



**HAL**  
open science

# Spectrométrie des électrons Auger - Auger Electron Spectroscopy AES

Ludovic Douillard

► **To cite this version:**

Ludovic Douillard. Spectrométrie des électrons Auger - Auger Electron Spectroscopy AES. Master. Univ. Paris Saclay, France, France. 2023. <hal-04487555>

**HAL Id: hal-04487555**

**<https://hal.science/hal-04487555v1>**

Submitted on 3 Mar 2024

**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.



HAL Authorization

# Spectrométrie des électrons Auger.

**Auger Electron Spectroscopy AES,**  
**AES - X (X-ray excitation), AES - E (Electron excitation),**  
**Scanning Auger Microscopy SAM.**

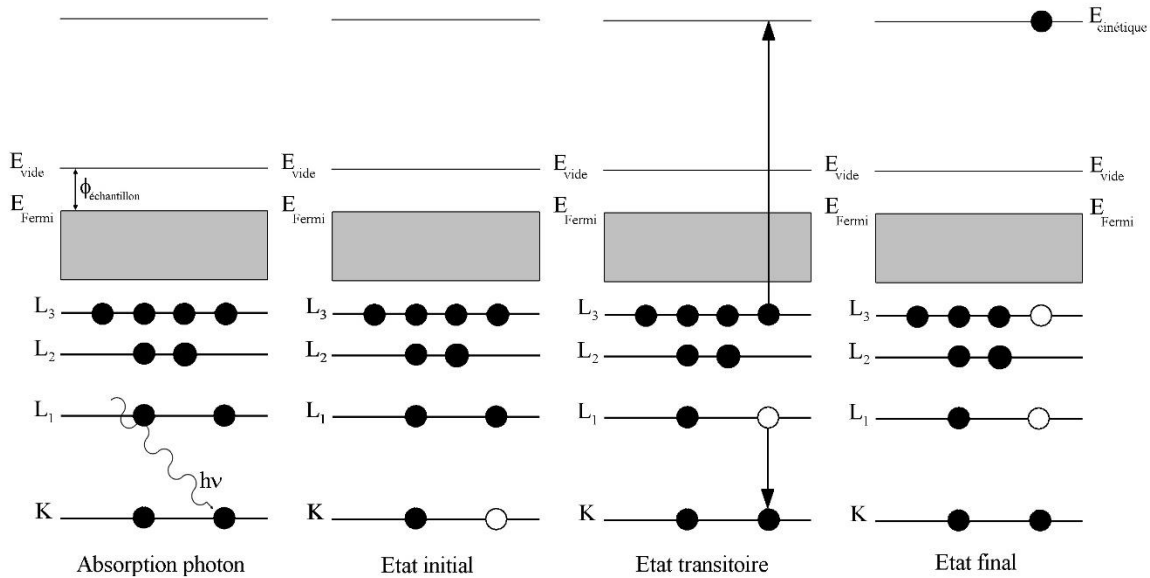
➤ **Principe.** P. Auger *CR Acad. Sci. (F)* **177** (1923) 169; J.J. Lander *Phys. Rev.* **91** (1953) 1382

Après excitation (RX,  $e^-$ ), des atomes ionisés peuvent se désexciter suivant deux voies :

## 1) *Désexcitation non radiative* → *Emission $e^-$ Auger.*

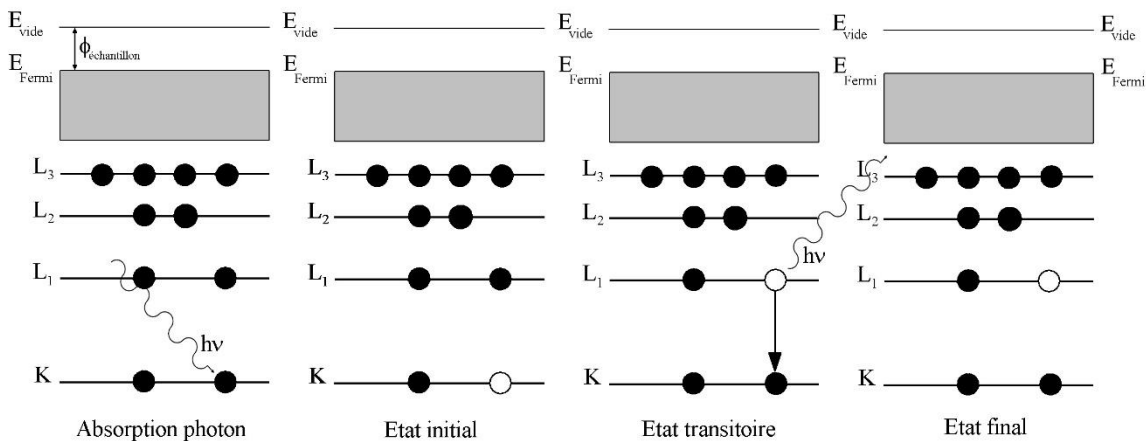
Cas des atomes légers ( $Z < 30$ , soit Zn),

Processus à 3 électrons, nomenclature  $e_1^- e_2^- e_3^-$ .



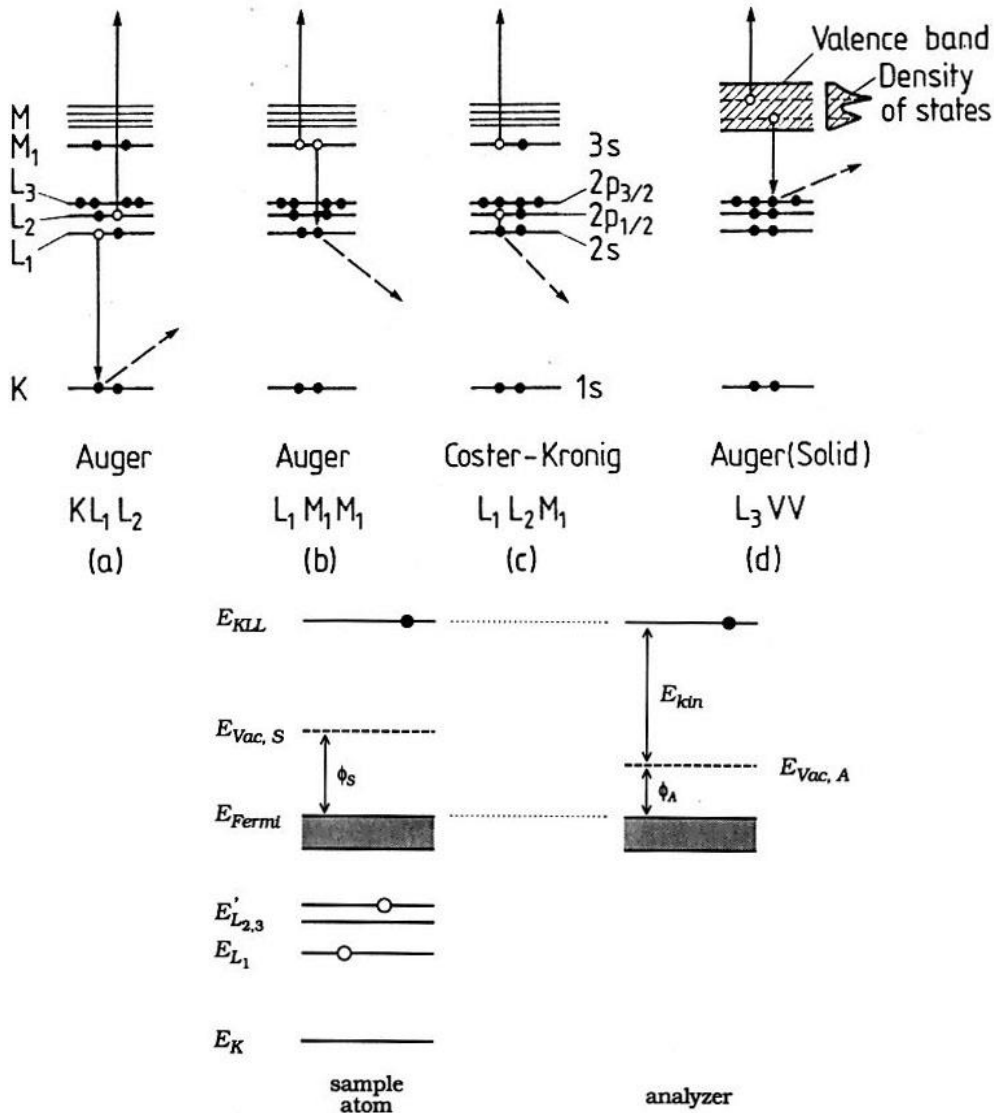
## 2) *Désexcitation radiative* → *Emission photon (fluorescence).*

Cas des atomes lourds ( $Z > 30$ , soit Zn).



# Spectrométrie des électrons Auger.

## ➤ Principe - Nomenclature - Energie des e<sup>-</sup> Auger.



$$E_{KL_1L_{2,3}}(Z) \approx (E_K(Z) - E_{L_1}(Z)) - E_{L_{2,3}}(Z+1) - \phi_A$$

Z Numéro atomique de l'élément excité [Ø],

$\phi_A$  Travail de sortie de l'analyseur :  $\phi_A = E_v - E_F$  [eV]  $\approx 4.5$  eV,

$$E_{L_{2,3}}^{2nd\ ionisation}(Z) \approx E_{L_{2,3}}^{1re\ ionisation}(Z+1).$$

Un pic Auger correspond aux électrons Auger dont la profondeur d'échappement est inférieure à  $\lambda(E_{cinétique} = E_{Auger})$  – pas de perte inélastique sur le trajet (volume  $\rightarrow$  surface).

.Gamme d'énergie  $\approx 10 - 1000$  eV,

.Libre parcours moyen  $\lambda(E_{Auger}) \approx$  qqes Å (**surface**),

**.Energie Auger indépendante de l'énergie de la source.**

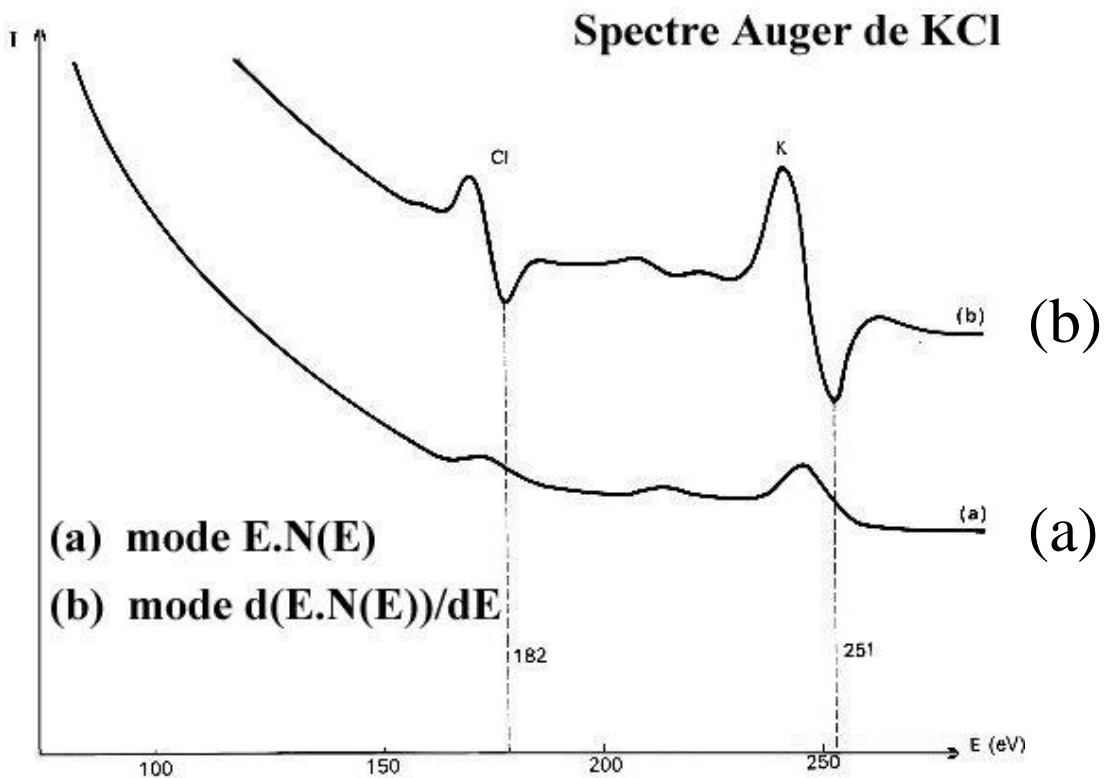
## Spectrométrie des électrons Auger.

### ➤ Principe - Intensité du signal des électrons Auger.

L'intensité du signal Auger  $I_{\text{Auger}}$  [nb  $e^-/m^2.s$ ] d'un élément A est proportionnelle (exemple transition  $KL_1L_{2,3}$ ) :

- . à l'intensité incidente en particules excitatrices  $I_0$  [nb part./ $m^2.s$ ],
- . à la concentration en atomes absorbeurs A  $N_A$  [ $1/m^3$ ],
- . à la section efficace du niveau considéré  $\sigma_K(Z, E_K)$  [ $m^2$ ],
- . au rendement de désexcitation Auger  $\omega_A(Z)$  [ $\emptyset$ ],
- . à la probabilité de la transition considérée  $p(KL_1L_{2,3})$  [ $\emptyset$ ],
- . à la profondeur d'échappement des  $e^-$  Auger  $\lambda(E_{KL_1L_{2,3}})$  [L],
- . au facteur de transmission du détecteur  $\tau(E_{KL_1L_{2,3}})$  [ $\emptyset$ ],
- . au facteur de rétrodiffusion  $(1 + R)$ , suite à l'occurrence d'excitations Auger par les  $e^-$  primaires rétrodiffusés dans le volume de l'échantillon (cas excitation  $e^-$ , source d'excitation interne) [ $\emptyset$ ].

$$I_{\text{Auger}} \approx I_0 \cdot N_A \cdot \sigma_K \cdot \omega_A \cdot p \cdot \lambda \cdot (1+R) \cdot \tau$$

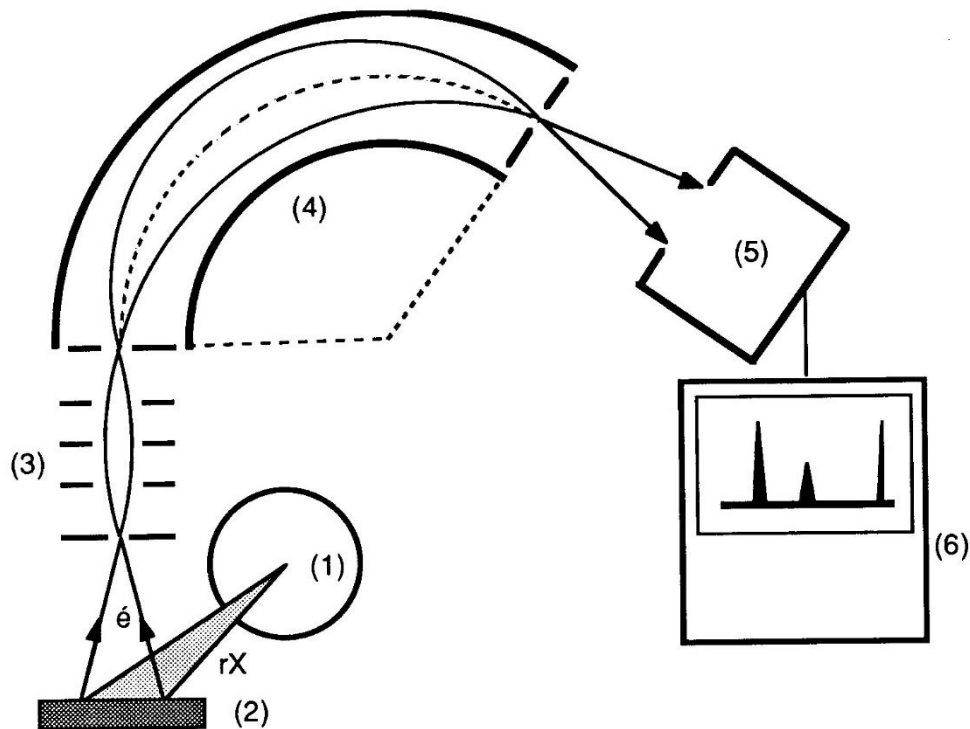


$K^{19}$  électron Auger LMM 251 eV,  $Cl^{17}$  électron Auger LVV 182 eV.

$\Delta E(\text{Signal AES})$  importante = Convolution de 3 niveaux  $e^-$

# Spectrométrie des électrons Auger – Mise en œuvre.

## ➤ Mise en œuvre de la spectrométrie Auger.



**Système ultra-vide** (Ultra-High Vacuum UHV)  $P \approx 1.10^{-10}$  mb,

### Source de photons (1)

- .tube à rayons X : Al  $K_{\alpha} = 1486.6$  eV, Mg  $K_{\alpha} = 1253.6$  eV,
- .source synchrotron de rayonnement X (ESRF, SOLEIL...),

### Source d'électrons (1)

- .canon à électrons (émission thermo-ionique),

### Monochromateur (1)

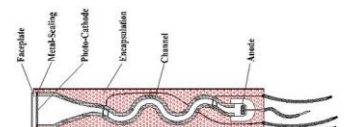
- .cristaux de Bragg (cas des photons),
- .analyseur à secteurs électrostatiques (cas des électrons),

### Analyseur en énergie (4)

.analyseur à secteurs électrostatiques hémisphériques (condensateurs hémisphériques) + système retardateur, analyseur à miroir électrostatique (CMA)...

### Détecteur (5)

.multiplicateur d'électrons (dynodes, « channeltron », c'est à dire multiplicateur tubulaire) de facteurs d'amplification  $\approx 10^4 - 10^8$ .



# Spectrométrie des électrons Auger.

## ➤ Applications.

.Analyse qualitative de surface - Composition de surface,

**Limite de détection  $\approx 0.3$  % monocouche (MC)**

(1 monocouche  $\sim 1.0 \cdot 10^{18}$  atomes/cm<sup>2</sup>)

.Étude des liaisons chimiques,

Déplacements en énergie dus aux liaisons chimiques –  
Interprétations difficiles suite à la mise en jeu de 3 niveaux e<sup>-</sup>,

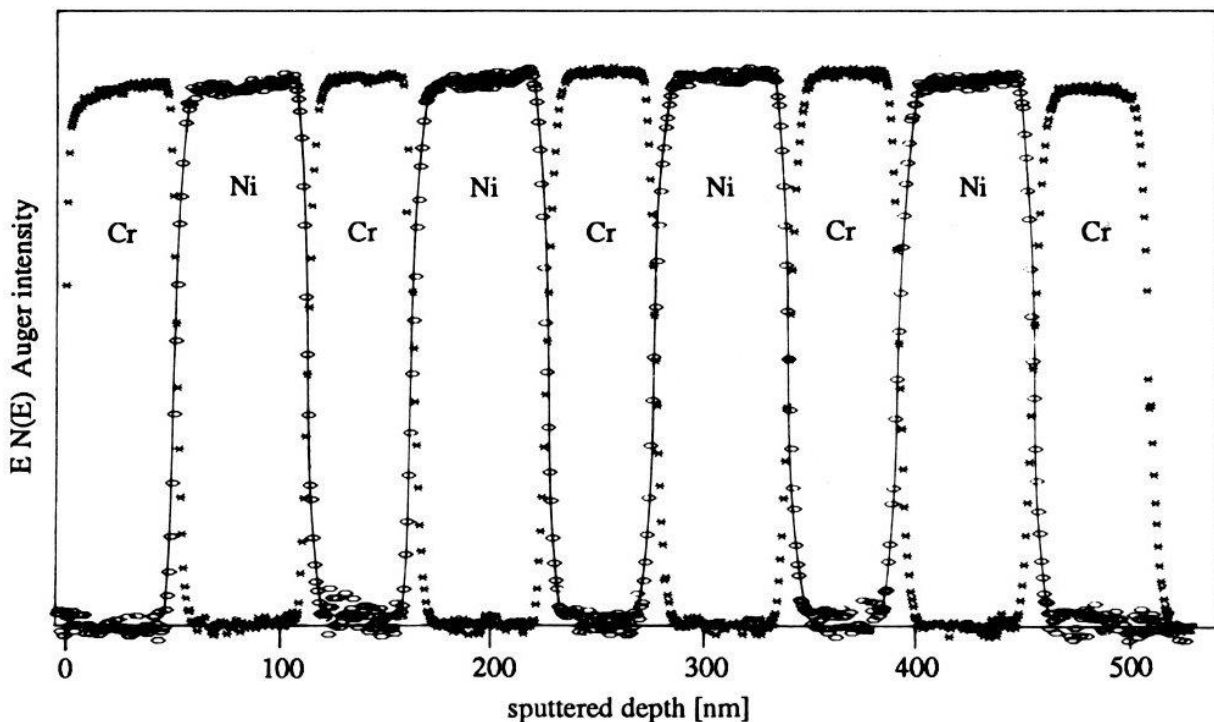
.Analyse (semi-)quantitative de surface,

Précision d'analyse  $\approx 10$  à 30 %, comparaison avec un échantillon témoin.

$$\frac{N_{A/\text{éch.}}}{N_{A/\text{témoin}}} = \frac{I_{A/\text{éch.}}}{I_{A/\text{témoin}}} \frac{\lambda_{\text{témoin}}}{\lambda_{\text{éch.}}} \frac{(1 + R_{\text{témoin}})}{(1 + R_{\text{éch.}})}$$

.Étude de modes de croissance (par couches, par îlots...),

.Étude de profils de concentration,

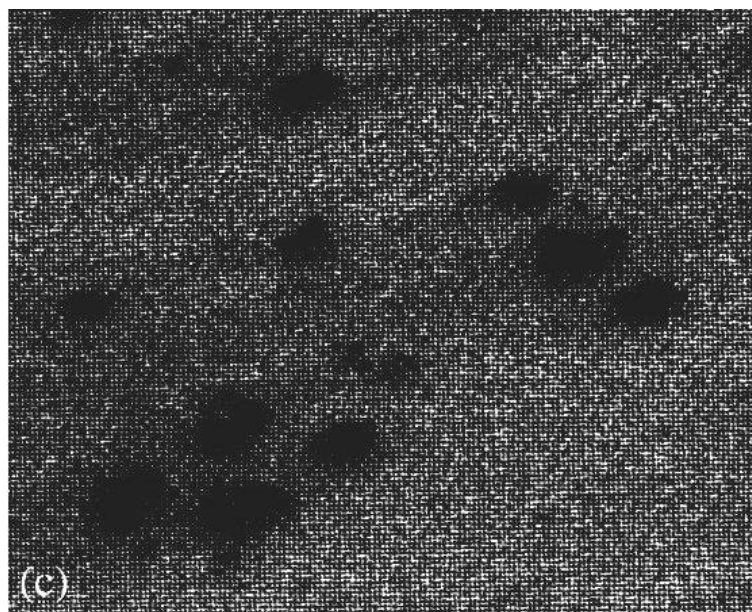
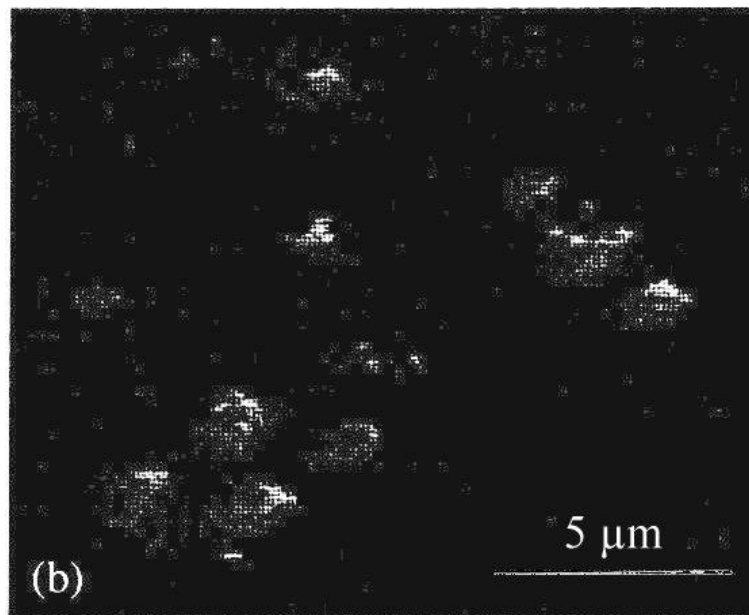


Profil Auger d'un échantillon multicouche NiCr (abrasion 1 keV Ar<sup>+</sup>) Fine et Navinsek *J. Vac. Sci. Technol.* A3 (1985) 1408.

## Spectrométrie des électrons Auger.

.Imagerie à partir du signal Auger,

Microscope à balayage Auger (**Scanning Auger Microscopy SAM**), mode de fonctionnement d'un **Microscope Electronique à Balayage MEB** - Sensible chimiquement - Résolution latérale  $< 100$  nm ( $1 \text{ nm} = 1.10^{-9} \text{ m} = 10 \text{ \AA}$ ).



Particules d'or sur substrat de silicium Au / Si - (b) Image d'émission Auger de Au, (c) Image d'émission Auger de Si. Document RIBER Lab. de cristallographie IPCMS ULP Strasbourg.

## Spectrométrie des électrons Auger.

### .Nomenclature des raies Auger – Couplage spin orbite j-j.

Dans le cadre du couplage spin orbite (notation) j-j, l'état d'un électron particulier est décrit via le jeu de paramètres  $(n, \ell, j)$  où  $n$  est le nombre quantique principal,  $\ell$  le nombre quantique azimutal et  $j$  le moment cinétique total de l'électron considéré :  $j = \ell + s$ , avec  $s$  nombre quantique de spin de valeur  $\pm 1/2$ .  $(n, \ell, j)$  constitue une base propre des opérateurs  $H_0, J^2, L^2, S^2$  et  $J_z$ .

1). Notation rayons X. Historiquement, un état de nombre quantique principal  $n = 1, 2, 3\dots$  est noté respectivement K, L, M, N... Les différentes combinaisons des nombres  $\ell$  et  $j$  sont quant à elles simplement numérotées 1, 2, 3...

2). Notation spectroscopique. Historiquement, un état est défini via son nombre quantique principal  $n$ , suivi d'une lettre représentative du nombre  $\ell$  (s, p, d, f), quant au nombre  $j$ , il est placé en indice.

$\ell = 0$  : s pour « sharp »,  $\ell = 1$  : p pour « principal »,  $\ell = 2$  : d pour « diffuse »,

Par suite, nous obtenons les notations X et spectroscopique suivantes :

Nombres quantiques					
n	$\ell$	j	Suffixe X	Niveau X	Spectro.
1	0	1/2	1	K	1s <sub>1/2</sub>
2	0	1/2	1	L <sub>1</sub>	2s <sub>1/2</sub>
2	1	1/2	2	L <sub>2</sub>	2p <sub>1/2</sub>
2	1	3/2	3	L <sub>3</sub>	2p <sub>3/2</sub>
3	0	1/2	1	M <sub>1</sub>	3s <sub>1/2</sub>
3	1	1/2	2	M <sub>2</sub>	3p <sub>1/2</sub>
3	1	3/2	3	M <sub>3</sub>	3p <sub>3/2</sub>
3	2	3/2	4	M <sub>4</sub>	3d <sub>3/2</sub>
3	2	5/2	5	M <sub>5</sub>	3d <sub>5/2</sub>

### **.Nomenclature des raies Auger – Couplage spin orbite L-S.**

L'image classique du couplage spin-orbite serait l'interaction du moment magnétique intrinsèque de l'électron, dû à son mouvement de spin, avec l'induction magnétique créée par son mouvement orbital (charge  $e$  en mouvement dans un champ électrique). Dans le référentiel au repos de l'électron, ce dernier est plongé dans un champ magnétique.

Ce couplage est à l'origine d'une levée de dégénérescence des états atomiques de vecteurs  $L$  et  $S$ , définis par les différentes valeurs de  $|J^2|$ .

Rigoureusement, un état atomique (atomes à plusieurs électrons) doit être défini par la valeur des nombres  $L$  et  $S$ , symbolisés respectivement par la lettre S, P, D... définissant l'état et sa multiplicité de spin ( $2S + 1$ ), auquel il convient d'ajouter, en indice, la valeur correspondante de  $J$ .

## **Spectrométrie des électrons Auger - Sommaire.**

- **Principe.**
  - **Principe - Nomenclature - Energie des e<sup>-</sup> Auger.**
  - **Principe - Intensité du signal des électrons Auger.**
  - **Mise en œuvre de la spectrométrie Auger.**
  - **Applications.**
- .Nomenclature des raies Auger – Couplage spin orbite j-j.**
- .Nomenclature des raies Auger – Couplage spin orbite L-S.**