



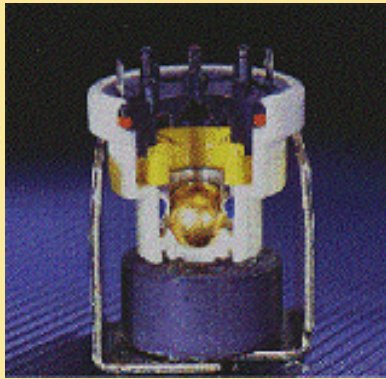
Propriétés des isolants: Influence des charges électriques

présenté par Christelle GUERRET

Chargée de recherche du CNRS

en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches

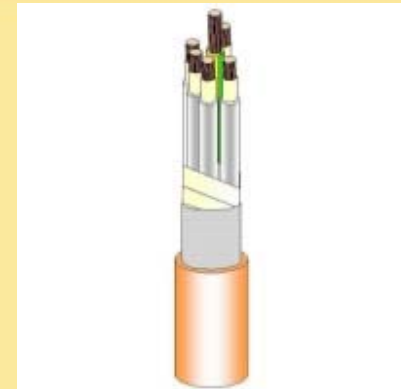




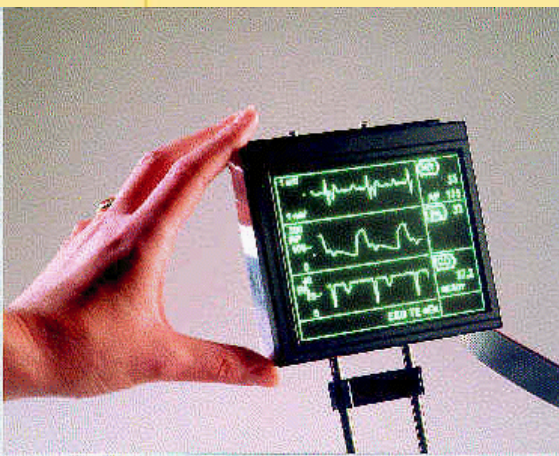
Capteurs électro- mécaniques d'accélération



Engins spatiaux



Isolants pour câbles



Ecran plat à effet de champ

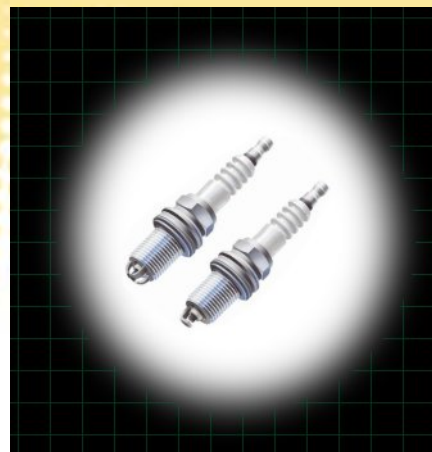
Quel rôle pour
les charges électriques ?



Extrusion de polymères



Guide-fils et galets de friction



Bougies d'allumage



Pièces pour robinet à mitigeur



PLAN

- I. **Exemples d'applications industrielles des isolants: Mise en évidence du rôle des charges électriques.**
 1. Modification du frottement et de l'adhésion
 2. Ecoulement et piégeage des charges électriques.

- II. **Contribution des forces électrostatiques aux propriétés d'adhésion des matériaux:**

- III. **Caractérisation des propriétés d'écoulement et de piégeage des charges : méthode "miroir" et simulations**

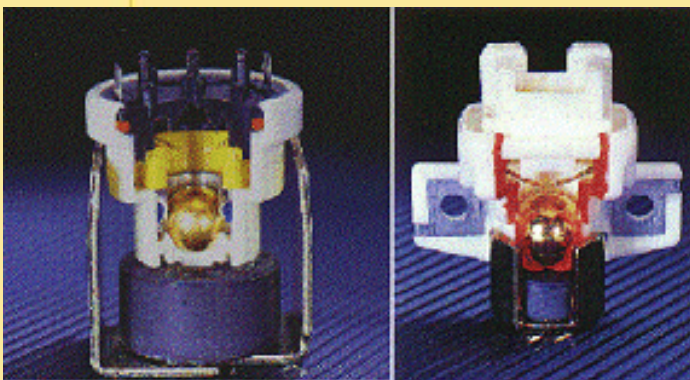
- IV. **Conclusions et Perspectives**

I.1. Modification du frottement et de l'adhésion

Capteurs électro-mécaniques d'accélération

Principe :

- bille métallique dans un guide isolant
- repoussée par un champ magnétique
- lors d'une accélération forte ou d'une collision la bille franchit le champ magnétique et fait contact électrique.



utilisation → triboélectrification contre le guide → bille collée contre la paroi

**Blocage du capteur par
adhésion de la bille sur son
guide isolant**

Etude fondamentale de l'interaction d'une
bille métallique chargée avec un plan
isolant

Intérêt de la compréhension des
phénomènes de triboélectrification

ACI* (Tribosurfélec)

I.1. Modification du frottement et de l'adhésion

Pièces pour robinets à mitigeur

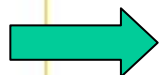


Principe :

- réglage simultané du débit et de la température de l'eau
- orifices de deux disques mobiles superposés en céramique
- glissement l'un sur l'autre lors du réglage

utilisation → frottement des deux disques → collage des deux disques

**Blocage du robinet par
adhésion des deux disques
céramiques**

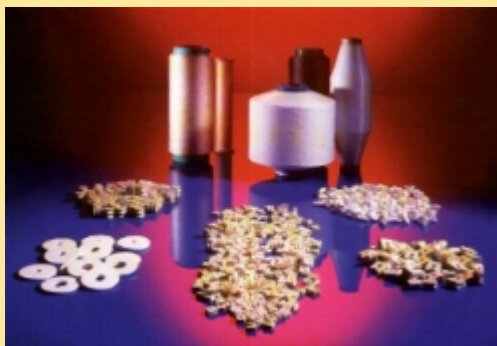


**Intérêt de la compréhension des
phénomènes de triboélectrification entre
deux matériaux antagonistes de même
nature**

ACI* (Tribosurfélec)

I.2. Ecoulement et piégeage des charges électriques

Guide-fils et galets de friction pour l'industrie textile



Performances:

- grande résistance à l'abrasion
- résistance à la corrosion chimique
- caractéristique mécaniques élevées
- matériaux utilisés: Al_2O_3 , Al_2O_3+Zr , TiO_2

Fil adhère au guide-fil au cours de l'utilisation lorsque le coefficient de frottement est trop important

Etude précédente*:

lien coefficient de frottement - capacité du matériau à piéger des charges

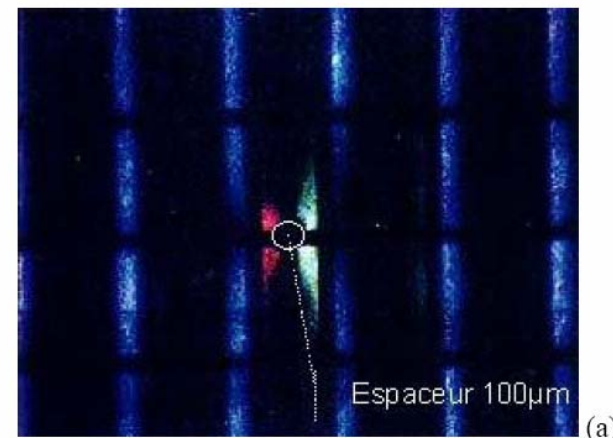
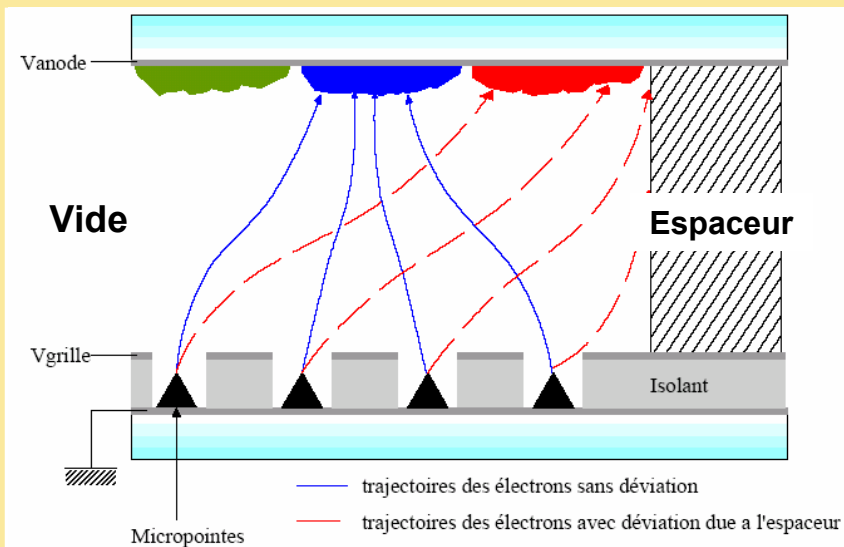
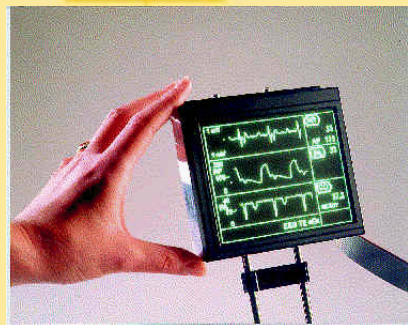


Importance de la capacité des matériaux à piéger des charges : étude de TiO_2

ACI
Thèse T. Temga

I.2. Ecoulement et piégeage des charges électriques

Ecrans plats à effet de champ *



Problème de "mélange" des couleurs dû au champ électrostatique créé par le chargement des espaceurs



Classement en "isolants piègeurs" et "isolants conductifs"*



Caractérisation du comportement des diélectriques sous irradiation : écoulement, piégeage des charges...

* D. Braga, Mémoire de Thèse, Université Paris XI, 2003.

** T. Thome, D. Braga, G. Blaise, *J. Appl. Phys.*, 2004, 95 (5), 2619 .

I.2. Ecoulement et piégeage des charges électriques

Bougies d'allumage

Conditions d'utilisation :

- milieu corrosif
- importantes variations de température et de pression
- haute tension
- miniaturisation des composants

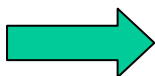


Viellissement du matériau

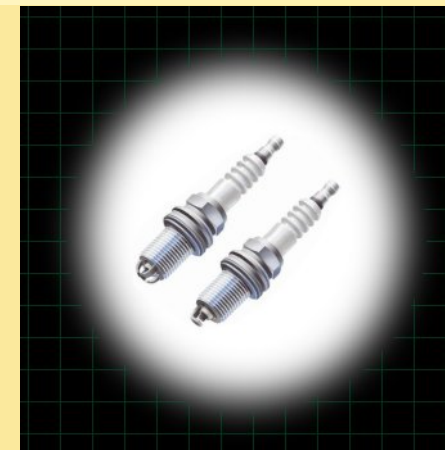
Résistance au claquage diélectrique dans différentes gammes de température



Problème de claquage diélectrique des bougies d'allumage



Ecoulement et piégeage des charges...
Liens avec la tenacité diélectrique des isolants
Comportement en température, vieillissement ...



Applications:

- motos
- automobiles
- bateaux
- fusées
- plaques de cuisson...

Thèse X. Meyza*
Thèse M. Touzin*

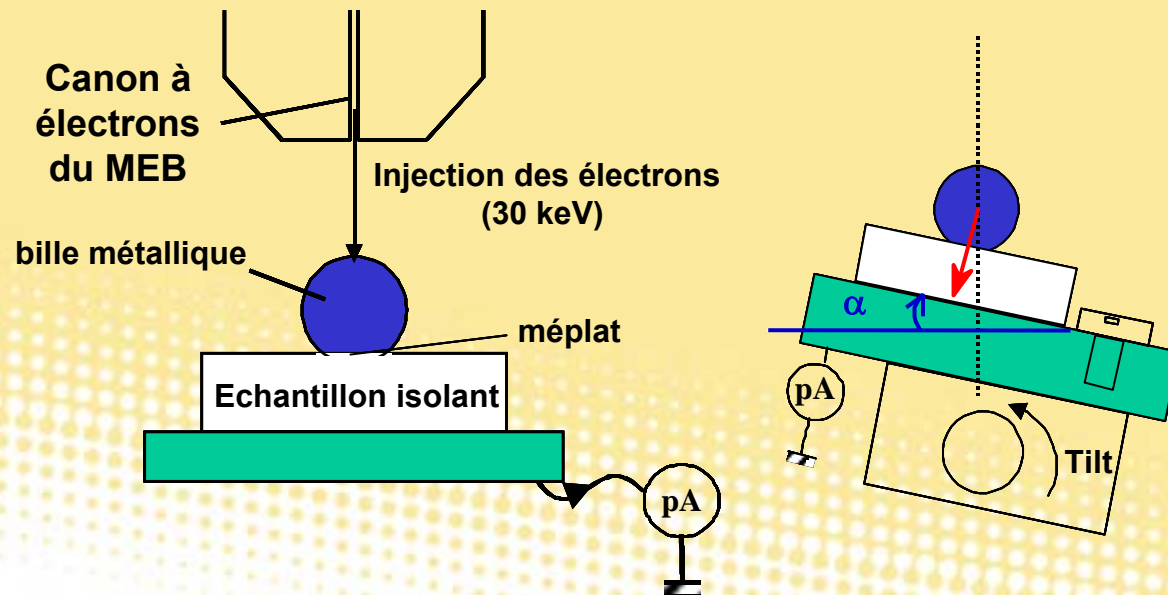
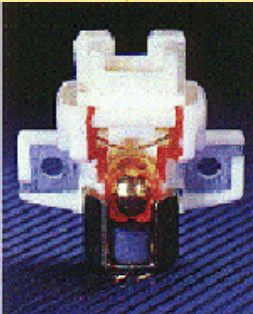
- II. **Contribution des forces électrostatiques aux propriétés d'adhésion des matériaux:**
 - 1. **Exemple de la bille métallique chargée en contact avec un isolant**
 - 2. **La triboélectrification entre deux matériaux de même nature**

II.1. Bille métallique chargée en contact avec un isolant

Expériences

Objectifs de l'étude:

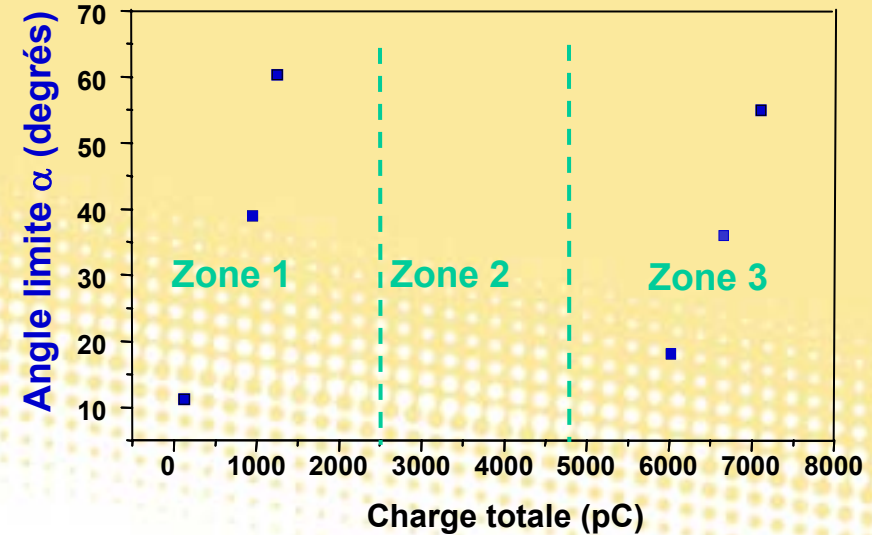
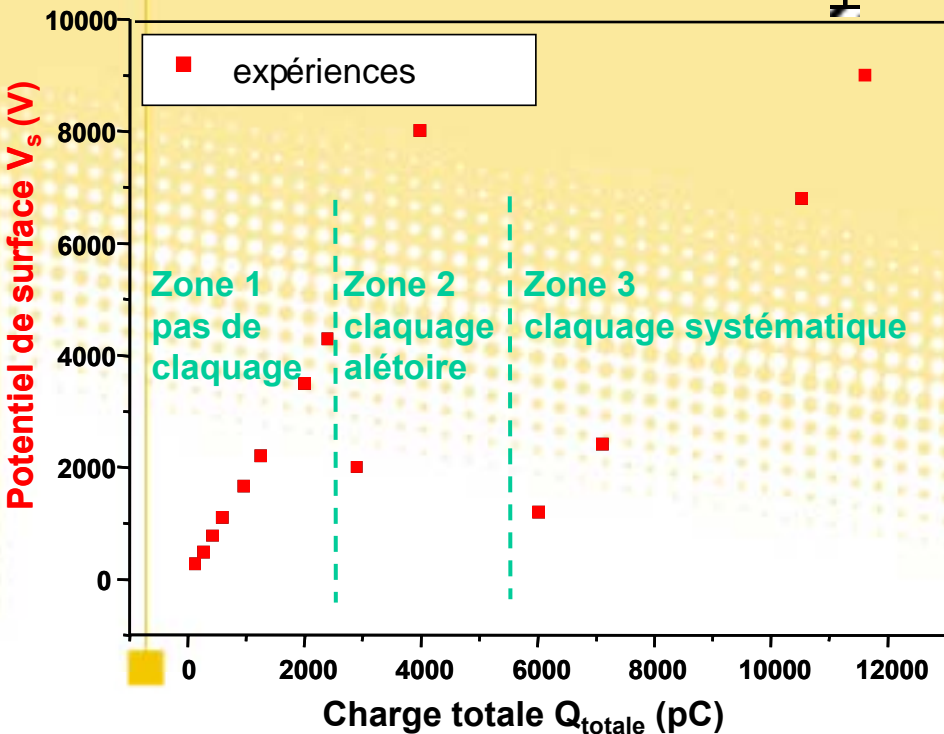
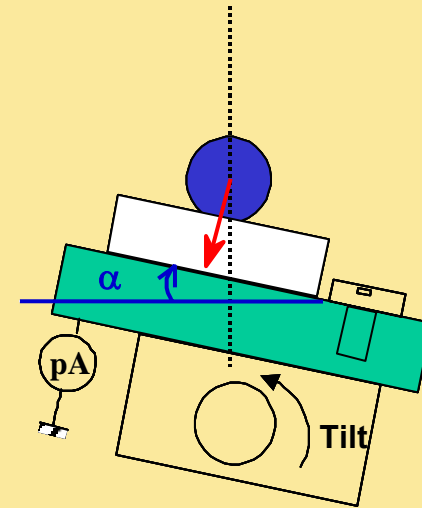
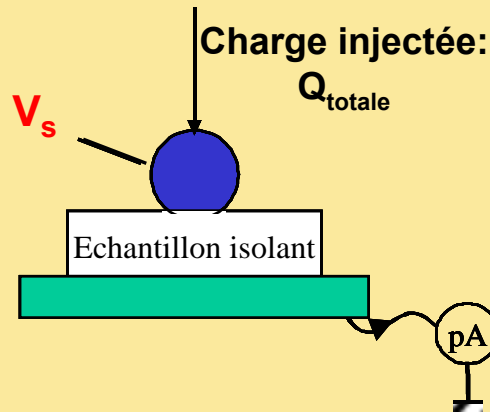
- mise en évidence de l'importance des forces électrostatiques
- injection "douce" de charges électriques dans un isolant?



$$\sin\alpha - k\cos\alpha = \frac{k}{mg}F$$

II.1. Bille métallique chargée en contact avec un isolant

Expériences



II.1. Bille métallique chargée en contact avec un isolant

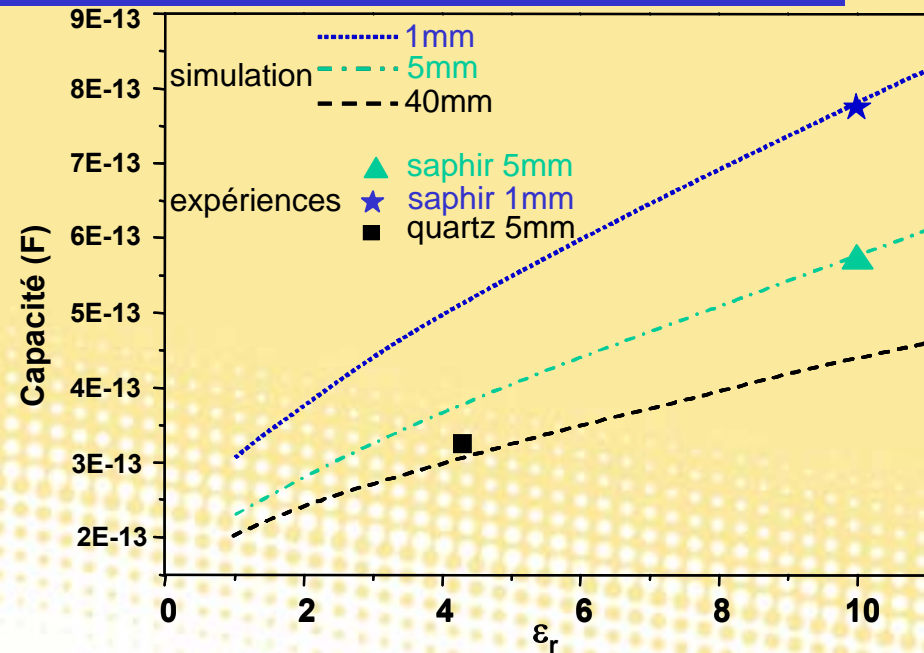
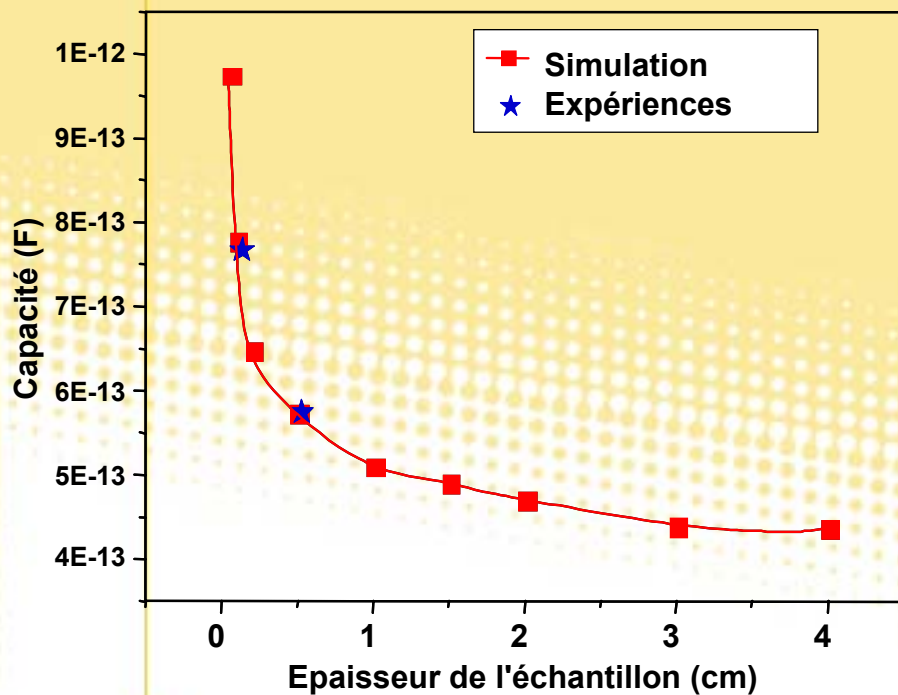
Simulations (Flux 2D)

Modèle numérique* :

- symétrie axiale, charge dans la bille Q_i , potentiel V_s
- bille reposant sur un disque isolant (ϵ_r) d'épaisseur h ($R=20\text{mm}$)
- isolant posé sur un plan métallique mis à la masse



$$Q_i = C V_s$$



Influence du porte-échantillon

Rôle prépondérant de ϵ_r

* collaboration avec N Burais, CEGELY, EC Lyon

II.1. Bille métallique chargée en contact avec un isolant

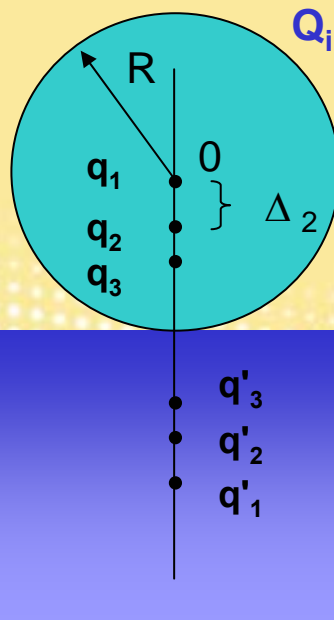


Approche analytique

Hypothèses du calcul:

- bille conductrice posée sur un diélectrique semi-infini
- cas (a): sphère chargée Q_i , plan non chargé
- cas (b): sphère chargée Q_i , plan chargé Q_t
- Q_t charge ponctuelle

Cas (a) plan non chargé: 2 séries infinies de charges images



$$\left\{ \begin{aligned} q_{i+1} &= A^i * q_1 * \frac{1}{i+1} \\ q'_i &= -A^i * q_1 * \frac{1}{i} \\ \Delta_{i+1} &= \frac{i}{i+1} R \end{aligned} \right. \quad \begin{aligned} &A = (\epsilon_r - 1) / (\epsilon_r + 1) \\ &\text{interface vide/diélectrique} \\ &\Delta_i = \text{distance } q_i - \text{centre O} \\ &q'_i \text{ symétrique de } q_i / \text{interface} \\ &q_1 = \frac{-A}{\ln(1-A)} * Q_i \end{aligned}$$

$$V_s = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 * (R - \Delta_i)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R} \frac{A}{\ln(1-A)} Q_i$$

Capacité C

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \sum_j \frac{q_i q_j}{(2R - \Delta_i - \Delta_j)^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R^2} \left(\frac{A}{\ln(1-A)} \right)^2 * Q_i^2 * K_\epsilon$$

$$K_\epsilon = \sum_i \sum_j A^{(i+j)-1} \frac{ij}{(i+j)^2}$$

saphir ($\epsilon_r=10$) $K_\epsilon=4.69$, quartz ($\epsilon_r=4.3$) $K_\epsilon=0,91$

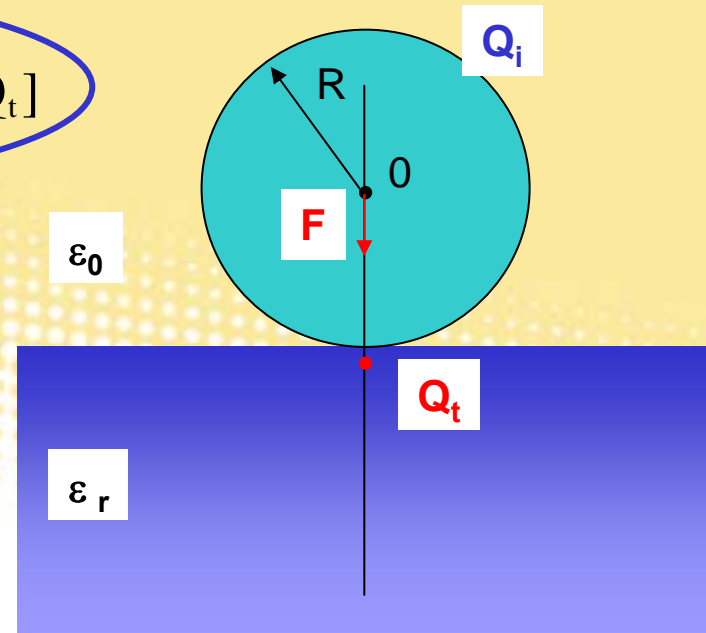
II.1. Bille métallique chargée en contact avec un isolant

Approche analytique

Cas (b) plan chargé Q_t : 4 séries infinies de charges images

$$V_s = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 * (R - \Delta_i)} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{q_i^d}{4\pi\epsilon_0 * (R - \Delta_i^d)} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0 R} \left[\frac{-A}{\ln(1-A)} Q_i + \frac{2}{\epsilon_r + 1} Q_t \right]$$

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R^2} \left[\left(\frac{A}{\ln(1-A)} \right)^2 * Q_i^2 * K_\epsilon - \frac{2}{\epsilon_r + 1} * Q_i * Q_t \right]$$



II.1. Bille métallique chargée en contact avec un isolant

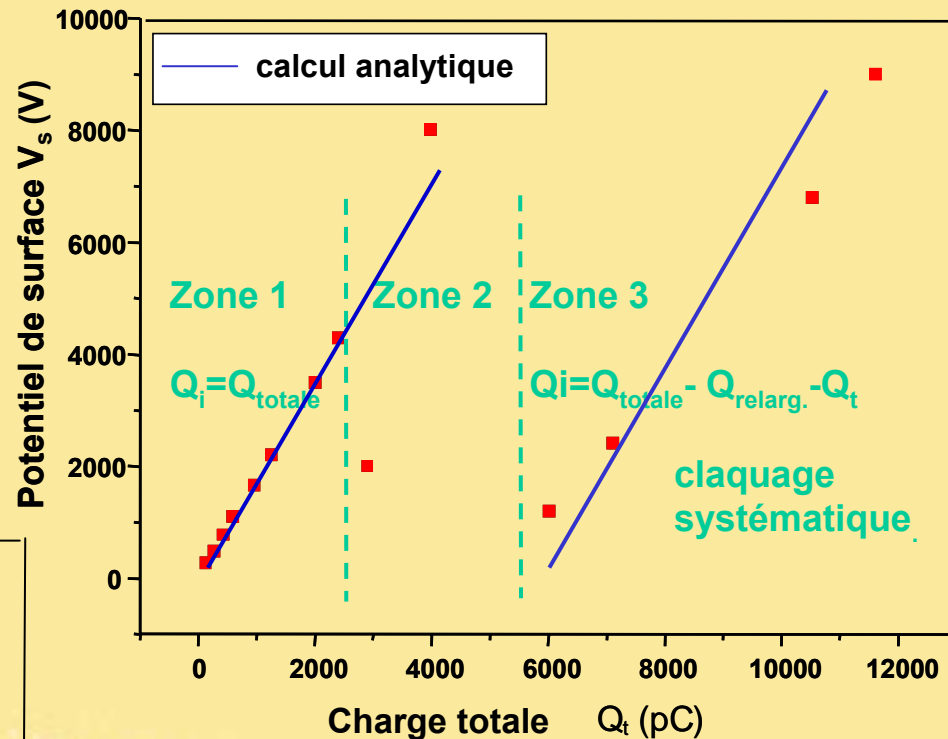
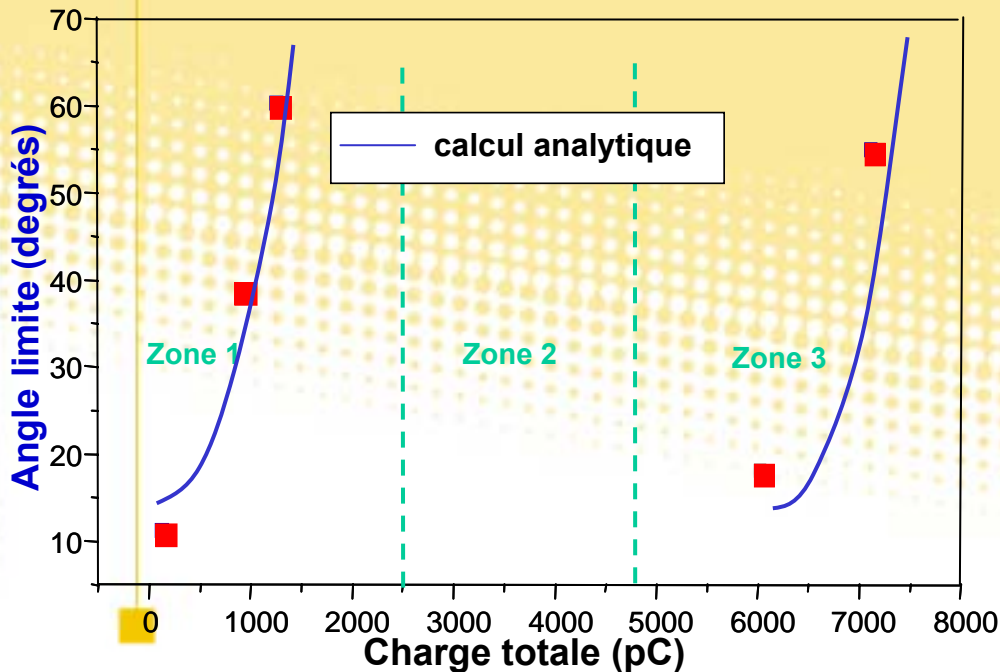


Approche analytique

Partie 1: $Q_i = Q_{\text{totale}}$

Partie 2: Claquage aléatoire

Partie 3: $Q_i = Q_{\text{totale}} - Q_{\text{relarguées}} - Q_t$
 Claquage systématique
 ($Q_{\text{relarguées}} = 6000 \text{ pC}$, $Q_{\text{injectées}} = 200 \text{ pC}$)



$$V_s = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R} \frac{A}{\ln(1-A)} Q_i$$

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R^2} \left(\frac{A}{\ln(1-A)} \right)^2 * Q_i^2 * K_\epsilon$$

II.1. Bille métallique chargée en contact avec un isolant



Bilan*

Résultats applicatifs: Adhésion de la bille est un phénomène électrostatique

$$F_{\text{électrost}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R^2} \left(\frac{A}{\ln(1-A)} \right)^2 * Q_i^2 * K_\epsilon = \frac{C_{te}}{4\pi\epsilon_0 R^2} Q_i^2$$

saphir ($\epsilon_r=10$), $C_{te} = 1,08$
 quartz ($\epsilon_r=4.3$) $C_{te} = 0,36$



Choix du diélectrique: nature, épaisseur
 Dimensions de la bille

Résultats fondamentaux:

Mécanisme d'interaction bille-plan sous injection d'électrons: 3 étapes

- 1- Bille peu chargée: charges électriques restent dans la bille
- 2- Claquage du milieu environnant , Relargage des charges présentes dans la bille.
- 3- Claquage systématique: Relargage dans le milieu environnant + injection et piégeage dans le plan isolant + reprise de l'injection dans la bille

Remarques: - piégeage stable et en volume
 - non utilisable pour injection "douce"

* C. Guerret, D. Juvé, D. Tréheux, N. Burais *Journal of Applied Physics* , Vol 92 (12), p 7425, 2002

- II. **Contribution des forces électrostatiques aux propriétés d'adhésion des matériaux:**
 - 1. **Exemple de la bille métallique chargée en contact avec un isolant**
 - 2. **La triboélectrification entre deux matériaux de même nature**

II.2. La triboélectrification entre deux matériaux de même nature

Position du problème *

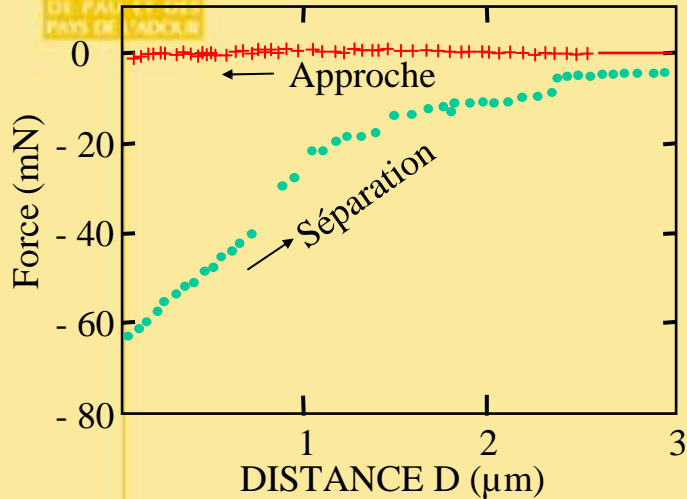


- **Triboélectrification entre 2 matériaux différents:** mécanisme identifié pour les métaux, non totalement établi lorsqu'au moins un des antagonistes est isolant
- **Triboélectrification entre 2 antagonistes de même nature:** non comprise, non mise en évidence à l'échelle microscopique
- **Nombreuses études, avec développements récents (SFA, AFM, EFM)**

* C. Guerret, S. Bec, D. Tréheux, C.-R. de l'Académie des Sciences. Paris, t2, Série IV, p. 1-14 2001

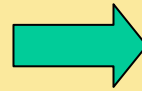
II.2. La triboélectrification entre deux matériaux de même nature

Résultats de la littérature



Appareil à Force de Surface : Mica/Silice, dans N₂ sec

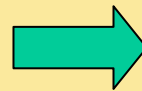
Horn R.G. and Smith D.T *Science* 256, (1992)



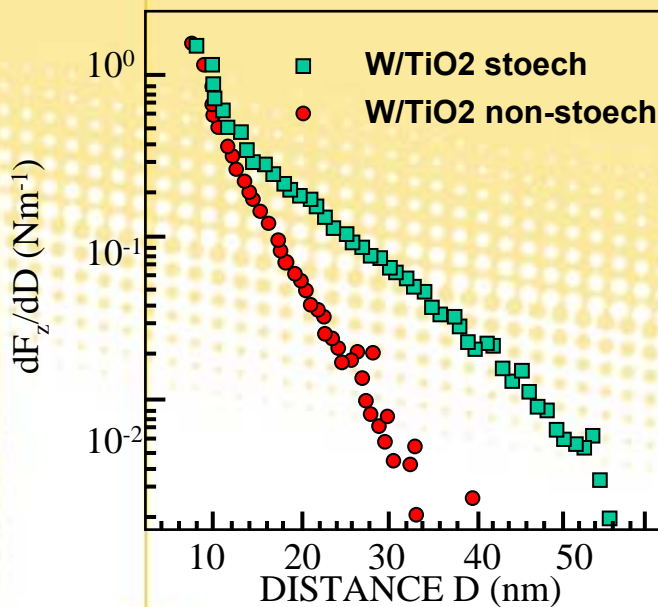
- attraction à longue distance (>3 μm)
- densité de charges électriques : **10 mC/m²**

AFM: Tungstène/ TiO₂ stoech. ou non/stoech, Ultravide

Sounilhac S., Barthel E., Creuzet F. , *J. Appl. Phys.*, 85 (1) (1999)



- <15nm : Forces de van der Waals dominant
- >15nm: Force électrostatique pour TiO₂ stoech
- densité de charges électriques : **10⁻³ mC/m²**



AFM: Stabilité des charges dans des couches minces d'Al₂O₃

N. Felidj, J. Lambert, C. Guthmann, M. Saint Jean *Eur. Phys. J. A. P.* 12 (2000)

J. Lambert, C. Guthmann, M. Saint Jean *J. Appl. Phys.*, 93 (9) (2003)

- dépôt de charges sur les surfaces d'oxydes, par application d'un potentiel ou par frottement
- densité de charges électriques : **10⁻⁵ mC/m²**

II.2. La triboélectrification entre deux matériaux de même nature

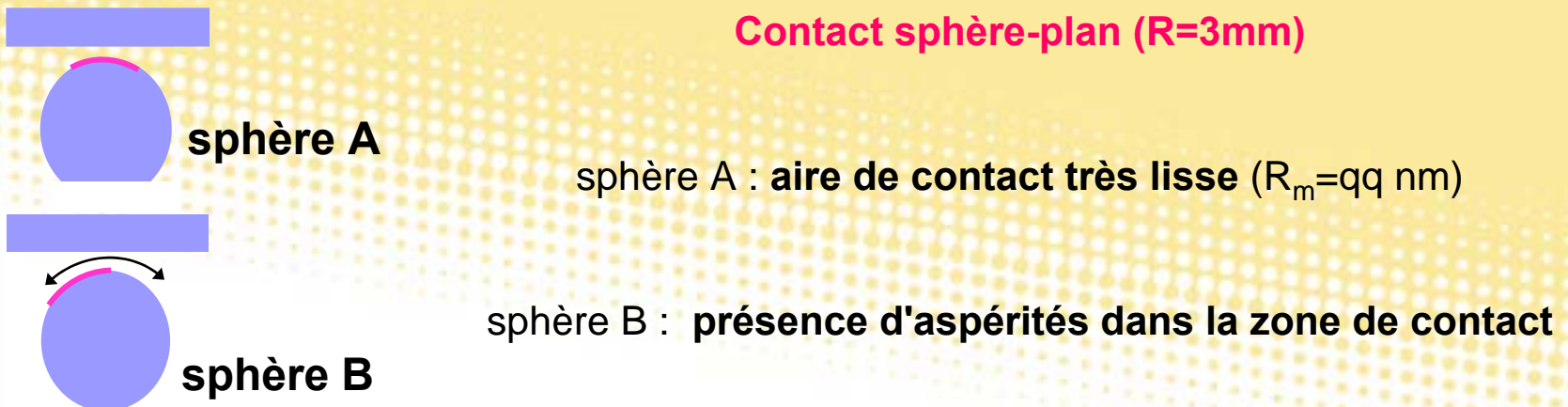
Adhésion entre deux surfaces isolantes de même nature*

OBJECTIF :

- Mise en évidence de la triboélectrification de matériaux de **même nature**
- Caractérisation de la **contribution de la force électrostatique** résultante sur l'adhésion

EXPERIENCE :

- Appareil à Force de Surface de l'ECL (SFA)
- 2 antagonistes en alumine monocristalline (saphir)



* Action Concertée Incitative, " Tribosurfélec" , collaboration IFoS- LTDS

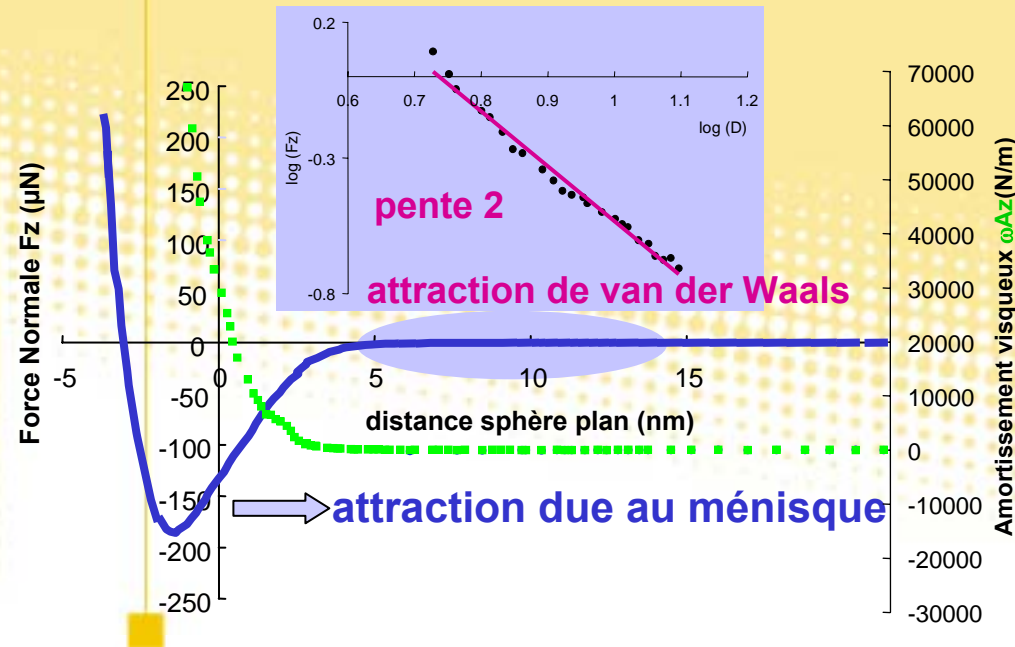
** C. GUERRET-PIECOURT, J. VALLAYER, D. TREHEUX Wear, Vol 254, p 950-958, 2003

II.2. La triboélectrification entre deux matériaux de même nature

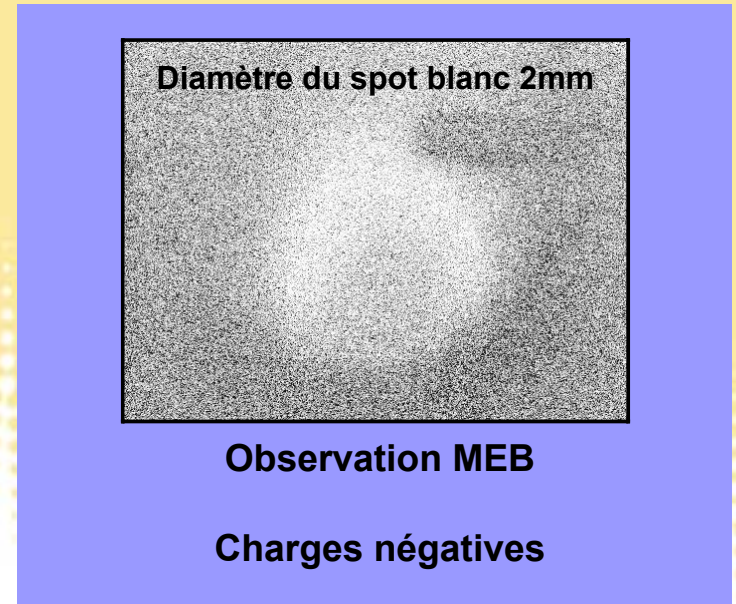
Cas de la sphère lisse A

- **Avant frottement:** - attraction due aux forces de van der Waals $\frac{F_z}{R} = \frac{-A}{6D^2}$
 - apparition d'un amortissement visqueux due à la formation d'un ménisque ➡ Vide non suffisant pour éliminer toute l'eau

- **Après frottement:** - apparition d'une force à longue distance, charges électrostatiques



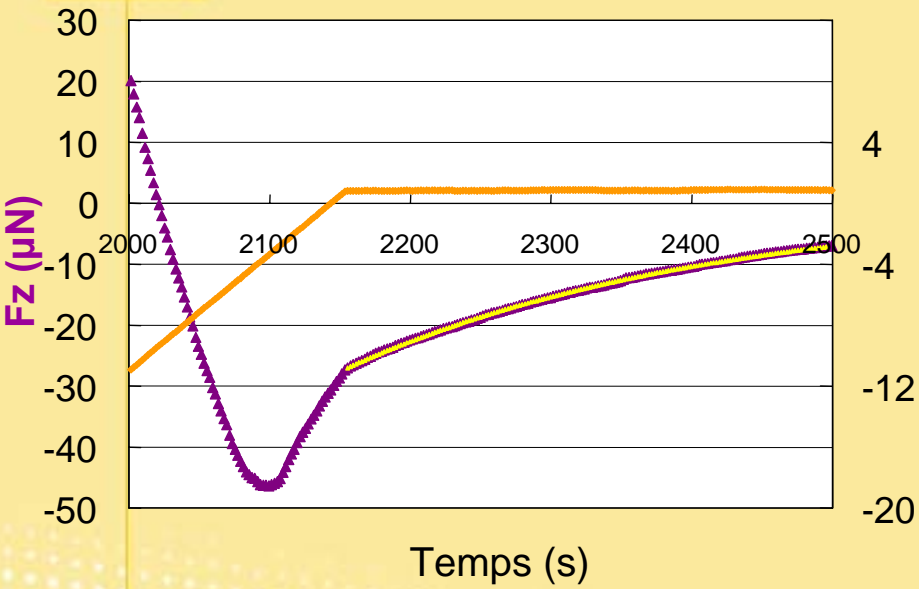
Avant frottement



Après frottement

II.2. La triboélectrification entre deux matériaux de même nature

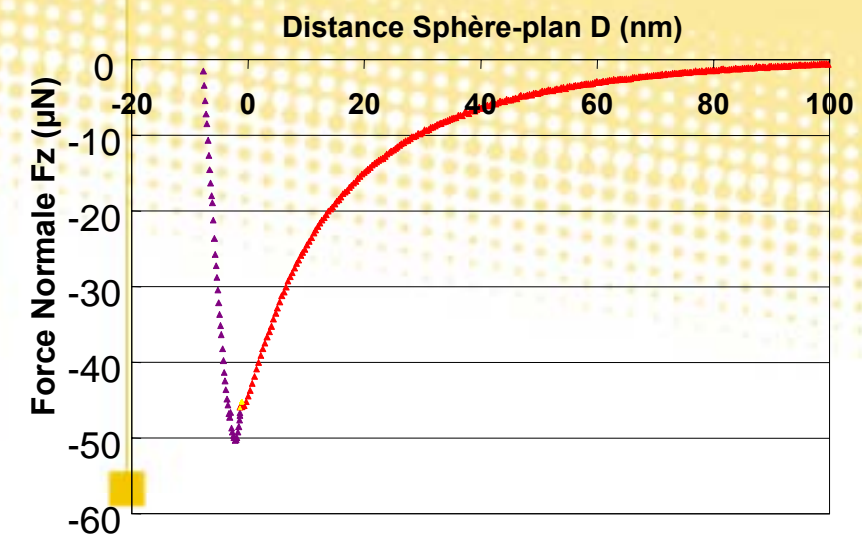
Cas de la sphère B : attraction après frottement



A distance fixée, fin du déchargement : attraction diminue avec le temps

$$F_z = F_o \exp\left(-\frac{(t - t_o)}{\tau}\right)$$

$\tau = 256 \text{ s}$



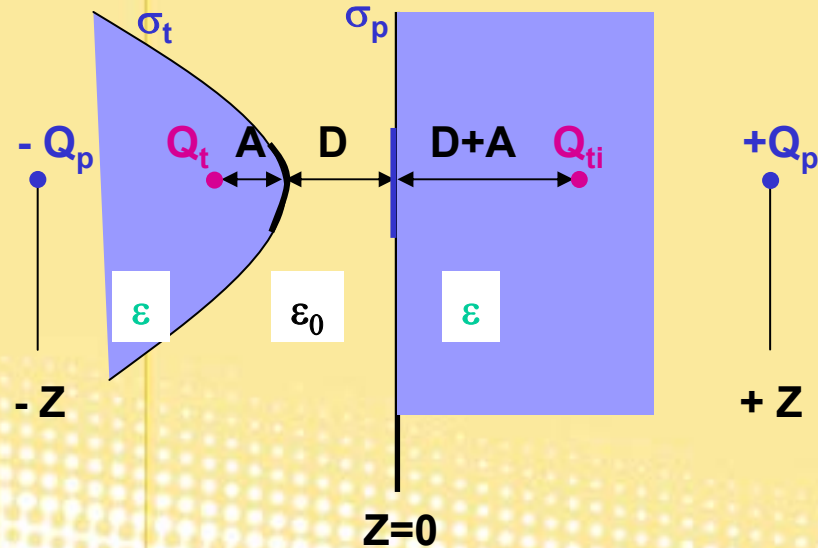
Procédure spécifique de déchargement instantané (qq s) : attraction diminue avec la distance

II.2. La triboélectrification entre deux matériaux de même nature

Attraction après frottement : Modèle de Burnham & al

Modèle de Burnham, Colton et Pollock (BCP)

Burnham N.A., Colton R.J., Pollock H.M., *Phys. Rev. Lett.* vol 69, n°1 (1992)



1er terme:

- due à l'interface vide/diélectrique
- toujours attractif

2ème terme:

- dépend du signe relatif de Q_t et Q_p
- même si Q_t et Q_p sont de même signe, à faible distance le 1er terme domine

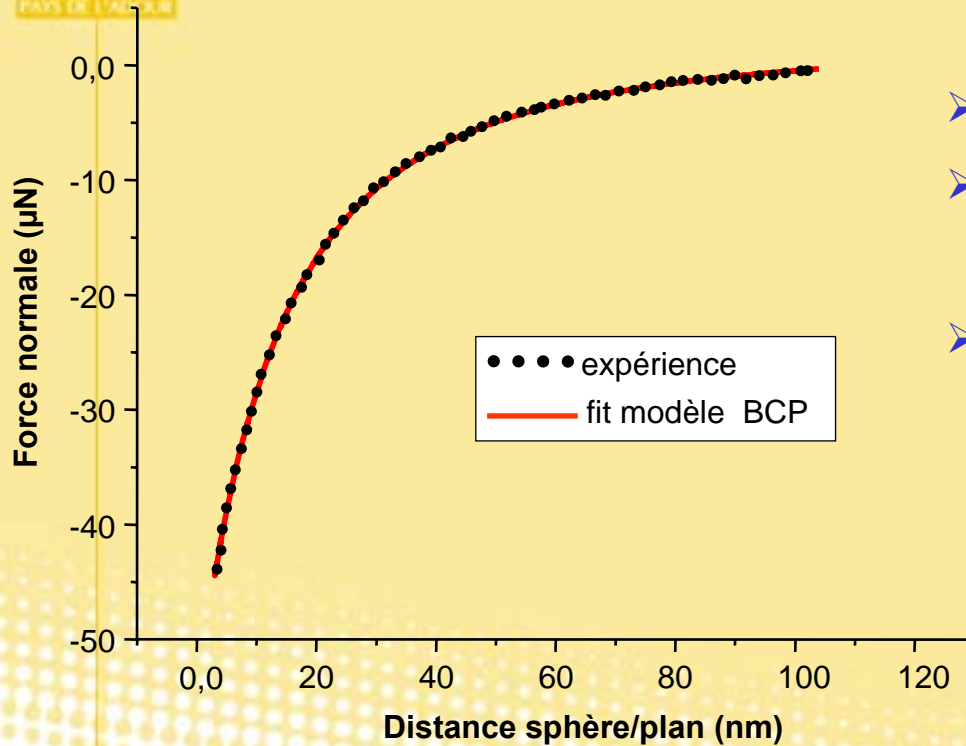
Dans le cas de notre symétrie:

$$4\pi\epsilon_0 F = - \frac{Q_t^2}{4(D+A)^2} \begin{pmatrix} \epsilon - 1 \\ \epsilon + 1 \end{pmatrix} + \frac{RQ_tQ_p}{z(2D+A+R)^2} \begin{pmatrix} \epsilon - 1 \\ \epsilon + 1 \end{pmatrix}^2$$

$\epsilon = 10$ pour Al_2O_3

II.2. La triboélectrification entre deux matériaux de même nature

Attraction après frottement : Modèle de Burnham & al



➤ Frottement saphir-saphir

➤ Meilleur fit entre 0 et 100 nm :

• Charges de même signe

➤ Paramètres du fit :

• $Q_t = 4,76 \cdot 10^{-15} \text{ C}$, $\Rightarrow \sigma_t = 9,2 \cdot 10^{-2} \text{ mC/m}^2$

• $A = 26 \text{ nm}$

• $Q_p/Z = 2,2 \cdot 10^{-7} \text{ C/m}$

Pour comparaison :

➤ Burnham et al : **diamant/graphite**

• $Q_t = 2 \cdot 10^{-16} \text{ C}$, $\Rightarrow \sigma_t = 4 \cdot 10^{-5} \text{ e/Å}^2$

• $A = 10 \text{ nm}$,

• $Q_p/Z = 4 \cdot 10^{-8} \text{ C/m} \Rightarrow \sigma_p = 8 \cdot 10^{-7} \text{ e/Å}^2$

➤ Sounilhac et al : **tungstène/TiO₂**

• $Q_t = 0,54 \cdot 10^{-15} \text{ C}$

• $A = 68 \text{ nm}$

• charges de même signe

II.2. La triboélectrification entre deux matériaux de même nature

Modification de l'adhésion due à la triboélectrification*

Bilan

(1) Mesure instantanée, Force à courte distance (0-100nm) :

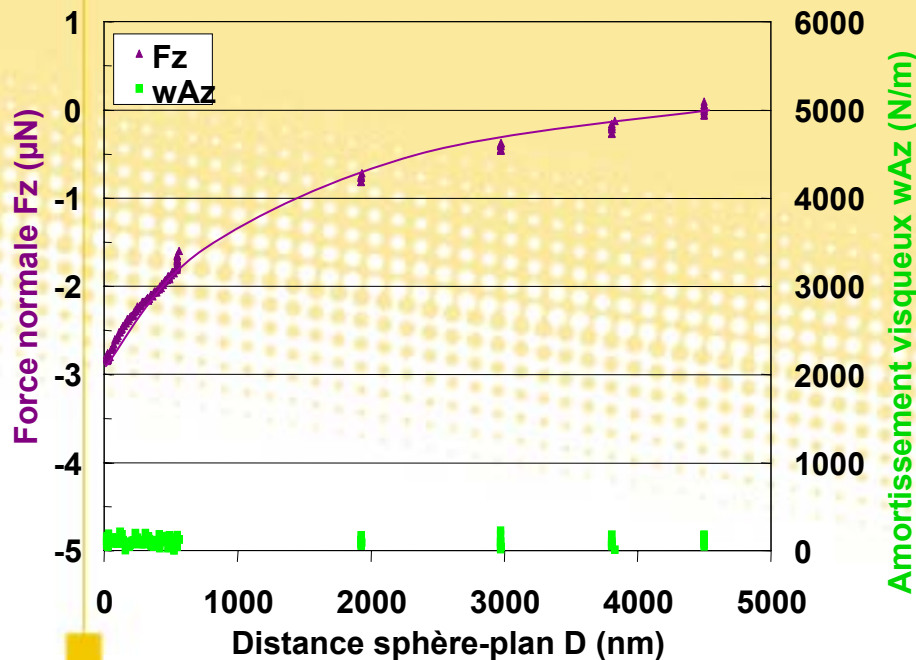
- Adhésion modifiée par présence d'une force électrostatique,
- Quantification des charges (modèle BCP)
- Charges mobiles sur la surface: $t = 256s$,
- Comparable aux temps de diffusion en surface $\tau \approx 200s$ sur surface d'alumine en présence d'un film d'eau ou polluée.

II.2. La triboélectrification entre deux matériaux de même nature

Modification de l'adhésion due à la triboélectrification*

(2) Temps longs, Force à longue distance (1- 5 μ m):

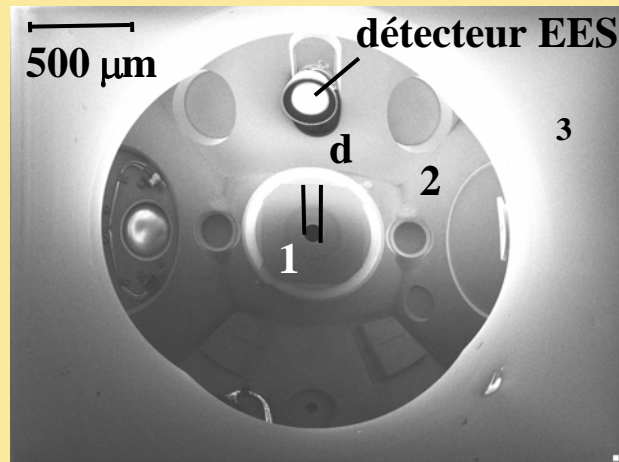
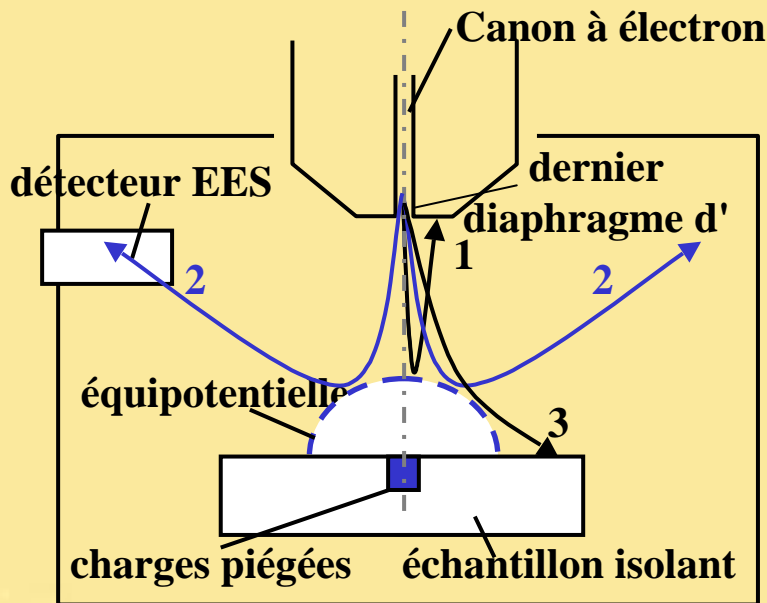
- attraction à longue distance dans la zone de frottement
- observée sur les deux types de sphère (lisse ou avec aspérité)
- mesurable plusieurs jours après le test
- charge observée au MEB



- III. Caractérisation des propriétés d'écoulement et de piégeage des charges : méthode "miroir" et simulations**
 - 1. Méthode miroir et courant d'influence**
 - 2. Simulation de l'injection des électrons**

III.1. Méthode miroir et courant d'influence

Méthode miroir (SEMM)



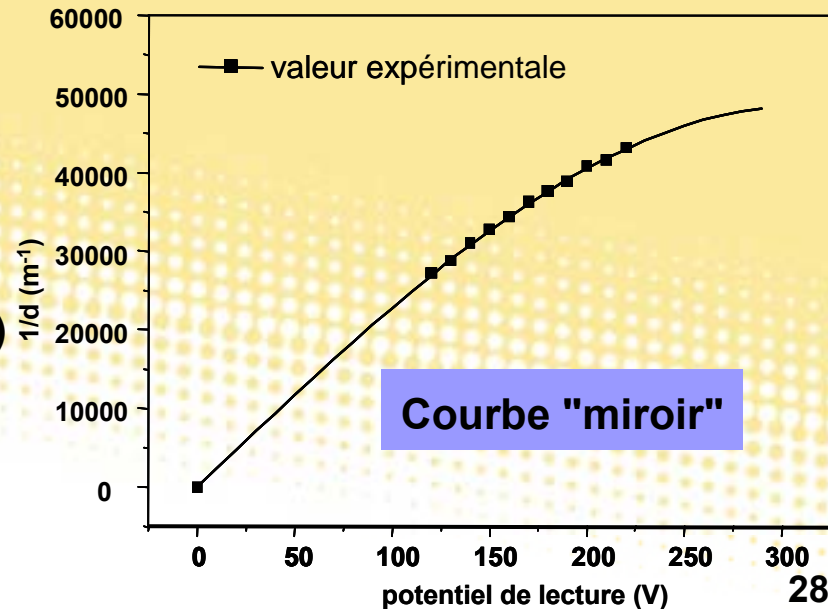
2 Etapes:

- injection d'électrons de grande énergie (10-30 keV)

➡ piégeage de charges dans l'isolant

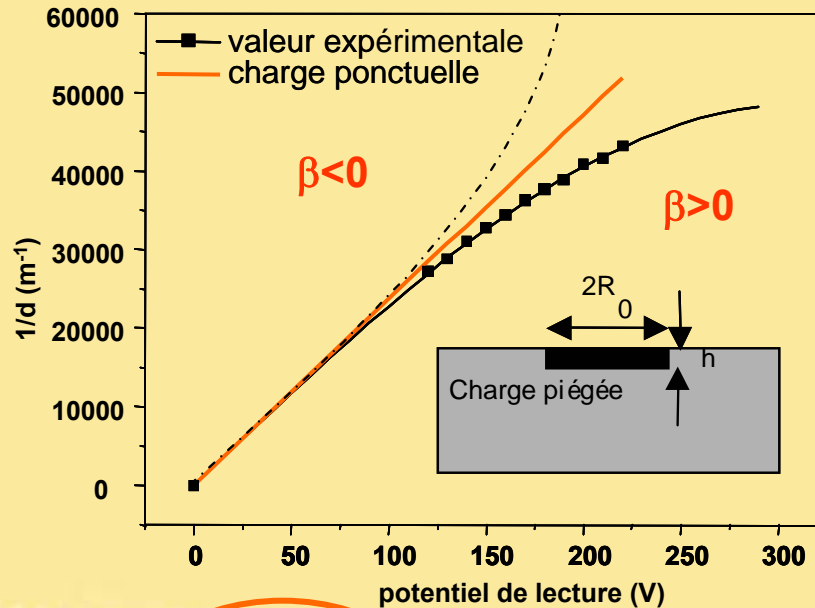
- lecture par un faisceau de basse énergie (300-1keV)

➡ déviation des e^- du faisceau de lecture



III.1. Méthode miroir et courant d'influence

Méthode miroir (SEMM)



Approximation de la charge ponctuelle

$$\frac{1}{d} = \left(\frac{4 \cdot L}{d'} \cdot \frac{1}{A_\infty Q_p} \right) \cdot V_i \quad A_\infty = \frac{1}{2\pi\epsilon_0(\epsilon_r + 1)}$$

Evaluation de la quantité de charge piégée

Développement en série multipolaire (matériau isotrope)*

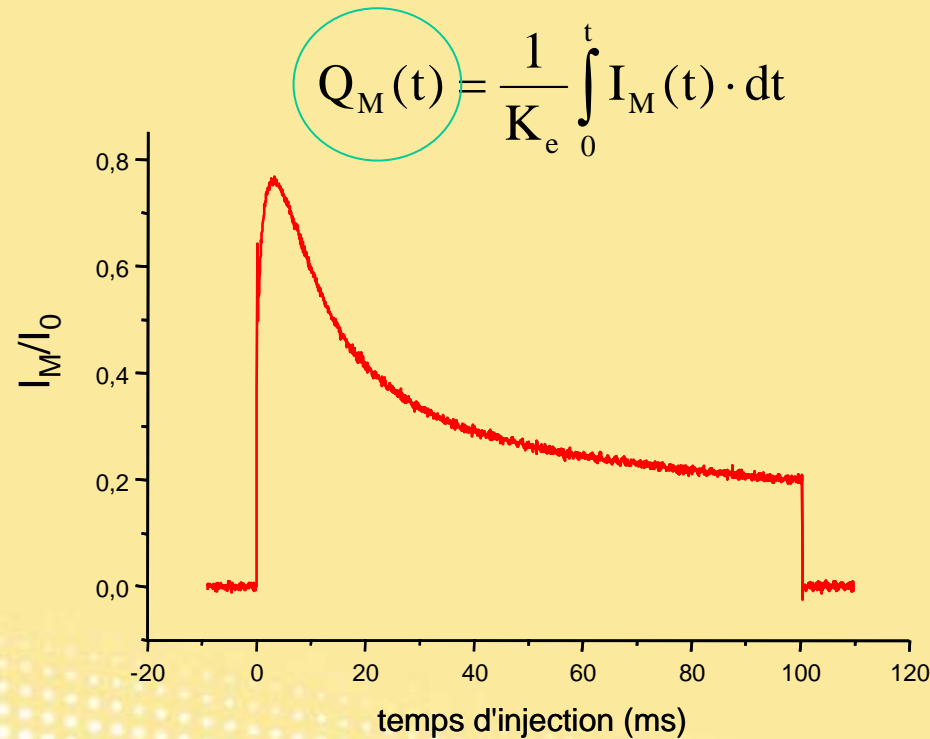
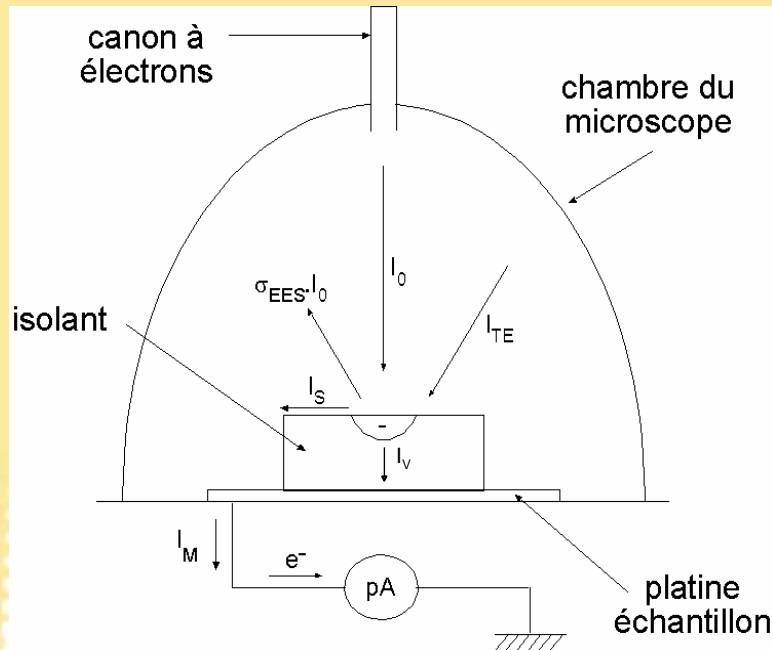
$$\frac{1}{d} = K \left\{ \frac{V}{AQ_p} - 2\beta R_0^2 \left(\frac{V}{AQ_p} \right)^3 \right\}$$

Forme de la distribution des charges :
 $\beta > 0$: charges en surface
 $\beta < 0$: charges en profondeur

*Attard C., et al Proceeding of the 2nd Conference on Electrostatics, Montpellier July 10-11, 2000: p. 77.

III.1. Méthode miroir et courant d'influence

Méthode du courant d'influence (ICM)



charges injectées dans le matériau



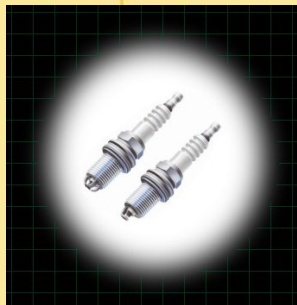
charges d'influence sur la platine

$$I_M = (1 - \sigma_{EES}) \cdot I_0 + I_S + I_V + I_{TE}$$

III.1. Méthode miroir et courant d'influence

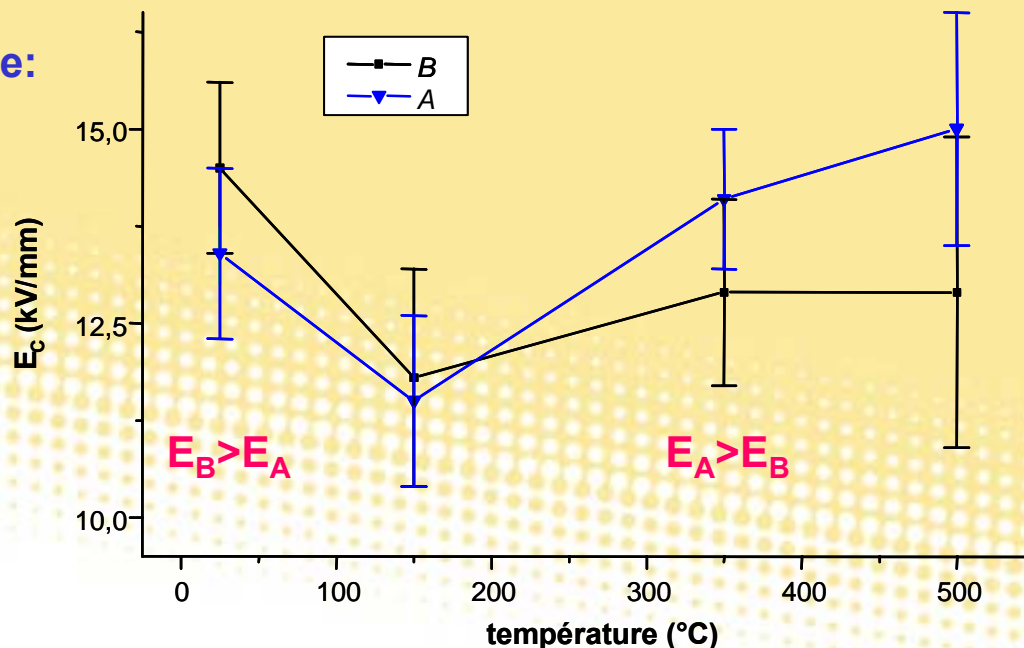
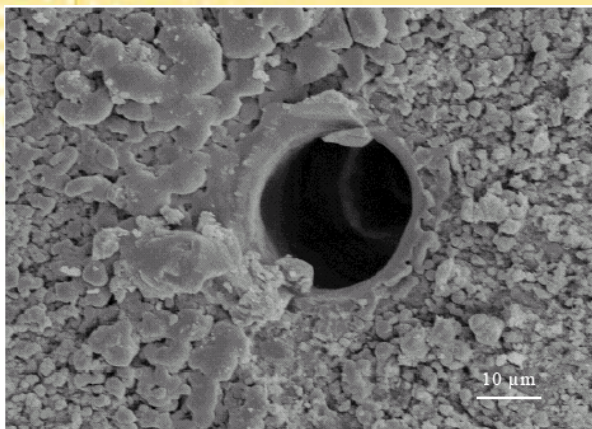
Caractérisation d'échantillons à base d'alumine polycristalline*

- poudres d'alumine + divers ajouts de frittage
- frittage en phase liquide
- exemple de 2 matériaux A et B
- ajouts de frittage différents \Rightarrow joints de grains différents



Matériau	Phase vitreuse (%)
A : Industriel	15,9
B : Laboratoire	4,6

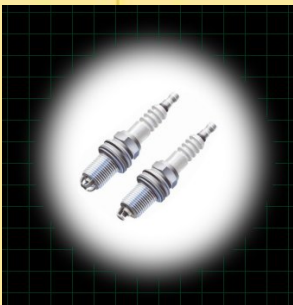
Caractérisation de la rigidité diélectrique:



* X. Meyza, Mémoire de Thèse, D. Goeriot, X. Meyza, M. Touzin, C. Guerret-Piécourt, D. Juvé, D. Tréheux, H.-J. Fitting *Journal of the European Ceramics Society*, (sous presse), Thèse en cours de M. Touzin, St Etienne

III.1. Méthode miroir et courant d'influence

Caractérisation d'échantillons à base d'alumine polycristalline



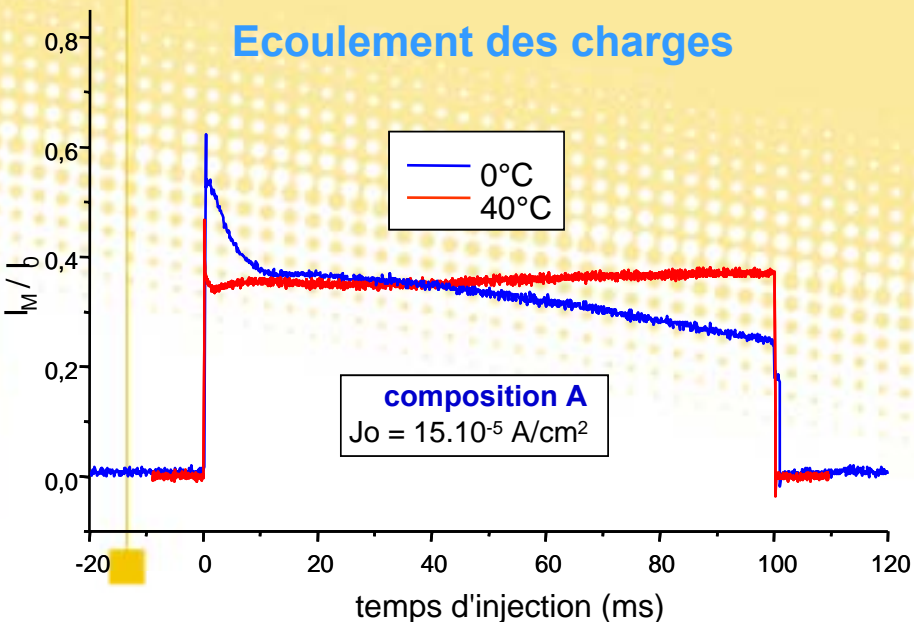
Charge piégée (SEMM)

Rendement de stabilisation

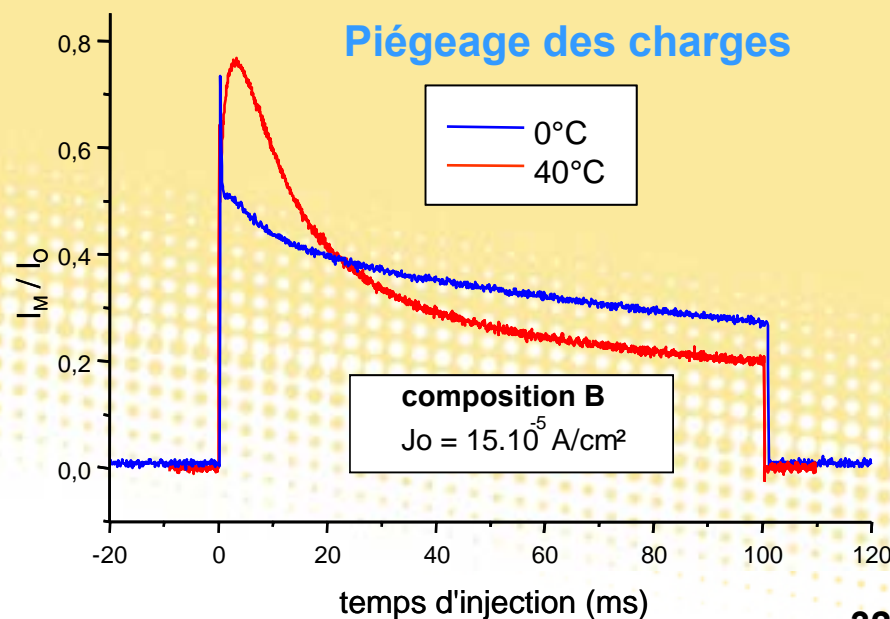
Charge injectée (ICM)

Matériau Industriel (A)	0°C	40°C
Q_P (pC)	94	0
Q_M (pC)	98	108
$R = Q_P / Q_M$	96 %	0
Matériau Laboratoire (B)		
Q_P (pC)	94,5	12,2
Q_M (pC)	105	102
$R (\%) = Q_P / Q_M$	90 %	12 %

Écoulement des charges

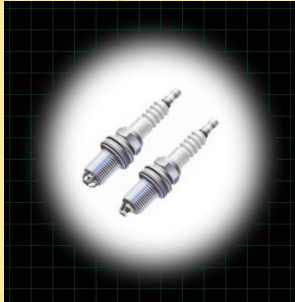


Piégeage des charges



III.1. Méthode miroir et courant d'influence

Caractérisation d'échantillons à base d'alumine polycristalline



Effets de la microstructure sur l'écoulement et le piégeage des charges, cas favorables à l'optimisation de la rigidité diélectrique:

A température ambiante ou faible:

- phase secondaire cristallisée (matériau B): pièges plus profonds

Isolant "piégeur"

A haute température:

- phase secondaire vitreuse (matériau A): pièges de faible profondeur, favorable à l'écoulement des charges
- faible densité de joints de grains

Isolant "conductif"

III.1. Méthode miroir et courant d'influence

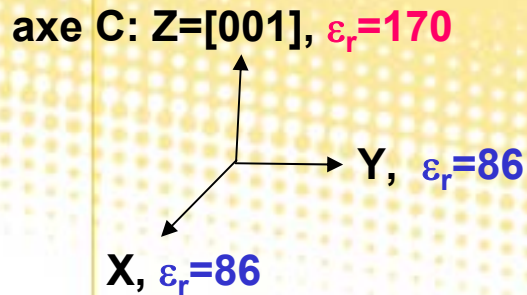
Caractérisation d'un semi-conducteur à grand gap: TiO_2 rutile*



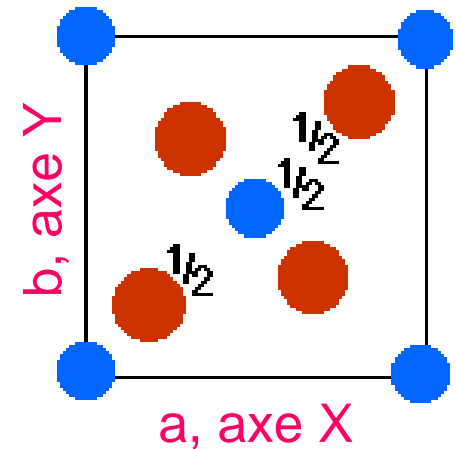
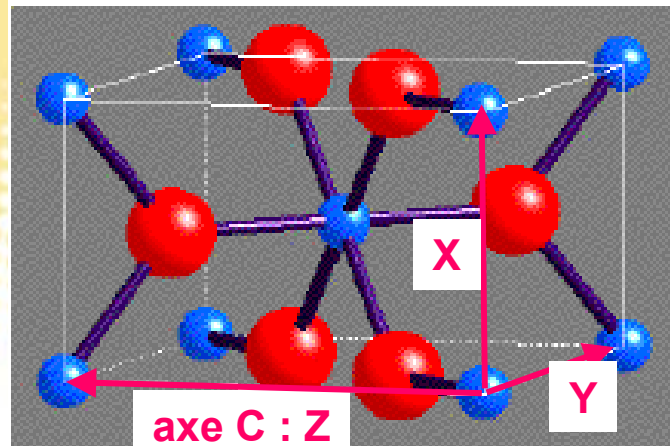
Caractéristiques du TiO_2 rutile:

- matériau SC à grande bande interdite: 3,1 eV
- résistivité $R > 10^{13} \Omega\text{cm}$ (sensibilité à l'oxygène)
- matériau anisotrope: $\epsilon_r = 86$ à T_{amb} dans le plan X,Y
axe C: $\epsilon_r = 170$ à T_{amb} suivant $Z = [001]$

Structure du TiO_2 rutile



Cellule unité : Tétragonale ($a=b, c$)



* Temga Temga, Mémoire de Thèse , Lyon, 2004

III.1. Méthode miroir et courant d'influence

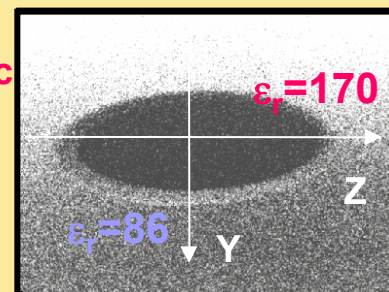
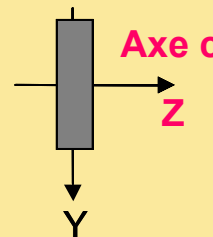
Caractérisation d'un semi-conducteur à grand gap: TiO_2 rutile*



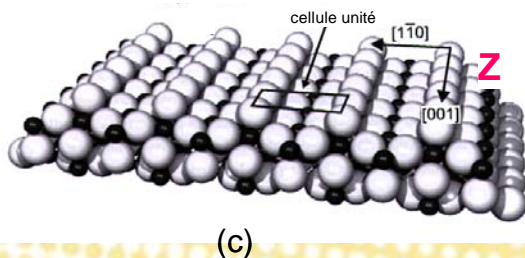
Injection suivant l'axe X = [110]



Anisotropie du miroir obtenu



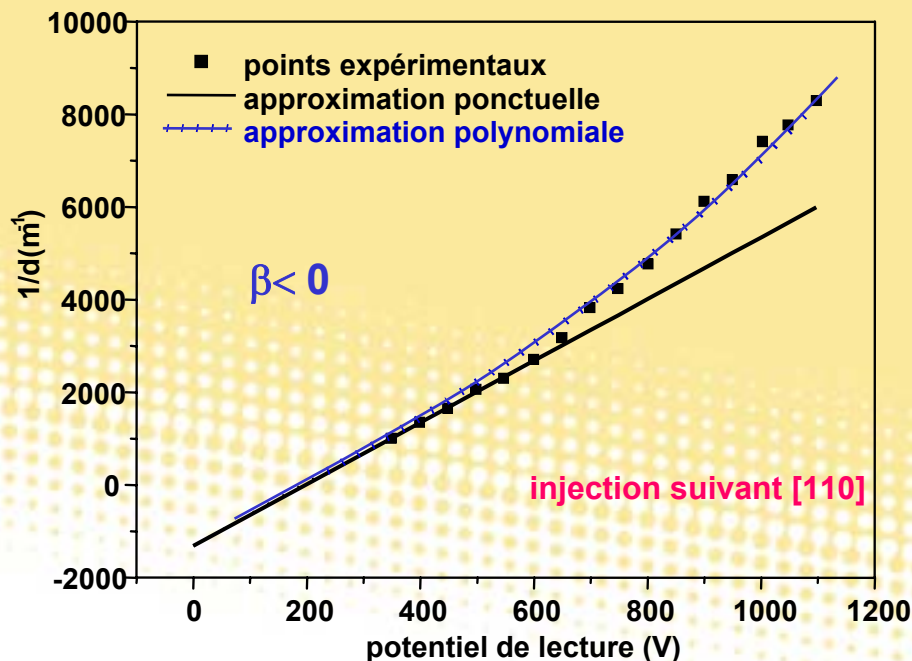
Piégeage préférentiel des électrons près des ions Ti



Piégeage en profondeur :

$$\frac{1}{d} = K \left\{ \frac{V}{AQ_p} - 2\beta R_0^2 \left(\frac{V}{AQ_p} \right)^3 \right\}$$

Distribution cylindrique de rayon $R=2\mu\text{m}$ et de hauteur $h=280\mu\text{m}$



* T. TEMGA, D. JUVE, D. TREHEUX, C. GUERRET-PIECOURT and C. JARDIN soumis à J. Appl. Phys.

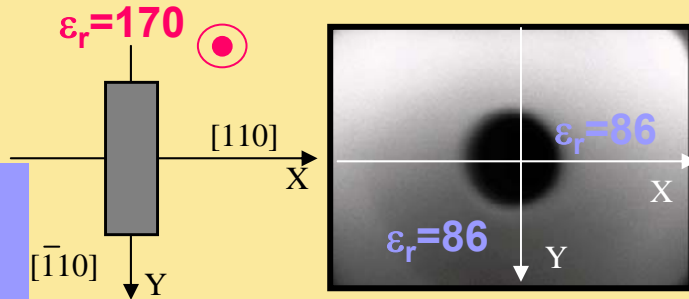
III.1. Méthode miroir et courant d'influence

Caractérisation d'un semi-conducteur à grand gap: TiO₂ rutile*

Injection suivant l'axe Z = [001]

~~$$\frac{1}{d} = \left(\frac{4 \cdot L}{d'} \cdot \frac{2\pi\epsilon_0(\epsilon_r + 1)}{Q_p} \right) \cdot V_i$$~~

miroir circulaire,
modèle analytique tenant
compte de l'anisotropie de ϵ_r^*

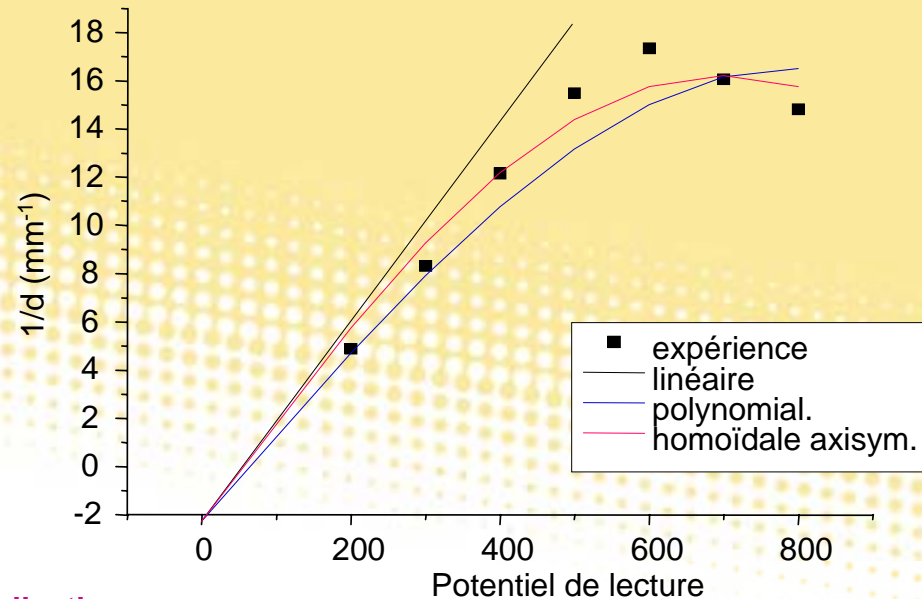


Matériau isotrope transverse: charge ponctuelle

$$\frac{1}{d} = \left(\frac{4 \cdot L}{d'} \cdot \frac{2\pi\epsilon_0 (\sqrt{\epsilon_X} \sqrt{\epsilon_Z} + 1)}{Q_p} \right) \cdot V_i$$

Matériau isotrope transverse: distribution homoïdale

$$\frac{2c}{d} = \frac{4H}{\phi} \left\{ \frac{\sin}{\text{sh}} \right\} \left(\frac{2c \cdot 8\pi\epsilon_0 E_{\text{cin}}}{Q} \right)$$



* développé par G DAMAMME, thèse T TEMGA, publication en cours

III.1. Méthode miroir et courant d'influence

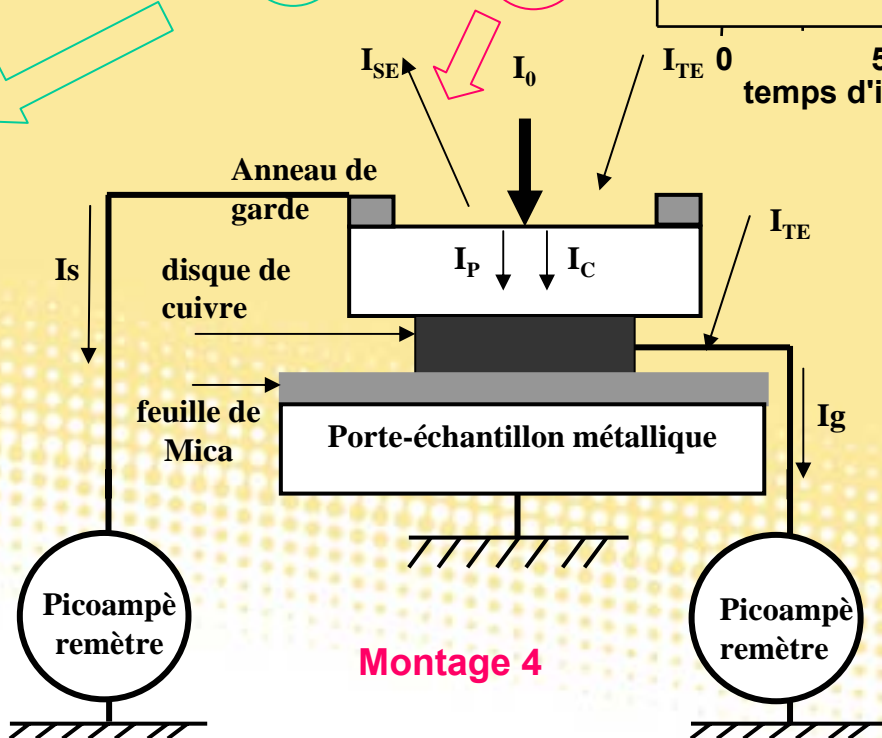
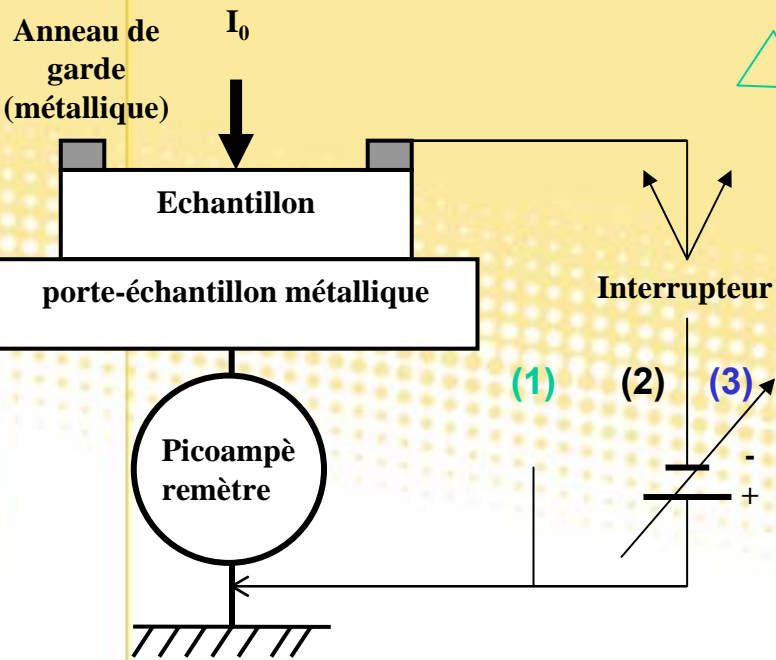
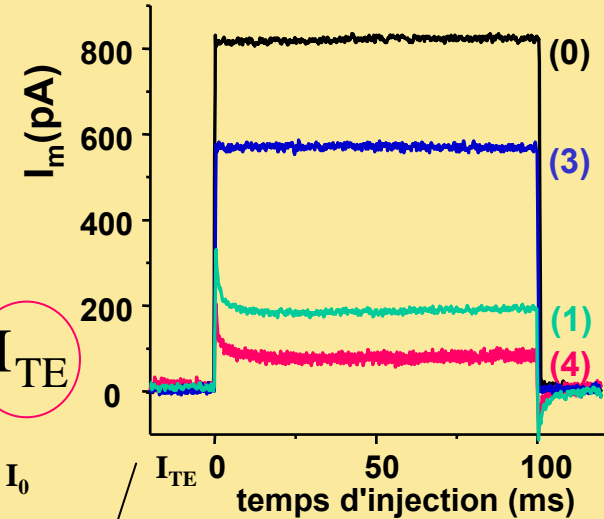
Caractérisation d'un semi-conducteur à grand gap: TiO₂ rutile

Importance du courant de fuite



Modification de la méthode ICM*

$$I_M = (1 - \sigma_{EES}) \cdot I_0 + I_S + I_V + I_{TE}$$



* T. Temga, C. Guerret-Piécourt, D. Juvé, D. Trégeux, C. Jardin, (2003) An. Rep. CEIDP, Albuquerque, p 221-224

** proposition HJ Fitting,

III. Caractérisation des propriétés d'écoulement et de piégeage des charges : méthode "miroir" et simulations

- 1. Méthode miroir et courant d'influence**
- 2. Simulation de l'injection des électrons**

IV. Conclusions et Perspectives

III.2. Simulation de l'injection des électrons*

Modèle auto-cohérent de suivi balistique des charges

Devenir des électrons de haute énergie dans un isolant**:

- électrons rétrodiffusés η
- pénétration dans le matériau PE
- génération de paires e-h (e secondaires)
- émission secondaire
- recombinaisons électrons-trous
- piégeage, effet du champ électrique

Principe de la simulation:

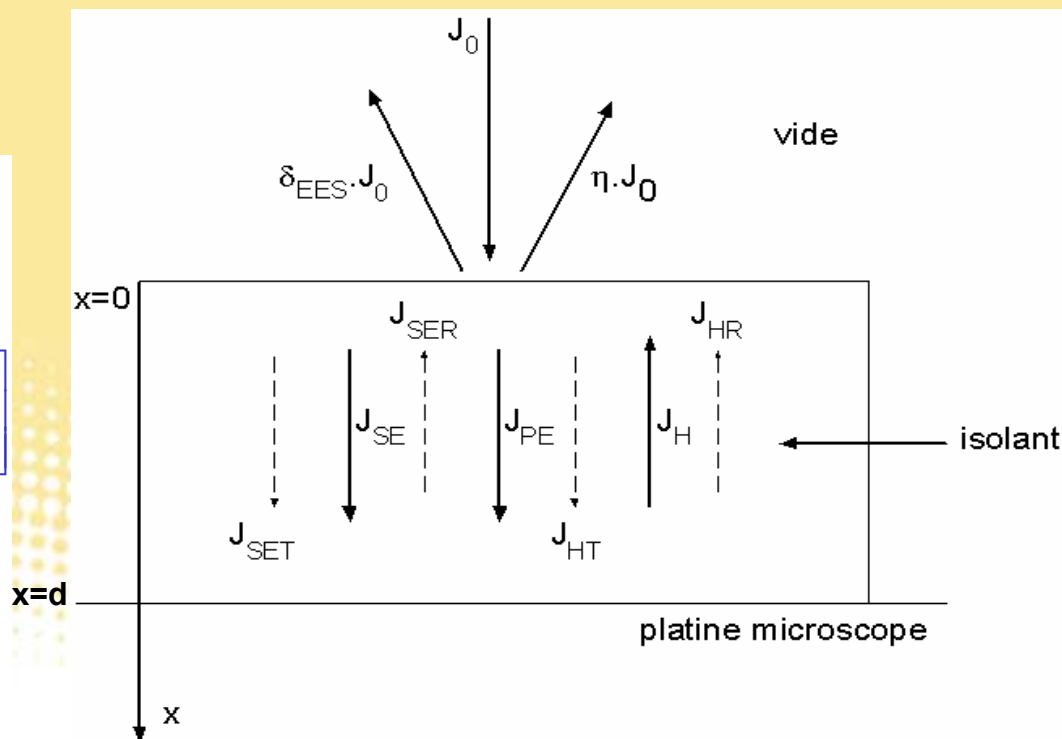
- modèle à 1 dimension
- déterminer à tout instant et à chaque profondeur x , la quantité de charges

$$j_{PE}(x, E) = j_0(1-\eta) \exp \left[-4.605 \left(\frac{x}{R(E, z)} \right)^{p(z)} \right]$$

$$g_i / \text{Å} = 0.146 \cdot (E_0 / \text{keV})^{-0.3} \exp \left[-7.5 \left(\frac{x}{R} - 0.3 \right)^2 \right]$$

$$j_T^R(x) = \left[j_T^R(x \pm \Delta x) + \frac{1}{2} j_0 g_i(x) \Delta x \right] \cdot W(x)$$

$$j(x) = -j_{PE}(x) - j_{ET}(x) + j_{ER}(x) + j_{HT}(x) - j_{HR}(x)$$



* Collaboration avec Pr HJ Fitting, Université de Rostock, Thèse X Meyza, Thèse C Dutriez, Thèse M Touzin

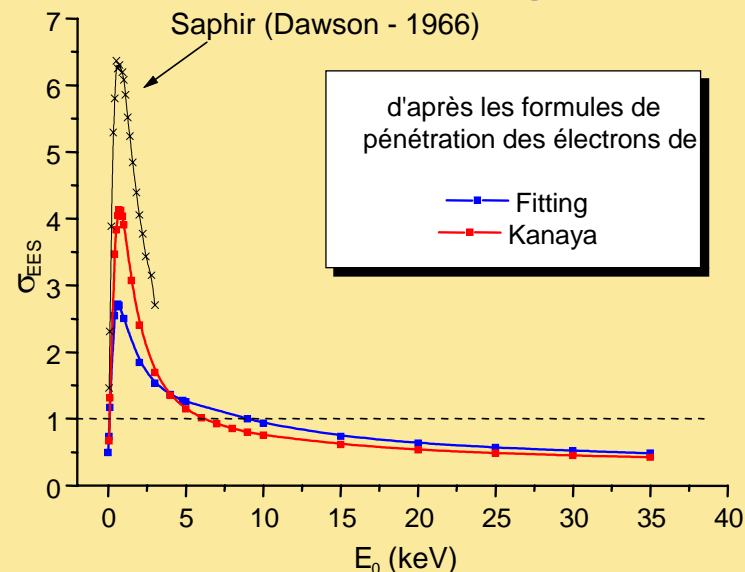
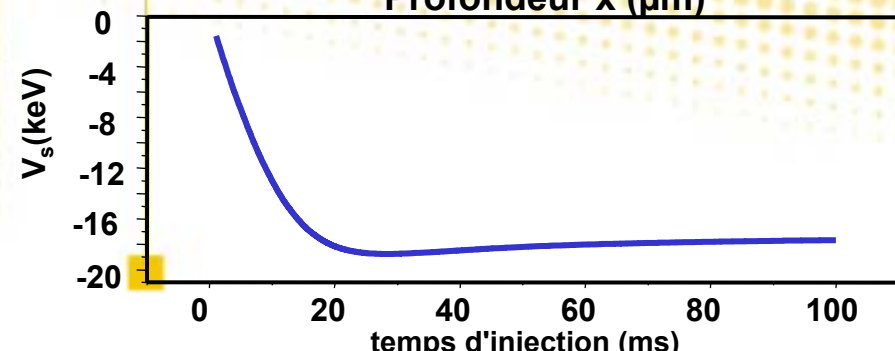
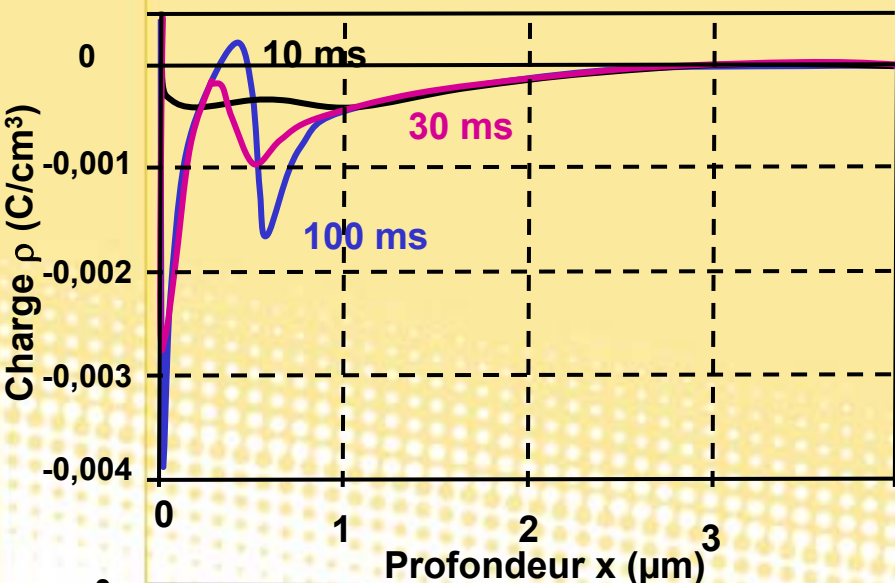
** H.J. Fitting, Phys. Status solid (a), 1974. 26 . I.A..Glavatskikh , V.S. Kortov, H.-J. Fitting, J. Appl. Phys., 2001. 89(2)

III.2. Simulation de l'injection des électrons

Modèle auto-cohérent de suivi balistique des charges

Injection instantanée:

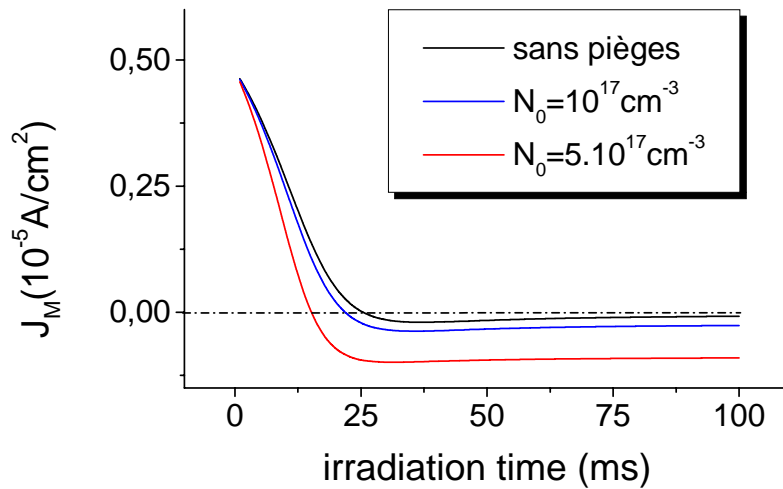
- détermination de la courbe d'émission secondaire (V_s négligeable)
- validation du modèle



Phénomène auto-régulé:
 charges négatives injectées créent un potentiel de surface négatif qui ralentit les charges incidentes et augmente l'émission secondaire
 les charges incidentes pénètrent alors de moins en moins loin, le potentiel de surface se stabilise ainsi que l'émission secondaire

III.2. Simulation de l'injection des électrons

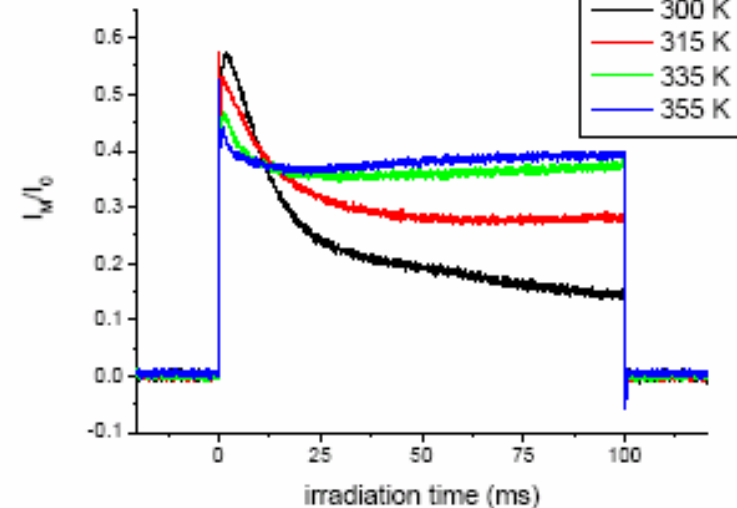
Modèle auto-cohérent de suivi balistique des charges



**Exemple d'application de la simulation:
effet du nombre de piège à électrons
sur la forme du courant de masse**

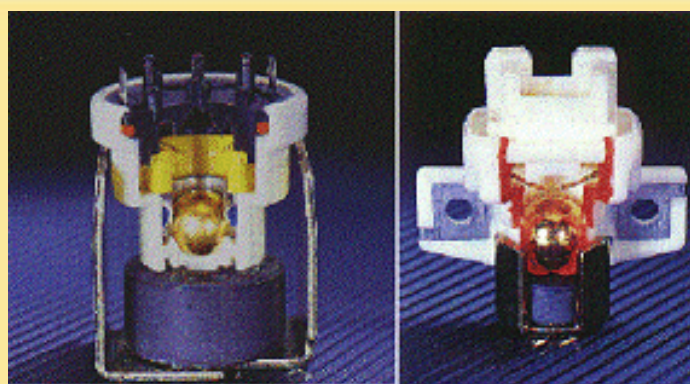
Nouveau modèle en développement* :

- permet de prendre en compte l'effet du dépiégeage des charges par effet Poole-Frenkel (effet de la température)
- permet de tenir compte de l'anisotropie de la diffusion sous influence du champ électrique



IV. Conclusions et Perspectives

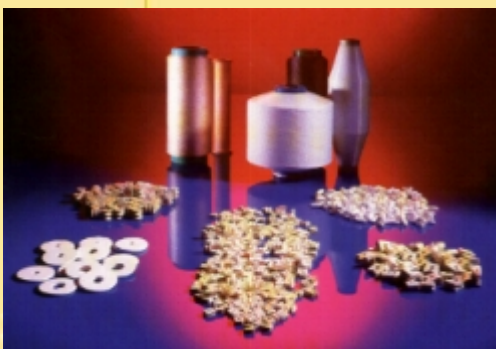
**Importance de la
triboélectrification**



**Capteurs mécaniques d'accélération
pour airbag ou pour prétensionneur de
ceinture de sécurité**



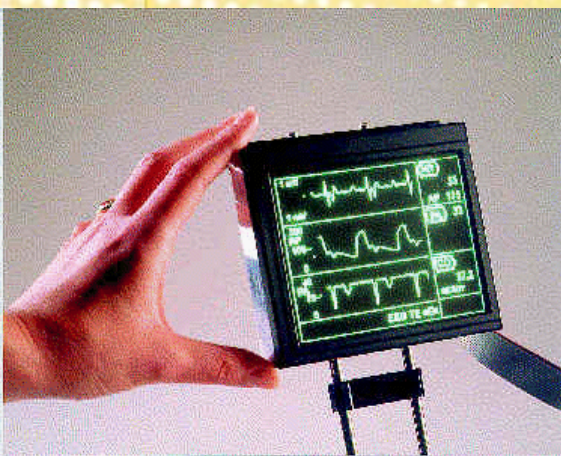
Pièces pour robinet à mitigeur



Guide fils et galets de friction

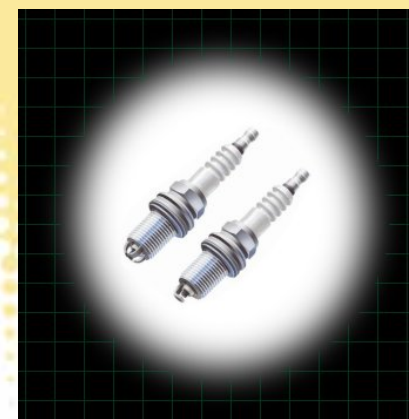
**Mise en évidence de
l'importance des charges
électriques dans les
propriétés de frottement et
d'adhésion**

**Compréhension des
mécanismes
d'injection et de
stockage des charges
électriques :**
- méth. expérimentales
- outils de simulation



Ecran plat à effet de champ

**Amélioration de la tenue au
claquage, à des températures
variables, par détermination des
paramètres structuraux
favorisant un meilleur
écoulement des charges :**
isolants "piégeurs" ou isolants
"conductifs"

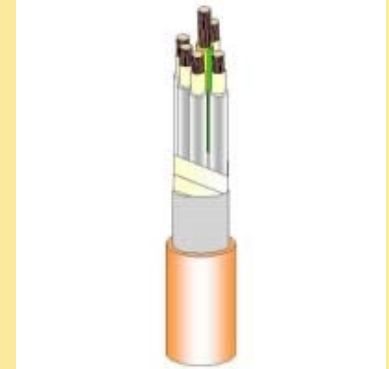


Bougies d'allumage₄₃

IV.2. Perspectives: les isolants polymères



- Etude du piégeage et de l'écoulement des charges dans les polymères*
- Lien entre triboélectrification et apparition des défauts d'extrusion**
- Etude de composites polymères/charges conductrices: NTC-Elastomères***, PANI-ABu...
- Utilisation des méthodes ICM et SEMM pour caractériser les matériaux nanostructurés



* Thèse Cédric Dutriez, C. Dutriez, X. Meyza, C. Guerret-Piécourt, D. Tréheux, H.J. Fitting (2003) Annual Report Conf. on Elect. Insul. Dielect. Phenomena, Albuquerque, 2003, p 530-533

** Thèse F. Flores, S. Tonon, A. Lavernhe-Gerbier, F. Flores, A. Allal, C. Guerret-Piécourt J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics, (accepté, sous presse)

*** 1 brevet déposé, V. Datsyuk, C. Guerret-Piécourt, S. Dagréou, L. Billon, J.-C. Dupin, E. Flahaut, A. Peigney, C. Laurent Carbon (sous presse)

**Sandrine BEC, Gilles DAMAMME , Vitaliy DATSYUK, Cédric DUTRIEZ,
Hans-Joachim FITTING, Fabrice FLORES, Dominique GOEURIOT,
Denyse JUVÉ, Xavier MEYZA, Olivier GUERRET, Frédéric SEGALT, Temga TEMGA,
André TONCK, Sébastien TONON, Matthieu TOUZIN , Daniel TRÉHEUX**

...

- **Laboratoire des Solides Irradiés (SESI) à l'Ecole Polytechnique**
- **Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes à Toulouse**
- **Laboratoire de Tribologie et de Dynamique des Systèmes de l'ECLyon**
- **Laboratoire d' Ingénierie et Fonctionnalisation des Surfaces de l'ECLyon**
- **Laboratoire de Physico-Chimie des Polymères de Pau**

IV.2. Perspectives: les isolants polymères

Engins spatiaux

Milieu agressif *:

- ionisations radiatives dues aux collisions avec les ions lourds du rayonnement cosmique
- collisions avec les électrons et les protons issus des éruptions solaires ou des ceintures de radiation



Accumulation de charges électriques
Apparition de décharges électrostatiques



Endommagement **

- des générateurs solaires par claquage diélectrique
- des composants électroniques du satellite par interférence, lors des décharges



Caractérisation du comportement des diélectriques (notamment polymères) sous irradiation: écoulement, piégeage des charges...

Thèse C. Dutriez
ATIP

* V. Pouget, Mémoire de Thèse, Université Bordeaux, 2000.

** V. Griseri et al, *IEEE-Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2004, 11 (5), p 891.

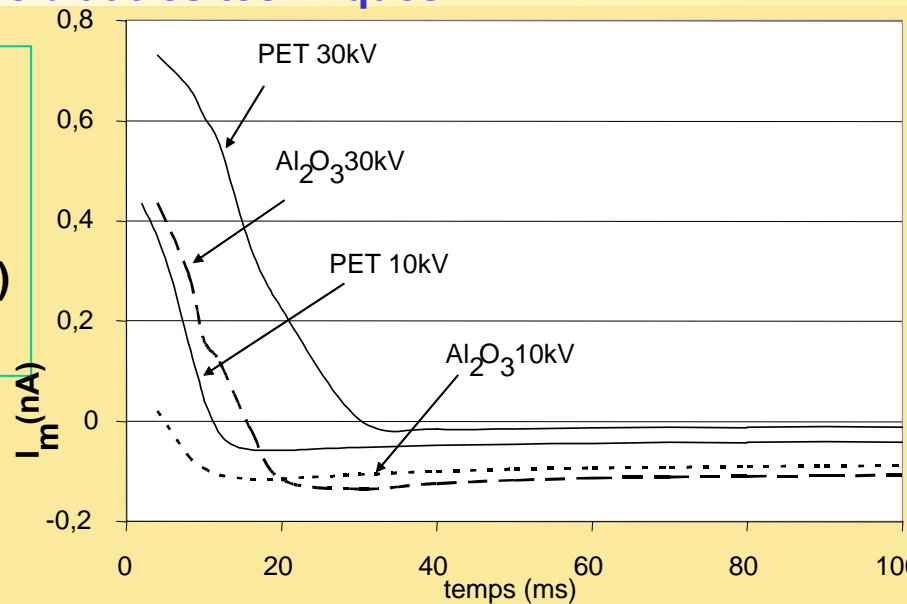
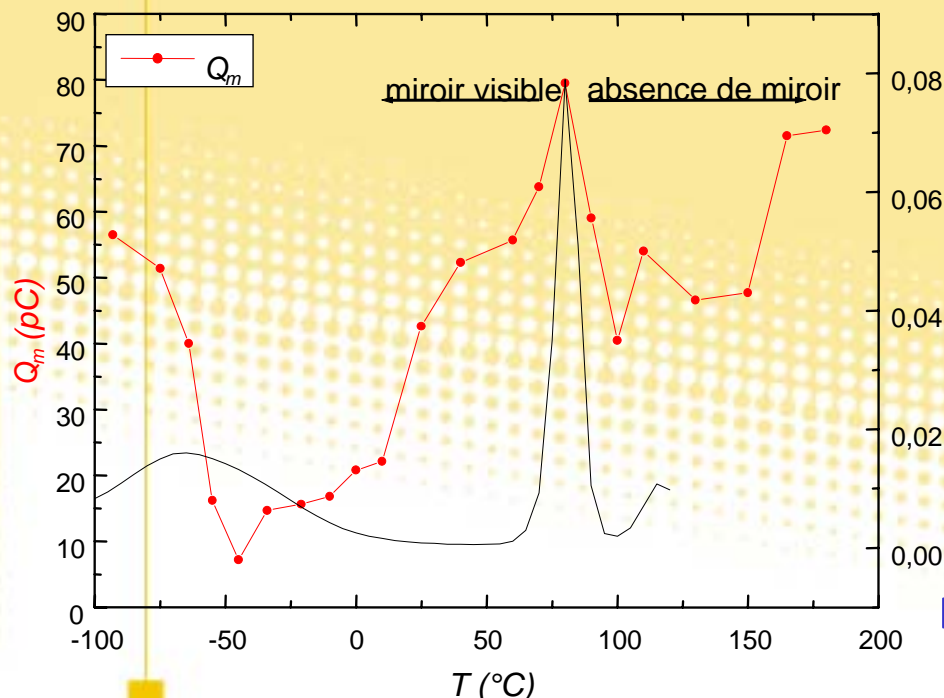
IV.2. Perspectives: les isolants polymères

Corrélations avec d'autres techniques*

Modélisation:

- utilisation du modèle établi pour l'alumine
- profondeur d'injection plus importante
- potentiel de surface plus importante (X-ray BS)
- courants d'influence plus importants

➔ Nouveau modèle



- Corrélation avec les propriétés diélectriques
- En mode focalisé la méthode SEMM permet d'obtenir des informations sur la mobilité des chaînes macromoléculaires

➔ Poursuite de l'adaptation SEMM et ICM
Confrontation avec la rhéologie

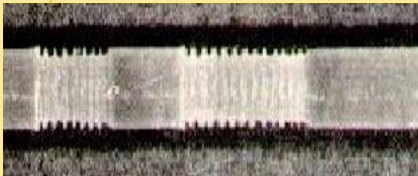
* Thèse Cédric Dutriez, C. Dutriez, X. Meyza, C. Guerret-Piécourt, D. Tréheux, H.J. Fitting (2003) Annual Report Conf. on Elect. Insul.Dielect. Phenomena, Albuquerque, 2003, p 530-533

IV.2. Perspectives: les isolants polymères

Extrusion de polymères



Défaut peau de requin (1)



Défaut oscillant (2)



Défaut de volume (3)

augmentation
du débit



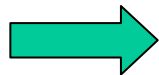
apparition de
défauts



paramètres
comparables
à ceux de la
triboélectrification



**Problème de risque
électrostatique**
**Lien entre électrification et
défauts d'extrusion**



Etude du lien entre l'apparition des défauts d'extrusion et une éventuelle électrification de l'extrudât.

ATIP*
Dea S. Tonon
Thèse F. Florès
CTP**

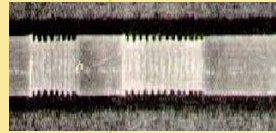


IV.2. Perspectives: les isolants polymères

Lien triboélectrification du polymère fondu/ apparition des défauts d'extrusion*



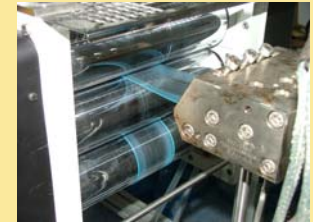
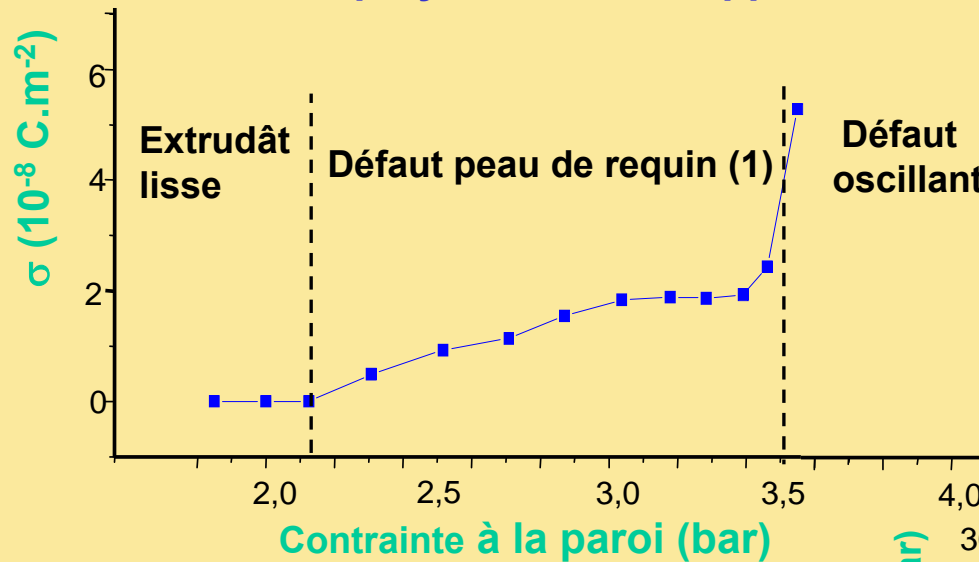
Défaut peau de requin (1)



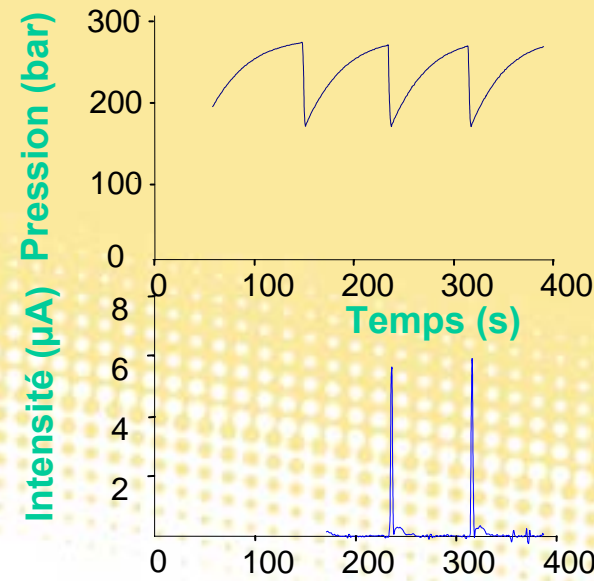
Défaut oscillant (2)



Défaut de volume (3)



Défaut d'extrusion/Triboélectrification
 Un même paramètre (?) :
 la vitesse de glissement à la paroi



* *Thèse F. Flores, S. Tonon, A. Lavernhe-Gerbier, F. Flores, A. Allal, C. Guerret-Piécourt J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics, (accepté, sous presse)

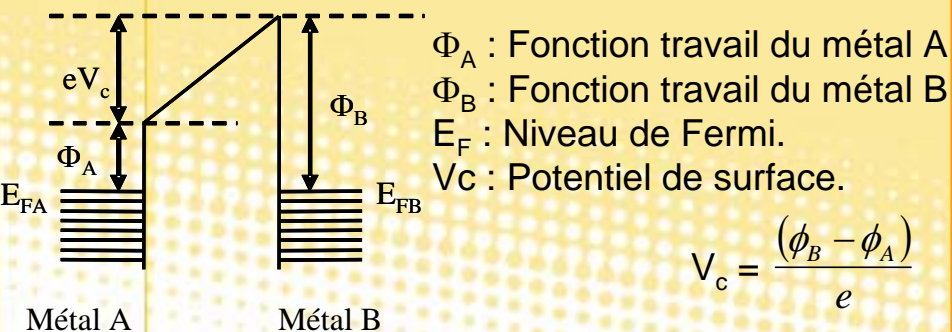
IV.2. Perspectives: les isolants polymères

Lien triboélectrification du polymère fondu/ apparition des défauts d'extrusion*

Détermination du mécanisme d'électrification:

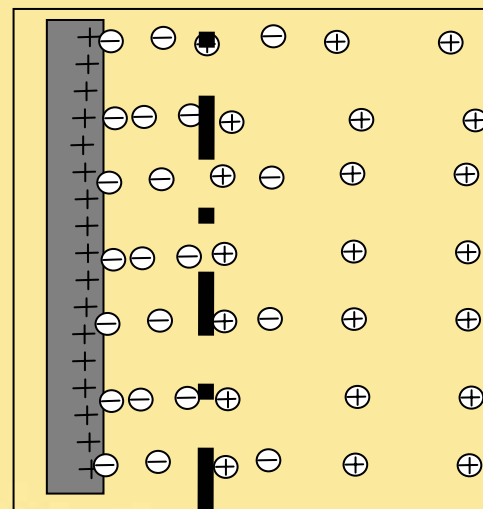
Triboélectrification par analogie avec un contact solide-solide

Contact entre deux métaux :
Mécanisme connu par transfert d'électrons



Application à notre cas :
Echange d'électrons entre le polymère et le métal

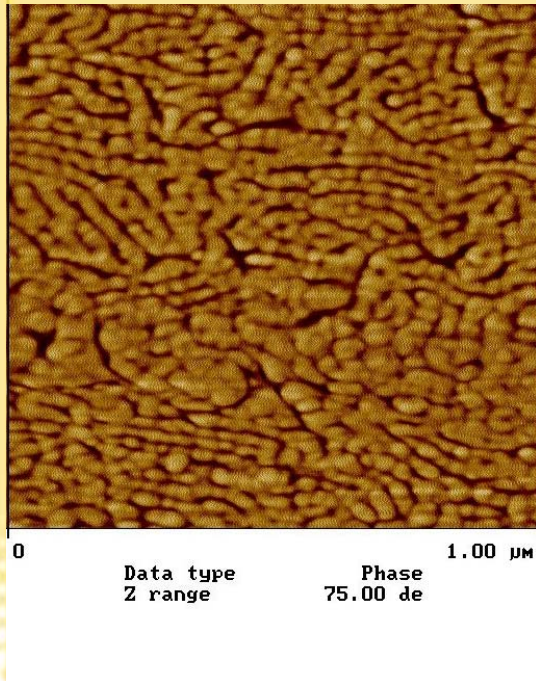
Arrachement de la double couche



- ❖ Lié à un **mouvement d'ions**
 - ❖ **Adsorption préférentielle d'ions** à la surface métallique
 - ❖ **Propriétés de la double couche** liées à : température, propriétés du liquide et du solide, concentration des ions dans le liquide.
 - ❖ **Sous mouvement de convection** : couche stagnante/couche mobile.
- ⇒ Partie de la **double couche arrachée**. Charges convectées

IV.2. Perspectives: les isolants polymères

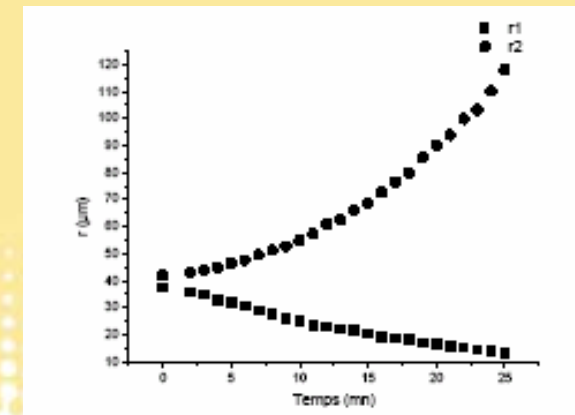
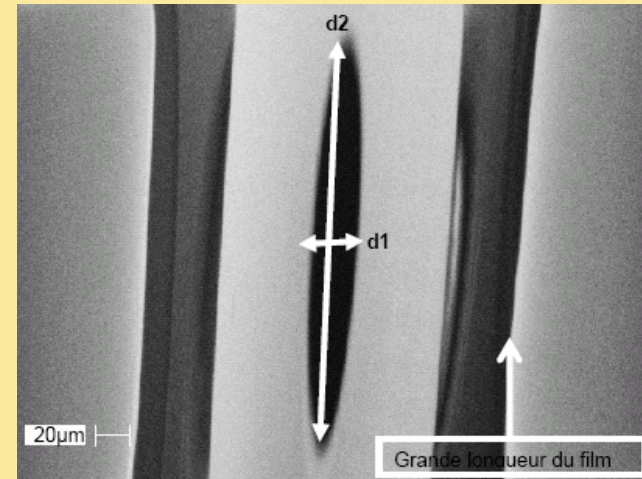
Exemple des copolymères à bloc: MAM-ABu- MAM



Matériau lamellaire
Alignement des lamelles



Anisotropie du
transport et du
piégeage des charges

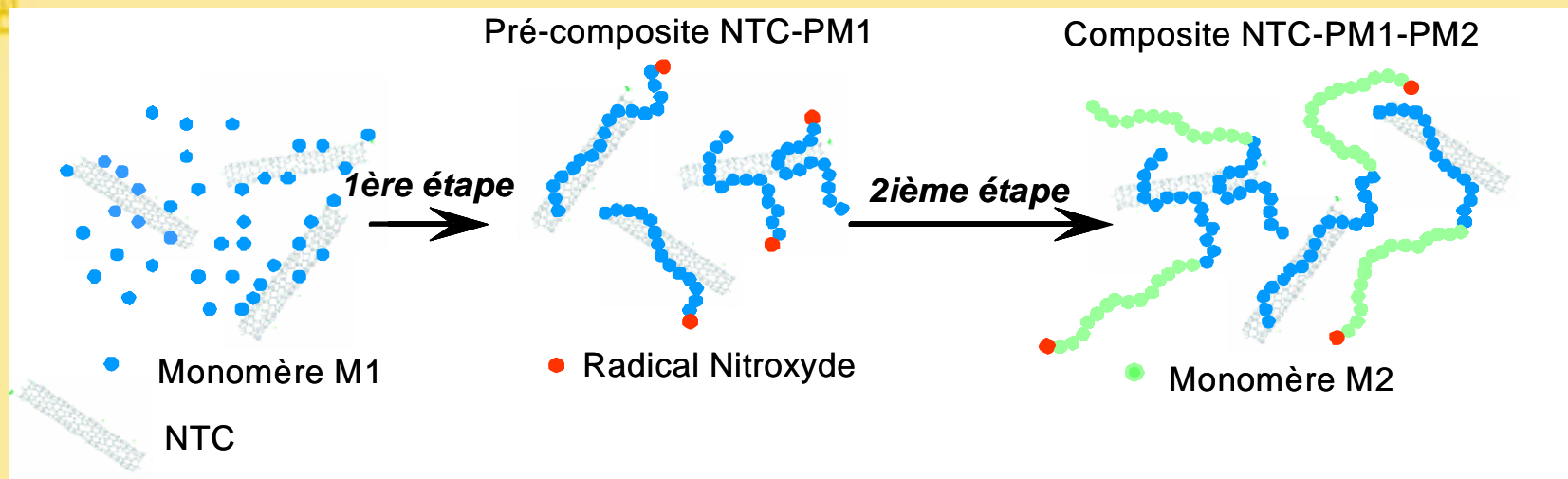


Utilisation de la méthode miroir pour
l'évaluation de l'anisotropie des matériaux
nanostructurés

Evaluation des différentes mobilités
Corrélation avec les propriétés rhéologiques
et diélectriques de ces matériaux

IV.2. Perspectives: les isolants polymères

Polymères chargés, exemple des composites NTC/ Elastomères*



Dispersion dans divers milieux



Compatibilisation avec diverses matrices polymères, exemple mélange avec un PS industriel: PS 1160

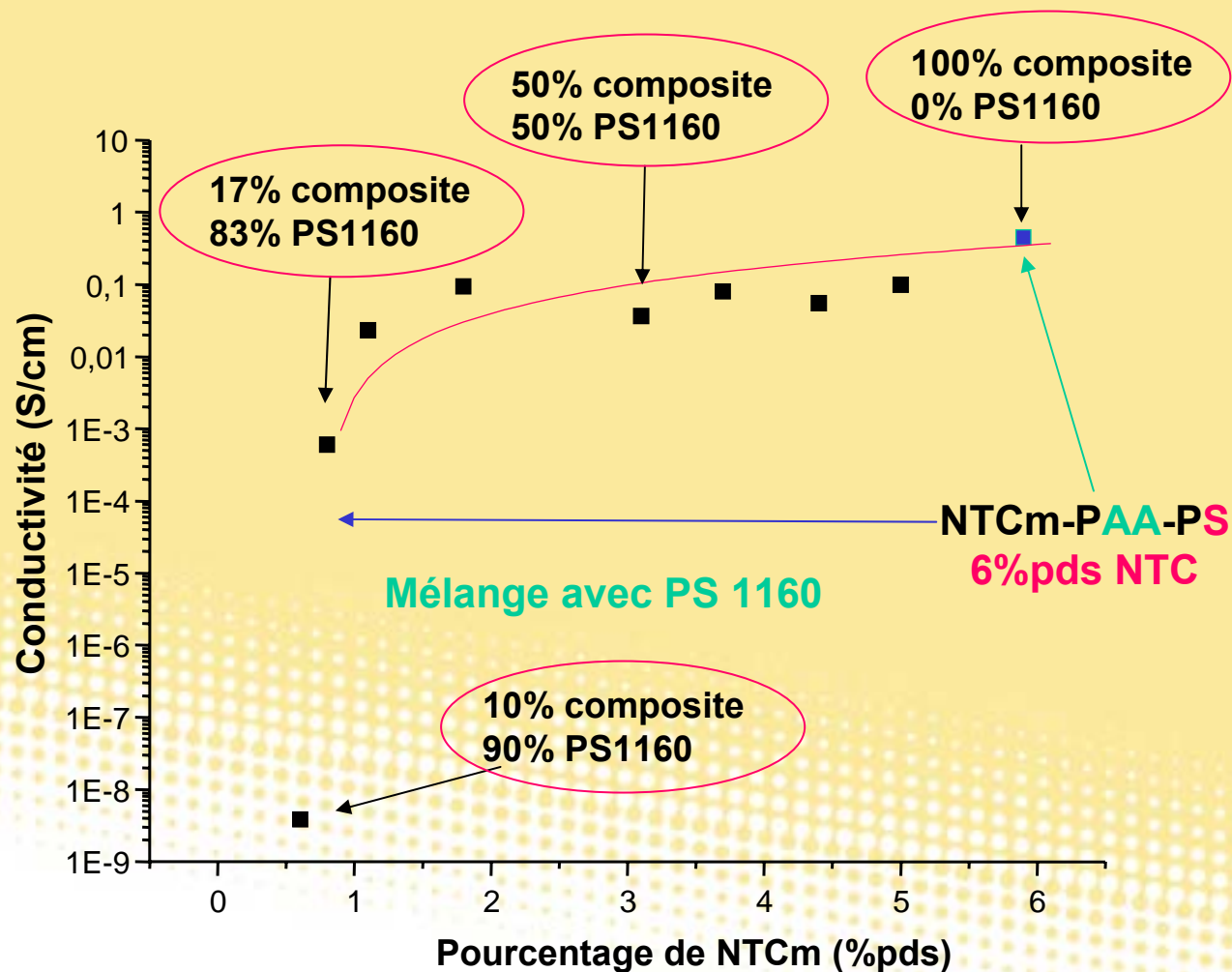
Détermination du seuil de percolation électrique, comparaison avec la percolation mécanique

Compréhension du mécanisme de transport des charges dans ce type de composites

* ATIP, 1 brevet déposé, V. Datsyuk, C. Guerret-Piécourt, S. Dagréou, L. Billon, J.-C. Dupin, E. Flahaut, A. Peigney, C. Laurent Carbon (sous presse)

IV.2. Perspectives: les isolants polymères

Polymères chargés, exemple des composites NTC/ Elastomères**



** V. Datsyuk, C. Guerret-Piécourt, L. Billon, S. Dagréou, O. Guerret, soumis   Adv. Funct. Mat.