

Spectrométrie des électrons Auger.

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

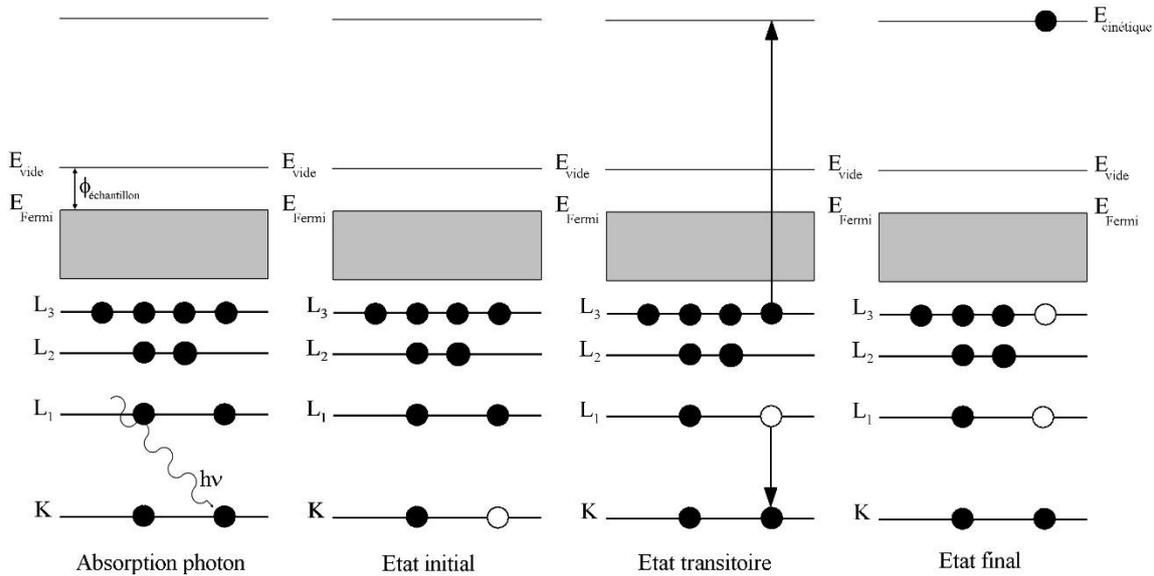
➤ **Principe.** P. Auger *CR Acad. Sci. (F)* **177** (1923) 169; J.J. Lander *Phys. Rev.* **91** (1953) 1382

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

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

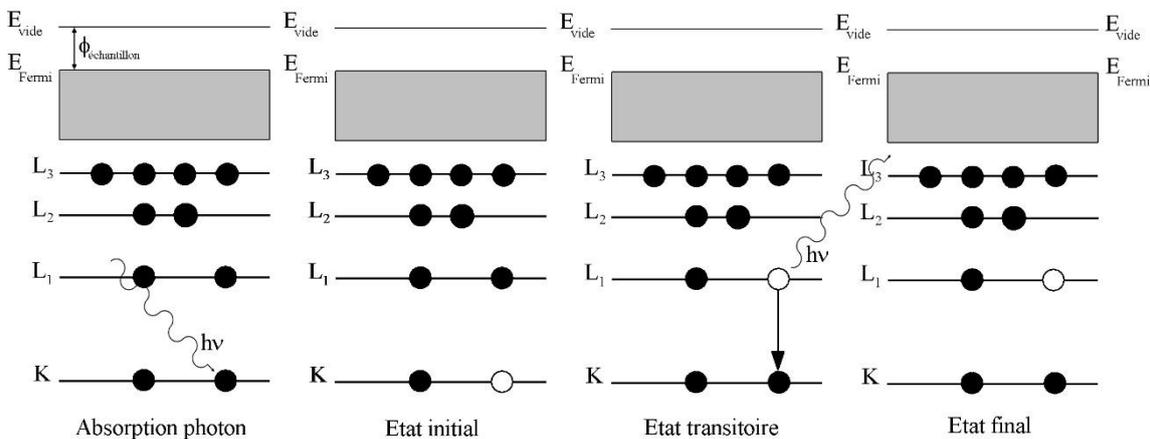
Cas des atomes légers ($Z < 30$, soit Zn),

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



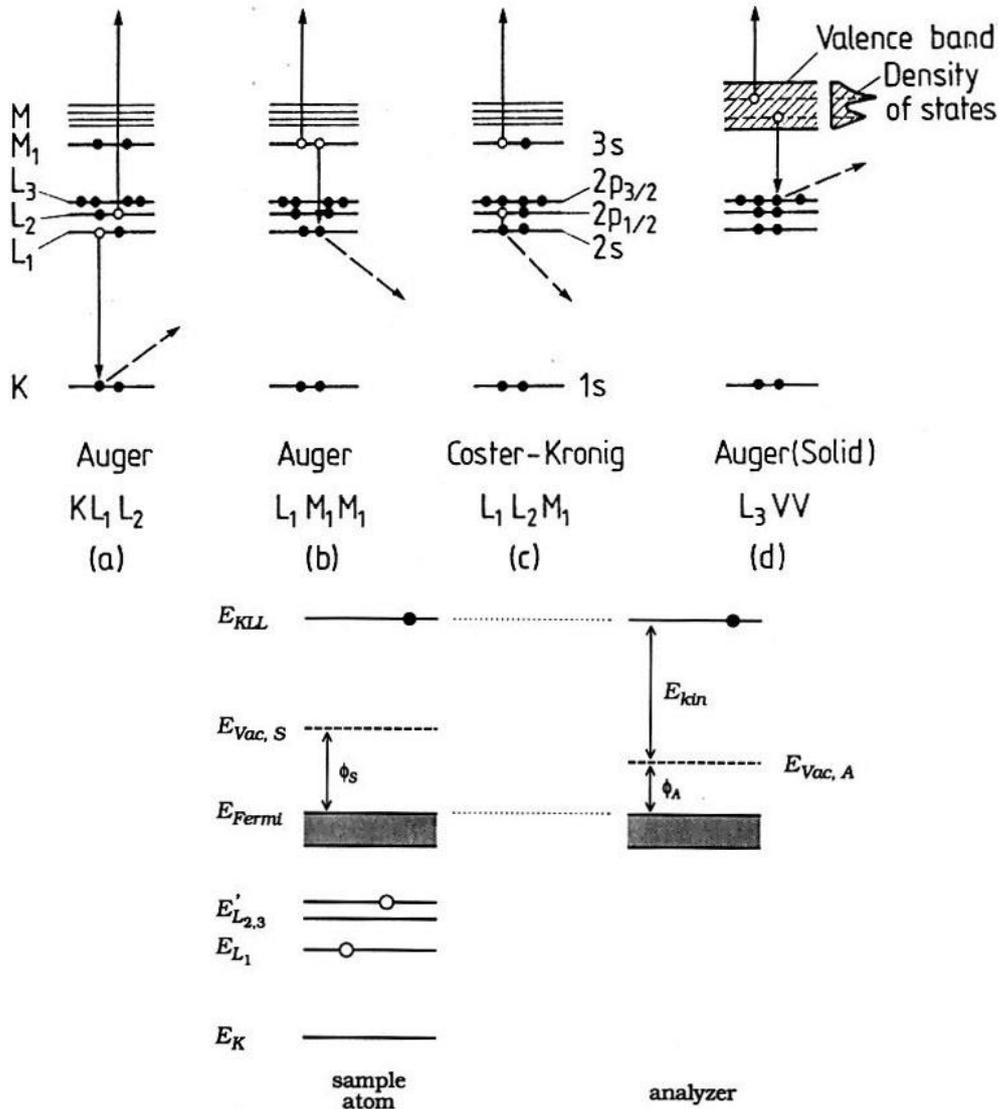
2) *Désexcitation radiative* → *Emission photon (fluorescence).*

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



Spectrométrie des électrons Auger.

➤ Principe - Nomenclature - Energie des e⁻ 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],

ϕ_A Travail de sortie de l'analyseur : $\phi_A = E_v - E_F$ [eV] ≈ 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.

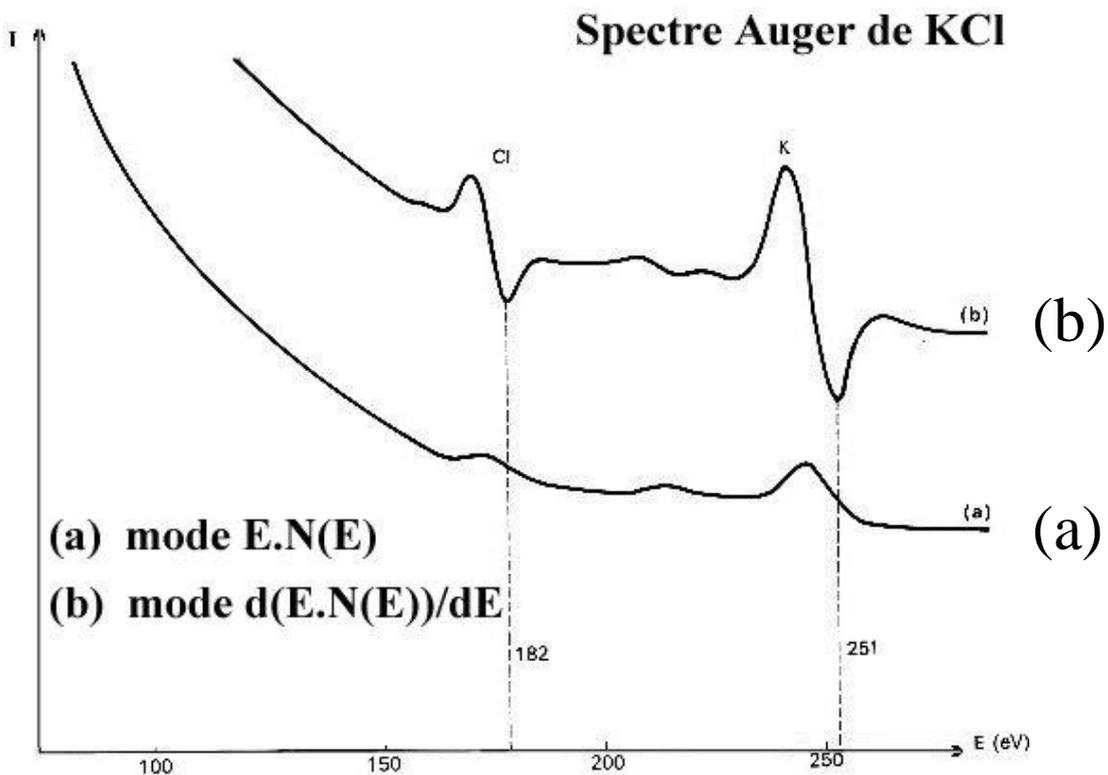
Spectrométrie des électrons Auger.

➤ Principe - Intensité du signal des électrons Auger.

L'intensité du signal Auger I_{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].

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

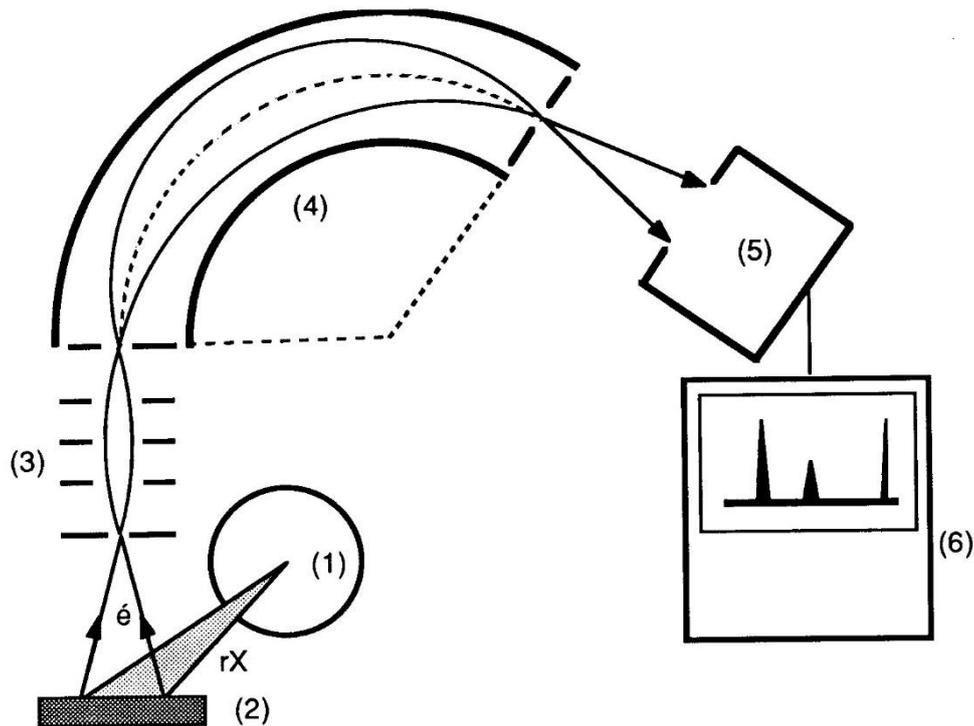


K^{19} électron Auger LMM 251 eV, Cl^{17} électron Auger LVV 182 eV.

$\Delta E(\text{Signal AES})$ 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)

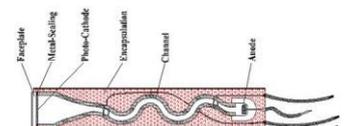
- .cristaux de Bragg (cas des photons),
- .analyseur à secteurs électrostatiques (cas des électrons),

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 $\approx 10^4 - 10^8$.



➤ Applications.

.Analyse qualitative de surface - Composition de surface,
Limite de détection ≈ 0.3 % monocouche (MC)
 (1 monocouche $\sim 1.0 \cdot 10^{18}$ atomes/cm²)

.Étude des liaisons chimiques,

 Déplacements en énergie dus aux liaisons chimiques –
 Interprétations difficiles suite à la mise en jeu de 3 niveaux e⁻,

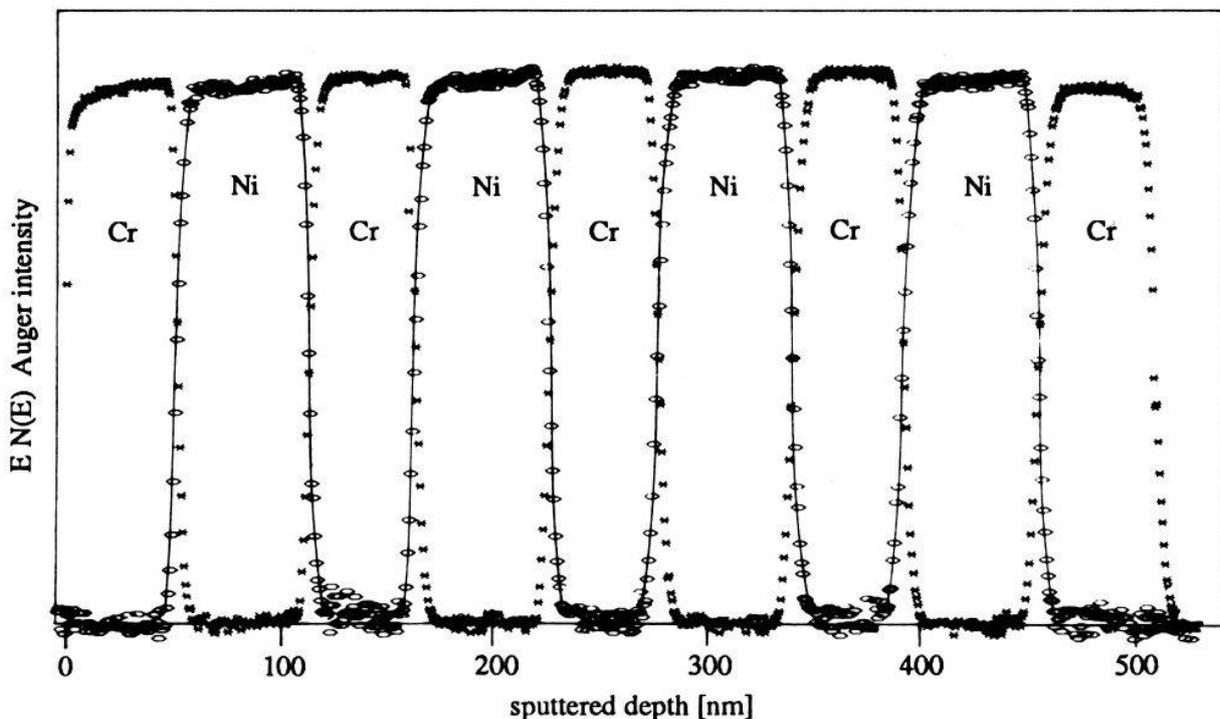
.Analyse (semi-)quantitative de surface,

 Précision d'analyse ≈ 10 à 30 %, comparaison avec un
 échantillon témoin.

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

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

.Étude de profils de concentration,

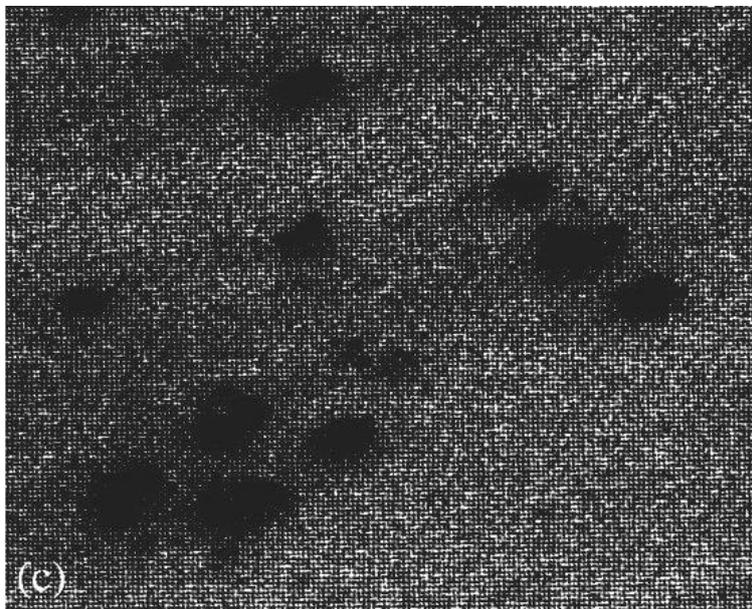
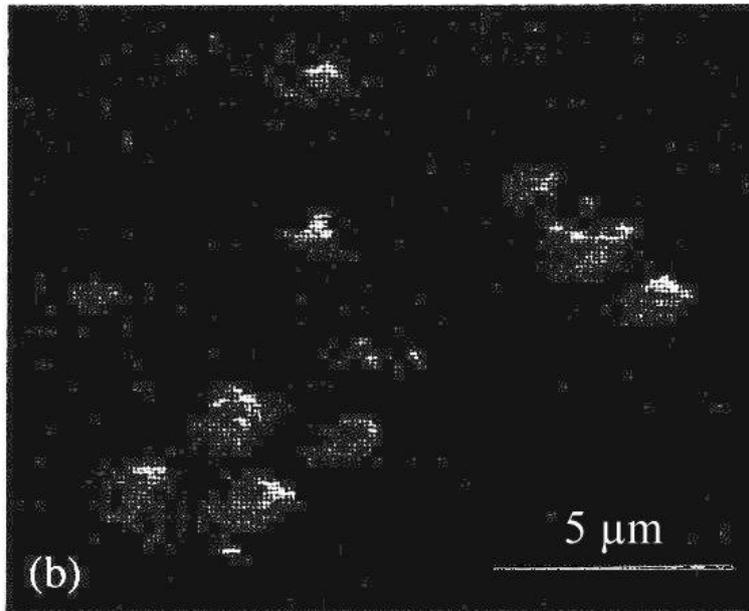


Profil Auger d'un échantillon multicouche NiCr (abrasion 1 keV Ar⁺) Fine et Navinsek *J. Vac. Sci. Technol.* A3 (1985) 1408.

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

$\ell = 0$: 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	ℓ	j	Suffixe X	Niveau X	Spectro.
1	0	1/2	1	K	1s _{1/2}
2	0	1/2	1	L ₁	2s _{1/2}
2	1	1/2	2	L ₂	2p _{1/2}
2	1	3/2	3	L ₃	2p _{3/2}
3	0	1/2	1	M ₁	3s _{1/2}
3	1	1/2	2	M ₂	3p _{1/2}
3	1	3/2	3	M ₃	3p _{3/2}
3	2	3/2	4	M ₄	3d _{3/2}
3	2	5/2	5	M ₅	3d _{5/2}

.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⁻ 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.**