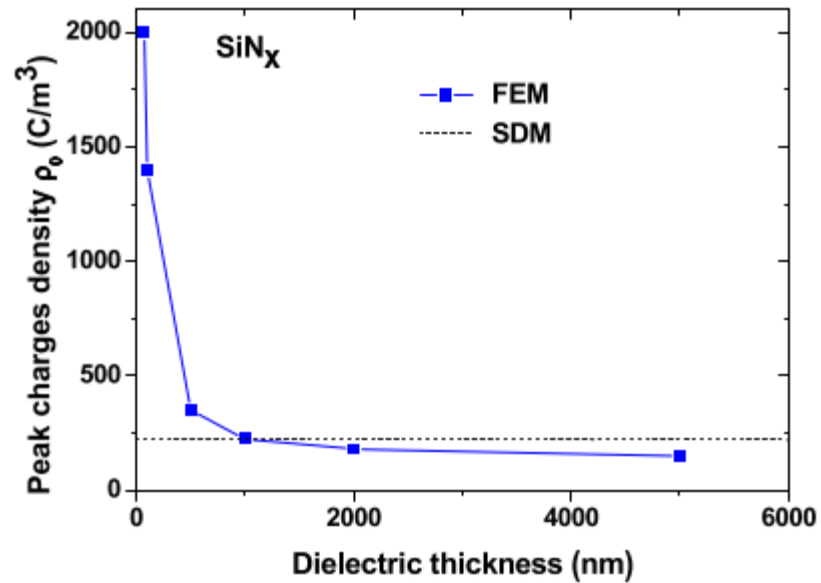
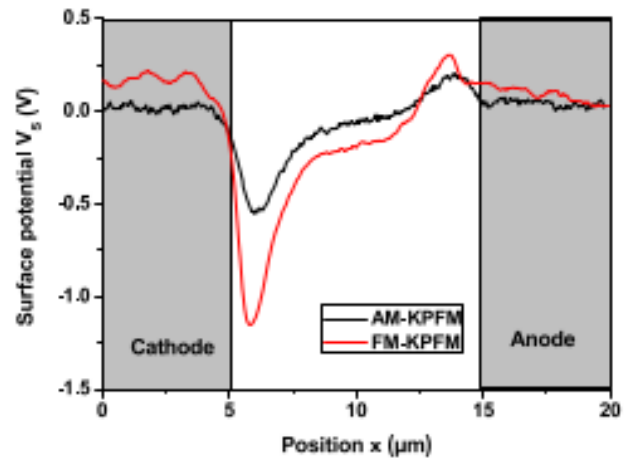
Charges injectées – Electrodes latérales



- 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)¹

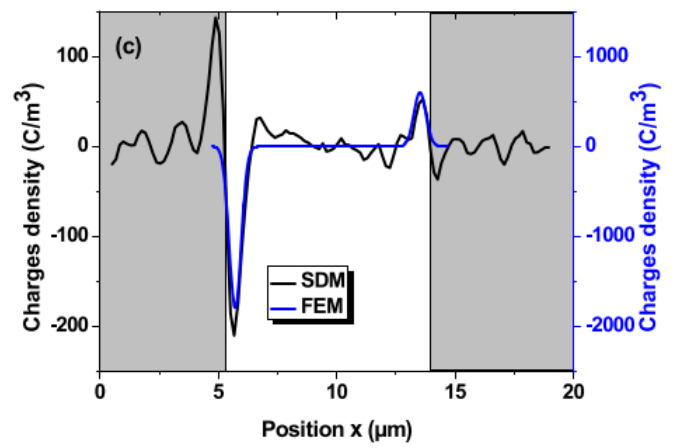
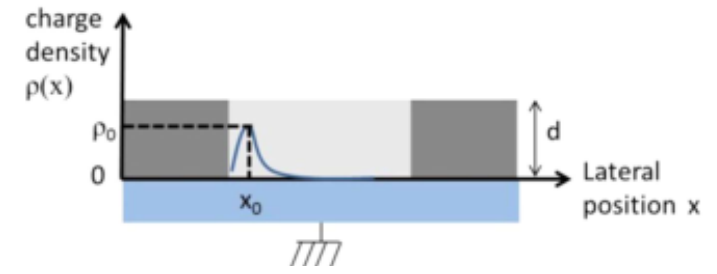


KPFM : potentiel de surface réel

Détermination de la densité de charges

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

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



¹ 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

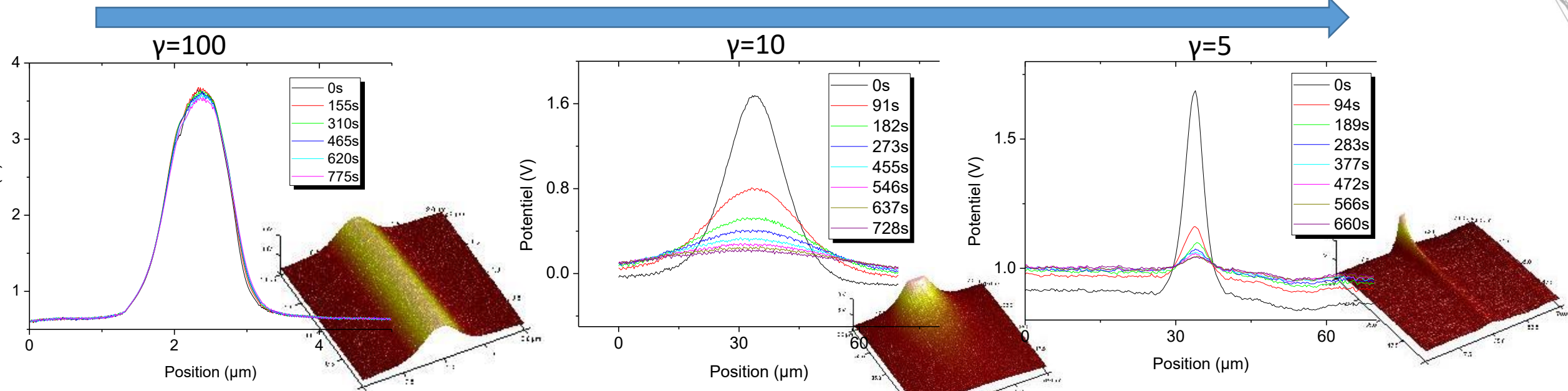
- Méthode de la dérivée seconde : film épais ($> 1\mu\text{m}$)
 - Méthode par éléments finis : film mince ($< 1\mu\text{m}$)
- + Mesure en FM-KPFM : plus proche du potentiel de surface réel

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

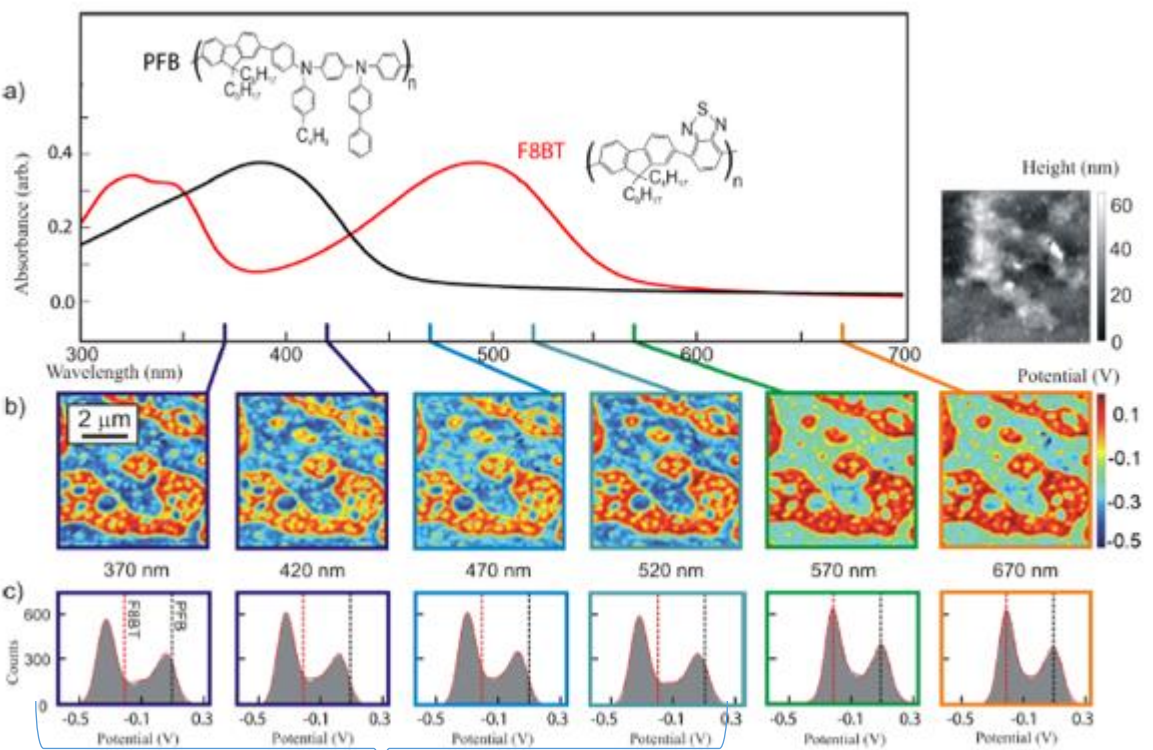
¹ C. Villeneuve-Faure et al, Proc. Int. Conf. Dielec. (ICD 2013)

² C. Villeneuve-Faure et al, JAP 113, 204102 (2013)

4.1. Mesures en dynamique – sous illumination

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

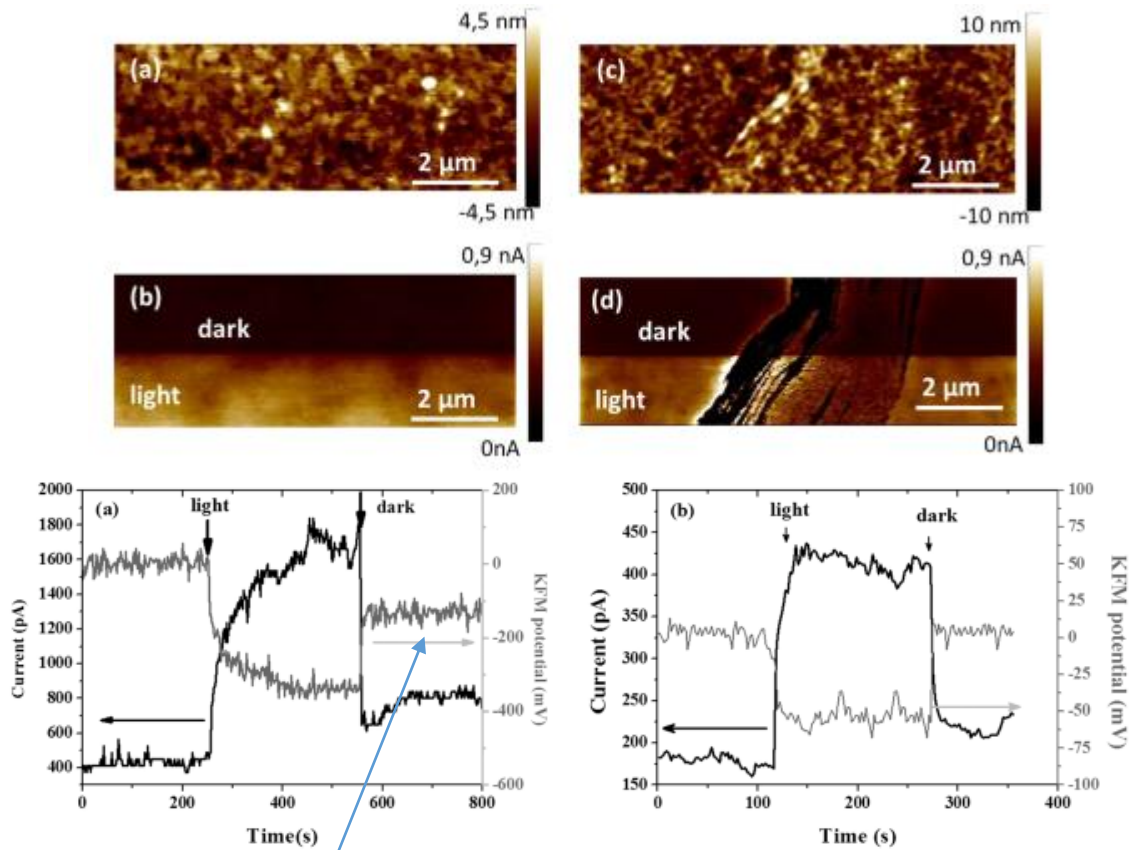
J. Luria et al., (2012)

Mesure sous illumination - dynamique

Cartographie de courant avec/sans illumination @ 3V

P3HT:PCBM

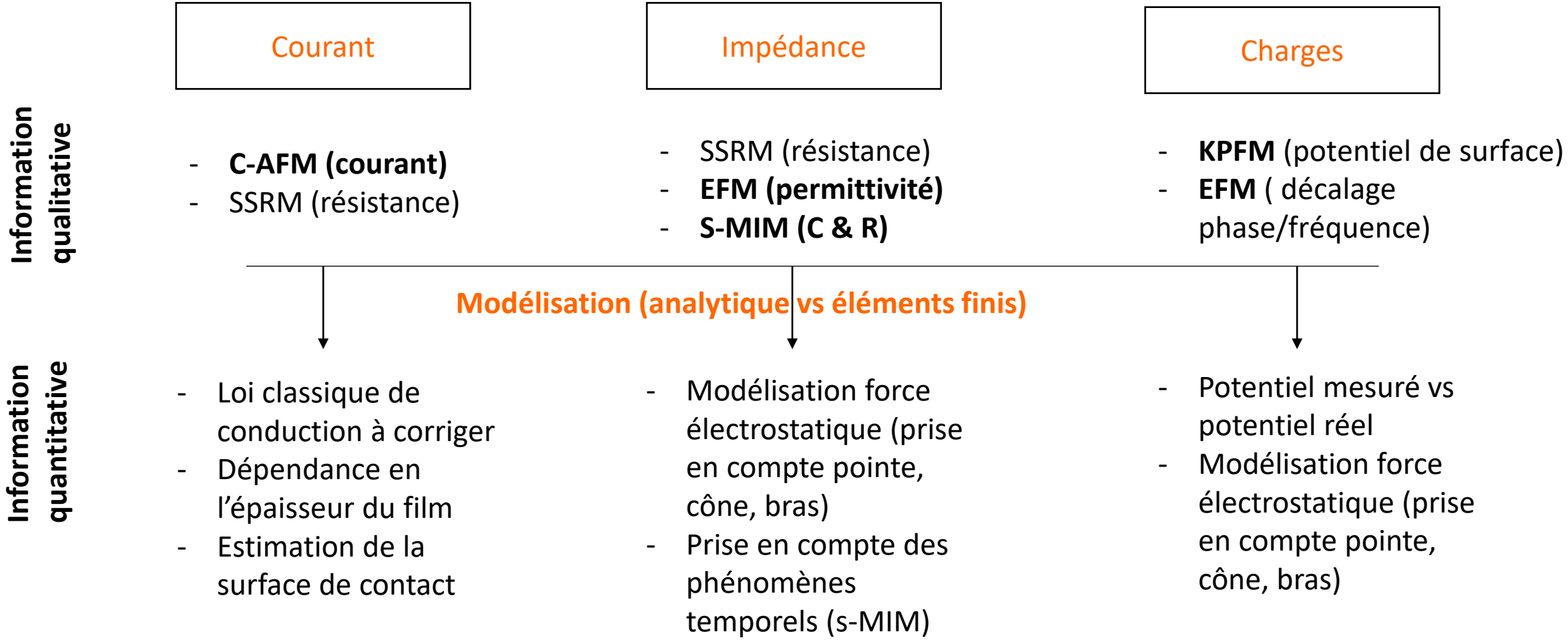
P3HT:BT22



Charges piégées

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

4. Conclusions



Biofilms 2024

10^e 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>