

# Spectrométrie des électrons Auger.

Auger Electron Spectroscopy AES,  
 AES - X (X-ray excitation), AES - E (Electron excitation).

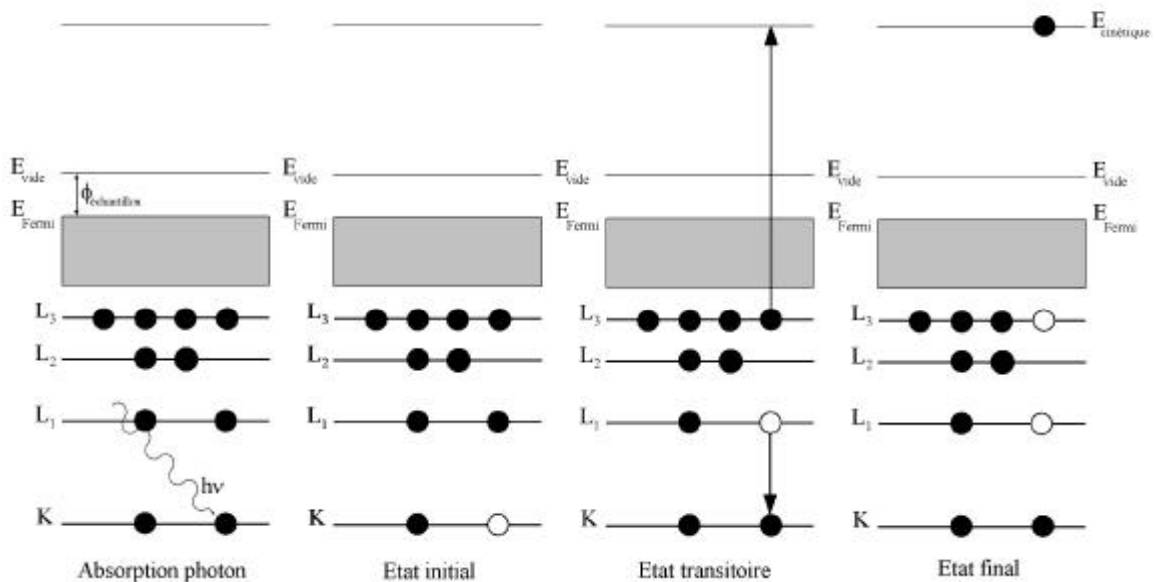
## ➤ Principe.

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

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

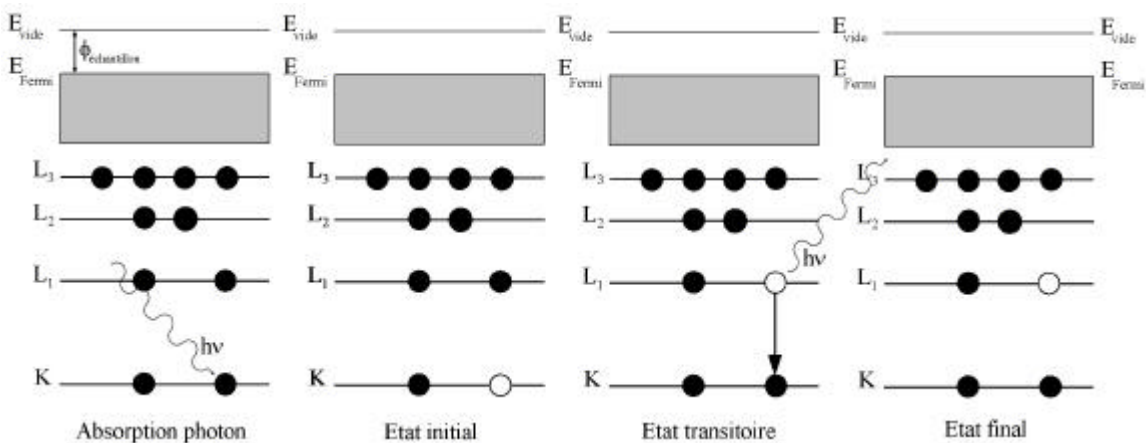
Cas des atomes légers ( $Z < 30$ , soit Zn),

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



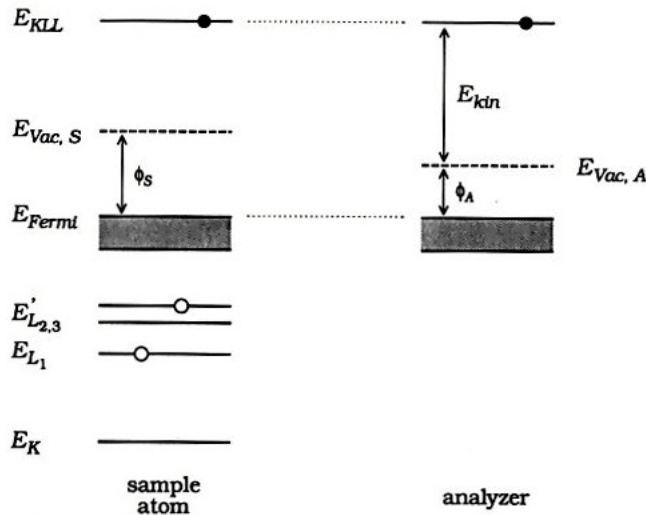
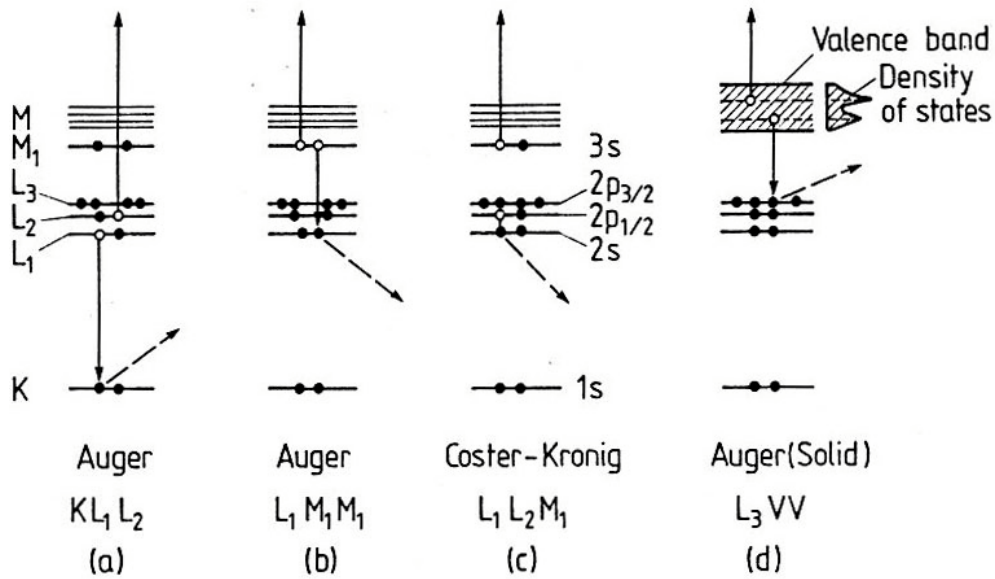
### 2) *Désexcitation radiative* → *Emission photon.*

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 → 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.***

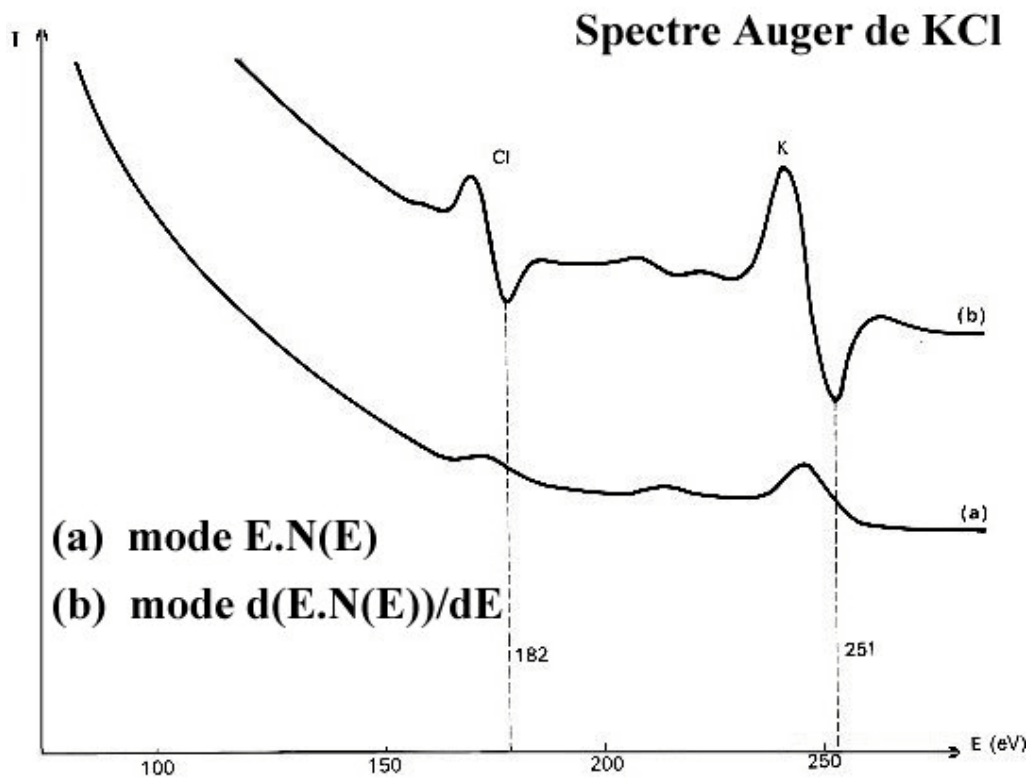
## Spectrométrie des électrons Auger.

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

L'intensité du signal Auger  $I_{\text{Auger}}$  d'un élément A est proportionnelle (exemple transition  $KL_1L_{2,3}$ ):

- . à l'intensité incidente en particules excitatrices  $I_0$ ,
- . à la concentration en atomes A  $N_A$  [ $1/L^3$ ],
- . à la section efficace du niveau considéré  $\sigma_K(Z, E_K)$  [ $L^2$ ],
- . 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 (source d'excitation interne) [ $\emptyset$ ].

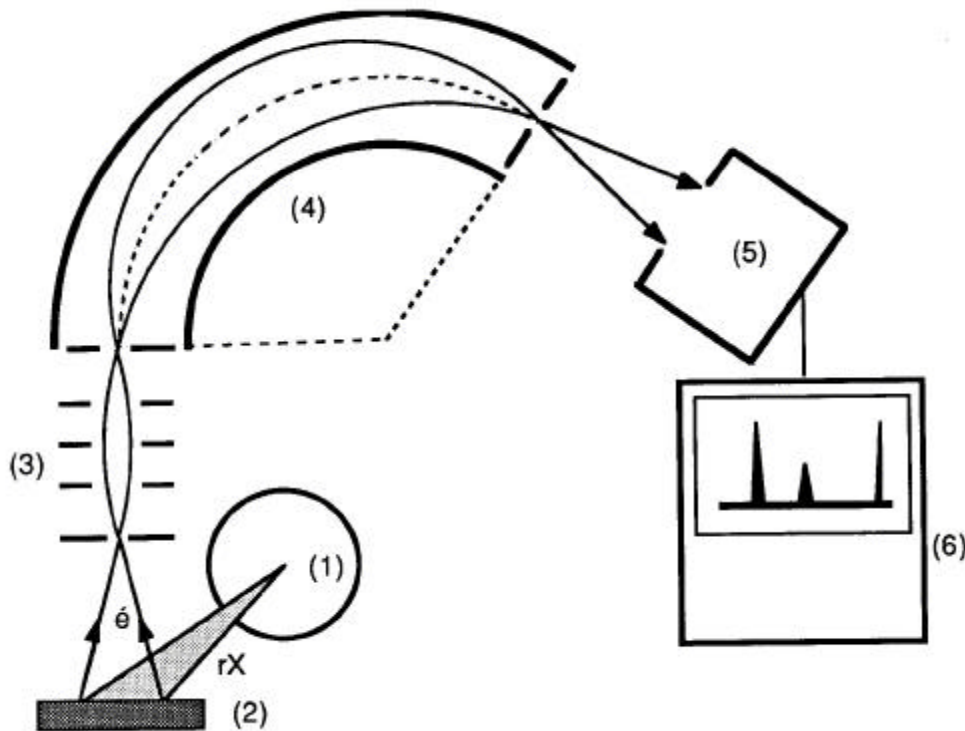
$$I_{\text{Auger}} \approx I_0 \cdot N_A \cdot \sigma_K \cdot p \cdot \omega_A \cdot \lambda \cdot (1+R) \cdot \tau$$



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

# Spectrométrie des électrons Auger - Mise en oeuvre.

## ➤ 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 (LURE, ESRF, SOLEIL),

### Source d'électrons (1)

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

### Monochromateur (1)

- .cristaux de Bragg (cas des photons),

### Analyseur en énergie (4) - détecteur (5)

.analyseur à secteurs électrostatiques hémisphériques, analyseur à miroir électrostatique (CMA)...

.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 » 0.3 % monocouche (MC)**  
(1 monocouche ~  $1.0 \cdot 10^{15}$  atomes/cm<sup>2</sup>)

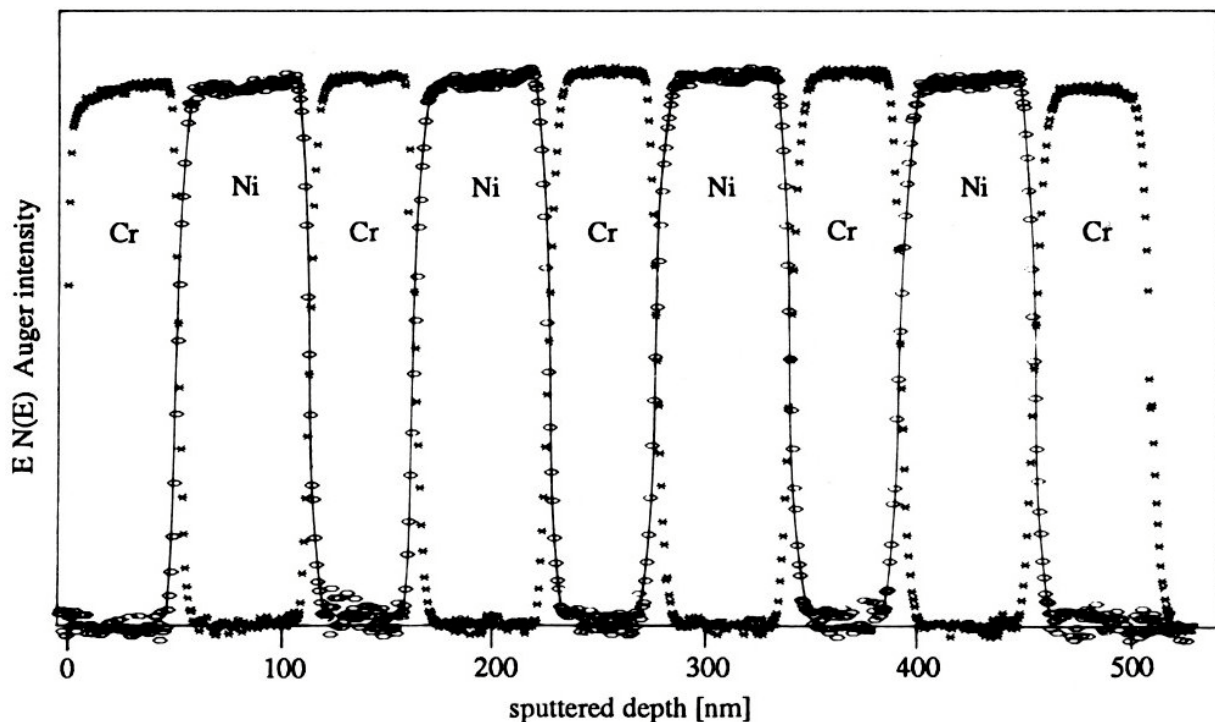
.Etude des liaisons chimiques,  
Déplacements chimiques dus aux liaisons chimiques,

.Analyse (semi-)quantitative de surface,  
Précision d'analyse ≈ 10 à 30 %, comparaison avec un échantillon témoin.

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

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

.Etude de profils de concentration,



Profil Auger d'un échantillon multicouche NiCr (abrasion 1 keV

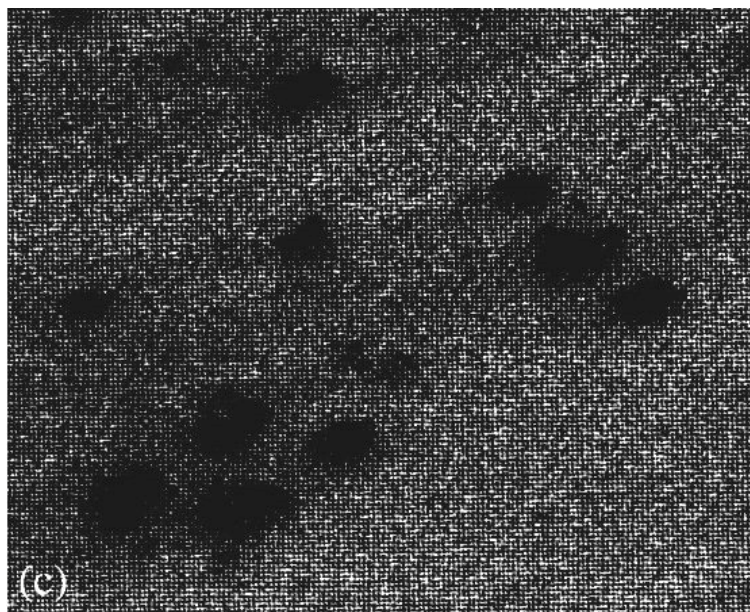
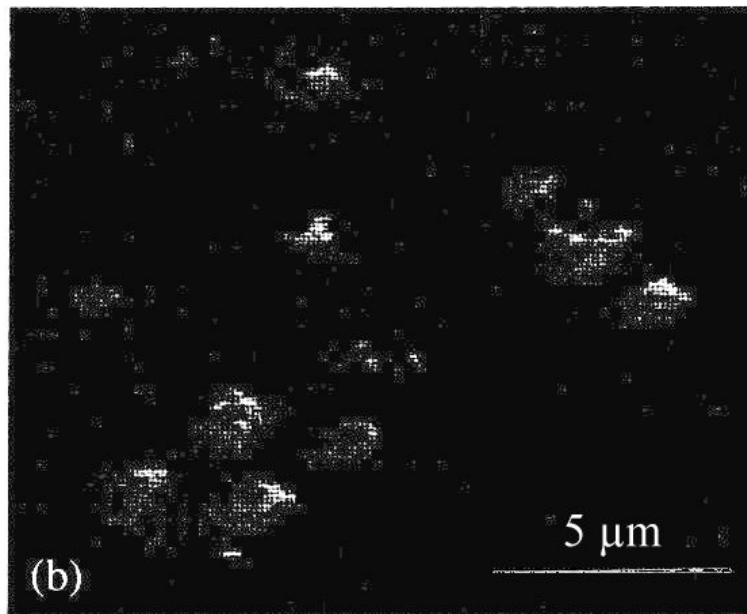
Ar<sup>+</sup>) Fine et Navinsek *J. Vac. Sci. Technol.* **A3** (1985) 1408.



## Spectrométrie des électrons Auger.

.Imagerie à partir du signal Auger,

Microscope à balayage Auger (**Scanning Auger Microscopy SAM**) - Sensible chimiquement - Résolution latérale  $< 100$  nm ( $1$  nm =  $1 \cdot 10^{-9}$  m =  $10$  Å).



Particules d'or sur substrat de silicium - (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, l, j) où n est le nombre quantique principal, l le nombre quantique azimutal et j le moment cinétique total de l'électron considéré :  $j = l + s$ , avec s nombre quantique de spin de valeur  $\pm 1/2$ .

1). Notation rayons X. Historiquement, un état de nombre quantique principal  $n = 0, 1, 2, 3\dots$  est noté respectivement K, L, M, N... Les différentes combinaisons des nombres l 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 l (s, p, d, f), quant au nombre j, il est placé en indice.

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

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

Nombres quantiques					
n	l	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>

## Spectrométrie des électrons Auger.

### .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.

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.

A poursuivre



## **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.**