

Problématique des gaines dans le cadre de la propulsion plasma : moteur de Hall

Laurent Garrigues, Gwénaél Fubiani



laurent.garrigues@laplace.univ-tlse.fr

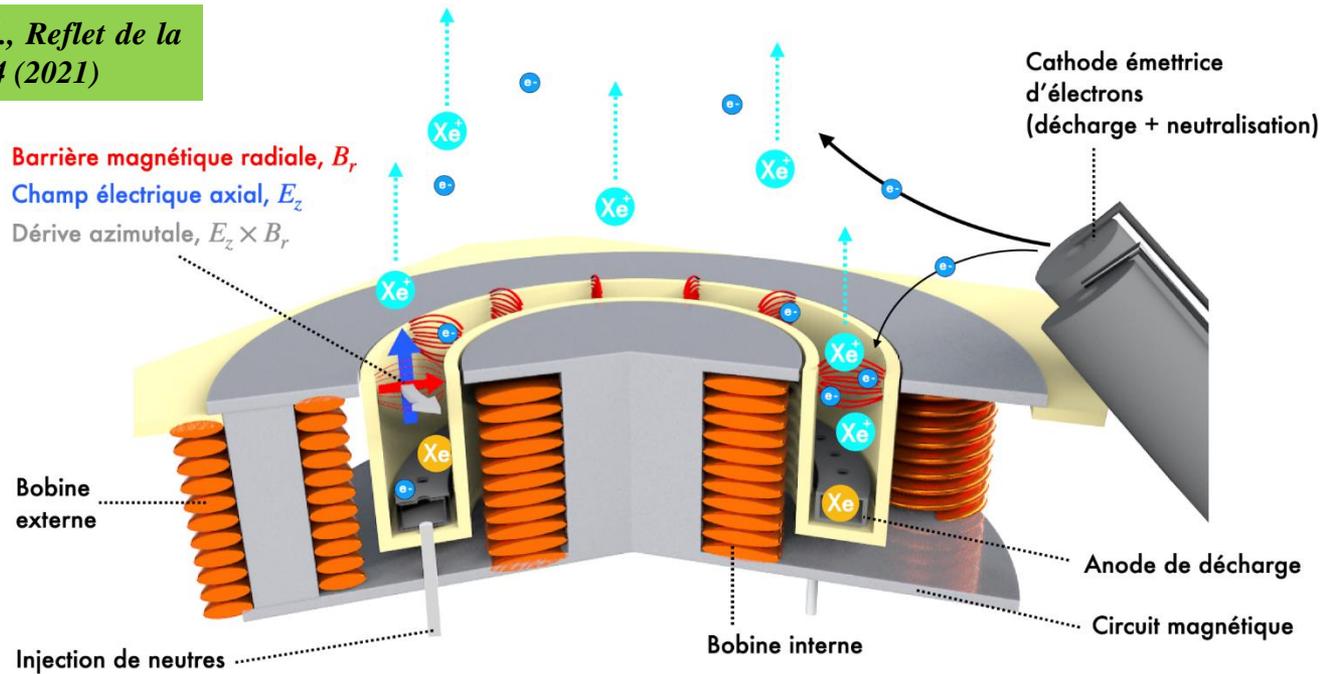
Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie – LAPLACE
Université de Toulouse, CNRS-UPS-INPT
31062 Toulouse Cedex 09, France

Plan

- **Moteur de Hall** 
- **Gaines et émission secondaire élec.** 
- **Modèles d'émission secondaire élec.** 
- **Conclusions** 

Caractéristiques du moteur de Hall

Garrigues et al., *Reflète de la Physique* 70, 24 (2021)



■ Principe

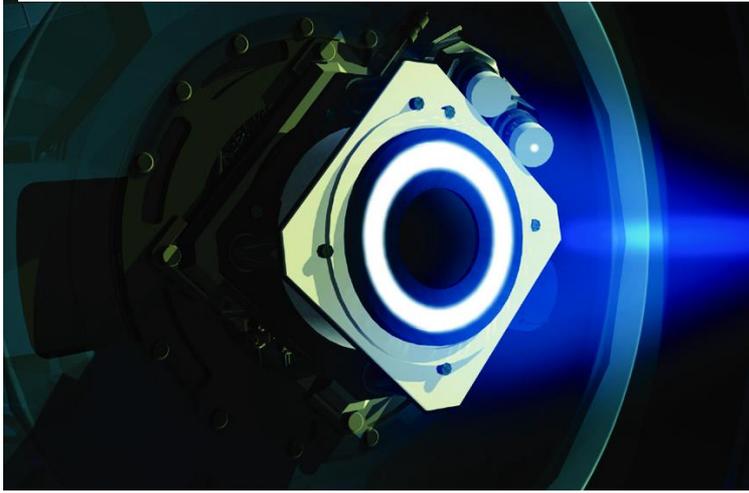
- $l_{pm} \ll L$
- Intensité de B (~ 100 G)
- piégeage des électrons
- Ions non magnétisés et non collisionnels

■ Grandeurs typiques

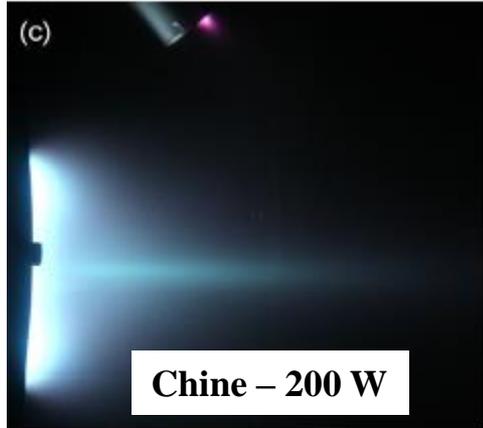
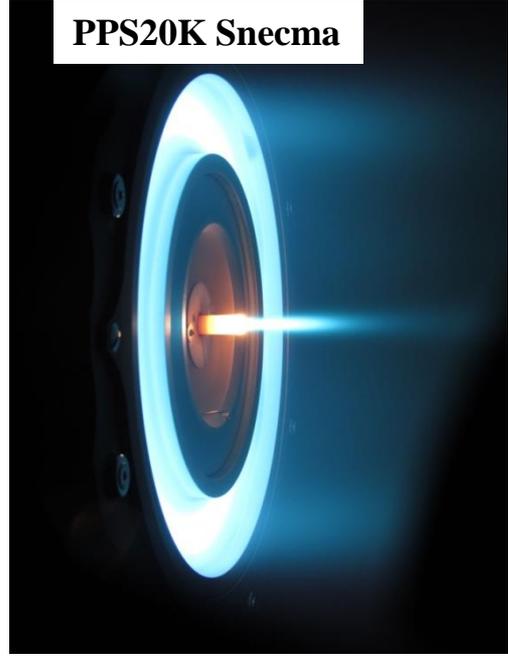
- Tension : 300 V, courant ~ 4 A
- Diamètre : 10 cm, $L = 2.5$ cm
- Débit Xe : 5 mg/s (densité $\sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$)
- Densité de plasma : 10^{18} m^{-3}
- Température électronique : 50 eV

Moteurs de Hall dans le monde

PPS®1350 Snecma sur la sonde ESA Smart-1

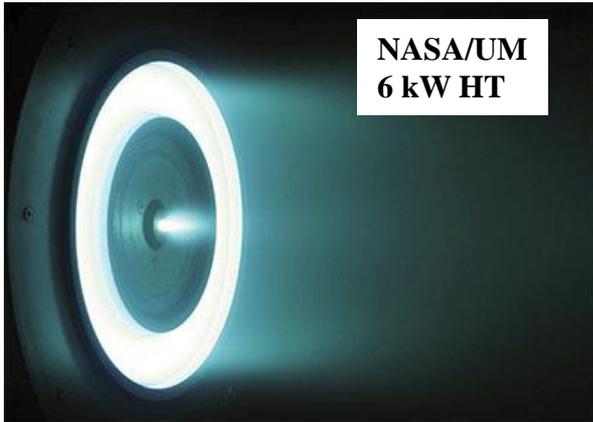


PPS20K Snecma



Chine – 200 W

NASA/UM
6 kW HT

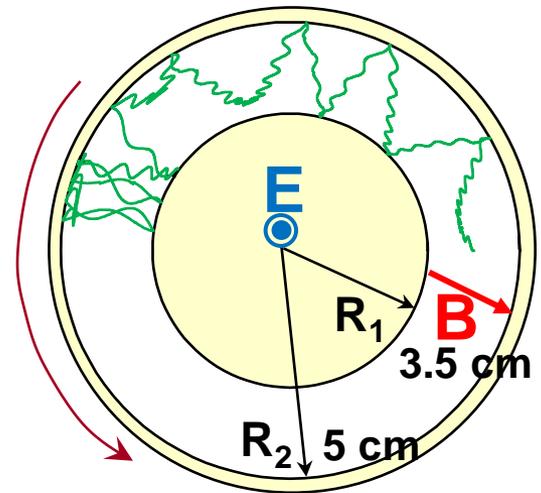
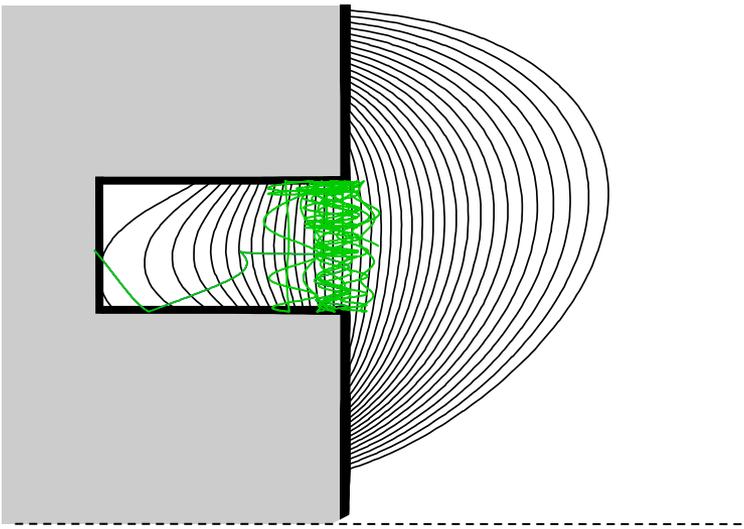


<https://pepl.engin.umich.edu>



Russe – SPT100

Configuration magnétique

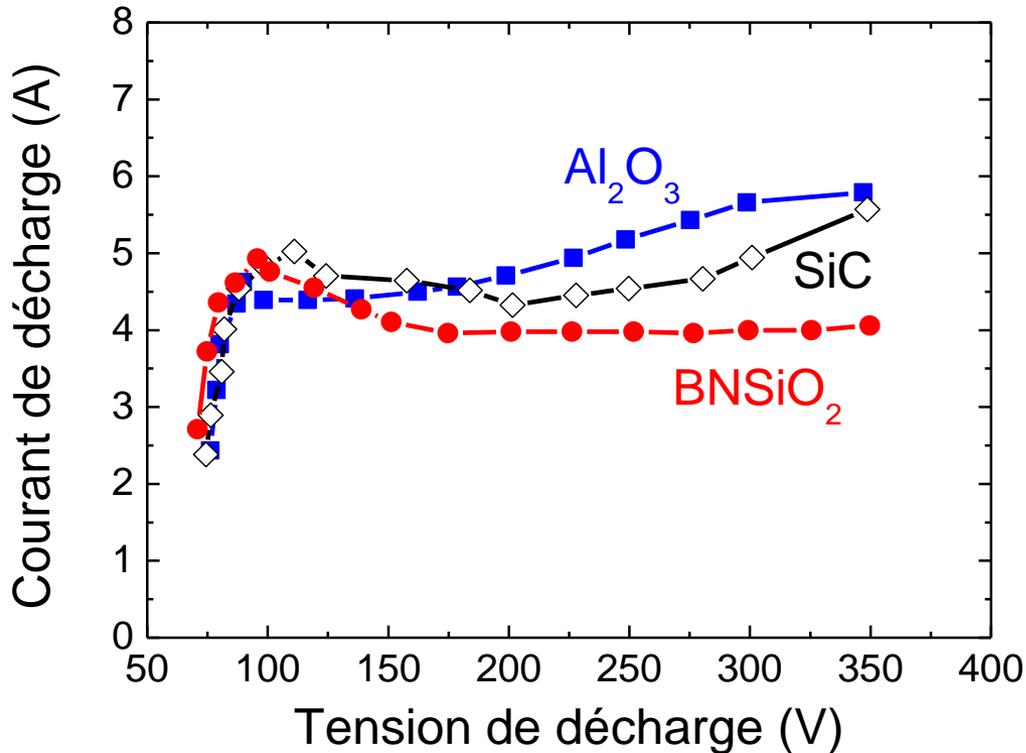


Courant de Hall

- Dérive $E \times B$
- Interactions électron-paroi

Influence du type de céramique

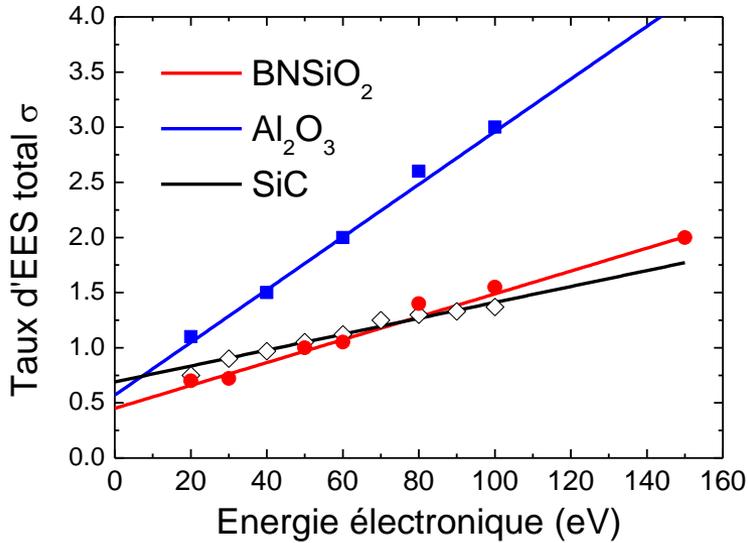
SPT100, 5 mg/s



- Mise en évidence de l'effet des matériaux sur la caractéristique I-V
- Courant additionnel électronique
- Effet de l'émission secondaire ?

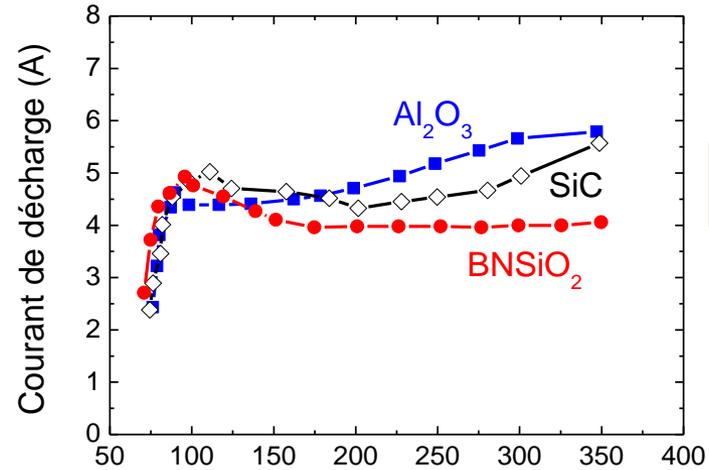
Gascon et al., Phys. Plasmas 10, 4123 (2003)

Emission secondaire électronique

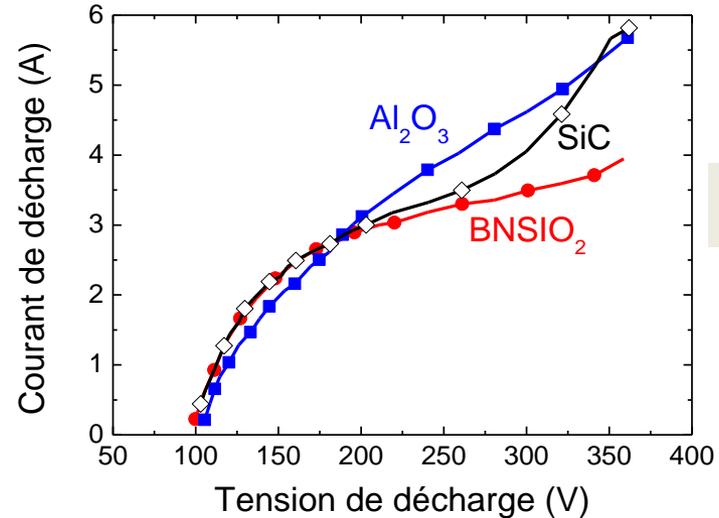


$$\sigma(\varepsilon) = \sigma(\varepsilon = 0) + \frac{\varepsilon}{\varepsilon^*} [1 - \sigma(\varepsilon = 0)]$$

Barral et al., Phys. Plasmas 10, 4137 (2003)



mesures



calculs

- Effet de l'ESE sur la décharge

Saturation de charge d'espace

diélectrique

$$\Gamma_{iw} \quad \Gamma_{ew}(1 - \bar{\sigma})$$

■ Hypothèses

- Electrons, distribution Maxwellienne
- Ions froids, non collisionnels

$$\Gamma_{iw} = \Gamma_{ew}(1 - \bar{\sigma})$$

$$\phi_s = \frac{k_B T_e}{e} \ln \left[(1 - \bar{\sigma}) \sqrt{\frac{m_i}{2\pi m_e}} \right]$$

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_c \approx 1 - 8.3 \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$$

$$\bar{\sigma}_{c,Xe} \approx 0.983$$

Hobbs and Wesson, Plasmas Physics 9, 85 (1967)

diélectrique

Gaine classique

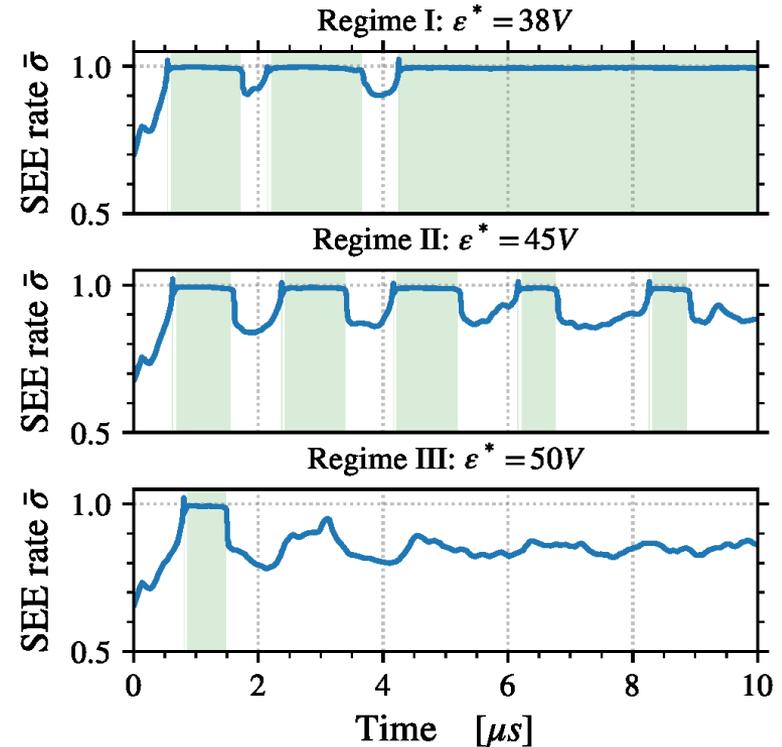
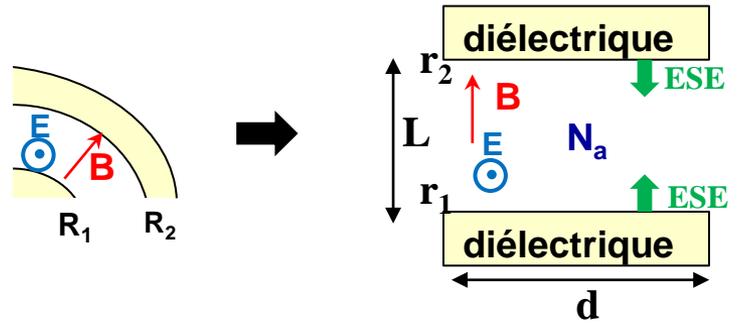
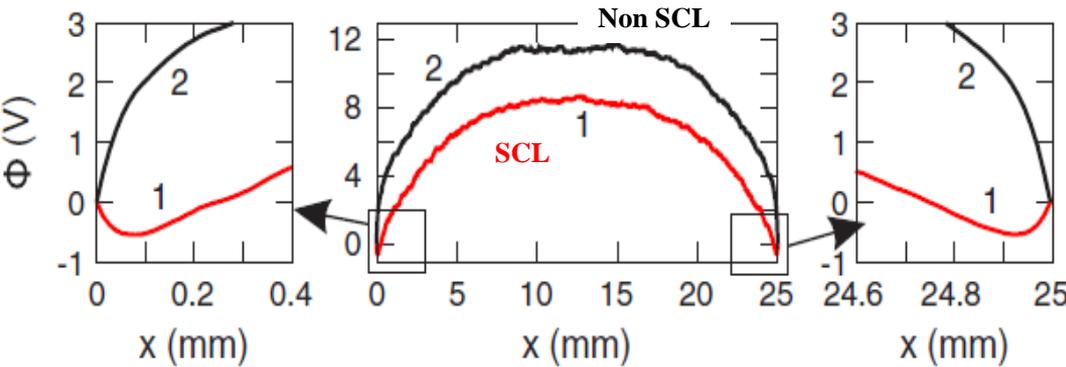
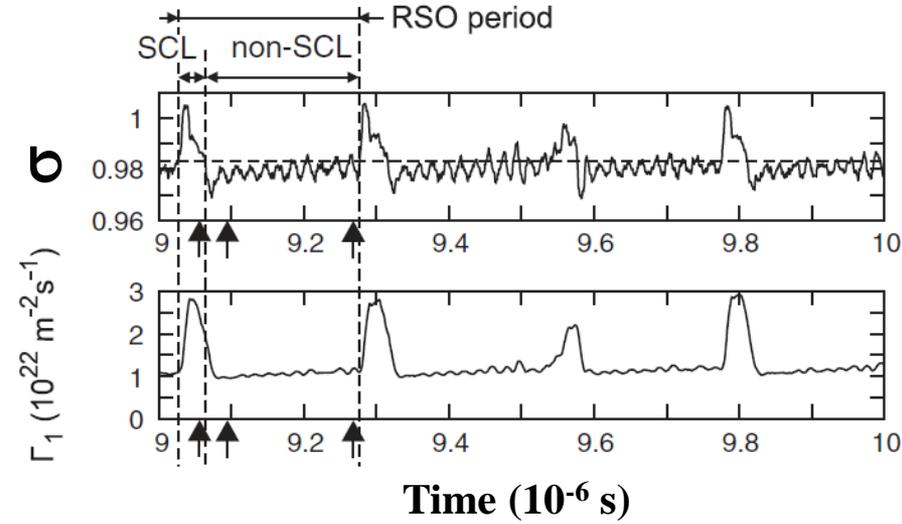
Gaine Saturée par la charge d'espace

ϕ

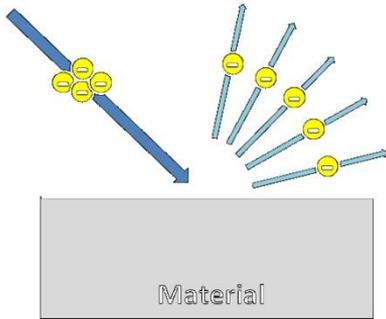
Instabilités de gaines



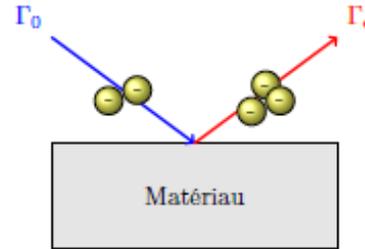
Sydorenko et al., *Phys. Plasmas* 15, 053506 (2008)
 Sydorenko et al., *Phys. Rev. Lett.* 103, 145004 (2009)
 Tavant et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* 27, 124001 (2018)



Emission secondaire électronique - ESE (1/2)

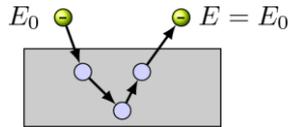


Taux d'ESE



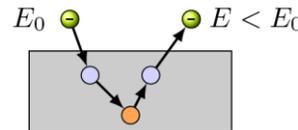
$$\sigma = \frac{\Gamma_e}{\Gamma_0}$$

Processus d'interactions d'un électron avec un matériau



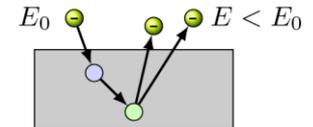
- : Electron
- : Elastic collision

(b) Elastic backscattering



- : Backscattered electron
- : Elastic collision
- : Inelastic collision

(c) Inelastic backscattering



- : Electron
- : Elastic collision
- : Electron emission

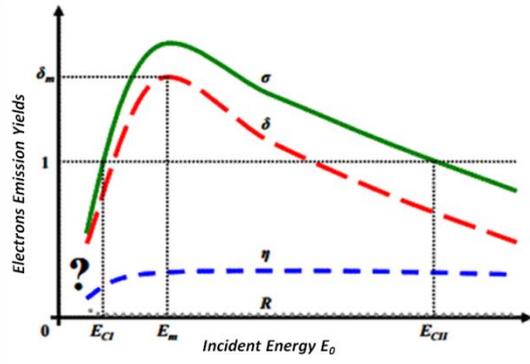
(a) Secondary electron emission

M. Villemant, Toulouse, ISAE (2018)

$$\sigma = \eta_e + \eta_i + \delta$$

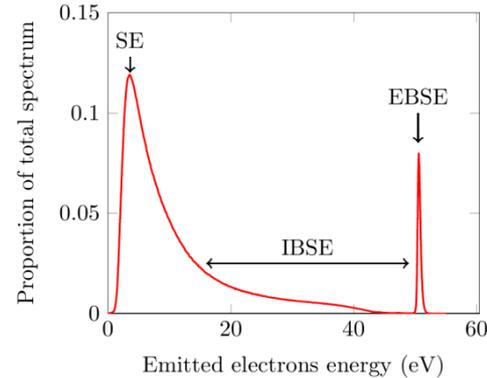
Emission secondaire électronique - ESE (2/2)

Taux d'ESE



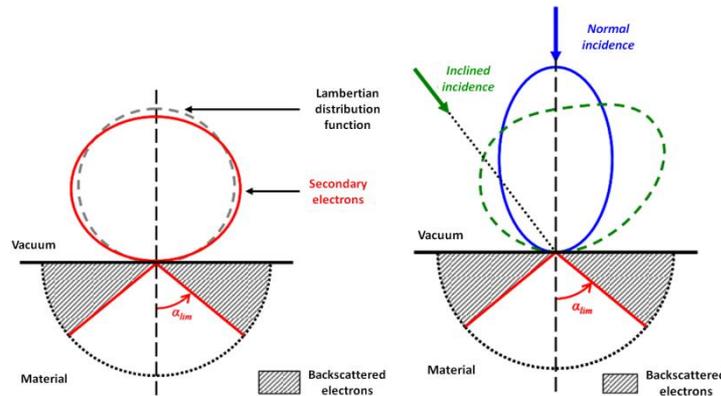
J. Roupie, Toulouse, ISAE (2013)

Spectre en énergie



*M. Villemant et al.,
J. Phys. D: Appl. Phys., 50,
485204 (2017)*

Distribution angulaire

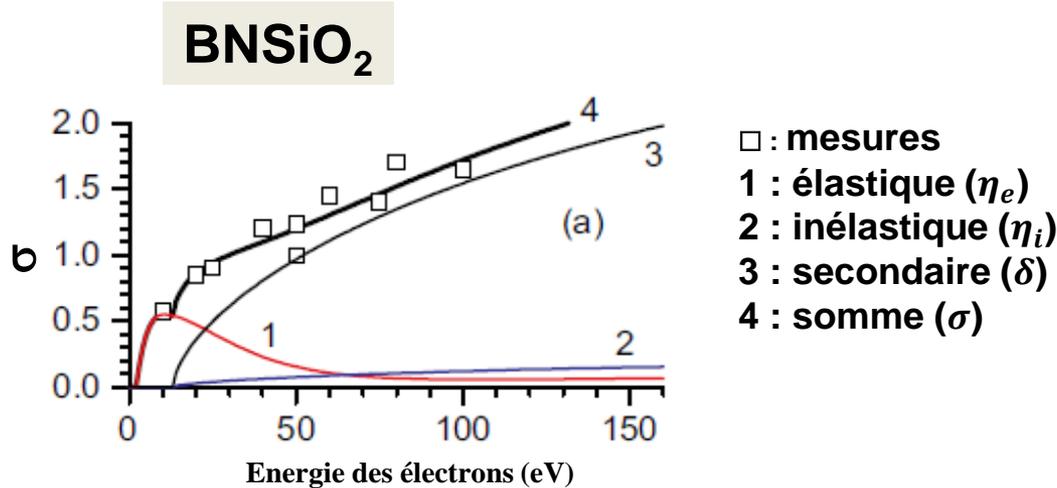


J. Roupie, Toulouse, ISAE (2013)

Modèle de « Vaughan » - fit des mesures

- **Modèle original, forte énergie, $\sigma > 1$**
- **Modifié (~ 10 paramètres), faible énergie**

J. Vaughan, IEEE TPS, 36, 1963 (1989)



D. Sydorenko, PhD Princeton (2006)

Table 3.1: Parameters of partial emission coefficients (3.16 - 3.18), which approximate the SEE properties of boron-nitride ceramics.

| w_0 [eV] | k_s | $\gamma_{max,0}$ | $w_{max,0}$ [eV] | r_e | $w_{e,0}$ | $\gamma_{e,max}$ | $w_{e,max}$ [eV] | r_i |
|------------|-------|------------------|------------------|-------|-----------|------------------|------------------|-------|
| 13 | 1 | 3 | 500 | 0.03 | 2 | 0.55 | 10 | 0.07 |

Mesures – Caisson DEESSE (ONERA)

Analyseur en énergie électronique hémisphérique

Canon à ion (pour le nettoyage des échantillons)

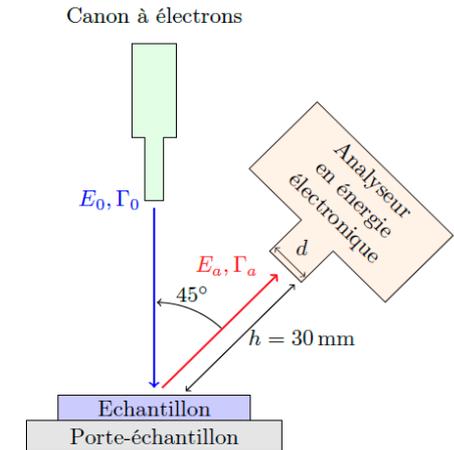
Canon à électron de 2 keV

Canon à électrons de 30 keV

Sas d'introduction des échantillons

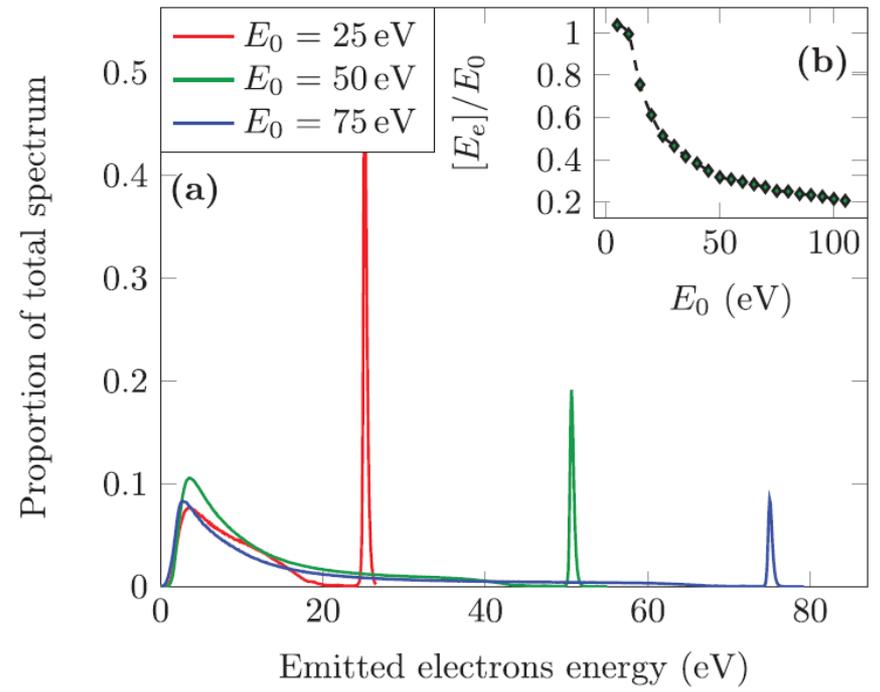
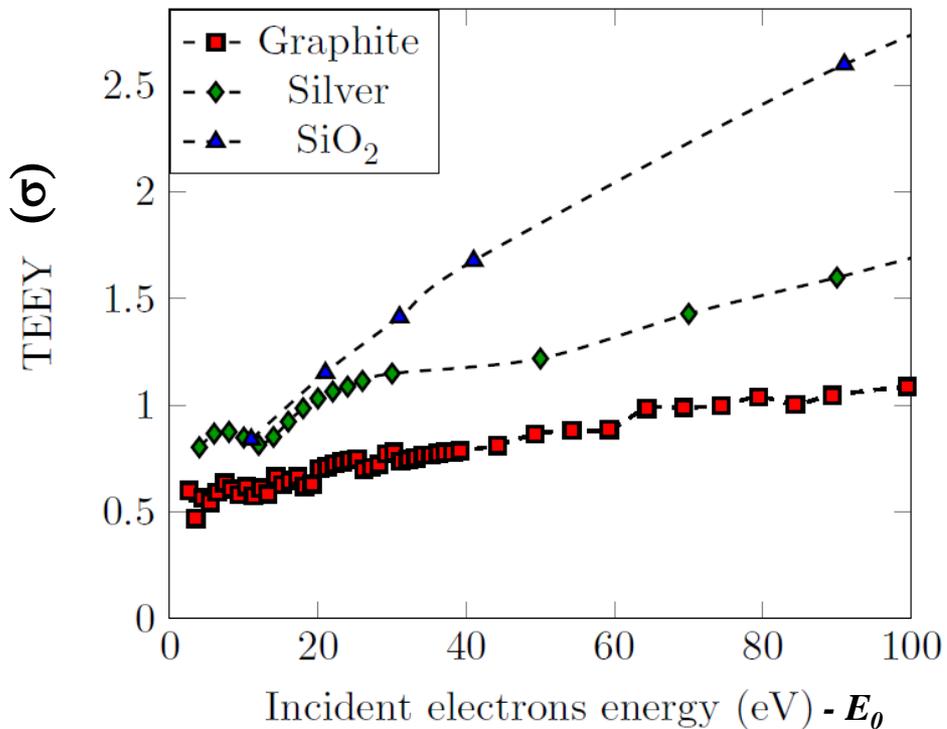


*M. Villemant, Toulouse
ISAE (2018)*



- Faible divergence du faisceau incident
- Chambre à la masse et échantillon polarisé négativement (pas de recollection d'électrons – échantillon ou chambre)
- Fonction de transfert à prendre en compte + calibrage
- Neutralisation de la charge après la mesure

Mesures – taux d'émission, spectre énergie



*M. Villemant et al.,
J. Phys. D: Appl. Phys. 50, 485204
(2017)*

- Mesures reproductibles sur divers matériaux

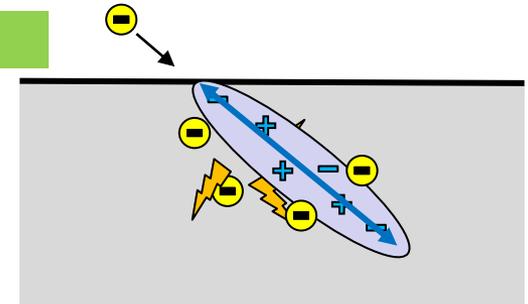


Electrons secondaires

■ Taux d'émission secondaire – physique des matériaux – OSMOSEE

A. Jablonski, J. Phys. D: Appl. Phys. 47, 055301 (2014)

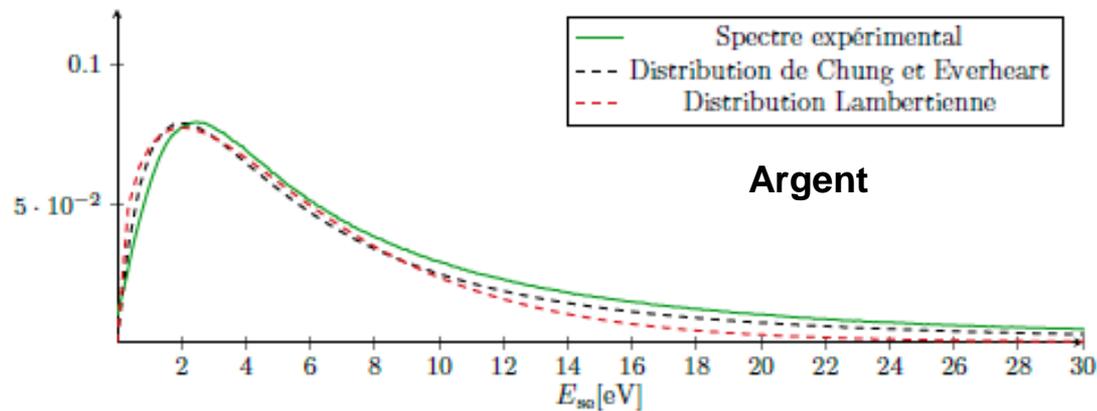
- Dose déposée dans le matériau
- Génération d'ES dans le matériau
- Evaluation de la probabilité d'un ES d'atteindre la surface
- Evaluation de la probabilité d'un ES de dépasser la surface



■ Energie des secondaires - Modèle de Chung-Everheart

- Propriétés du matériau (travail de sortie)
- Energie des électrons incidents
- Répartition angulaire semi-isotrope : bonne hypothèse

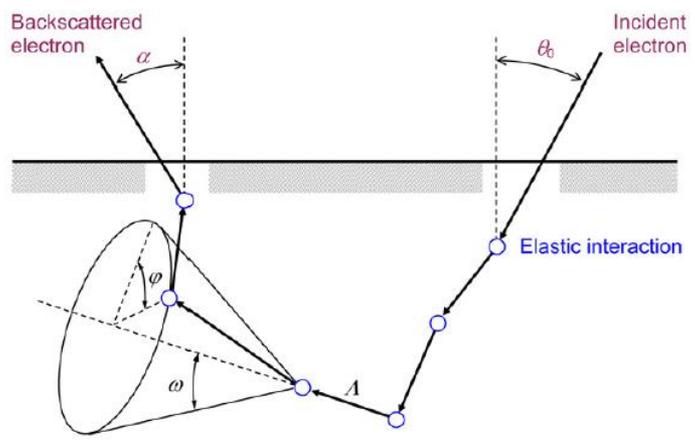
Chung and Everheart, J. Appl. Phys 49, 707 (1974)



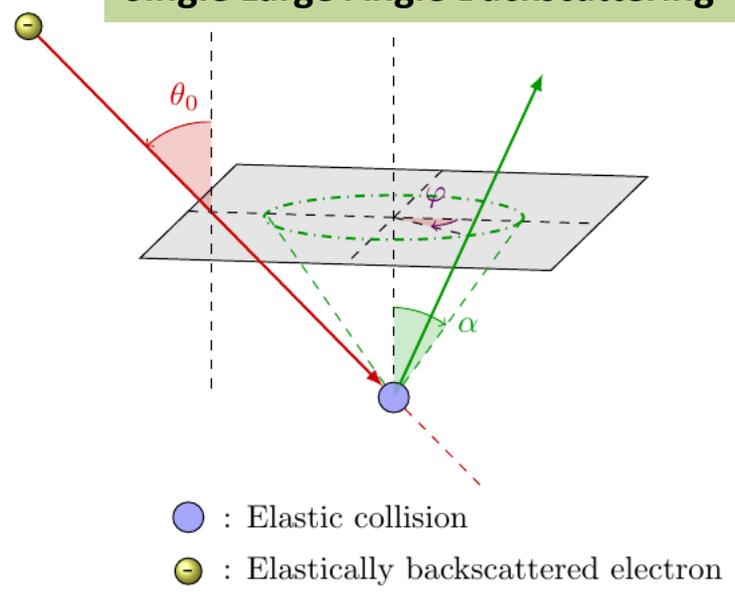
M. Villemant, Toulouse ISAE (2018)

Electrons rétrodiffusés

Modèle Monte-Carlo



Modèle SLAB Single Large Angle Backscattering



- Précis mais très long

- Faible profondeur de pénétration
- 1 seule interaction effective

M. Villemant, IEPC (2017)

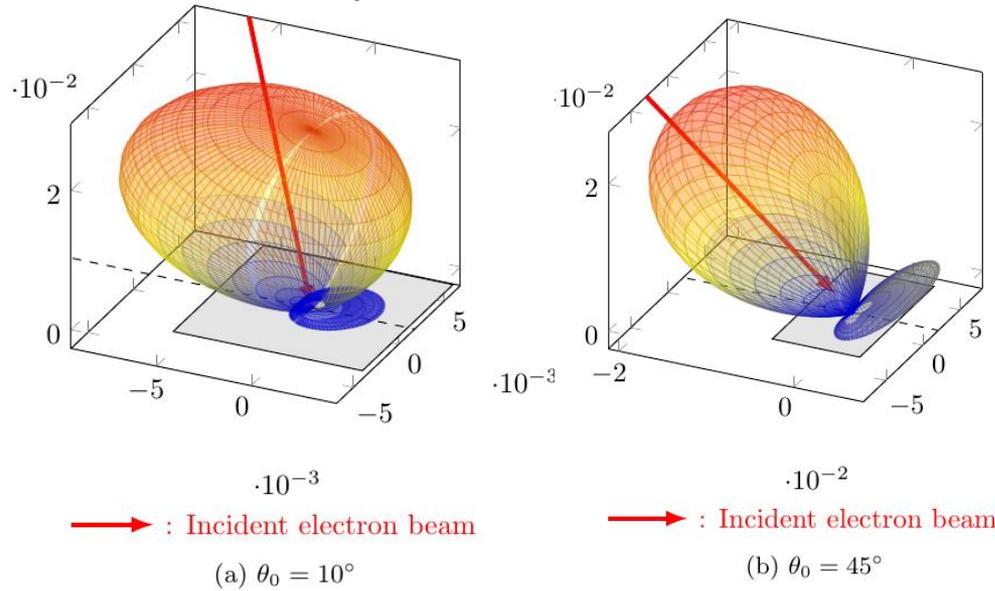


Répartition angulaire et énergétique

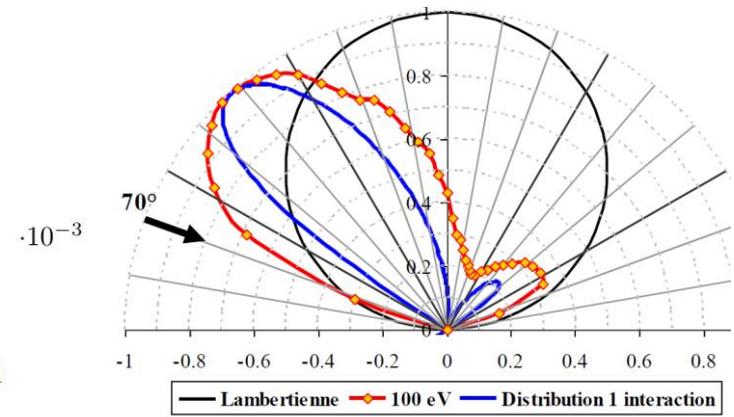
- **Energie des électrons rétrodiffusés**
 - Mono-énergétique: bonne approximation
- **Répartition angulaire**

R. Gueroult et al., *Front. Phys.* 6:128 (2018)

$E_0 = 40$ eV, aluminium



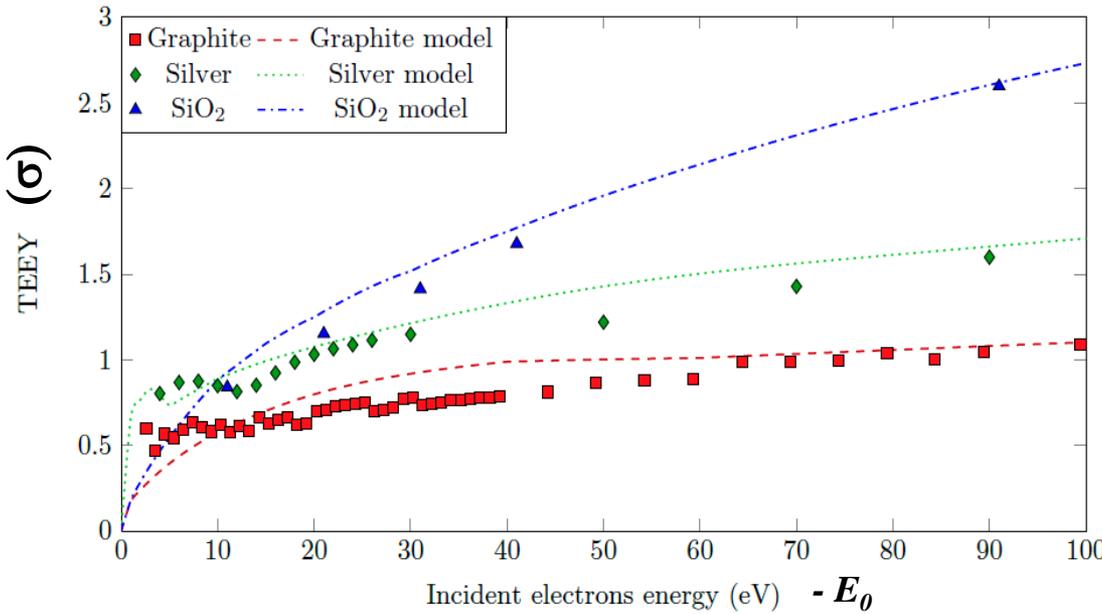
Modèle SLAB



Modèle SLAB + Monte Carlo



| | Electrons secondaires | Électrons élastiques rétrodiffusés | Électrons inélastiques rétrodiffusés |
|------------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Taux d'émission | Modèle de "dose" | Model SLAB | Négligés, prise en compte ? |
| Distribution angulaire | Isotrope | | |
| Distribution énergie | modèle Chung and Everheart | Mono-énergétique | |



M. Villemant, Toulouse ISAE (2018)

■ Accord qualitatif

Conclusions

- **Rôle de l'émission secondaire électronique dans les propulseurs de Hall**
- **La détermination des propriétés de l'émission secondaire en fonction du type de matériau facteur clé**
- **Etablir des lois basées sur les propriétés des matériaux avec une compréhension de la physique est possible mais limité à un matériau « idéal »**
- **Couplage plasma avec ces lois « réalistes » d'émission secondaire électronique reste à faire**