

# Emission d'électrons secondaires et rétrodiffusés à très basse énergie d'incidence (5eV-1keV): nouveaux développements et nouveaux résultats.

Thomas Gineste, Mohamed Belhaj, Christophe Inguibert  
Département d'Environnement SPatial (DESP)  
ONERA – Toulouse

Thomas.Gineste@onera.fr  
Mohamed.Belhaj@onera.fr  
Christophe.Inguibert@onera.fr

GN  
MEBA



Journées Pédagogiques  
La basse énergie en MEB et les microanalyses  
4 et 5 décembre 2014, Jussieu, Paris V

ONERA

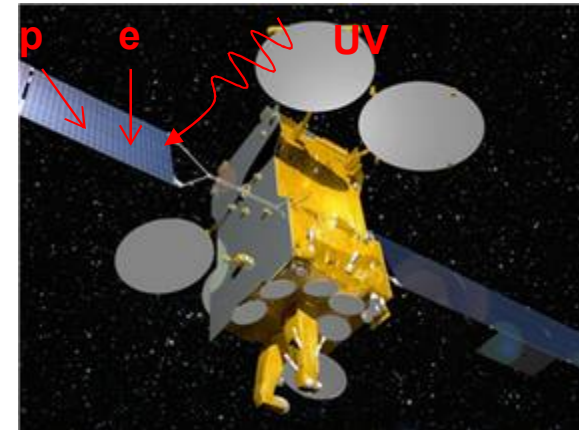
THE FRENCH AEROSPACE LAB

# Contexte spatial 1/3

## Interactions environnement spatial

- Protons
- Photons
- **Electrons**

avec le satellite

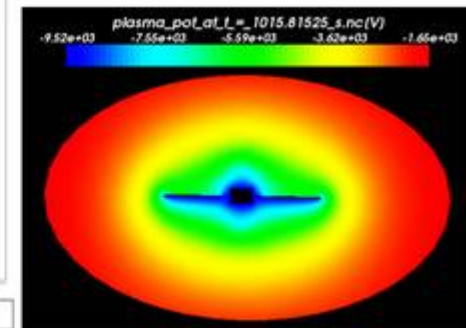
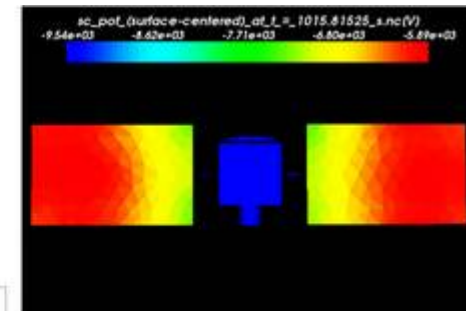
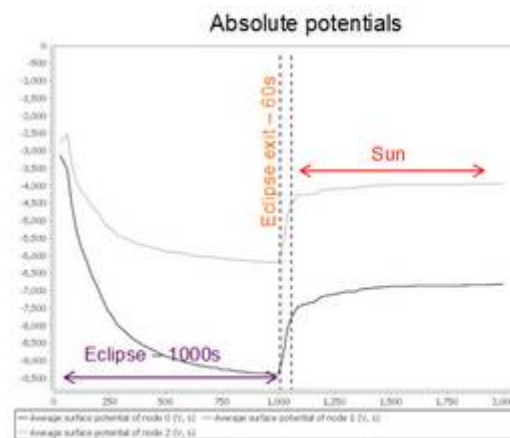


- Evaluer la charge électrostatique du satellite ou d'un instrument particulier
- Evaluer le risque et les conséquences de décharges électrostatiques (ESD)

**Domaine d'énergie d'intérêt  
1 keV- 30 keV**

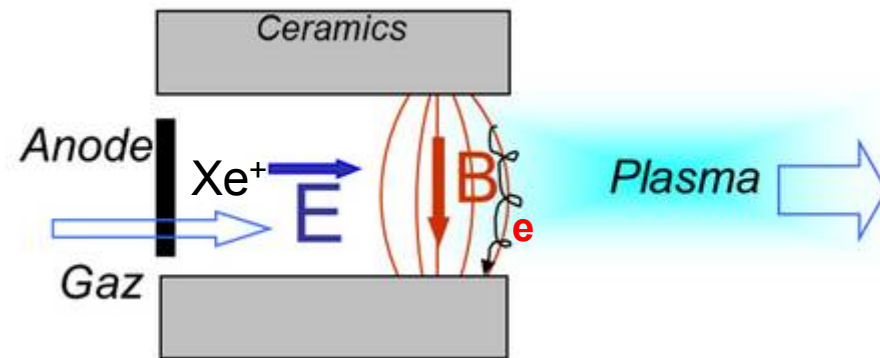
## Modélisation SPIS\*

GEO : estimation du risque électrostatique en sortie d'éclipse



\* <http://dev.spis.org/projects/spine/home/spis>  
\* <http://www.onera.fr/fr/desp/electrization?page=4>

## Propulsion plasmique: moteurs à effet Hall (maintien et mise en poste du satellite)

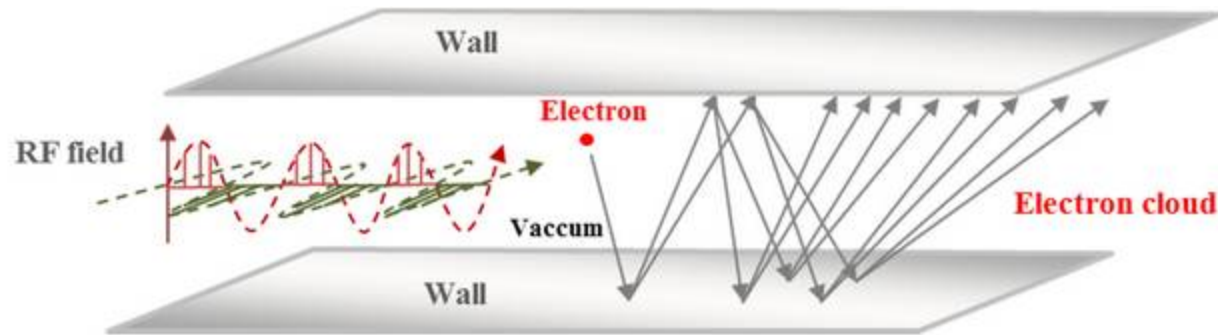


- Rendement du moteur liée au rendement d'émission électronique
- Recherche de matériaux céramiques à faible rendement d'émission électronique

Domaine d'énergie d'intérêt  
1 eV- 50 eV

# Contexte spatial 3/3

## Effet multipactor: couplage onde rf et émission électronique



- Contraintes fortes sur la puissance transmise permise dans les guides d'ondes.
- Recherche de matériaux conducteurs et diélectriques à faible rendement d'émission électronique.
- Besoin de modèles d'émission électronique précis et des paramètres fiables.

**Domaine d'énergie d'intérêt  
1 eV- 500 eV**

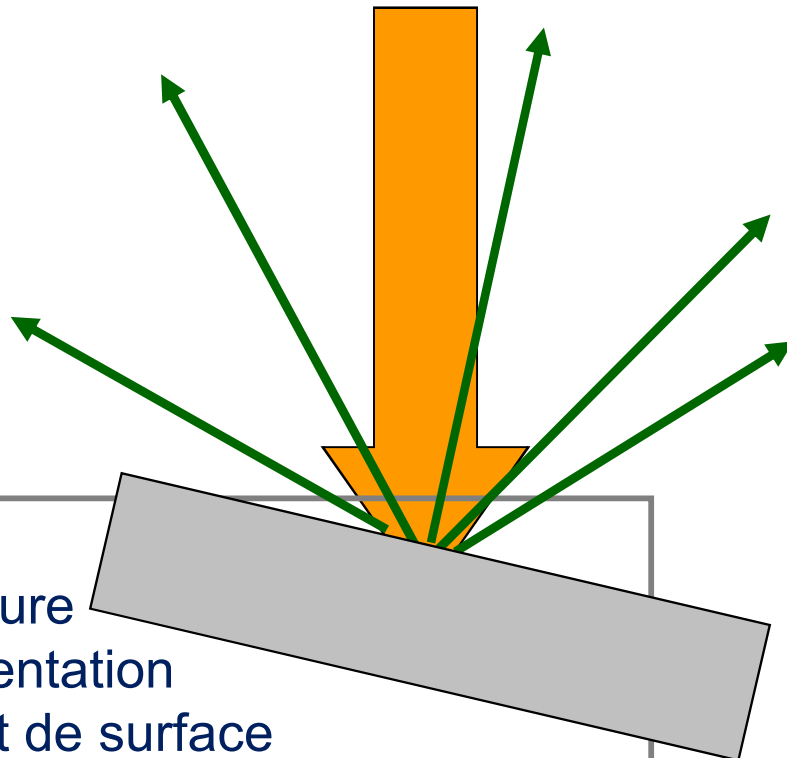
# Les besoins laboratoire: contexte spatiale

## Faisceau primaire d'électrons

- Energie
- Densité de courant
- Durée d'irradiation

## Électrons émis

- Quantité
- Origine
  - Primaire => Rétrodiffusé
  - Cible => secondaire vrai
- Distribution angulaire
- Spectre en énergie



## Cible

- Nature
- Orientation
- État de surface  
(contamination, rugosité)
- Potentiel électrique Vs
- Historique

Mesure 1

Mesure 2

$$\sigma = \frac{\text{Nombre d'électrons émis}}{\text{Nombre d'électrons primaires}}$$

# Intérêts communs (spatial – MEB-basses tensions)

## Faisceau primaire d'électrons

- **Energie** (contraste optimal, inversion de contraste ?)
- Densité de courant
- **Durée d'irradiation** (dynamique de la contamination: fixation et évaporation: variation du contraste lors de l'analyse ?)

## Cible

- **Nature** (contraste Z)
- **Orientation** (contraste topographique)
- **État de surface:**
- Potentiel électrique  $V_s$
- Historique

## Électrons émis

- Quantité : **intensité du signal, contraste**
- Origine : **identification de la nature du contraste .**
  - Primaire => Rétrodiffusé
  - Cible => secondaire vrai
- Distribution angulaire: **détection ?**
- Spectre en énergie : **détection, filtration, tomographie ?**

## 1- Basses énergies → **moyens de mesures spécifiques**

- Présentation des moyens
- Quelques méthodes de mesures
- Exemples de mesures

## 2- Emission secondaire → **effet de la contamination**

- De l'échantillon dit «technique» à l'échantillon dit « propre»

## 3- Très basses énergies → **de la mesure vers la modélisation**

## 4- Conclusion et perspectives

## 1- Basses énergies → **moyens de mesures spécifiques**

- Présentation des moyens
- Quelques méthodes de mesures
- Exemples de mesures

## 2- Emission secondaire → effet de la contamination

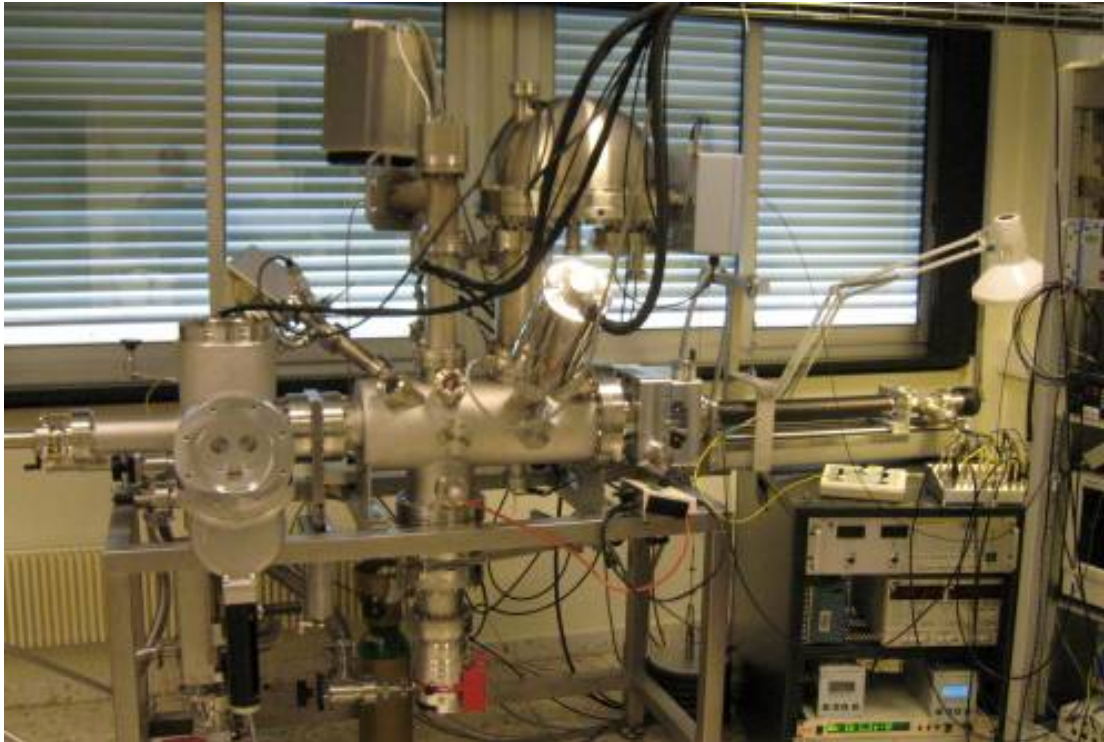
- De l'échantillon dit «technique» à l'échantillon dit « propre»

## 3- Très basses énergies → de la mesure vers la modélisation

## 4- Conclusion et perspectives

# Moyens de mesures spécifiques 1/2

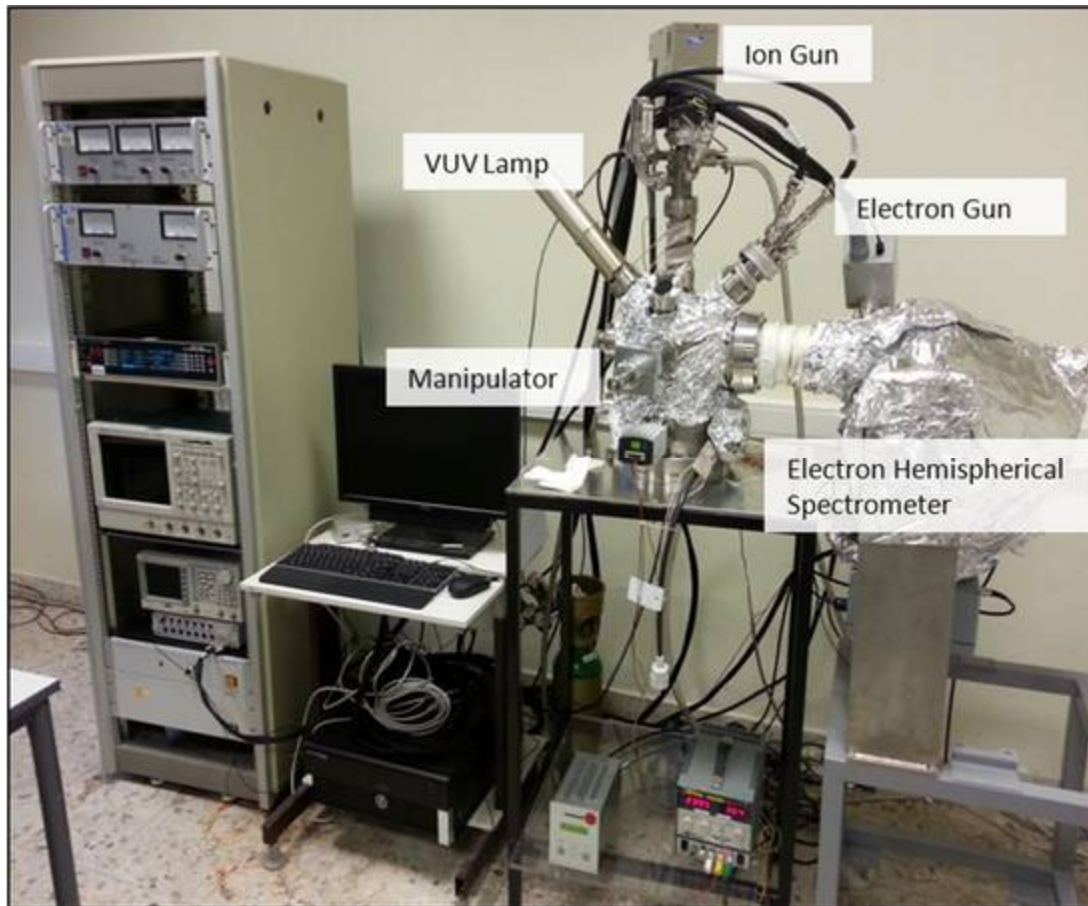
## DEESSE (Dispositif d'Emission Electronique Secondaire Sous Electrons)



- Pression résiduelle :  $10^{-10}$  mbar dans la chambre et  $10^{-7}$  mbar dans le sas
- Canon à électrons 1eV-2 keV, 1keV-22 keV
- Source à ions
- Analyseur à électron hémisphérique
- Source VUV
- Analyseur de gaz
- Cage de Faraday
- Collecteur cylindrique
- Manipulateur X,Y,Z, $\theta$
- Porte échantillon inclinable sur  $180^\circ$

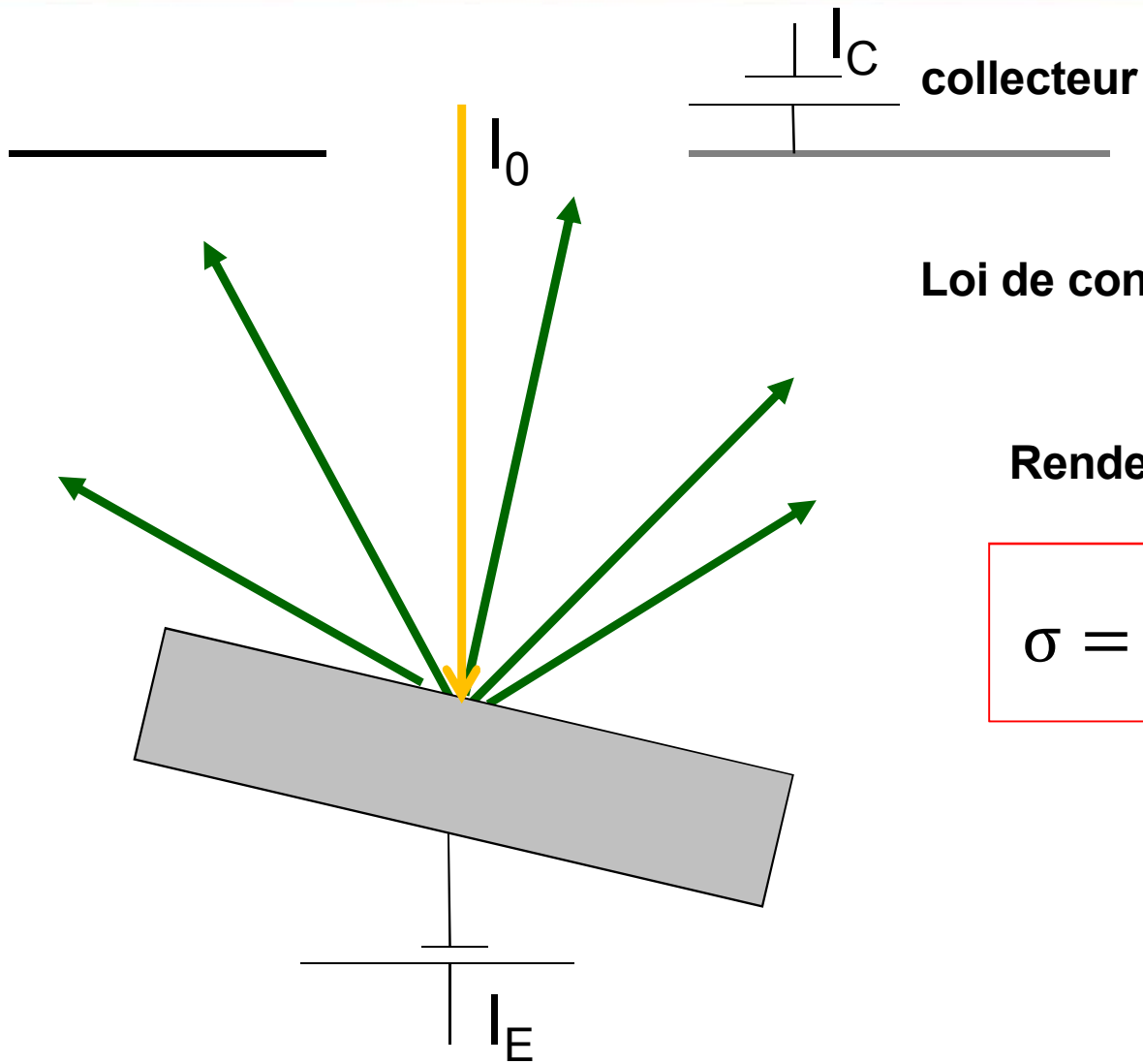
# Moyens de mesures spécifiques 2/2

CELESTE\*: dédié aux thèses



- Pression résiduelle :  $10^{-9}$  mbar
- Canon à électrons 1eV-2 keV
- Source à ions
- Analyseur à électrons hémisphérique
- Source VUV
- Cage de Faraday
- Manipulateur  $X, \theta$
- Porte échantillon inclinable sur  $180^\circ$

# Mesures aux très basses énergies (1/3)

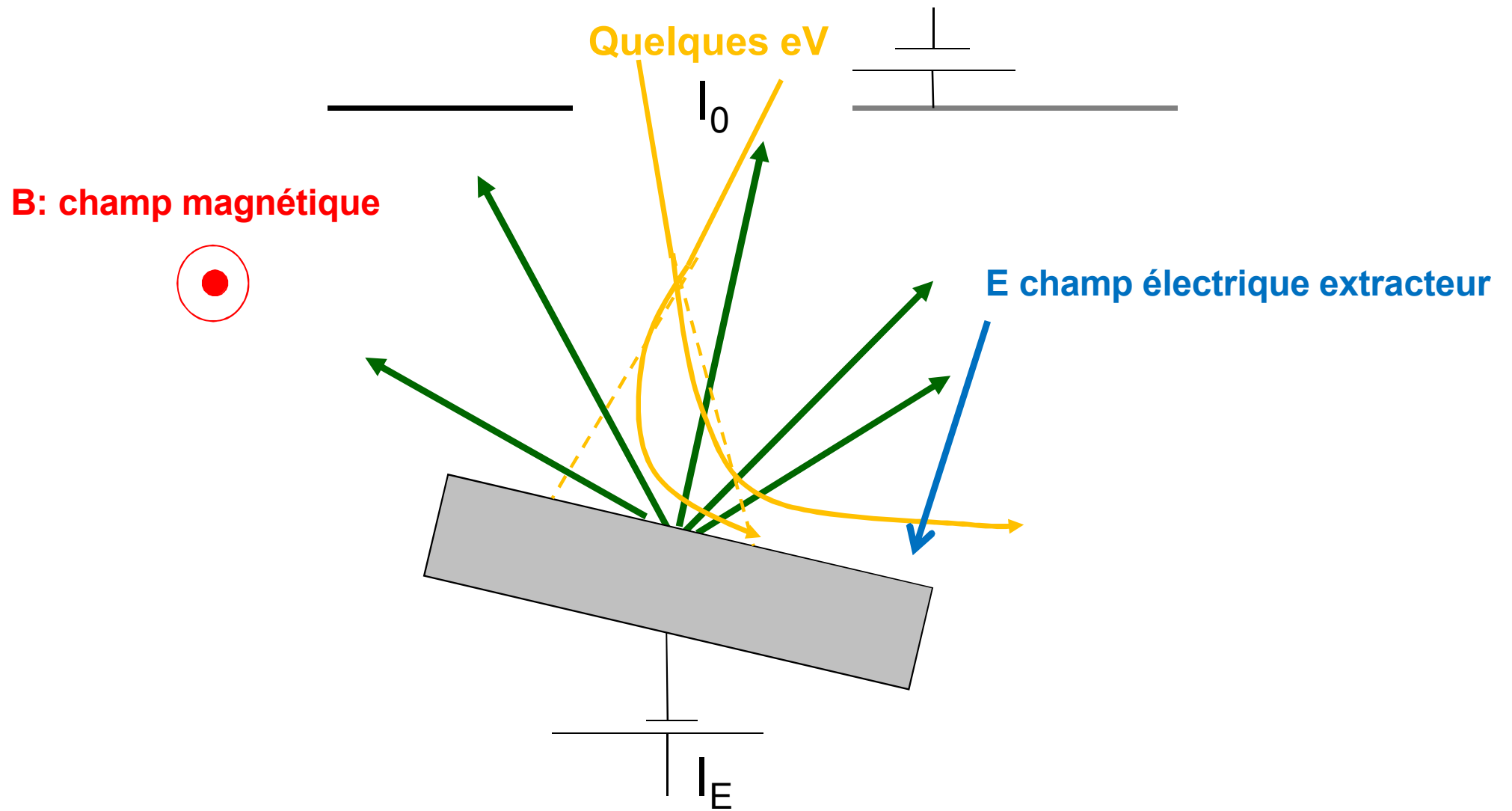


Loi de conservation du courant :  $I_0 = I_C + I_E$

Rendement d'émission électronique

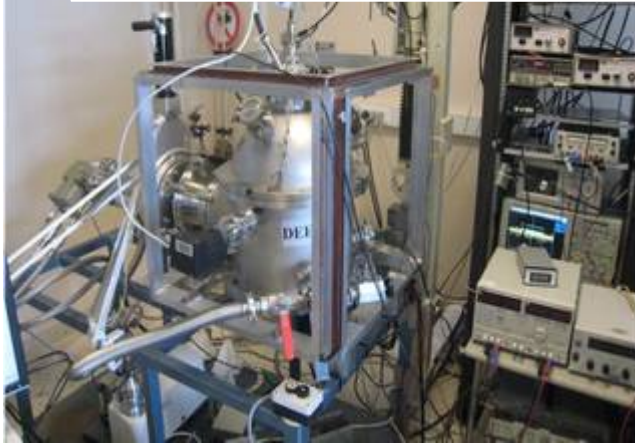
$$\sigma = \frac{I_I}{I_I} = \frac{I_I}{I_I + I_I} = \frac{I_0 - I_I}{I_I}$$

# Mesures aux très basses énergies (2/3)

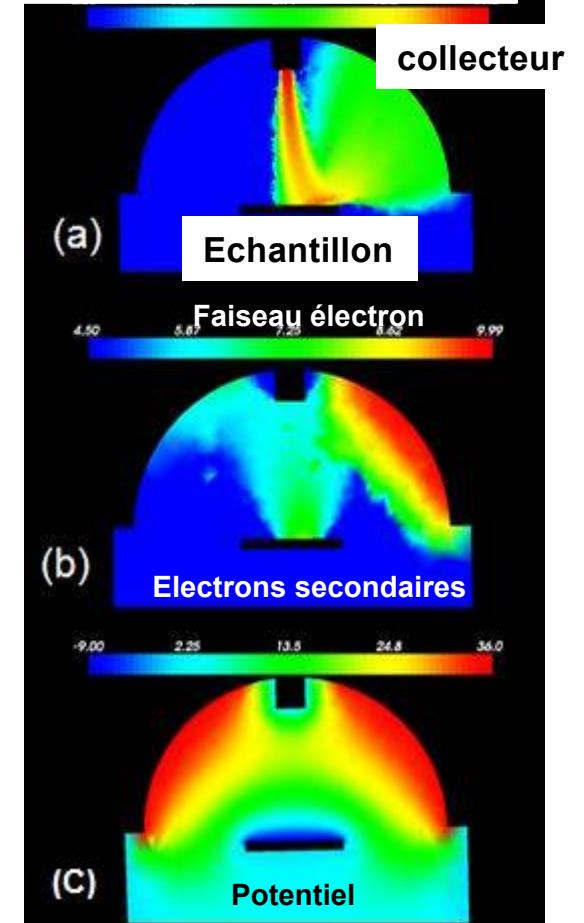


# Mesures aux très basses énergies (3/3)

## Compensation du champ magnétique

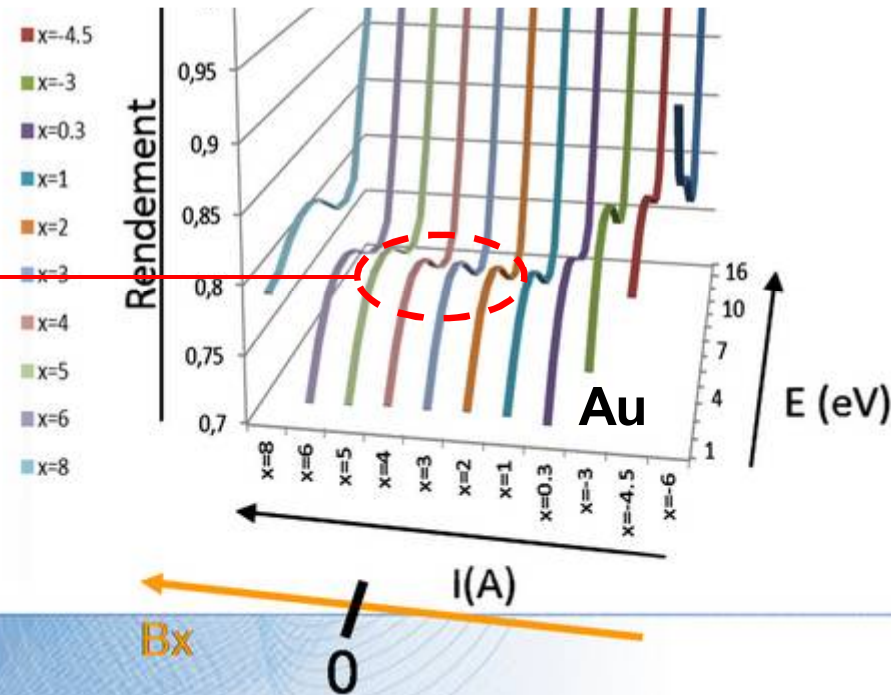


## Choix des polarisation, distance de travail, etc



## Test de sensibilité du rendement au champ magnétique

Mesure possible



Simulations SPIS  
 $E_0 = 5\text{eV}$  et  $V_{\text{colector}} = +18\text{V}$

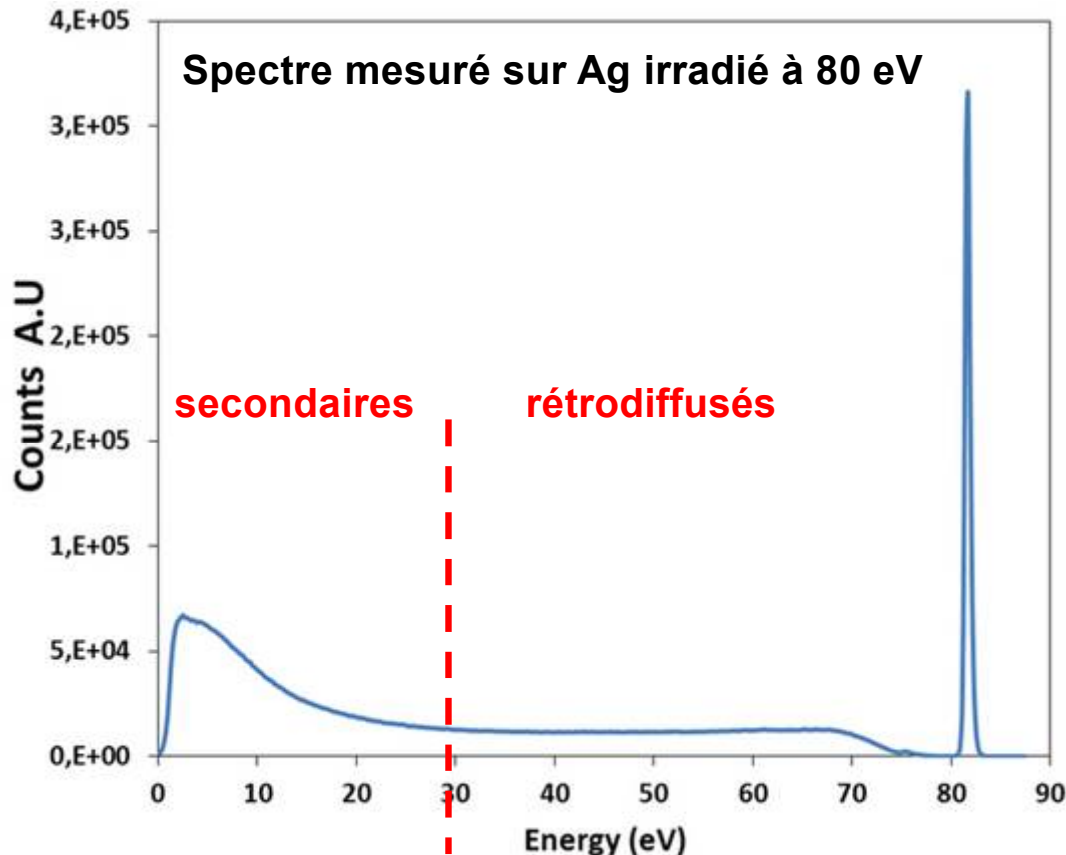
# Exemple de techniques de mesures spécifiques\* (1/4)

Rendement d'émission secondaire, rendement de rétrodiffusion aux basses énergies

Le rendement  $\sigma = \delta + \eta$

Objectif: différentier la contribution des électrons rétrodiffusés  $\eta$  de celle des secondaires

Principe du filtre passe-haut en énergie

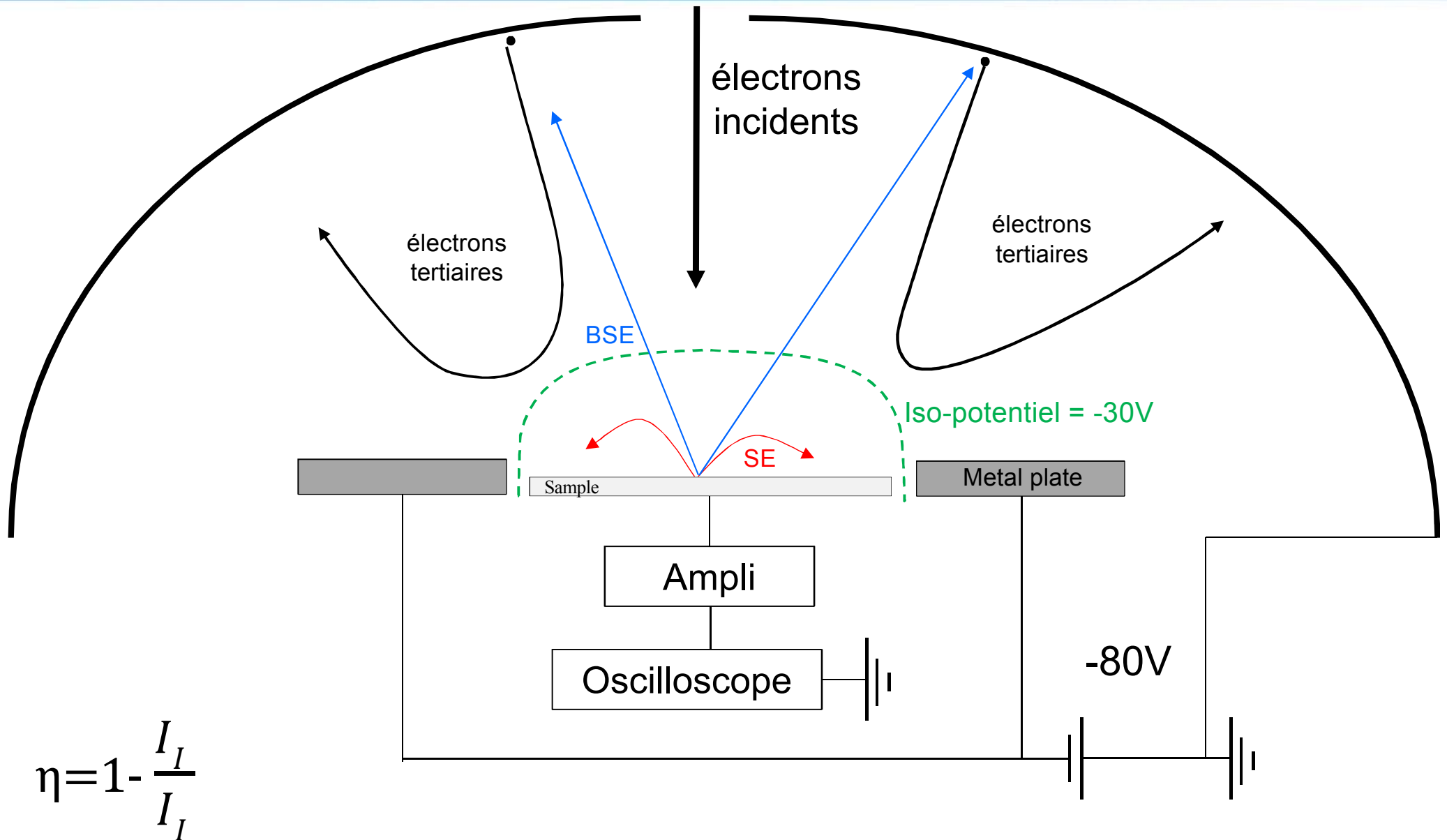


N.B: Selon l'approche conventionnelle le seuil est à 50 eV ...

Principe du filtre passe-haut: à manier avec beaucoup de précautions quelque soit le seuil fixé.

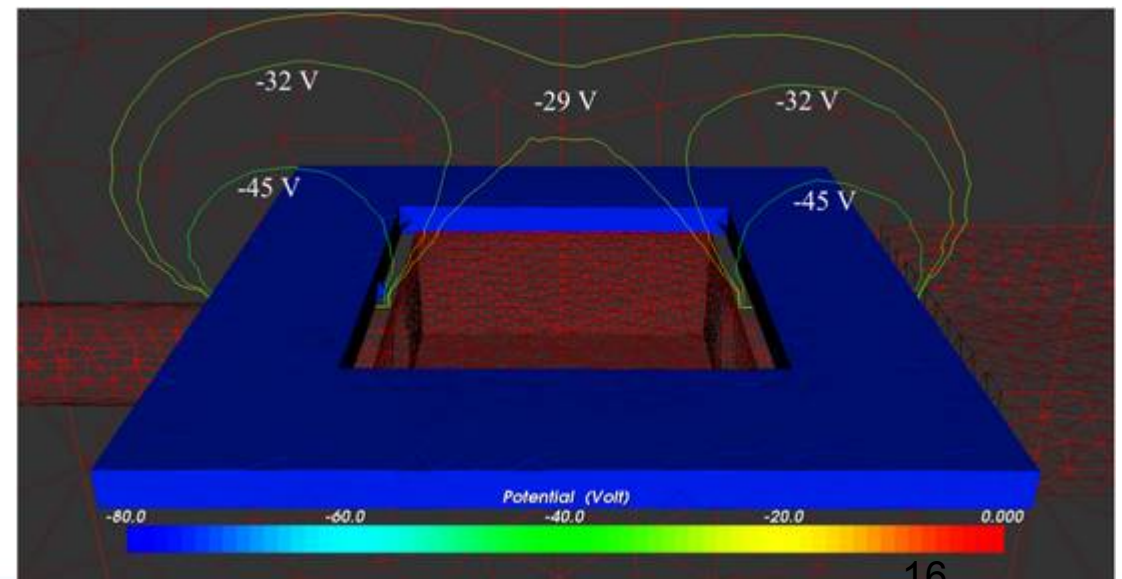
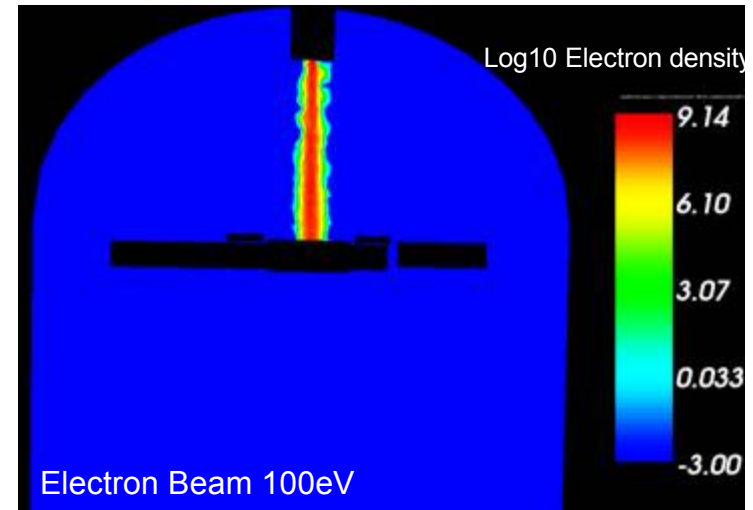
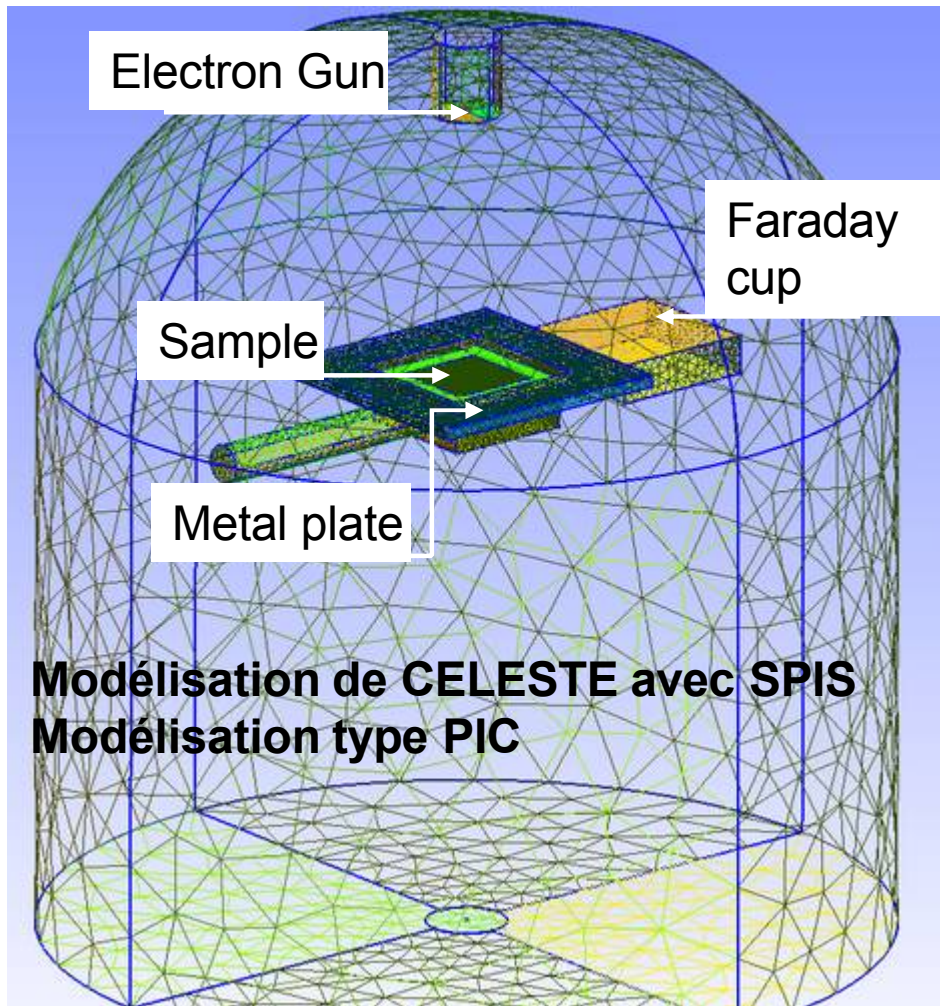
# Exemple de techniques de mesures spécifiques (2/4)

Rendement d'émission secondaire, rendement de rétrodiffusion aux basses énergies



# Exemple de techniques de mesures spécifiques (3/4)

Rendement d'émission secondaire, rendement de rétrodiffusion aux basses énergies

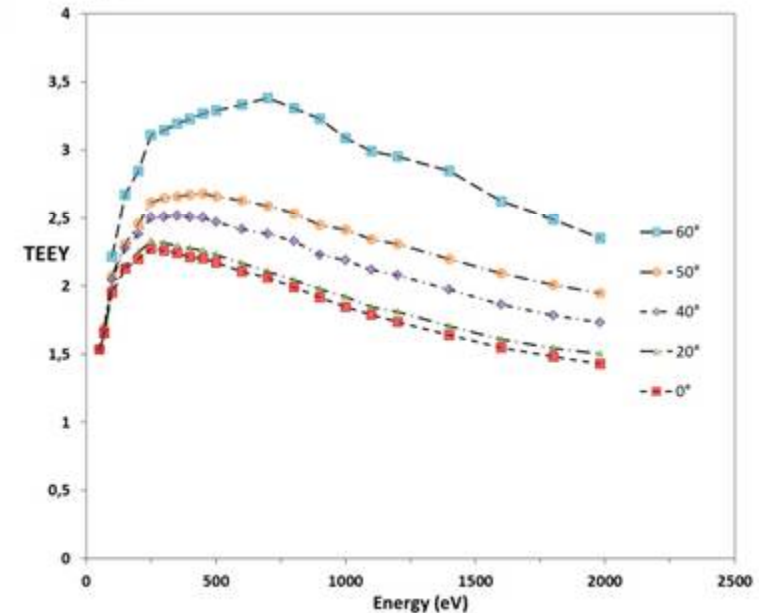
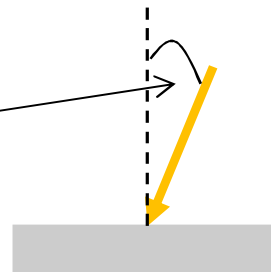
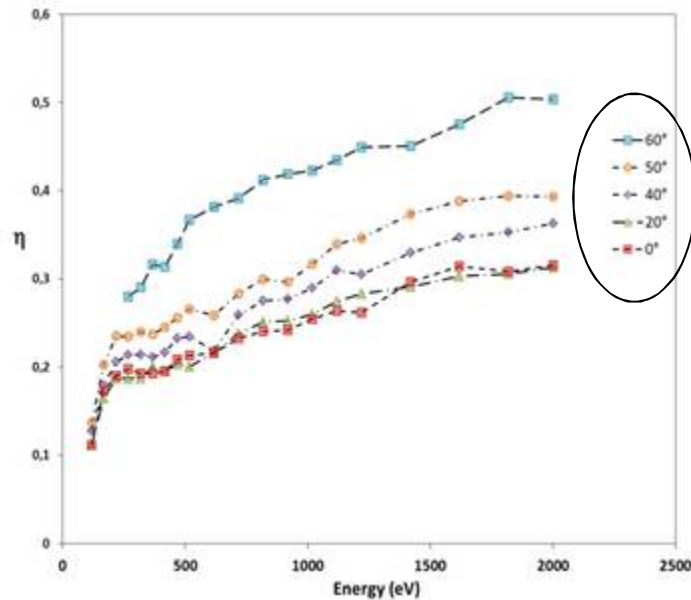
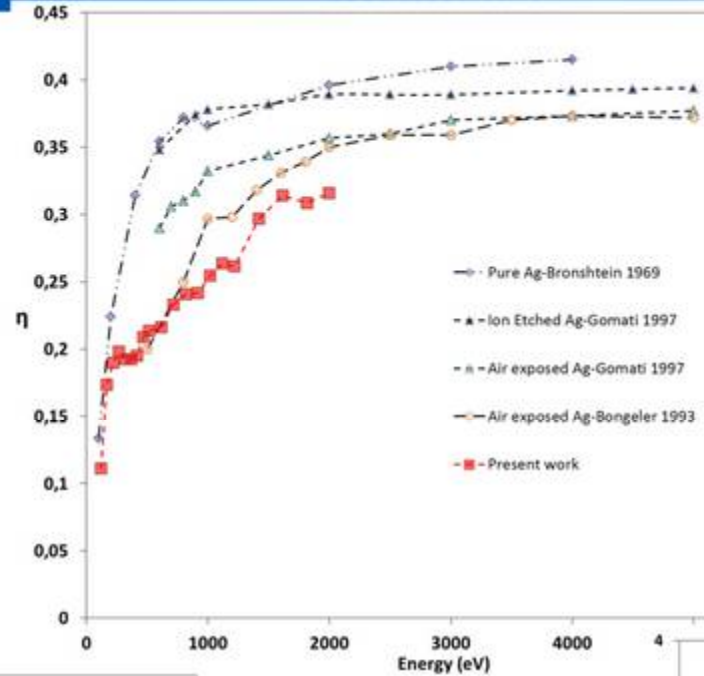


# Exemple de techniques de mesures spécifiques (4/4)

Rendement d'émission secondaire, rendement de rétrodiffusion aux basses énergies

## Résultats

### Ag «technique»

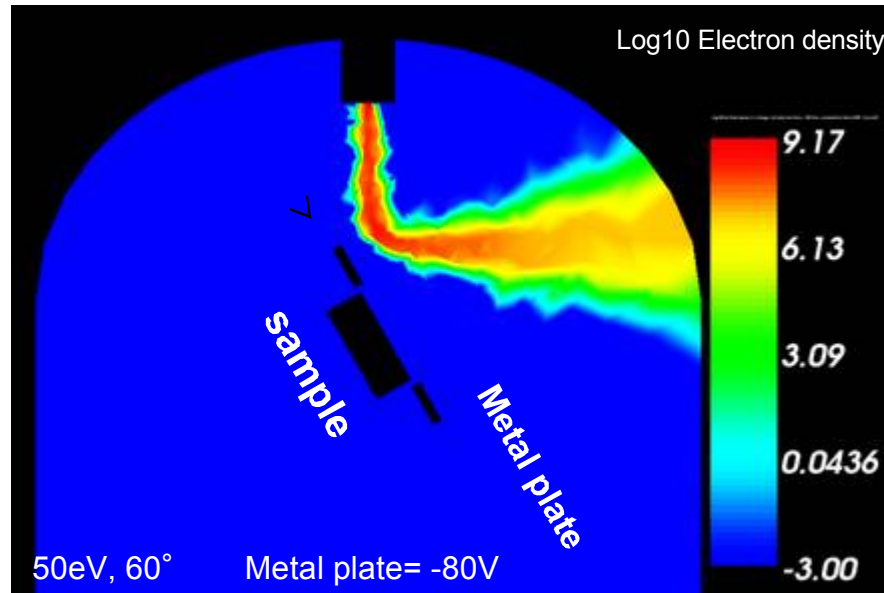


# Exemple de techniques de mesures spécifiques (5/6)

Rendement d'émission secondaire, rendement de rétrodiffusion aux basses énergies

## Limites aux très basses énergies

- **Déflexion**

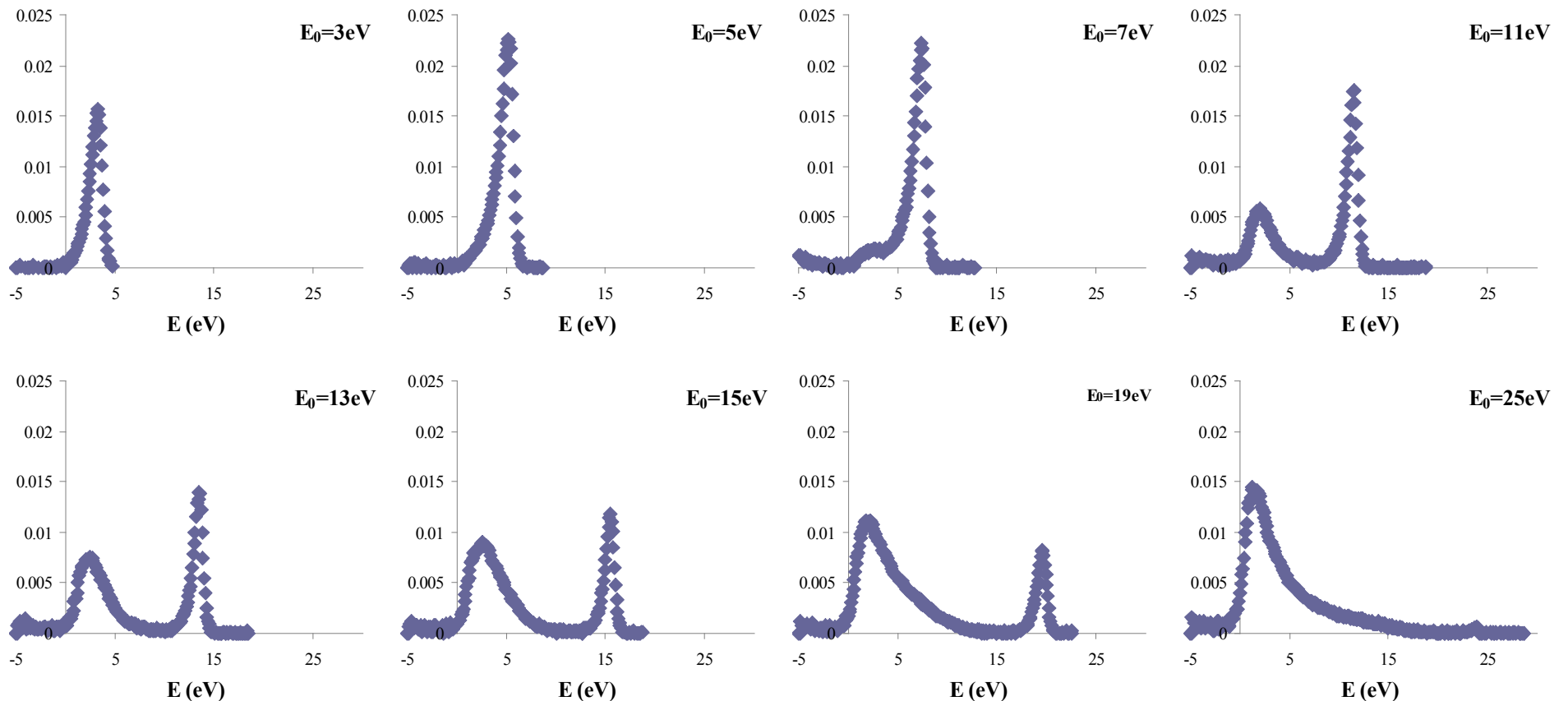


- **Encore plus limitant: le critère de discrimination entre type d'électrons (énergie seuil) devient invalide aux très basses énergies**

# Exemple de techniques de mesures spécifiques (6/6)

Rendement d'émission secondaire, rendement de rétrodiffusion aux basses énergies

Pour descendre plus bas en énergie ... Il faut dépouiller les spectres électroniques



Mais, nous restons dans une approche très qualitative (fonction appareil ? efficacité de collecte de l'analyseur ? aux très basses énergies).

## 1- Basses énergies → moyens de mesures spécifiques

- Présentation des moyens
- Quelques méthodes de mesures
- Exemples de mesures

## 2- Emission secondaire → **effet de la contamination**

- **De l'échantillon dit «technique» à l'échantillon dit « propre»**

## 3- Très basses énergies → de la mesure vers la modélisation

## 4- Conclusion

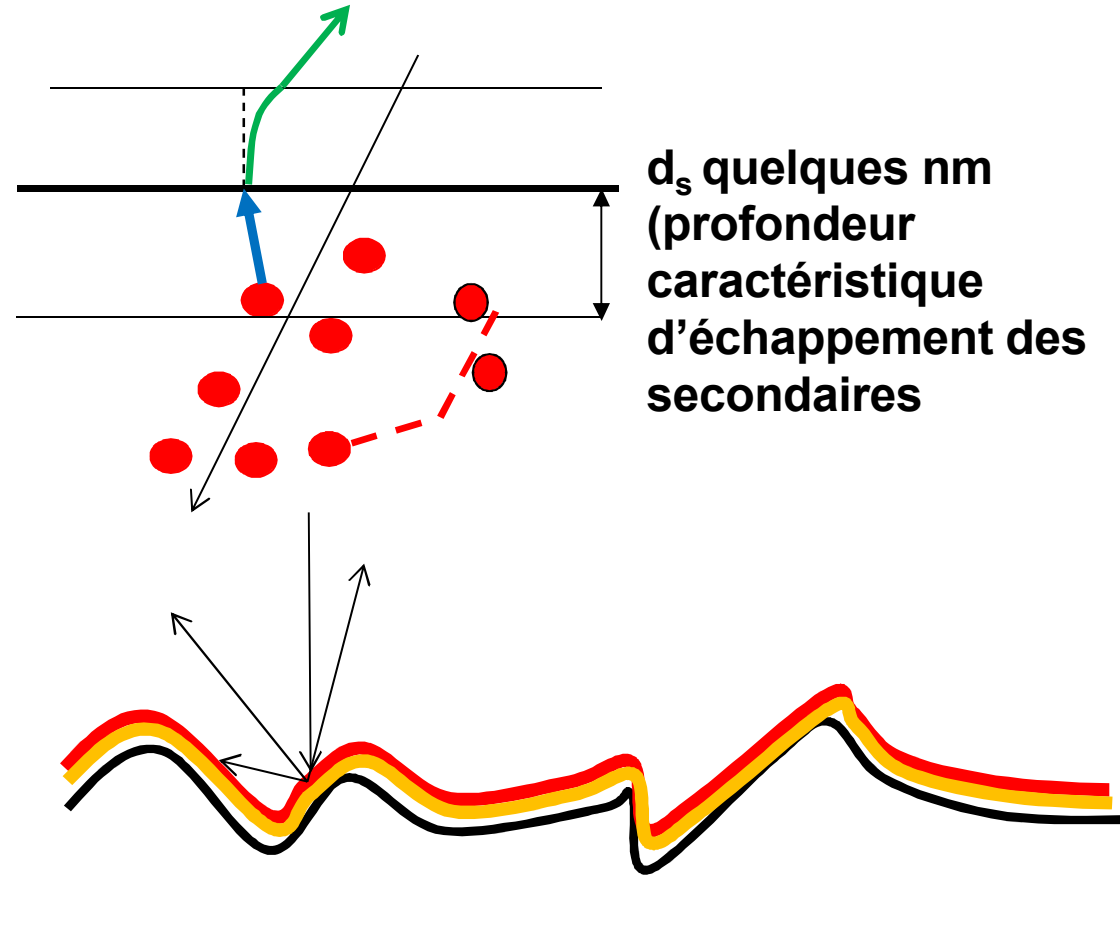
# Emission secondaire: effet de la contamination (1/7)

Rappel:  $\delta = (G \times T \times S)$

**G: génération**

**T: transport**

**S: Sortie dans le vide**

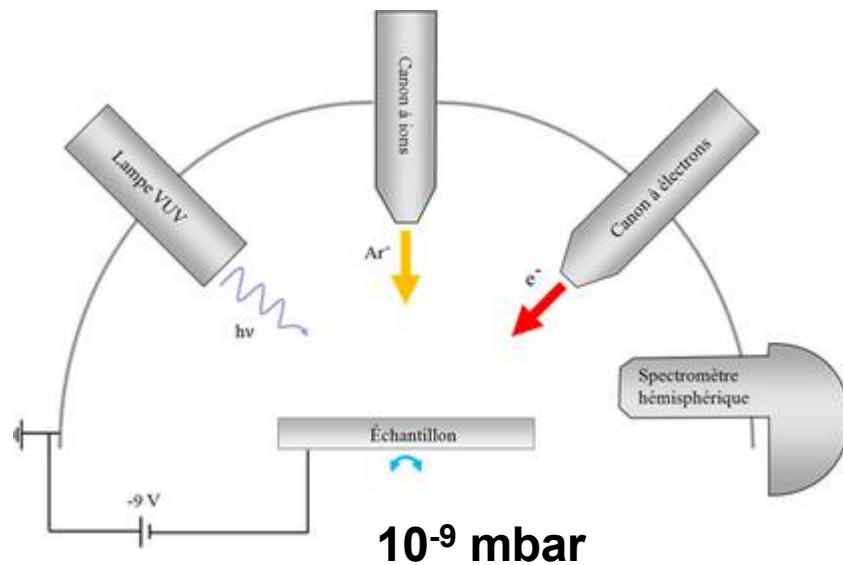


Les propriétés mesurées ou modélisées sur des matériaux « propres: ultra-purs » ne peuvent pas s'appliquer à des matériaux dits « techniques »

# Emission secondaire: effet de la contamination (2/7)

## Exemple

Cas de l'argent : argent pur à 99.99% exposé 4 ans à l'air.



## Protocole:

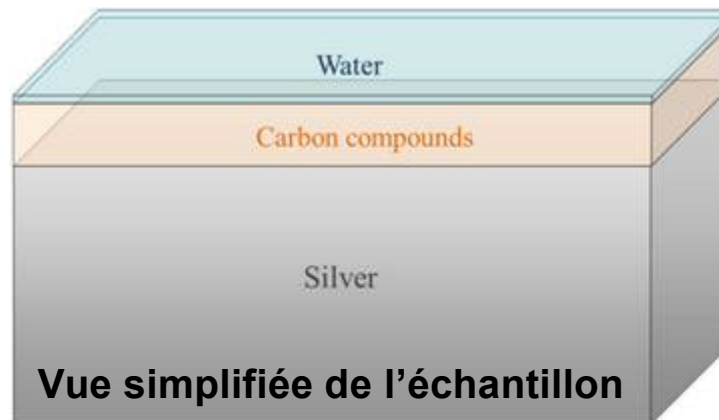
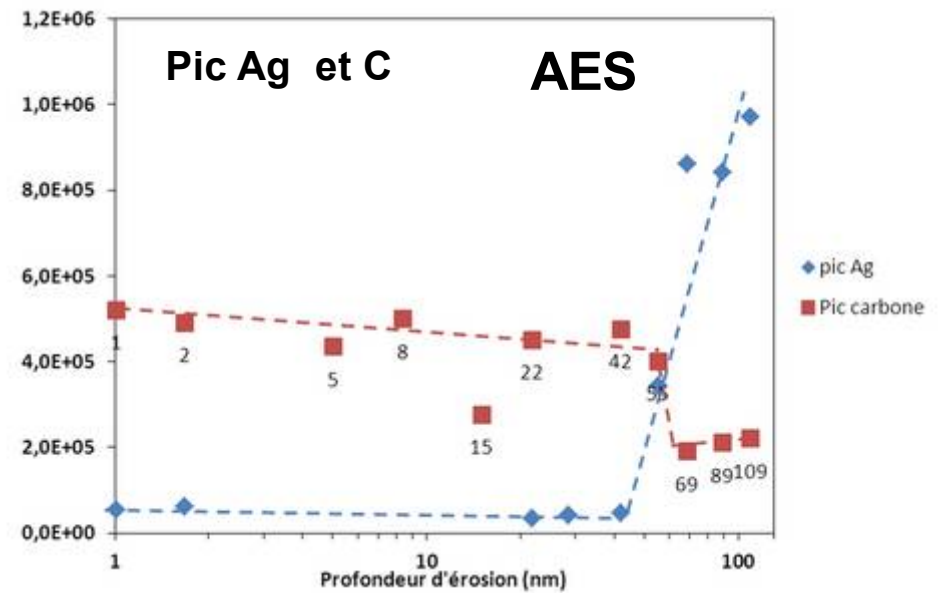
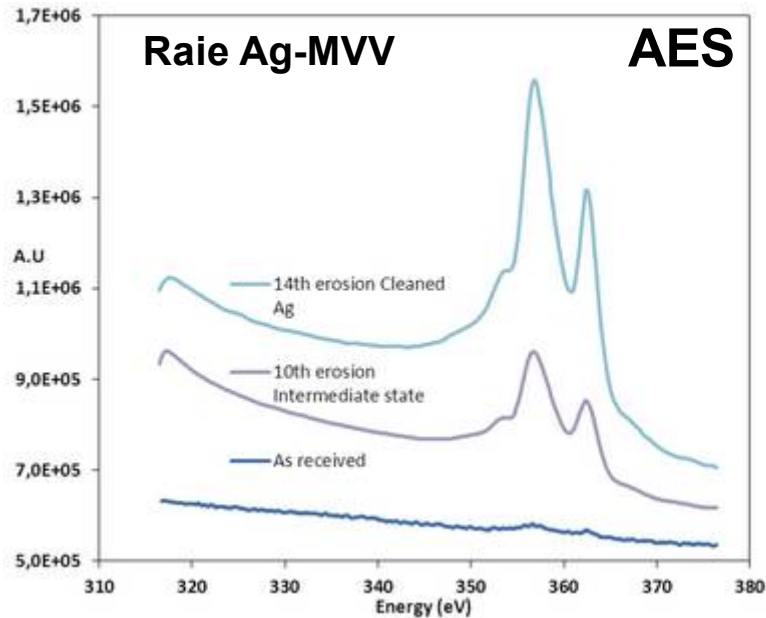
### Mesure de la rugosité

#### 1- Erosion progressive en 14 étapes

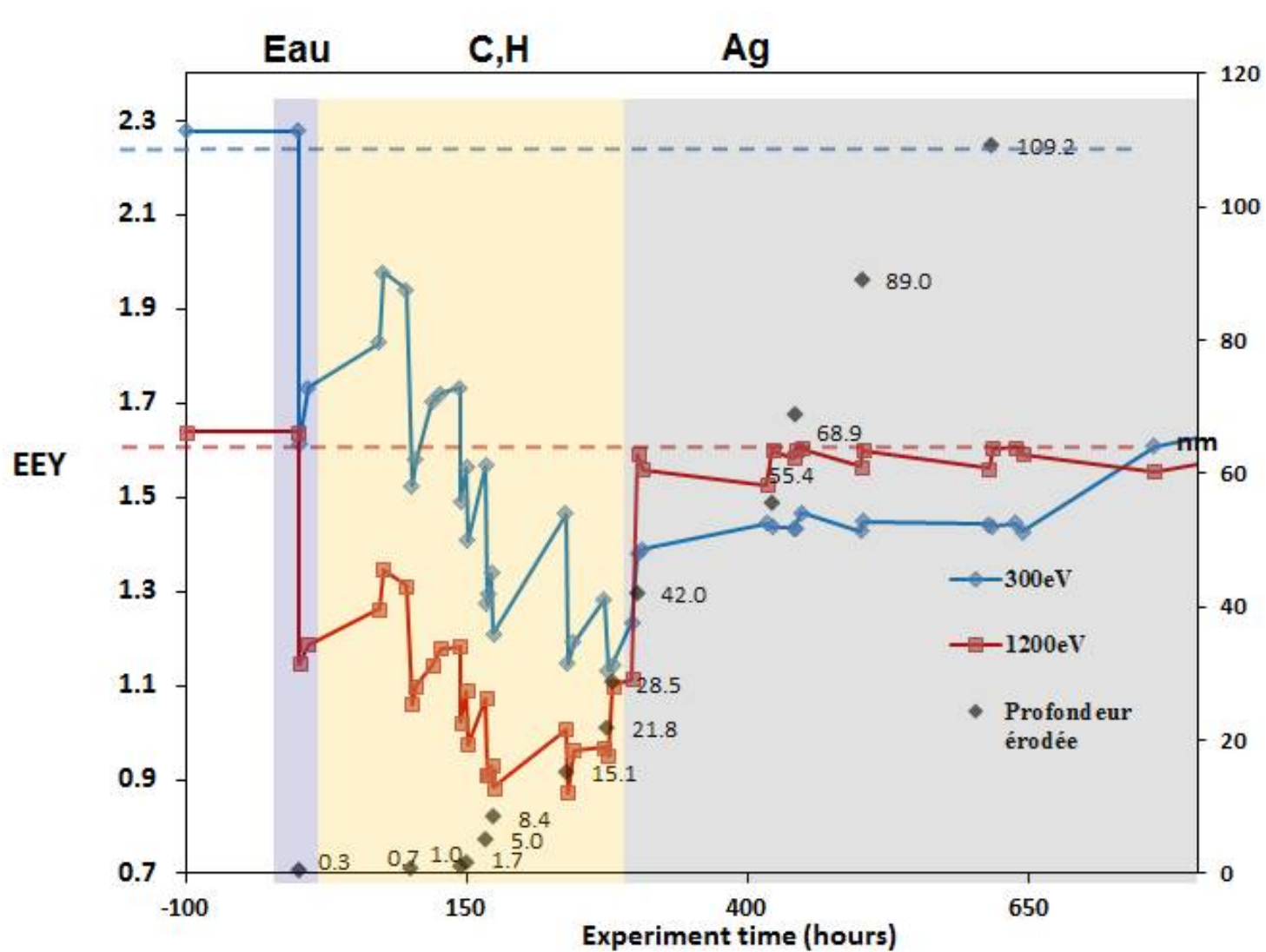
- **Caractérisation de la surface AES**
- **Mesures EELS**
- **Mesures du rendement à 300 eV et 1200 eV**
- **Mesures des spectres d'émission sous VUV et sous électrons de faibles énergies**
- **Effet de l'angle d'incidence**

# Emission secondaire: effet de la contamination (3/7)

## Evolution de la composition de la surface

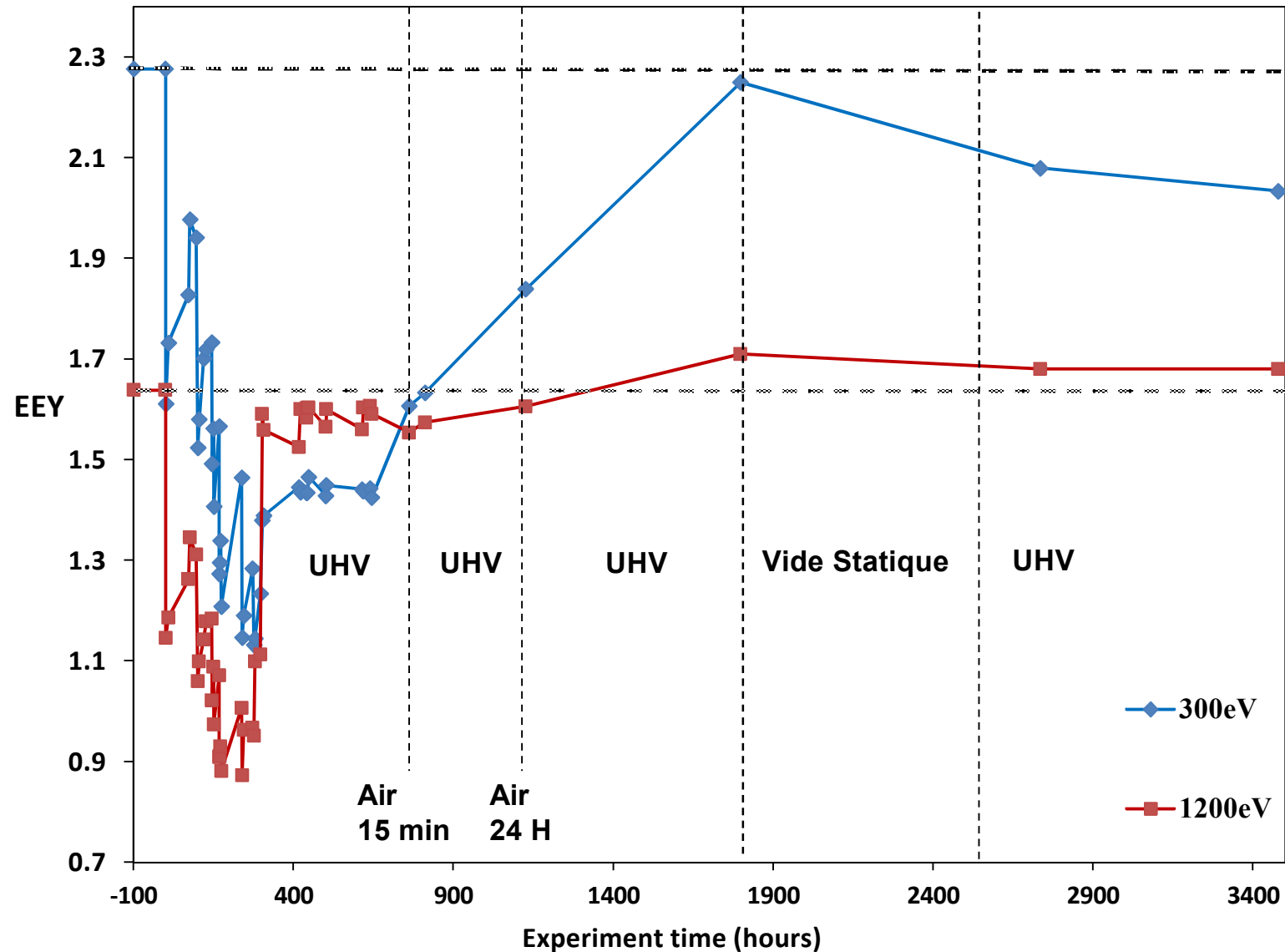


# Emission secondaire: effet de la contamination (4/7)



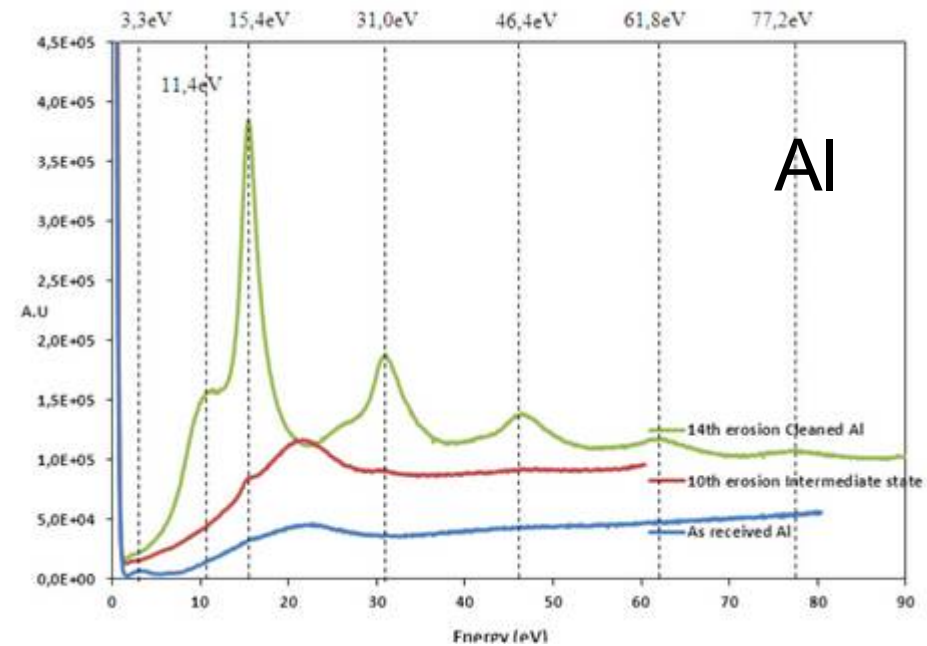
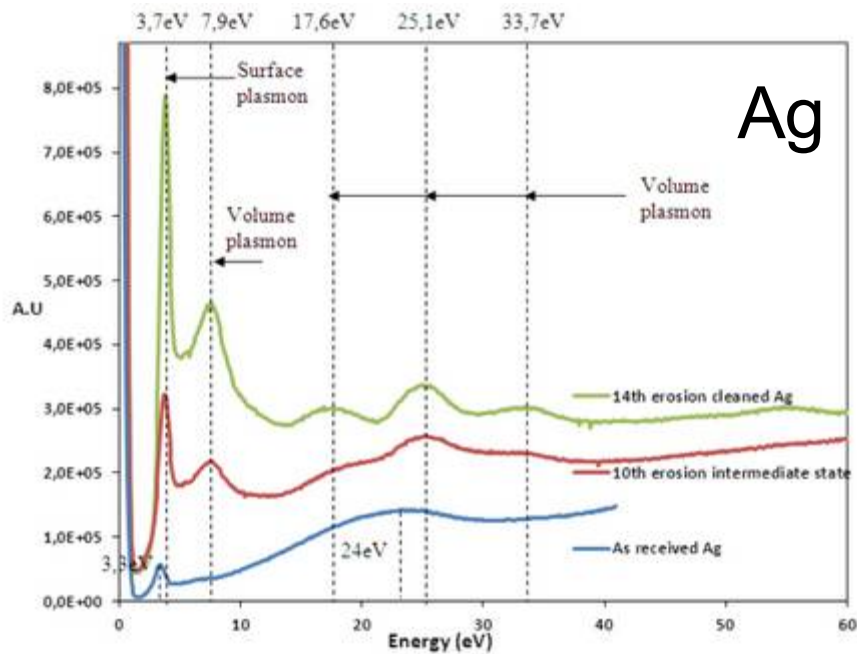
# Emission secondaire: effet de la contamination (5/7)

## Remise à l'air



# Emission secondaire: effet de la contamination (6/6)

## Spectres EELS



Forte ressemblance entre l'Al et l'Ag techniques (avant érosion)

La physique de l'émission électronique du contaminant fait principalement la physique de l'émission électronique du matériau

## 1- Basses énergies → moyens de mesures spécifiques

- Présentation des moyens
- Quelques méthodes de mesures
- Exemples de mesures

## 2- Emission secondaire → effet de la contamination

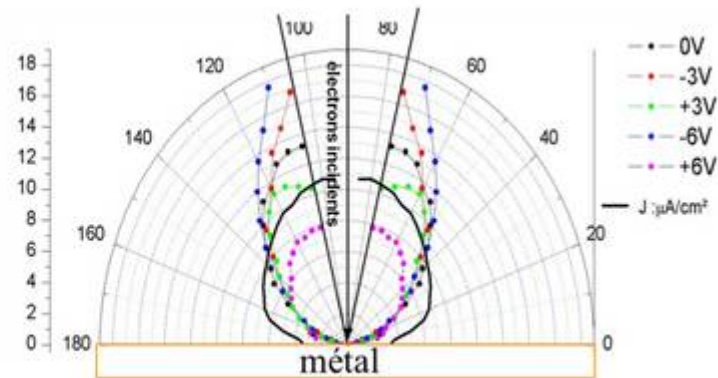
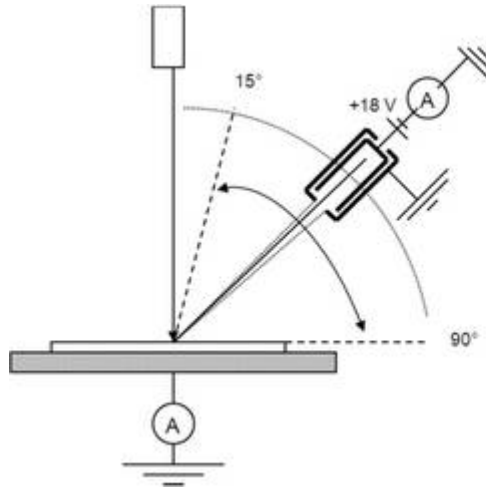
- De l'échantillon dit «technique» à l'échantillon dit « propre»

## 3- Très basses énergies → **de la mesure vers la modélisation**

## 4- Conclusion et perspectives

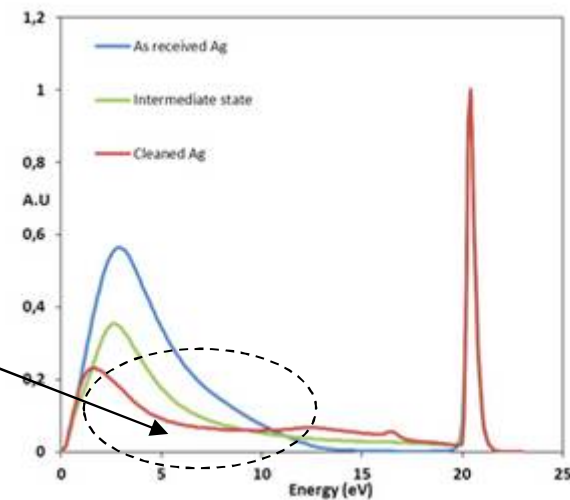
## Limite des mesures

- Distribution angulaire: **Mesures très difficiles et discutables.**



- Distinction entre différents types d'électrons: **impossible.**

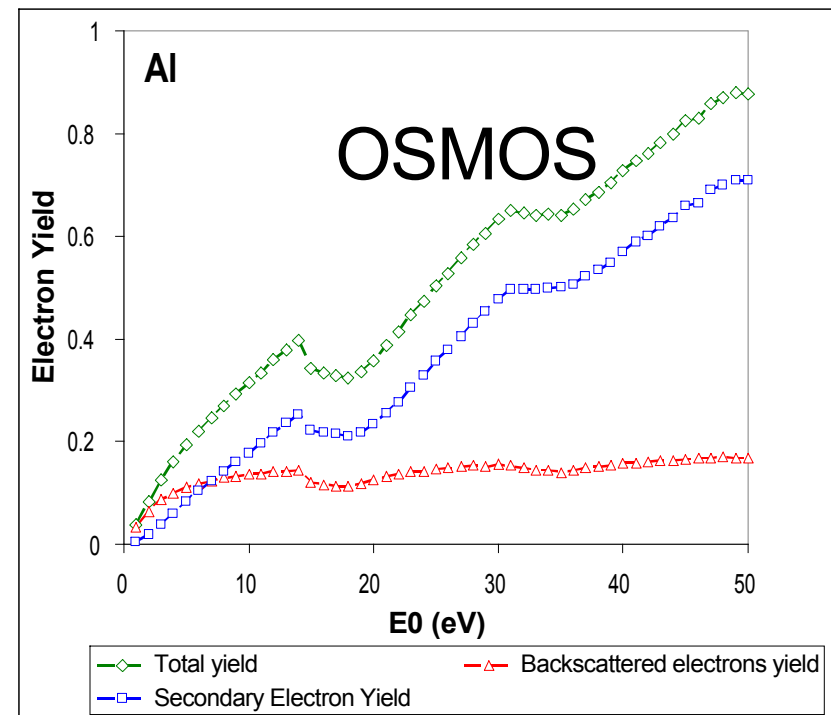
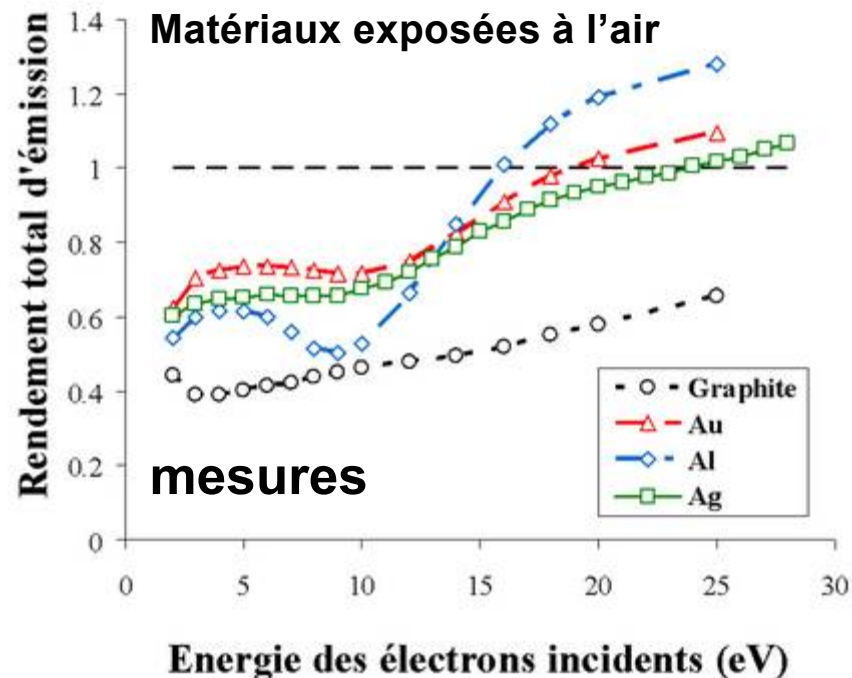
Recouvrement BSE et SE



# Très basses énergies: de la mesure vers la modélisation (2/5)

**OSMOSEE (Onera Simulation Model of Secondary Electron Emission): Code de transport aux basses énergies (Monte-Carlo)**

**OSMOSEE: simulation des interactions individuellement (élastiques, électrons de conduction, plasmon de volume, plasmon de surface, la surface)**

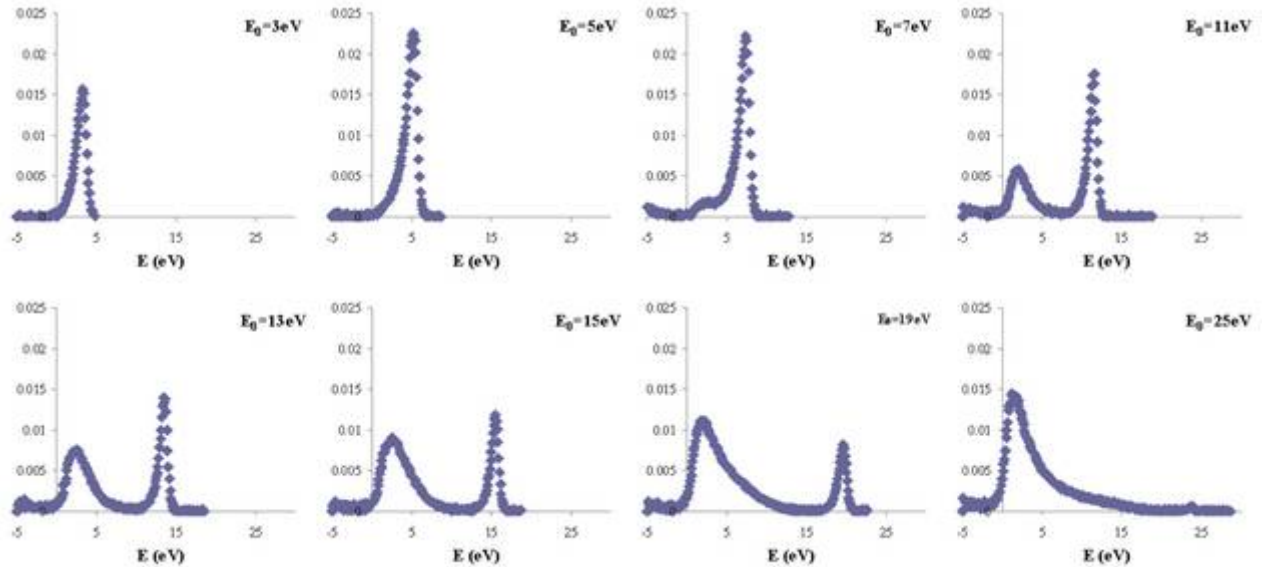


**Bon accord qualitatif**

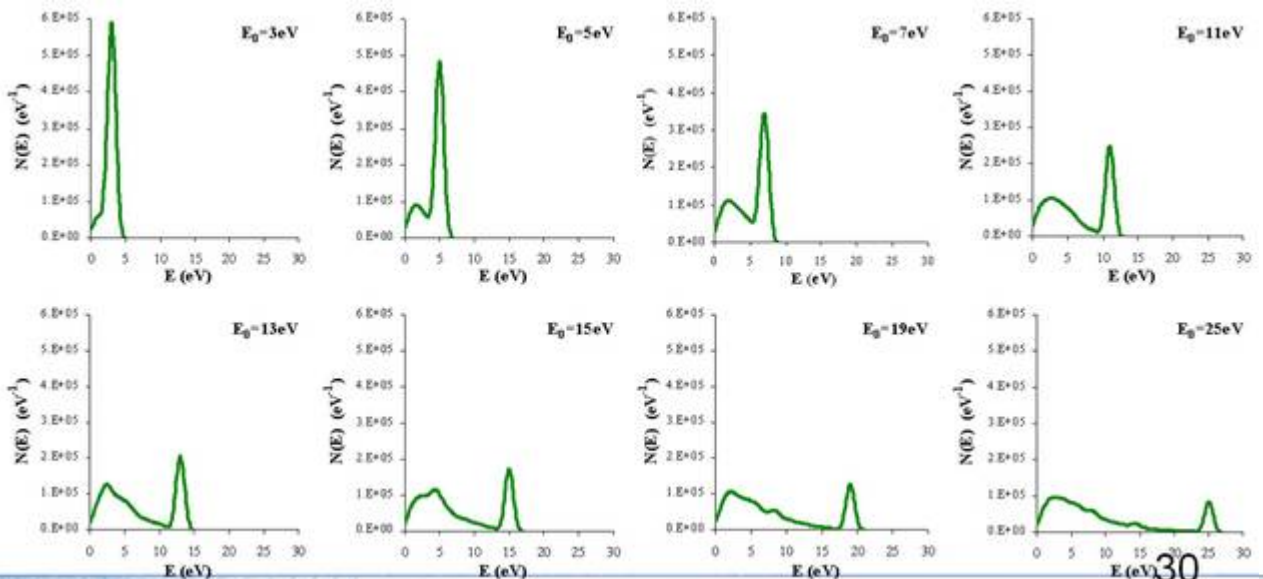
# Très basses énergies: de la mesure vers la modélisation (3/5)

## Discrimination secondaires-rétrodiffusés

- Mesures/ Au

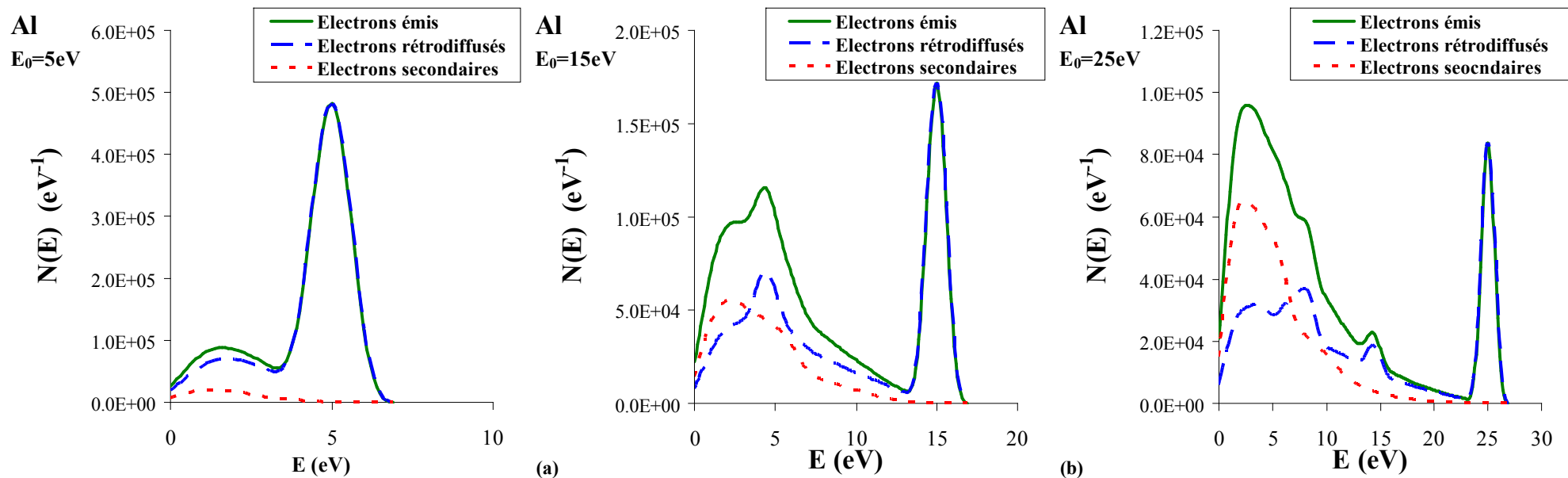


- Simulations OSMOSEE/ AI



**Fortes similitudes !**

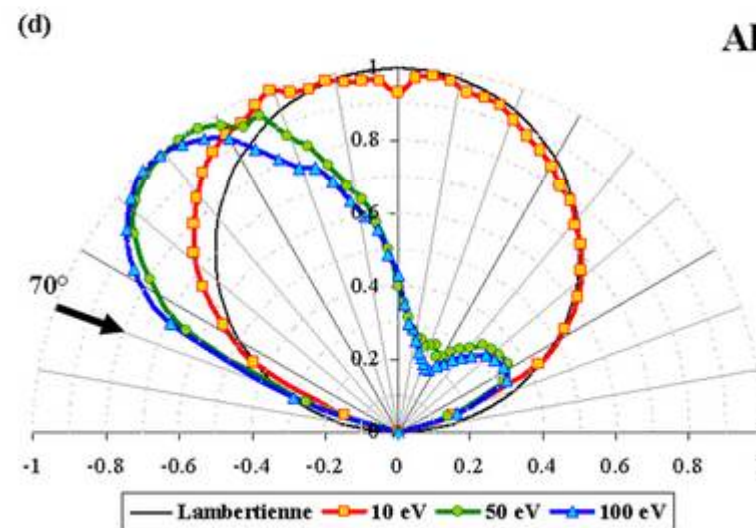
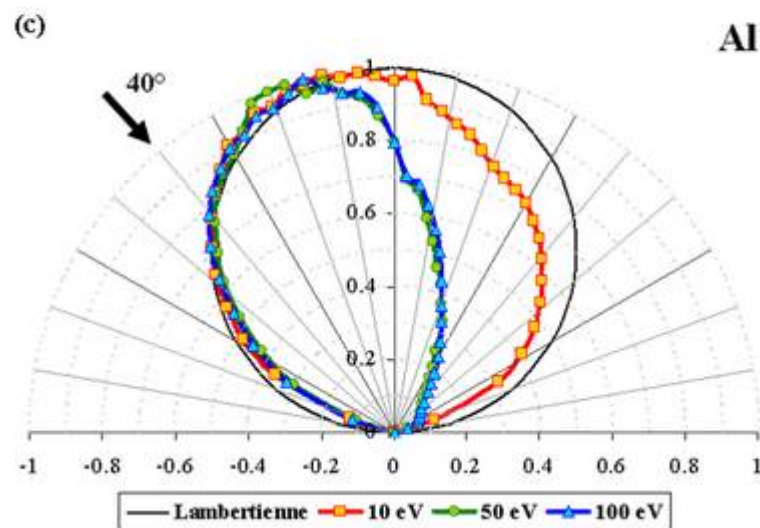
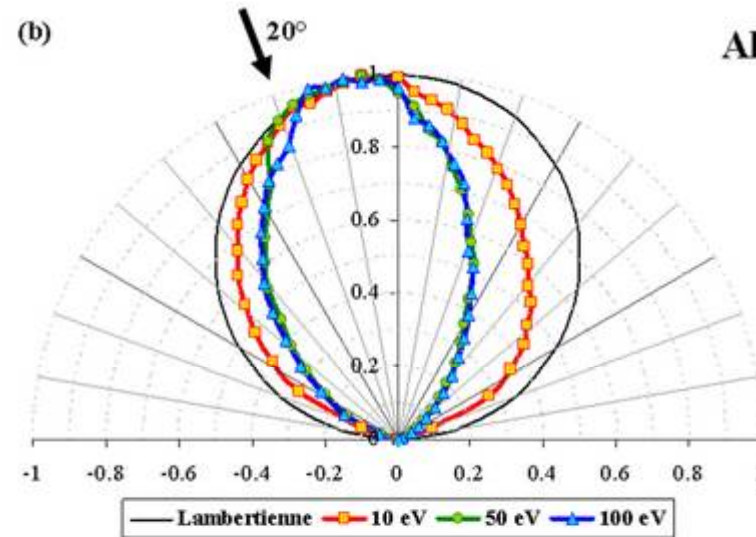
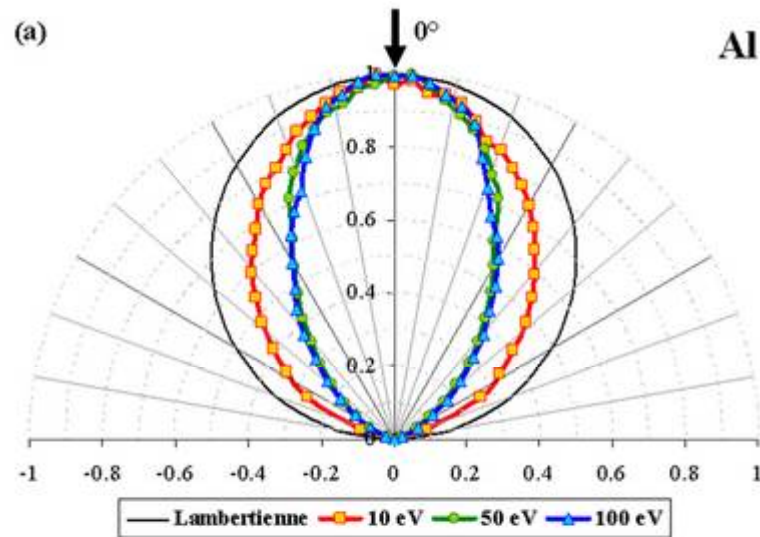
**Mais aux très basses énergies « le pic des secondaires » est essentiellement formé de rétrodiffusés !**



**Décomposition des spectres selon le type des électrons**

## Distributions angulaires

## Rétrodiffusés élastiques



## 1- Basses énergies → moyens de mesures spécifiques

- Présentation des moyens
- Quelques méthodes de mesures
- Exemples de mesures

## 2- Emission secondaire → effet de la contamination

- De l'échantillon dit «technique» à l'échantillon dit « propre»

## 3- Très basses énergies → de la mesure vers la modélisation

## 4- Conclusion

# Conclusion

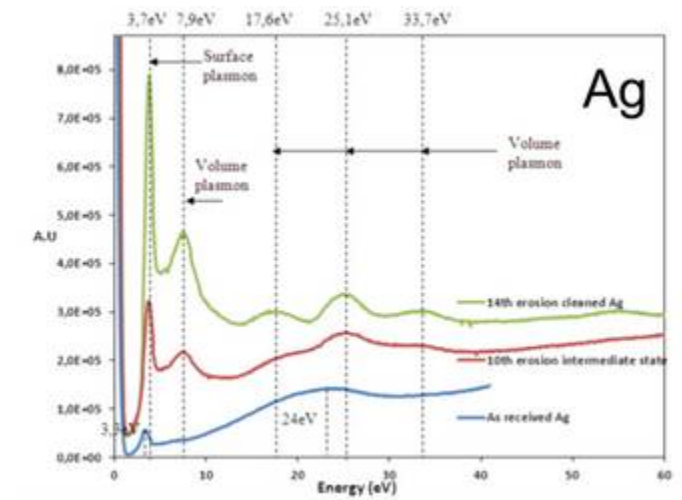
- **Besoin important pour le spatial en données et modèles précis d'émission électronique aux basses énergie (activité soutenue 1 thèse soutenue, 3 thèses en cours sur le sujet à l'onera).**
- **Difficulté de trouver des données et modèles valables aux très faibles énergies.**
- **Difficulté d'appliquer les modèles existants sur des matériaux dit « techniques »**
- **Nécessité de prendre en compte et d'étudier les effets de la contamination.**
- **Nécessité de développement de nouveaux moyens expérimentaux, de méthodes de mesures et de modélisation.**
- **Nécessité d'associer la mesure à la modélisation (validation ↔ compréhension de la physique)**
- **Nécessité d'oublier certains réflexes: hautes énergies (keV) ( coefficient de rétrodiffusion augmente avec Z,  $E < 50$  eV c'est que de l'électron secondaire, etc...)**

# Perspectives

Aux très basses énergies < 100 eV: **Modélisation, Modélisation et Modélisation.**  
E faire beaucoup de manips en soutien et pour la validation.

Objectif:

- Modéliser des matériaux techniques (contamination et rugosité)  
Monte-Carlo: exploiter les spectres EELS (en cours), passer sur du 3D (en cours)



- Construire des protocoles de validations des modèles par l'expérience
- La problématique est vaste: unifier les efforts et échanger et aller à la recherche de nouvelles idées → **recherche de collaborations avec d'autres communautés scientifiques: projets communs**

# Merci pour votre attention

Pour tout renseignement complémentaire ou éclaircissement:

**Mesures, méthodes, moyens expérimentaux et questions générales**

Mohamed.Belhaj@onera.fr

**Modélisation et Monte-Carlo**

Christophe.Inguibert@onera.fr

Beaucoup de résultats exposés sont issus de projets soutenus par le CNES