



**HAL**  
open science

## Un nouveau moyen expérimental de mesure de rendement de rétrodiffusion

T Gineste, M Belhaj, G. Teyssedre, J Puech, N Balcon

### ► To cite this version:

T Gineste, M Belhaj, G. Teyssedre, J Puech, N Balcon. Un nouveau moyen expérimental de mesure de rendement de rétrodiffusion. 9e Conférence Société Française d'Electrostatique (SFE), Toulouse, France, 27-29 Aout 2014, Aug 2014, Toulouse, France. pp. 343-347. hal-03034521

**HAL Id: hal-03034521**

**<https://hal.science/hal-03034521>**

Submitted on 1 Dec 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Un nouveau moyen expérimental de mesure de rendement de rétrodiffusion.

T.Gineste<sup>1</sup>, M. Belhaj<sup>1</sup>, G.Teysse<sup>2</sup>, J. Puech<sup>3</sup> et N.Balcon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ONERA – The French Aerospace Lab 31055 Toulouse Cedex, France

<sup>2</sup>Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie - LAPLACE

Bât. 3R3, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex, France

<sup>3</sup>CNES, 18 Avenue Edouard Belin 31055 Toulouse Cedex 9, France

### Résumé:

Un moyen expérimental permettant de caractériser l'émission électronique sous irradiation par des électrons (flux, énergies) a été développé. Une technique originale a été implanté dans l'objectif d'identifier et quantifier le type d'électrons émis: secondaire ou rétrodiffusé. Les résultats obtenus sont en bon accord avec la littérature.

### INTRODUCTION

Lorsqu'un matériau est irradié par des électrons il émet des électrons. Les électrons émis sont:

(i) Des électrons secondaires (SE : Secondary Electrons) qui sont des électrons originaires de la cible.

(ii) Des électrons rétrodiffusés (BSE : BackScattered Electrons) qui sont des électrons incidents qui sont réémis par la cible après une ou plusieurs interactions.

L'émission électronique est un phénomène clef dans de nombreux domaines scientifique et technique comme la microscopie électronique (formation de l'image), les accélérateurs à particules [1] (perturbation du faisceau de particules) ou bien encore dans les guides d'ondes (effet d'avalanche liée au couplage onde rf et émission secondaire). Dans certains cas, l'émission électronique est considérée comme une source de perturbation. En revanche dans d'autres applications comme les amplificateurs à micro galettes (MCP), la multiplication d'électrons par émission électronique est à l'origine de l'amplification : une forte émission électronique conduit à un fort gain. Dans tous les cas, il est important de pouvoir modéliser l'émission électronique et ses effets. Pour ce faire il est nécessaire de connaître (i) le nombre d'électron émis, (ii) l'énergie des électrons émis et (iii) de différencier la contribution des électrons secondaires et rétrodiffusés au rendement total. Afin de quantifier l'émission électronique des mesures de rendements sont effectuées. Le rendement d'émission électronique total (TEEY : Total Electron Emission Yield) est le nombre d'électrons émis divisé par le nombre d'électrons incidents. Sur la Fig. 1 la variation typique du TEEY en fonction de l'énergie des électrons incidents est représentée.

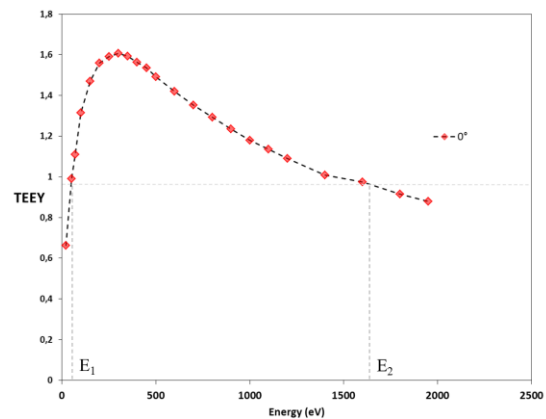


Figure 1. Courbe de rendement total typique (TEEY). Courbe mesurée sur un échantillon de graphite.

Le rendement aux faibles énergies incidentes est inférieur à un, ce qui implique qu'il y a plus d'électrons incidents que d'électrons émis. Lorsque le rendement est égal à un le premier point de cross-over ( $E_1$ ) est atteint. Le nombre d'électrons émis est alors égal au nombre d'électrons reçus. Le TEEY atteint un maximum puis diminue en passant par le second point de cross-over ( $E_2$ ). Connaissant le courant incident, les mesures de rendement nous renseignent sur la quantité d'électron émis. Pour caractériser plus en détails l'émission électronique, il est nécessaire de connaître la distribution énergétique des électrons émis. Celle-ci s'obtient par la mesure des spectres (distribution énergétique) des électrons émis obtenus à une énergie incidente fixe. Un spectre d'émission typique se compose en trois parties comme cela est représenté sur la Fig. 2.

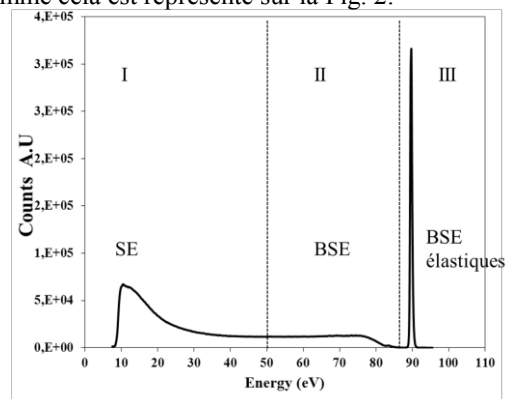


Figure 2. Spectre d'émission, énergie incidente 90eV, échantillon polarisé à -8V, énergie des électrons incidents à la surface du matériau est de 82eV.

Le premier pic (I) correspond à des électrons

secondaires. Les électrons secondaires sont émis à des énergies allant de quelques meV à 50 eV. Cette barrière purement conventionnelle des 50eV se base sur l'hypothèse qu'en dessous de 50eV, uniquement des électrons secondaires sont émis. Cette approximation est correcte lorsque l'énergie des électrons incidents est élevée (> quelques centaines d'eV). Nous attirons l'attention du lecteur au fait que la définition d'une barrière énergétique nette entre électrons secondaires et autres est bien plus compliquée, voir impossible aux basses énergies (quelques dizaines d'eV). La deuxième partie (II) correspond aux électrons rétrodiffusés inélastiques qui ont subi une ou des interaction(s) inélastiques dans le matériau avant de sortir. Le pic d'électrons rétrodiffusés élastiques constitue la troisième partie. Les électrons ont subi une ou plusieurs interactions élastiques et ressortent donc avec la même énergie que l'énergie d'incidence.

L'objectif de ce papier est de présenter un dispositif expérimental qui permet la mesure de rendement d'électrons rétrodiffusés et donc de séparer la contribution des électrons secondaires et des électrons rétrodiffusés au rendement total. Le dispositif a l'avantage d'être facile à mettre en œuvre dans n'importe quel moyen expérimental contrastant ainsi des dispositifs classiques à grilles retardatrices [3][4][5][6][7].

**METHODES**

**Mesure de rendement**

L'échantillon étudié est un échantillon d'argent dit « technique » mais le dispositif est aussi fonctionnel pour des échantillons diélectriques à condition de limiter la charge électrique.

Les mesures de rendement sont effectuées sans utiliser de collecteur. Un échantillon d'argent est irradié par un faisceau incident dont le courant a été préalablement mesuré ( $I_f$ ) grâce à une cage de Faraday. Le courant échantillon est par la suite mesuré ( $I_e$ ). Le rendement total  $\sigma$ , peut être déduit de la relation suivante :

$$\sigma = \frac{I_f - I_e}{I_f}$$

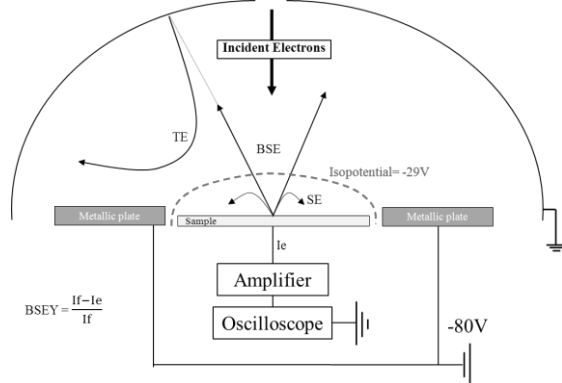
Une méthode qui permet d'effectuer des mesures de rendement sur des diélectriques est décrite par Belhaj et al [2].

Des techniques ont déjà été mises en œuvre pour effectuer des mesures de rendement de rétrodiffusion. La plupart des auteurs utilisent un analyseur à grilles retardatrices sphériques ou hémisphériques [3][4][5][6][7]. Ce sont des méthodes techniquement complexes à mettre en œuvre et qui ne peuvent pas s'adapter facilement à n'importe quel moyen d'essai. De plus, pour utiliser ces dispositifs, il est nécessaire de considérer certaines hypothèses. Il faut connaître la

transparence des grilles utilisées en général entre 80 et 85%. En fonction du potentiel des grilles utilisées (positif ou négatif), des électrons tertiaires générés par les électrons rétrodiffusés sur les grilles peuvent venir parasiter les mesures. Afin de s'affranchir de ces hypothèses un dispositif expérimental a été mis au point.

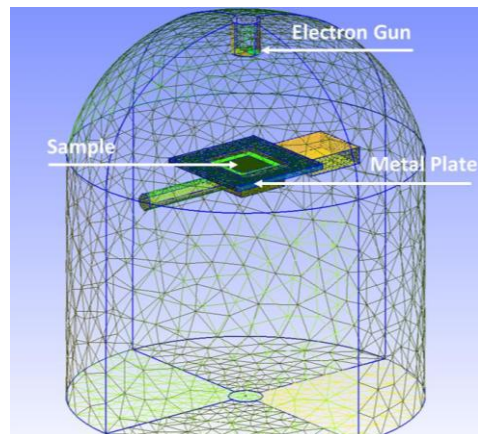
**Conception du dispositif**

Le principe du dispositif est similaire à celui utilisé par Frederickson et Burke [8] pour les hautes énergies. Une plaque métallique polarisée négativement (environ -80V) entoure l'échantillon. Les isopotentiels négatifs générés par la plaque au-dessus de l'échantillon empêchent les électrons émis de faibles énergies de s'échapper du matériau. La valeur de la barrière ainsi créée est ajustée pour arrêter les électrons secondaires. Le principe du dispositif est résumé sur la Fig.3.



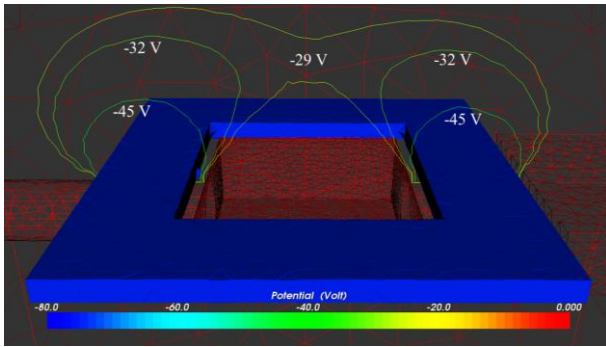
**Figure 3.** Principe du dispositif

Afin de concevoir le dispositif le plus efficace, un logiciel PIC (Particle In Cell) nommé SPIS (Spacecraft Plasma Interaction Software) [9] a été utilisé. La géométrie du dispositif est représentée sur la Fig.4.



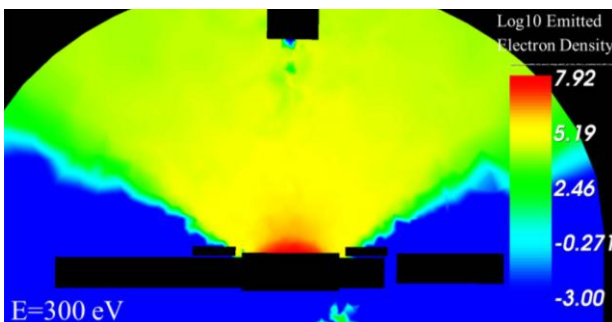
**Figure 4.** Géométrie du dispositif

Pour des raisons de simplicité, la géométrie de la cage de Faraday est un pavé et non un cylindre. Les isopotentiels sont représentés sur la figure 5 dans le cas où la plaque est polarisée à -80V.



**Figure 5.** Représentation des isopotentiels (Volt)

D'après la forme de l'isopotential de -32V, des électrons émis avec une énergie de -32V peuvent s'échapper. Le premier isopotential fermant la cloche au-dessus de l'échantillon est de -29V. Cela signifie qu'aucun électron émis ayant une énergie inférieure à -29V ne peut franchir la barrière. Malgré la forme carrée de la plaque, la barrière qui s'établit au-dessus de l'échantillon est homogène. Dans le cas de l'argent, une barrière à -29V est suffisante pour stopper tous les électrons secondaires [10]. Des simulations ont ensuite été menées afin de s'assurer qu'aucuns électrons ne pouvaient s'échapper. La simulation est réalisée avec un faisceau incident axisymétrique de 300eV représentatif du faisceau expérimental. Le logarithme décimal de la densité d'électrons émis est représenté sur la Fig. 6.

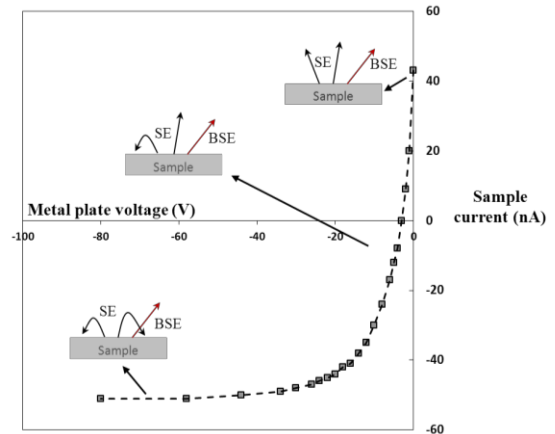


**Figure 6.** Densité d'électrons émis

La forte concentration électronique proche de la surface correspond aux électrons secondaires qui ne peuvent franchir la barrière et sont repoussés vers l'échantillon. Le cône vert jaune correspond aux électrons rétrodiffusés qui ont une énergie supérieure à la barrière.

La validité du dispositif a été vérifiée de manière expérimentale. Le courant échantillon est mesuré pendant une irradiation avec un faisceau de 1 KeV (voir Fig.7). Au début du test, le potentiel de la plaque a été fixé à 0V, le courant échantillon mesuré est positif puisque avec un faisceau incident de 1 KeV le TEEY est supérieur à un. Puis, le potentiel a été progressivement diminué jusqu'à atteindre -80V. Le courant échantillon mesuré diminue en fonction du potentiel pour atteindre une valeur asymptotique négative, car les

électrons de faible énergie sont progressivement bloqués par la barrière de potentiel croissante. Le comportement  $I_e=f(V)$  asymptotique signifie que tous les électrons secondaires ont été bloqués. Le dispositif repose sur l'approche conventionnelle (coupure énergétique entre SE et BSE), Etant donné que cette hypothèse n'est plus valide aux basses énergies incidentes (chevauchement entre les distributions des électrons rétrodiffusés et des électrons secondaires), le dispositif ne peut pas être utilisé aux faibles énergies d'incidence. Dans le cas présent les mesures ont été effectuées avec une énergie incidente minimale de 60eV.

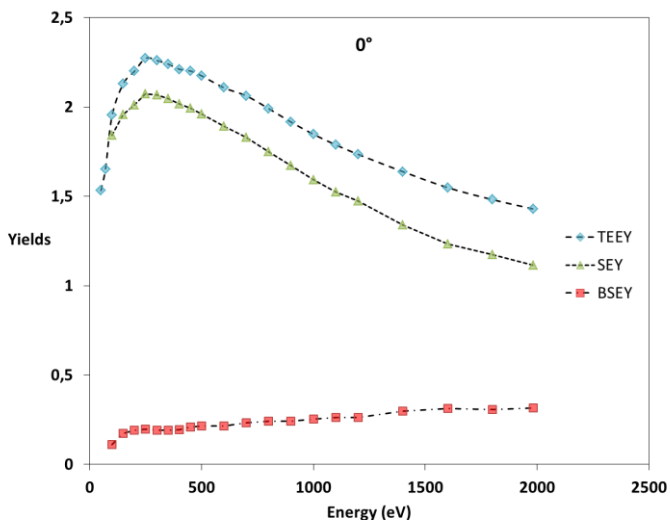


**Figure 7.** Courbe représentant le courant échantillon en fonction du potentiel de la plaque.  $E=1000\text{eV}$ .

## RESULTATS

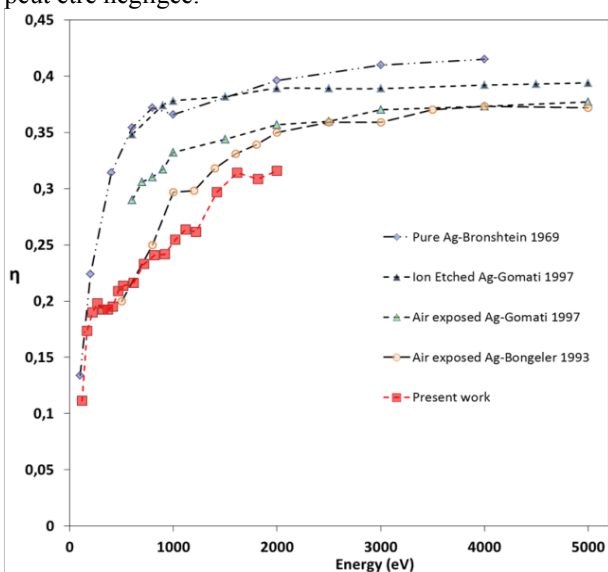
Les mesures ont été réalisées dans le moyen expérimental CELESTE de l'ONERA, entièrement dédié à l'étude de l'émission électronique. Un système de pompage composé d'une pompe turbomoléculaire et d'une pompe à membrane sans huile permet d'atteindre une pression de  $5 \cdot 10^{-9}$  mBar. Les mesures ont été réalisées à  $5 \cdot 10^{-8}$  mbar.

Le rendement d'émission secondaire est obtenu en soustrayant le rendement de rétrodiffusion au rendement total. Les trois courbes sont représentées sur la Fig. 8.



**Figure 8.** Représentation des courbes de rendement total (TEEY), rendement d'émission secondaire (SEY) et rendement de rétrodiffusion (BSEY) à incidence normale.

L'émission secondaire contribue majoritairement au rendement total mais cette contribution diminue avec l'énergie incidente au profit de la rétrodiffusion. Le rendement de rétrodiffusion mesuré a été comparé à la littérature sur la Fig. 9 Les résultats obtenus sont proches de ceux obtenus par les auteurs El-Gomati [11] et Böngeler [7] qui ont travaillé sur de l'argent exposé à l'air (dit « technique »). En revanche ils sont plus éloignés de ceux effectués sur de l'argent pur par Bronshtein [12]. En effet les échantillons exposés à l'air présentent une couche de contamination qui n'est pas présente sur les échantillons purs. Compte tenu du fait que la profondeur moyenne d'échappement des électrons rétrodiffusés est inférieure à 40 nm et que les contaminants sont déposés sur quelques nm, l'influence des contaminants sur les rendements de rétrodiffusion ne peut être négligée.



**Figure 9.** Comparaison résultats de rendement de rétrodiffusion avec la littérature.

## CONCLUSION

Un dispositif expérimental permettant d'effectuer des mesures de rendement de rétrodiffusion a été mis au point. Il permet de travailler avec une large gamme d'énergie incidente, de 60eV au MeV. Il peut être utilisé sur des matériaux conducteurs ou diélectriques et peut être installé simplement dans n'importe quelle chambre à vide.

## REFERENCES

- [1] K. Ohmi, « Beam-Photoelectron Interactions in Positron Storage Rings », *Phys. Rev. Lett.*, vol. 75, n° 8, p. 1526–1529, août 1995.
- [2] M. Belhaj, T. Tondou, V. Inguibert, et J. P. Chardon, « A Kelvin probe based method for measuring the electron emission yield of insulators and insulated conductors subjected to electron irradiation », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 42, n° 10, p. 105309, mai 2009.
- [3] S. Thomas et E. B. Pattinson, « Range of electrons and contribution of back-scattered electrons in secondary production in aluminium », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 3, n° 3, p. 349, mars 1970.
- [4] L. Reimer et C. Tollkamp, « Measuring the backscattering coefficient and secondary electron yield inside a scanning electron microscope », *Scanning*, vol. 3, n° 1, p. 35–39, mars 1980.
- [5] T. Koshikawa et R. Shimizu, « Secondary electron and backscattering measurements for polycrystalline copper with a spherical retarding-field analyser », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 6, n° 11, p. 1369, juill. 1973.
- [6] M. M. El-Gomati, C. G. H. Walker, et X. Zha, « Towards quantitative scanning electron microscopy: Applications to nano-scale analysis », *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, vol. 645, n° 1, p. 68–73, juill. 2011.
- [7] R. Böngeler, U. Golla, M. Kässens, L. Reimer, B. Schindler, R. Senkel, et M. Spranck, « Electron-specimen interactions in low-voltage scanning electron microscopy », *Scanning*, vol. 15, n° 1, p. 1–18, 1993.
- [8] A. R. Frederickson et E. A. Burke, « Total Electron Backscatter and Backemission Yields from Metals Bombarded at Several Angles by 0.4 to 1.4 MeV Electrons », *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 19, n° 6, p. 160–166, 1972.
- [9] SPIS, [www.spis.org](http://www.spis.org).
- [10] P. Riccardi, M. Pisarra, A. Cupolillo, M. Comisso, A. Sindona, R. A. Baragiola, et C. A. Dukes, « Secondary electron emission spectra from clean and cesiated Al surfaces: the role of plasmon decay and data analysis for applications », *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 22, n° 30, p. 305004, 2010.
- [11] A. M. D. Assa'd et M. M. El Gomati,

« Backscattering coefficients for low energy electrons », *Scanning Microsc.*, vol. 12, p. 185–192, 1998.

- [12] I. M. Bronshtein et B. S. Fraiman, *VTORICHNAYA ELEKTRONNAYA EMISSIYA. (Secondary Electron Emission)*. Nauka, Moskva, 1969.