

Introduction à la Diffraction par Rayon X

Partie Expérimentations

Simon HAZIZA et Emmanuelle DELEPORTE

ENS Cachan Septembre 2014

WARNING

Lisez attentivement les recommandations suivantes :

- 1- Mesures de protection et de blindage incorporées par le constructeur, le taux de dose hors de l'appareil est réduit à moins de 1 $\mu\text{Sv/h}$, une valeur d'un ordre de grandeur correspondant à la dose d'irradiation naturelle.
- 2- Tenir l'appareil à rayons X à l'abri des personnes non autorisées.
- 3- **Eviter une surchauffe de l'anode** dans le tube à rayons X (vérifier le bon fonctionnement du ventilateur dans la partie tube RX).
- 4- Le goniomètre s'ajuste exclusivement par le biais de moteurs pas à pas électriques : **ne bloquer ni le bras de cible, ni le bras de capteur du goniomètre et ne pas modifier le réglage par force.**
- 5- **Les cristaux de NaCl sont hygroscopiques et fragiles: ranger le cristal dans un endroit aussi sec que possible, éviter toute sollicitation mécanique sur le cristal, ne s'emparer du cristal que par les bords.**
- 6- A la fin de la manipulation¹, remettre le cache de protection de l'écran luminescent.
- 7- Vérifier en fin de TP du matériel mis à disposition : calculatrice, Filtre Ni et filtre Cu, monocristal NaCl et KBr.

Manipulation 1 :

Visualisation de l'émission de rayons X par fluorescence et influence du courant d'émission et de la haute tension du tube à rayons X sur la luminosité et le contraste de l'image (expériences à réaliser dans une pièce assombrie)

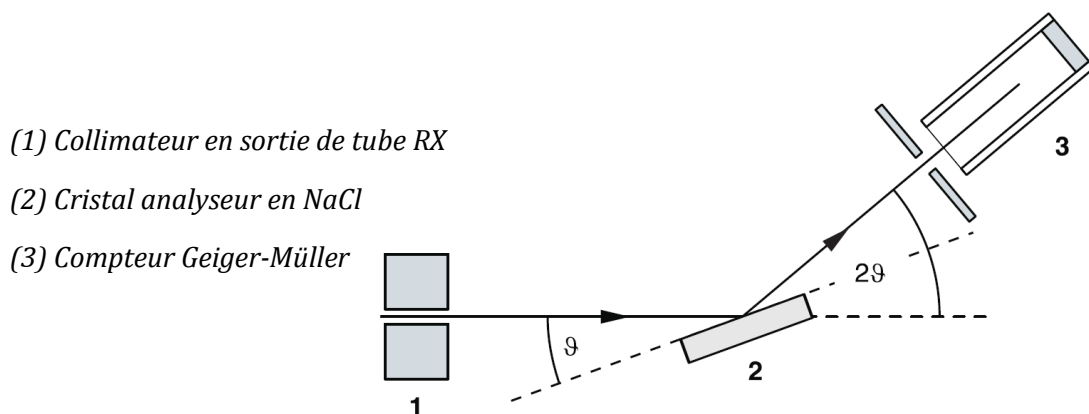
Remarques:

- Le collimateur, le goniomètre et la plaque de protection de l'écran luminescent doivent être retirés.
 - L'objet à analyser par radioscopie, par ex. une calculatrice avec boîtier en plastique doivent être plats et opaques avec une structure intérieure essentiellement constituée de pièces en plastique et en métal.
- a- Fermer la porte coulissante en verre de plomb, régler une haute tension du tube $U = 35 \text{ kV}$ et mettre l'appareil en marche en actionnant le bouton-poussoir HV on/off.
 - b- Augmenter continuellement le courant d'émission I de 0 à 1,00 mA tout en observant la luminosité de l'écran luminescent.
 - c- Placer l'objet à radioscopier le plus près possible de l'écran luminescent, et faire varier U à I fixé et inversement (mise en route de l'appareil en actionnant le bouton-poussoir HV on/off).
 - d- Discuter la luminosité et le contraste de l'image dans les 2 cas.
 - e- Remettre le cache de protection de l'écran luminescent.

Manipulation 2 :

Etude du spectre du tube à anode Mo avec identification des raies caractéristiques de fluorescence.

A partir de maintenant, on se placera en configuration θ - 2θ avec NaCl comme cristal analyseur (figure ci-dessous, configuration en réflexion).



- a- Remettre le collimateur, le porte échantillon et compteur Geiger-Müller. Manipuler avec précaution ! Ne pas oublier de faire l'« ajustement au cristal ».
- b- S'assurer de l'absence de filtre sur le collimateur, régler les paramètres du tube : tension 35 kV, courant d'électrons 1 mA.
- c- Lancer une acquisition balayant l'angle θ entre 2 et 40° par pas de 0.1°, avec un temps de comptage de 2s par pas.

- d- Tracer le spectre du tube en fonction de la longueur d'onde λ en Å. Pour ce faire, on fera l'hypothèse (fausse) que l'on n'observe que de la diffraction à l'ordre 1 sur le cristal analyseur. Repérez les raies caractéristiques pour les différents ordres de diffraction.
- e- Dans les conditions de fonctionnement choisies, depuis quels niveaux d'énergie les électrons sont-ils excités ? Quelle série de photons de fluorescence devrait-on donc observer ? Dresser un tableau indiquant les transitions concernées et les longueurs d'onde associées. Vérifier ensuite la présence de ces raies caractéristiques sur votre spectre. On se référera aux valeurs tabulées en annexe.

Manipulation 3 :

Etude de la monochromatisation $K\alpha$ du signal RX provenant d'une anode en Mo. On se limitera au 1^o ordre de diffraction ($3^\circ < \theta < 10^\circ$) avec un pas angulaire de $0,1^\circ$ et un temps de comptage de 5s par pas. $U=35\text{kV}$ et $I=1\text{mA}$.

- a- Placer la feuille d'absorption en zirconium sur le collimateur et lancez l'acquisition du spectre.
- b- Une fois l'acquisition terminée, appuyez sur le bouton droit de la souris et sélectionner «Calcul intégral». Avec le bouton gauche de la souris, marquer successivement les pics des raies caractéristiques et relever leur taux de comptage intégral R_i au coin en bas à gauche de la fenêtre du graphe.
- c- Calculer la part V du rayonnement $K\beta$ intervenant dans le rayonnement caractéristique total : $V = R_i^{K\beta} / (R_i^{K\alpha} + R_i^{K\beta})$
- d- Recommencer avec la feuille d'absorption en cuivre sur le collimateur. Que concluez-vous ?
- e- D'après le tableau annexe « seuil d'absorption », proposer d'autres filtres potentiellement compatibles avec une monochromatisation $K\alpha$ du signal RX provenant d'une anode en Mo.

Manipulation 4 :

Interprétation des spectres d'énergie comme la superposition du spectre continu du rayonnement de freinage et des raies du rayonnement X caractéristique du matériau de l'anode et étude de l'influence de la haute tension et du courant d'émission sur le rayonnement de freinage et sur le rayonnement caractéristique. Loi de Duane-Hunt et calcul de la constante de Planck.

Variation de la haute tension du tube :

- a- Régler un courant d'émission $I = 1,0\text{mA}$, un temps de mesure par pas angulaire de 5s et un pas de progression angulaire de $0,1^\circ$. Régler la valeur limite inférieure de l'angle de la cible sur $2,5^\circ$ et la valeur limite supérieure sur $12,5^\circ$.
- b- Sélectionner une haute tension du tube $U = 20\text{kV}$ puis lancer la mesure.
- c- Enregistrer des séries de mesures supplémentaires avec les hautes tensions du tube $U = 25\text{kV}$, 30kV et 35kV . Tracer sur un même graphique les spectres du tube à rayons X Mo pour les hautes tensions du tube U précédentes (courant d'émission $I = 1\text{mA}$).
- d- Relever la position des pics du rayonnement caractéristique du molybdène en fonction de la haute tension du tube et mesurez la valeur moyenne. Comparer à la littérature.

Variation du courant d'émission :

- e- Régler une haute tension du tube $U = 35$ kV. Sélectionner un courant d'émission $I = 0,40$ mA puis lancer la mesure.
- f- Enregistrer des séries de mesures supplémentaires avec les courants d'émissions $I = 0,60$ mA, $0,80$ mA et $1,00$ mA. Tracer sur un même graphique les spectres du tube à rayons X Mo pour les courants d'émission I précédents (hautes tensions du tube $U = 35$ kV).
- g- Relever la position des pics du rayonnement caractéristique du molybdène en fonction de la haute tension du tube et mesurez la valeur moyenne. Comparer à la littérature.
- h- Déterminer les maxima de taux de comptage des raies caractéristiques $K\alpha$, $K\beta$ ainsi que le maximum du spectre continu du rayonnement de freinage R_c et tracer sur un même graphe ces maxima en fonction du courant d'émission. Commenter.

Loi des déplacements de Duane-Hunt et calcul de la constante de Planck :

- i- En reprenant les deux expériences ci-dessous, comparer l'évolution de λ_{\min} en fonction de I et de U et vérifier la loi des déplacements de Duane-Hunt.
- j- Calculer la valeur numérique de la constante de Planck. Comparer avec la littérature.

Manipulation 5 :

Etude de la réflexion de Bragg sur un monocristal de NaCl avec le rayonnement X caractéristique du molybdène.

- 1- Choisir la haute tension du tube $U = 35,0$ kV, le courant d'émission $I = 1,00$ mA, le temps de mesure par pas angulaire 5s et le pas de progression angulaire $0,1^\circ$. Régler la valeur limite inférieure de l'angle de la cible sur 2° , la valeur limite supérieure sur 25° (on se limitera ici aux trois premiers ordres de diffraction).
- 2- Tracer le spectre de diffraction du rayonnement X sur un monocristal de NaCl.
- 3- A partir de l'angle de brillance θ , calculer la longueur d'onde λ des raies caractéristiques $K\alpha$ et $K\beta$ (l'écartement des plans réticulaires $d = 282,01$ pm). Comparer à la littérature.
- 4- Tracer le spectre de diffraction du rayonnement X sur un monocristal du KBr. Connaissant maintenant la longueur d'onde $K\alpha$ et $K\beta$, tracer $n\lambda$ en fonction de l'angle de brillance θ des pics de diffraction et détermination de la constante de réseau a_0 du monocristal de KBr ($d = a_0/2$).
- 5- Conclure sur la validité de la loi de Bragg et sur la nature ondulatoire du rayonnement X.

Valeurs numériques de la littérature

Valeurs littéraires à titre de comparaison:

$$\lambda(K\alpha) = 71,080 \text{ pm}$$

$$\lambda(K\beta) = 63,095 \text{ pm}$$

Paramètre de maille a_0 :

$$\text{NaCl} : a_0 = 564,02 \text{ pm}$$

$$\text{KBr} : a_0 = 659,8 \text{ pm}$$

loi de Duane-Hunt : $\lambda_m = (hc/e) * 1/V_i$, avec V_i haute tension du tube à rayon X

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$c = 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$e = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ A.s}$$

Bibliographie

[1] C. M. Lederer and V. S. Shirley, Table of Isotopes, 7th Edition, 1978, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

[2] Handbook of Chemistry and Physics, 52^{ème} edition (1971-72), The Chemical Rubber Company, Cleveland, Ohio, USA.

Aide Logiciel

Pour la représentation en fonction de la longueur d'onde, ouvrir la fenêtre de dialogue avec le bouton  ou la touche F5 et inscrire l'écartement des plans du réseau du NaCl.

Enregistrer toutes les séries de mesures ensemble sous un nom approprié avec la touche F2.

Effacer les données de mesure avec la touche F4

Cliquer sur le graphe avec le bouton droit de la souris :

- sélectionner le point de menu «Calcul valeur principale du pic» et marquer un pic sur «toute sa largeur» avec le bouton gauche de la souris
- sélectionner le point de menu «Droite de régression». Avec la touche gauche de la souris, marquer la section de courbe dans laquelle une droite de régression doit être modélisée pour la détermination de la longueur d'onde limite λ_{\min} .
- sélectionner le point de menu «Calcul valeur principale du pic». Avec la touche gauche de la souris, marquer à chaque fois les pics sur leur «largeur totale», et reporter dans le graphe la valeur principale β déterminée et la largeur de pic σ avec Alt+T puis noter la valeur principale sous forme d'angle.

Annexe I : Seuils d'absorption

Elément	K	L ₁	L ₂	L ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
3-Li	226.950	-	-	-	-	-	-	-	-
4-Be	107.200	-	-	-	-	-	-	-	-
5-B	65.604	-	-	-	-	-	-	-	-
6-C	43.887	-	-	-	-	-	-	-	-
7-N	31.220	-	-	-	-	-	-	-	-
8-O	23.233	-	-	-	-	-	-	-	-
9-F	17.897	-	-	-	-	-	-	-	-
10-Ne	14.170	-	-	-	-	-	-	-	-
11-Na	11.475	-	-	-	-	-	-	-	-
12-Mg	9.512	197.300	-	220.534	-	-	-	-	-
13-Al	7.951	142.500	163.022	163.942	-	-	-	-	-
14-Si	6.745	105.000	122.028	122.761	-	-	-	-	-
15-P	5.787	81.000	95.070	95.801	-	-	-	-	-
16-S	5.018	64.100	75.314	75.868	-	-	-	-	-
17-Cl	4.397	52.100	60.739	61.222	591.900	-	-	-	-
18-Ar	3.871	43.200	50.025	50.446	476.587	-	-	-	-
19-K	3.436	36.400	41.754	42.179	373.456	-	-	-	-
20-Ca	3.070	30.700	35.797	36.173	309.146	-	-	-	-
21-Sc	2.757	26.800	30.943	31.296	264.440	-	-	-	-
22-Ti	2.497	23.400	26.936	27.290	228.816	-	-	-	-
23-V	2.269	19.803	23.877	24.229	201.484	-	-	-	-
24-Cr	2.070	17.840	21.294	21.367	171.626	-	-	-	-
25-Mn	1.896	16.138	19.086	19.417	150.739	-	-	-	-
26-Fe	1.743	14.650	17.188	17.504	132.991	-	-	-	-
27-Co	1.608	13.333	15.545	15.843	118.175	-	-	-	-
28-Ni	1.488	12.201	14.104	14.387	103.062	-	-	-	-
29-Cu	1.380	11.172	12.841	13.113	91.685	137.152	-	793.498	-
30-Zn	1.283	10.262	11.725	11.987	81.898	116.000	-	546.224	-
31-Ga	1.196	9.416	10.728	10.930	73.146	98.670	107.500	405.000	-
32-Ge	1.116	8.692	9.840	10.089	65.116	89.857	93.488	299.437	-
33-As	1.045	8.067	9.056	9.298	58.581	79.123	82.205	238.357	-
34-Se	0.980	7.456	8.347	8.584	52.385	69.999	72.578	187.662	-
35-Br	0.920	6.920	7.721	7.952	46.679	62.341	64.705	150.218	-
36-Kr	0.866	6.444	7.158	7.377	42.071	54.882	57.020	129.756	-
37-Rb	0.816	5.995	6.642	6.861	37.696	49.562	51.527	108.446	109.986
38-Sr	0.770	5.591	6.173	6.387	34.553	44.124	45.866	90.985	92.251
39-Y	0.728	5.226	5.752	5.961	31.453	39.733	41.308	77.850	78.973

Élément	K	L ₁	L ₂	L ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
40-Zr	0.689	4.889	5.378	5.565	28.474	35.564	36.972	66.136	67.184
41-Nb	0.653	4.495	5.031	5.230	26.482	32.708	34.155	59.815	60.608
42-Mo	0.620	4.323	4.716	4.913	24.413	30.083	31.401	53.277	54.201
43-Tc	0.589	4.068	4.431	4.623	22.500	27.578	28.853	47.507	48.140
44-Ru	0.560	3.837	4.169	4.358	20.945	25.461	26.510	42.660	43.038
45-Rh	0.534	3.623	3.928	4.113	19.453	23.341	24.492	38.561	39.286
46-Pd	0.509	3.425	3.706	3.889	18.109	21.603	22.699	34.940	35.494
47-Ag	0.486	3.243	3.501	3.680	16.877	20.011	21.061	31.793	32.299
48-Cd	0.464	3.073	3.312	3.488	15.873	18.602	19.614	29.269	29.507
49-In	0.444	2.916	3.137	3.311	14.764	17.314	18.285	26.617	27.165
50-Sn	0.425	2.648	2.975	3.146	13.856	16.050	17.200	24.500	24.900
51-Sb	0.407	2.634	2.824	2.994	13.020	15.072	16.014	22.699	23.114
52-Te	0.390	2.508	2.685	2.853	12.274	14.185	15.079	21.124	21.528
53-I	0.374	2.390	2.555	2.721	11.575	13.344	14.193	19.670	20.050
54-Xe	0.358	2.277	2.434	2.597	10.800	12.532	13.381	18.300	18.716
55-Cs	0.345	2.175	2.321	2.482	10.338	11.824	12.638	17.158	17.607
56-Ba	0.331	2.078	2.214	2.374	9.987	11.156	11.957	16.087	16.513
57-La	0.318	1.988	2.115	2.273	9.316	10.560	11.343	15.060	15.470
58-Ce	0.306	1.902	2.022	2.178	8.844	9.997	10.758	14.242	14.560
59-Pr	0.295	1.822	1.934	2.089	8.394	9.498	10.242	13.429	13.792
60-Nd	0.284	1.747	1.852	2.007	8.026	9.033	9.787	12.789	13.092
61-Pm	0.274	1.675	1.775	1.928	7.750	8.610	9.342	12.160	12.461
62-Sm	0.265	1.608	1.703	1.855	7.338	8.199	8.926	11.547	11.828
63-Eu	0.256	1.545	1.634	1.785	7.013	7.827	8.548	10.975	11.257
64-Gd	0.247	1.485	1.569	1.719	6.703	7.496	8.200	10.457	10.747
65-Tb	0.238	1.428	1.507	1.656	6.398	7.135	7.829	9.958	10.233
66-Dy	0.230	1.375	1.449	1.597	6.139	6.865	7.547	9.506	9.791
67-Ho	0.223	1.323	1.393	1.540	5.892	6.571	7.225	9.079	9.342
68-Er	0.216	1.274	1.341	1.487	5.675	6.283	6.950	8.664	8.950
69-Tm	0.209	1.227	1.291	1.436	5.410	5.985	6.661	8.275	8.541
70-Yb	0.202	1.183	1.243	1.387	5.192	5.724	6.361	7.912	8.164
71-Lu	0.196	1.140	1.198	1.341	4.981	5.480	6.119	7.573	7.813
72-Hf	0.190	1.100	1.155	1.297	4.765	5.238	5.876	7.216	7.450
73-Ta	0.184	1.062	1.114	1.255	4.594	5.041	5.675	6.951	7.183
74-W	0.178	1.025	1.074	1.215	4.407	4.831	5.453	6.649	6.875
75-Re	0.173	0.990	1.037	1.177	4.237	4.632	5.250	6.371	6.597
76-Os	0.168	0.956	1.001	1.140	4.067	4.440	5.052	6.097	6.313
77-Ir	0.163	0.924	0.966	1.105	3.909	4.262	4.858	5.848	6.076
78-Pt	0.158	0.893	0.933	1.071	3.761	4.082	4.679	5.622	5.820
79-Au	0.153	0.863	0.902	1.039	3.669	3.936	4.518	5.374	5.584

Elément	K	L ₁	L ₂	L ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
80-Hg	0.149	0.835	0.872	1.008	3.476	3.771	4.352	5.182	5.409
81-Tl	0.145	0.807	0.843	0.979	3.348	3.626	4.192	4.992	5.187
82-Pb	0.141	0.781	0.815	0.950	3.217	3.484	4.035	4.793	4.989
83-Bi	0.137	0.756	0.788	0.923	3.097	3.342	3.890	4.601	4.793
84-Po	0.133	0.731	0.762	0.897	2.989	3.209	3.742	4.430	4.624
85-At	0.129	0.708	0.738	0.872	2.850	3.092	3.616	4.267	4.458
86-Rn	0.125	0.686	0.715	0.848	2.740	2.982	3.506	4.112	4.301
87-Fr	0.122	0.665	0.692	0.825	2.650	2.866	3.392	3.966	4.151
88-Ra	0.119	0.644	0.671	0.803	2.576	2.769	3.280	3.829	4.008
89-Ac	0.116	0.625	0.650	0.782	2.470	2.673	3.185	3.698	3.871
90-Th	0.113	0.606	0.629	0.761	2.394	2.577	3.076	3.568	3.742
91-Pa	0.110	0.587	0.610	0.741	2.314	2.483	2.977	3.446	3.628
92-U	0.108	0.570	0.592	0.722	2.240	2.394	2.887	3.339	3.509

Annexe II : Raies de fluorescence

Série K (en Å) [1/3]

Raie Transition électronique K ←	α	α_1	α_2	β_1	β_3	β_2
Intensité relative approximative	150	100	50	20		5
		L ₃	L ₂	M ₃	M ₂	N ₂ ,N ₃
3-Li	240	–	–	–	–	–
4-Be	113	–	–	–	–	–
5-B	67	–	–	–	–	–
6-C	44	–	–	–	–	–
7-N	31.603	–	–	–	–	–
8-O	23.707	–	–	–	–	–
9-F	18.307	–	–	–	–	–
10-Ne	14.615	–	–	14.460	–	–
11-Na	11.909	–	–	11.617	–	–
12-Mg	9.889	–	–	9.558	–	–
13-Al	8.339	8.338	8.341	7.981	–	–
14-Si	7.126	7.125	7.127	6.769	–	–
15-P	6.155	6.154	6.157	5.804	–	–
16-S	5.373	5.372	5.375	5.032	–	–
17-Cl	4.729	4.728	4.731	4.403	–	–
18-Ar	4.192	4.191	4.194	3.886	–	–
19-K	3.744	3.742	3.745	3.454	–	–
20-Ca	3.360	3.359	3.362	3.090	–	–
21-Se	3.032	3.031	3.034	2.780	–	–
22-Ti	2.750	2.749	2.753	2.514	–	–
23-V	2.505	2.503	2.507	2.285	–	–
24-Cr	2.291	2.290	2.294	2.085	–	–
25-Mn	2.103	2.102	2.105	1.910	–	–
26-Fe	1.937	1.936	1.940	1.757	–	–
27-Co	1.791	1.789	1.793	1.621	–	–
28-Ni	1.659	1.658	1.661	1.500	–	1.489
29-Cu	1.542	1.540	1.544	1.392	1.393	1.381
30-Zn	1.437	1.435	1.439	1.296	–	1.281
31-Ga	1.341	1.340	1.344	1.207	1.208	1.190
32-Ge	1.256	1.255	1.258	1.129	1.129	1.117
33-As	1.177	1.176	1.180	1.057	1.058	1.045
34-Se	1.106	1.105	1.109	0.992	0.993	0.980
35-Br	1.041	1.040	1.044	0.933	0.933	0.921

Série K (en Å) [2/3]

Raie Transition électronique K ←	α	α_1	α_2	β_1	β_3	β_2
Intensité relative approximative	150	100	50	20		5
		L ₃	L ₂	M ₃	M ₂	N ₂ ,N ₃
36-Kr	0.981	0.980	0.984	0.879	0.879	0.866
37-Rb	0.927	0.926	0.930	0.829	0.830	0.817
38-Sr	0.877	0.875	0.880	0.783	0.784	0.771
39-Y	0.831	0.829	0.833	0.740	0.741	0.771
40-Zr	0.788	0.786	0.791	0.701	0.702	0.690
41-Nb	0.748	0.747	0.751	0.665	0.666	0.645
42-Mo	0.710	0.709	0.713	0.632	0.633	0.621
43-Te	0.674	0.673	0.676	0.601	0.602	0.590
44-Ru	0.644	0.643	0.647	0.572	0.573	0.562
45-Rh	0.614	0.613	0.617	0.546	0.546	0.535
46-Pd	0.587	0.585	0.590	0.521	0.521	0.510
47-Ag	0.561	0.559	0.564	0.497	0.498	0.487
48-Cd	0.536	0.535	0.339	0.475	0.476	0.465
49-In	0.514	0.512	0.517	0.455	0.455	0.455
50-Sn	0.492	0.491	0.495	0.435	0.436	0.426
51-Sb	0.472	0.470	0.475	0.417	0.418	0.408
52-Te	0.453	0.451	0.456	0.400	0.401	0.391
53-I	0.435	0.433	0.438	0.384	0.385	0.376
54-Xe	0.418	0.416	0.421	0.369	–	0.360
55-Cs	0.402	0.401	0.405	0.355	0.355	0.346
56-Ba	0.387	0.385	0.390	0.341	0.342	0.333
57-La	0.373	0.371	0.376	0.328	0.329	0.320
58-Ce	0.359	0.357	0.362	0.316	0.317	0.309
59-Pr	0.346	0.344	0.349	0.305	0.305	0.297
60-Nd	0.334	0.332	0.337	0.294	0.294	0.287
61-Pm	0.322	0.312	0.325	0.283	0.284	0.276
62-Sm	0.311	0.309	0.314	0.274	0.274	0.267
63-Eu	0.301	0.299	0.304	0.264	0.265	0.258
64-Gd	0.291	0.289	0.294	0.255	0.256	0.249
65-Tb	0.281	0.279	0.284	0.246	0.246	0.329
66-Dy	0.272	0.270	0.275	0.237	0.238	0.231
67-Ho	0.263	0.261	0.266	0.230	0.231	0.224
68-Er	0.255	0.253	0.258	0.222	0.223	0.217
69-Tm	0.246	0.244	0.250	0.215	0.216	0.210

Série K (en Å) [3/3]

Raie Transition électronique K ←	α	α_1	α_2	β_1	β_3	β_2
Intensité relative approximative	150	100	50	20		
		L ₃	L ₂	M ₃	M ₂	N ₂ ,N ₃
70-Yb	0.238	0.236	0.241	0.208	0.209	0.203
71-Lu	0.231	0.229	0.234	0.202	0.203	0.197
72-Hf	0.224	0.222	0.227	0.195	0.196	0.190
73-Ta	0.217	0.215	0.220	0.190	0.191	0.185
74-W	0.211	0.209	0.213	0.184	0.185	0.179
75-Re	0.204	0.202	0.207	0.179	0.179	0.174
76-Os	0.198	0.196	0.201	0.173	0.174	0.169
77-Ir	0.193	0.191	0.196	0.168	0.169	0.164
78-Pt	0.187	0.185	0.190	0.163	0.164	0.159
79-Au	0.182	0.180	0.185	0.159	0.160	0.155
80-Hg	0.177	0.175	0.180	0.154	0.155	0.150
81-Tl	0.172	0.170	0.175	0.150	0.151	0.146
82-Pb	0.167	0.165	0.170	0.146	0.117	0.162
83-Bi	0.162	0.161	0.165	0.142	0.143	0.135
84-Po	0.158	0.156	0.161	0.138	0.139	0.134
85-At	0.154	0.152	0.157	0.134	0.135	0.131
86-Rn	0.150	0.148	0.153	0.131	0.132	0.127
87-Fr	0.146	0.144	0.149	0.127	0.128	0.124
88-Ra	0.142	0.140	0.145	0.124	0.125	0.120
89-Ac	0.138	0.136	0.141	0.121	0.121	0.117
90-Th	0.135	0.133	0.138	0.117	0.118	0.114
91-Pa	0.131	0.129	0.134	0.114	0.115	0.111
92-U	0.128	0.126	0.131	0.111	0.112	0.108
93-Np	0.125	0.123	0.128	0.109	–	0.105
94-Pu	0.122	0.120	0.125	0.106	–	0.103
95-Am	0.119	0.117	0.122	0.103	–	0.100
96-Cm	0.116	0.114	0.119	0.101	–	0.098
97-Bk	0.113	0.111	0.116	0.098	–	0.095
98-Cf	0.110	0.108	0.113	0.097	–	0.093

Séries L (en Å) [1/3]

Raie Transition Electronique	α_1	α_2	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_6	l	η
$L_3 \leftarrow M_5$	M_5	M_4		N_5	O_4, O_5								M_1	
$L_2 \leftarrow M_4$			M_4					N_4				O_4		M_1
$L_1 \leftarrow M_3$					M_3	M_2			N_2	N_3	O_3			
Intensité relative approx.	100	10	80	30	3	2	2	10	1	2	1	1	5	2
16-S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	83.400	
17-Cl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	67.840	67.250
18-Ar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56.212	56.813
19-K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47.834	47.325
20-Ca	36.393		36.022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41.042	40.542
21-Sc	31.393		31.072	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35.671	35.20
22-Ti	27.445		27.074	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31.423	30.942
23-V	24.309		23.898	-	21.890	-	-	-	-	-	-	-	27.826	27.375
24-Cr	21.713		21.323	-	19.429	-	-	-	-	-	-	-	24.840	24.339
25-Mn	19.489		19.158	-	17.575	-	-	-	-	-	-	-	22.315	21.864
26-Fe	17.602		17.690	-	15.710	-	-	-	-	-	-	-	20.201	19.730
27-Co	16.000		15.698	-	14.240	-	-	-	-	-	-	-	18.358	17.860
28-Ni	14.595		14.308	-	13.146	-	-	-	-	-	-	-	16.693	16.304
29-Cu	13.357		13.079	-	12.115	-	-	-	-	-	-	-	15.297	14.940
30-Zn	12.282		12.009	-	11.185	-	-	-	-	-	-	-	14.081	13.719
31-Ga	11.313		11.045	-	10.365	-	-	-	-	-	-	-	12.976	12.620
32-Ge	10.436		10.194	-	9.580	9.640	-	-	-	-	-	-	11.944	11.608
33-As	9.671		9.414	-	8.930	-	-	-	-	-	-	-	11.069	10.732
34-Se	8.990		8.735	-	8.321	-	-	-	-	-	-	-	10.293	9.959
35-Br	8.375		8.126	-	7.767	-	-	-	-	-	-	-	9.583	9.253
36-Kr	7.817		7.576	-	7.264	7.304	-	-	-	-	-	-	8.946	8.626
37-Rb	7.318	7.325	7.075	-	6.788	6.821	-	-	6.045	-	-	-	8.363	8.042
38-Sr	6.863	6.870	6.623	-	6.367	6.403	-	-	5.644	-	-	-	7.836	7.517
39-Y	6.449	6.456	6.211	-	5.983	6.018	-	-	5.283	-	-	-	7.356	7.040
40-Zr	6.070	6.077	5.836	5.586	5.632	5.668	-	5.384	4.953	-	-	-	6.918	6.606
41-Nb	5.725	5.732	5.492	5.238	5.310	5.346	-	5.036	4.654	-	-	-	6.517	6.210
42-Mo	5.406	5.414	5.176	4.923	5.013	5.048	-	4.726	4.380	-	-	-	6.150	5.847
43-Tc	5.114	5.123	4.887	4.636	4.737	4.773	-	4.440	4.138	-	-	-	5.819	5.516
44-Ru	4.846	4.854	4.620	4.372	4.487	4.523	-	4.182	3.897	-	-	-	5.503	5.204
45-Rh	4.597	4.605	4.374	4.130	4.253	4.289	-	3.944	3.685	-	-	-	5.217	4.922
46-Pd	4.368	4.376	4.146	3.909	4.034	4.071	-	3.725	3.489	-	-	-	4.952	4.660
47-Ag	4.154	4.162	3.935	3.703	3.834	3.870	-	3.523	3.307	-	-	-	4.707	4.418
48-Cd	3.956	3.965	3.739	3.514	3.644	3.681	-	3.336	3.137	-	-	-	4.480	4.193
49-In	3.752	3.781	3.555	3.339	3.470	3.507	-	3.162	2.980	2.926	-	-	4.629	3.983

Séries L (en Å) [2/3]

Raie	α_1	α_2	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_6	l	η
Transition Electronique	$M_5 \leftarrow L_3$	M_4	M_4	N_5			O_4, O_5	N_4				O_4	M_1	M_1
Intensité relative approx.	100	10	80	30	3	2	2	10	1	2	1	1	5	2
50-Sn	3.600	3.609	3.385	3.175	3.306	3.344	–	3.001	2.835	2.778	–	–	4.071	3.789
51-Sb	3.439	3.148	3.226	3.023	3.152	3.190	–	2.852	2.695	2.639	–	–	3.888	3.607
52-Te	3.290	3.299	3.077	2.882	3.009	3.046	–	2.712	2.567	2.511	–	–	3.716	3.418
53-I	3.149	3.158	2.937	2.751	2.874	2.912	–	2.582	2.447	2.391	–	–	3.357	3.280
54-Xe	3.017	3.025	2.803	2.626	2.745	2.784	–	–	–	–	–	–	3.421	3.143
55-Cs	2.892	2.902	2.683	2.511	2.628	2.666	–	2.348	2.237	2.233	2.174	–	3.267	2.994
56-Ba	2.776	2.785	2.567	2.404	2.516	2.555	–	2.242	2.138	2.134	2.075	–	3.135	2.862
57-La	2.665	2.674	2.458	2.303	2.410	2.449	–	2.141	2.046	2.041	1.983	–	3.006	2.740
58-Ce	2.561	2.570	2.356	2.208	2.311	2.349	–	2.048	1.960	1.955	1.899	–	2.892	2.620
59-Pr	2.463	2.473	2.259	2.119	2.216	2.255	–	1.961	1.879	1.874	1.819	–	2.784	2.512
60-Nd	2.370	2.382	2.166	2.035	2.126	2.166	–	1.878	1.801	1.797	1.745	1.855	2.675	2.409
61-Pm	2.283	2.292	2.081	1.956	2.042	2.081	–	1.799	1.729	1.724	–	–	2.591	2.322
62-Sm	2.199	2.210	1.998	1.882	1.962	2.000	1.779	1.726	1.659	1.655	1.606	–	2.482	2.218
63-Eu	2.120	2.131	1.920	1.812	1.887	1.926	–	1.657	1.597	1.591	1.544	–	2.395	2.131
64-Gd	2.046	2.057	1.847	1.746	1.815	1.853	–	1.592	1.534	1.529	1.485	–	2.312	2.049
65-Tb	1.976	1.986	1.777	1.682	1.747	1.785	1.577	1.530	1.477	1.471	1.427	–	2.234	1.973
66-Dy	1.909	1.920	1.710	1.623	1.681	1.720	–	1.473	1.423	1.417	1.374	–	2.158	1.898
67-Ho	1.845	1.856	1.647	1.567	1.619	1.658	–	1.417	1.371	1.364	1.323	–	2.086	1.826
68-Er	1.785	1.796	1.587	1.514	1.561	1.601	–	1.364	1.321	1.315	1.276	–	2.019	1.757
69-Tm	1.726	1.738	1.530	1.463	1.505	1.544	–	1.316	1.274	1.268	1.229	–	1.955	1.695
70-Yb	1.672	1.682	1.476	1.416	1.452	1.491	1.387	1.268	1.228	1.222	1.185	1.243	1.894	1.635
71-Lu	1.619	1.630	1.424	1.370	1.402	1.441	1.342	1.222	1.185	1.179	1.143	1.198	1.836	1.478
72-Hf	1.569	1.580	1.374	1.327	1.353	1.392	1.298	1.179	1.144	1.138	1.103	1.155	1.782	1.523
73-Ta	1.522	1.533	1.327	1.285	1.307	1.346	1.256	1.138	1.105	1.099	1.065	1.114	1.728	1.471
74-W	1.476	1.487	1.282	1.245	1.263	1.302	1.215	1.098	1.068	1.062	1.028	1.074	1.678	1.421
75-Re	1.433	1.444	1.238	1.206	1.220	1.260	1.177	1.061	1.032	1.026	0.993	1.037	1.630	1.374
76-Os	1.391	1.402	1.197	1.169	1.179	1.218	1.140	1.025	0.998	0.992	0.959	1.001	1.585	1.328
77-Ir	1.352	1.363	1.158	1.135	1.141	1.179	1.106	0.991	0.966	0.959	0.928	0.967	1.541	1.285
78-Pt	1.313	1.325	1.120	1.102	1.104	1.142	1.072	0.958	0.934	0.928	0.897	0.934	1.499	1.243
79-Au	1.277	1.288	1.083	1.070	1.068	1.106	1.040	0.927	0.905	0.898	0.867	0.903	1.460	1.202
80-Hg	1.242	1.253	1.049	1.040	1.034	1.072	1.010	0.897	0.876	0.869	0.839	0.873	1.422	1.164
81-Tl	1.207	1.218	1.015	1.010	1.001	1.039	0.981	0.868	0.848	0.842	0.812	0.845	1.385	1.127
82-Pb	1.175	1.186	0.983	0.982	0.969	1.007	0.953	0.840	0.822	0.815	0.786	0.817	1.350	1.092
83-Bi	1.144	1.155	0.952	0.955	0.939	0.977	0.926	0.814	0.796	0.790	0.761	0.791	1.317	1.058
84-Po	1.114	1.125	0.922	0.929	0.909	0.948	0.900	0.788	0.772	0.765	0.736	0.765	1.283	1.024
85-At	1.085	1.097	0.894	0.905	0.881	0.919	0.875	0.763	0.747	0.740	0.713	0.741	1.256	0.997

Séries L (en Å) [3/3]

Raie	α_1	α_2	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_6	l	η
Transition Electronique														
$L_3 \leftarrow$	M_5	M_4		N_5			O_4, O_5						M_1	
$L_2 \leftarrow$			M_4					N_4				O_4		M_1
$L_1 \leftarrow$					M_3	M_2			N_2	N_3	O_3			
Intensité relative approx.	100	10	80	30	3	2	2	10	1	2	1	1	5	2
86-Rn	1.057	1.069	0.866	0.881	0.854	0.892	0.852	0.739	0.725	0.718	0.692	0.717	1.233	0.968
87-Fr	1.030	1.042	0.840	0.858	0.828	0.867	0.829	0.716	0.703	0.696	0.670	0.695	1.199	0.938
88-Ra	1.005	1.017	0.814	0.836	0.803	0.841	0.807	0.694	0.682	0.675	0.649	0.673	1.167	0.908
89-Ac	0.980	0.992	0.789	0.814	0.778	0.816	0.786	0.671	0.662	0.665	0.630	0.653	1.144	0.882
90-Th	0.956	0.968	0.766	0.794	0.755	0.793	0.765	0.653	0.642	0.635	0.611	0.632	1.115	0.855
91-Pa	0.933	0.945	0.742	0.774	0.732	0.770	0.746	0.634	0.624	0.617	0.594	0.613	1.091	0.830
92-U	0.911	0.923	0.720	0.755	0.710	0.748	0.726	0.615	0.605	0.598	0.577	0.595	1.067	0.800
93-Np	0.889	0.901	0.698	0.736	0.689	0.727	0.708	0.597	0.587	0.581	0.558	0.577	1.043	0.781
94-Pu	0.869	0.880	0.678	0.720	0.669	0.707	0.691	0.579	0.571	0.564	0.542	0.560	1.023	0.759
95-Am	0.849	0.860	0.658	0.701	0.649	0.686	0.674	0.562	0.554	-	-	0.543	-	-
96-Cm	0.829	0.841	0.639	0.685	-	-	-	0.546	-	-	-	-	-	-
97-Bk	0.810	0.822	0.621	0.699	-	-	-	0.530	-	-	-	-	-	-
98-Cf	0.792	0.804	0.603	0.653	-	-	-	0.515	-	-	-	-	-	-