



HAL
open science

Spectres d'émission X et structure électronique des alliages Al-Cu et Al-Ni

J. Farineau

► **To cite this version:**

J. Farineau. Spectres d'émission X et structure électronique des alliages Al-Cu et Al-Ni. Journal de Physique et le Radium, 1939, 10 (7), pp.327-332. 10.1051/jphysrad:01939001007032700 . jpa-00233680

HAL Id: jpa-00233680

<https://hal.science/jpa-00233680>

Submitted on 4 Feb 2008

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.

LE JOURNAL DE PHYSIQUE

ET

LE RADIUM

SPECTRES D'ÉMISSION X ET STRUCTURE ÉLECTRONIQUE
DES ALLIAGES Al-Cu ET Al-Ni

Par J. FARINEAU.

Physique expérimentale, Institut de Physique, Liège (Belgique).

Sommaire. — Cet article a pour objet l'étude expérimentale de la répartition de l'intensité dans les bandes d'émission X dues aux électrons extérieurs des atomes d'aluminium (raie $K\beta_1$) et de nickel ou de cuivre (raie $L\alpha$), dans les alliages nickel-aluminium et cuivre-aluminium ainsi que les renseignements qu'on peut en déduire sur la structure électronique de ces alliages. Différentes particularités qui dépendent de la composition de l'alliage sont mises en évidence. Les résultats expérimentaux sont discutés à l'aide des caractéristiques physiques de ces alliages et de la théorie quantique des métaux. Cette théorie, qui dans le cas présent ne donne le plus souvent que des renseignements qualitatifs est en accord avec l'expérience. En particulier, les zones de Brillouin semblent encore exister dans ce cas. Des indications sont aussi fournies sur la localisation des électrons.

Introduction. — On sait que, dans un métal pur ou un alliage, les électrons extérieurs des atomes composant le corps solide ont des énergies qui sont réparties à l'intérieur de raies larges, ou bandes, ayant une largeur de plusieurs électron-volts. Lorsque ces électrons tombent sur un niveau profond, ils émettent un rayonnement X. L'étude de la répartition de l'intensité à l'intérieur des bandes larges ainsi émises donne des renseignements sur la répartition des électrons entre les différentes énergies : En effet, si $N(E) dE$ est le nombre d'électrons d'énergie comprise entre E et $E + dE$, et si $p(E)$ est la probabilité de passage d'un de ces électrons sur un niveau intérieur, la raie émise par ces électrons, passant sur ce niveau, a une intensité proportionnelle à $p(E) N(E) dE$. De cette intensité mesurée expérimentalement on pourra déduire $N(E)$ si l'on connaît $p(E)$. Cette fonction n'est malheureusement donnée par la théorie quantique des métaux que dans quelques cas particuliers. Rappelons toutefois que les raies larges d'émission se décomposent en bandes chevauchant les unes sur les autres et dont chacune correspond à une « zone de Brillouin ». De plus, pour une raie K , l'intensité émise est proportionnelle, dans la majeure partie de la première

zone de Brillouin, à $(E - E_0)^{3/2}$, où E_0 désigne l'énergie du début de la zone. Nous n'insisterons pas sur ces résultats en renvoyant pour cela à [1] pour le problème des bandes d'émission, et au traité de Mott et Jones [2] pour la définition, les propriétés et le calcul des zones de Brillouin. Différents métaux purs ont été étudiés par cette méthode, par nous-même [1] dans la région 6-20 Å, et par O'Bryan et Skinner [3] dans l'ultraviolet extrême. Des raies analogues à celles étudiées par ces auteurs ont été aussi photographiées récemment par différents chercheurs tels Gwinner [4] (1).

On sait que dans les alliages, les électrons extérieurs des métaux composant cet alliage sont « mis en commun » d'une façon plus ou moins parfaite. Dans le cas des alliages magnésium-aluminium que nous avons étudiés [1], cette mise en commun est à peu près complète. Les raies dues aux électrons de conductibilité sont à peu près identiques dans le spectre de l'aluminium et du magnésium. Les raies ne sont plus identiques lorsque les métaux composant l'alliage sont assez éloignés dans le

(1) Voir l'exposé d'ensemble de Skinner (*Reports on Progress in Physics*, 1939, 5, p. 237 (Note ajoutée à la correction.)

tableau de Mendeleïeff et lorsqu'il s'agit d'électrons qui ne sont plus les électrons de conductibilité, c'est ce qui a été montré par Skinner et Johnson [5] pour les raies L de certains alliages beryllium-cuivre et par nous-même en collaboration avec M. Morand pour les alliages nickel-cuivre [6]. Ces dernières recherches ont mis en évidence le comportement différent des atomes de Ni et de Cu qui sont pourtant voisins dans la classification périodique.

Dans le présent article nous étudions les alliages d'aluminium avec le cuivre ou le nickel. L'aluminium possède 3 électrons de conductibilité par atome, dont les énergies, à l'état pur, sont réparties dans une bande de largeur 12 eV environ [1]. Le cuivre et le nickel purs possèdent respectivement 1 et 0,6 électron de conductibilité. Mais, ainsi que l'a établi théoriquement Mott [2] et ainsi que nous l'avons vérifié expérimentalement, les électrons 3 d de ces derniers métaux occupent une bande d'énergie ayant une largeur de 7 et de 6 eV [1] qui recouvre la bande d'énergie occupée par les électrons 4 s . De sorte que les raies dues aux électrons 3 d et 4 s se recouvrent, la majeure partie de l'intensité étant due aux électrons 3 d .

Ce sont les modifications de la raie $K \beta_x$ de l'aluminium (raie due aux électrons de conductibilité) et des raies $L \alpha$ du cuivre et du nickel (raies dues aux électrons de conductibilité et aux électrons 3 d de Cu et Ni) que nous avons étudiées en faisant varier la composition des alliages.

Méthode expérimentale. — De même que dans nos recherches précédentes [1, 6] nous avons employé un spectrographe dans le vide à cristal courbé sur un cercle de 36 cm de rayon utilisant soit le quartz (raie de l'aluminium), soit le mica (aluminium, cuivre, nickel). Les raies, une fois photographiées, étaient étudiées au microphotomètre enregistreur et l'intensité était déduite de ces enregistrements à l'aide de la courbe de sensibilité des films utilisés, courbe que nous avons déterminée précédemment [1]. Le vide était fait dans l'appareil à l'aide d'une pompe à diffusion de vapeur d'huile. Le vide était encore amélioré par la présence d'un piège à air liquide. Les anodes sont restées toujours rigoureusement propres, même pendant les poses de 4 h utilisées pour des alliages à très faible teneur; jamais la moindre trace d'altération de la surface du métal bombardé n'est apparue. Nous sommes donc certains d'avoir obtenu dans ces conditions les raies des alliages eux-mêmes et non les raies des combinaisons des métaux avec les produits déposés sur l'anode par condensation. Les précautions prises pour avoir un bon vide, qui sont absolument nécessaires, rendent les manipulations assez longues. Il faut, en effet, une journée entière pour faire un cliché, même avec un temps de pose de quelques minutes. Plusieurs clichés ont été pris pour chaque alliage.

ALLIAGES ALUMINIUM-CUIVRE.

1. Résultats expérimentaux. — La raie $K \beta_x$ de l'aluminium dans certains de ces alliages a déjà été étudiée récemment par Yoshida [7] à l'aide d'un spectrographe à cristal tournant. Ses résultats sont assez différents de ceux auxquels nous sommes arrivés nous-mêmes, probablement par suite du faible pouvoir séparateur et de la faible luminosité du spectrographe employé par cet auteur. De plus les précautions que nous avons prises pour avoir une anode non souillée ainsi que la constance des résultats obtenus nous permettent de penser que les courbes que nous donnons sont très voisines des courbes réelles.

Nous avons étudié les alliages suivants, dont les compositions sont données en atomes d'aluminium : 100, 96, 92, 82, 66, 49, 35 et 19 pour 100.

Les courbes d'intensité de ces alliages sont données dans la figure 1 pour la raie $K \beta_x$ de l'aluminium et dans la figure 2 pour la raie $L \alpha$ du cuivre.

2. Interprétation des résultats. — *a. Pour la raie $K \beta_x$.* conformément à la théorie, l'intensité au voisinage du bord de grande longueur d'onde est à peu près proportionnelle à $(E - E_0)^{3/2}$ de même que pour

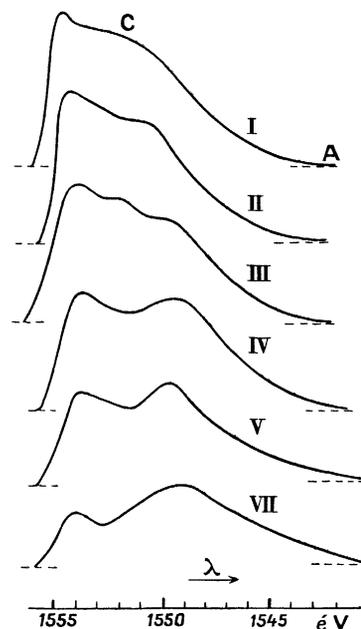


Fig. 1. — Raie $K \beta_x$ de Al dans les alliages Al-Cu.

I, 100 pour 100 de Al; II, 82 pour 100; III, 66 pour 100; IV, 49 pour 100; V, 35 pour 100; VI, 19 pour 100.

le métal pur. On remarque toutefois, que le début de la raie à cet endroit est extrêmement difficile à fixer avec exactitude, et que la raie semble s'étendre assez loin du côté des grandes longueurs d'onde,

avec une intensité très faible (1); il semble certain que cette raie s'étend nettement plus loin que la limite théorique qui correspondrait à une courbe d'intensité proportionnelle à $(E - E_0)^{3/2}$ (point A de la figure 1).

b. Le diagramme Cu Al est bien connu. Les principaux constituants de ce diagramme sont la phase η (96 pour 100 d'Al), les alliages de formule Cu Al^2 et Cu Al, la phase γ qui se présente aux environs de 35 pour 100 d'Al, et la phase α (pour moins de 20 pour 100 d'Al).

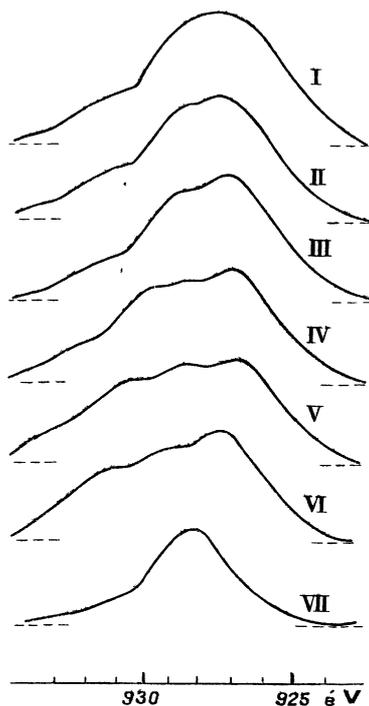


Fig. 2. — Raie $L \alpha$ de Cu dans les alliages Al-Cu.

I, 0 pour 100 de Al; II, 19 pour 100; III, 35 pour 100; IV, 49 pour 100; V, 60 pour 100; VI, 82 pour 100; VII, 96 pour 100.

Ainsi que nous l'avons rappelé dans l'introduction, la théorie moderne des alliages admet que les électrons de valence des constituants sont mis en commun, chaque atome d'Al fournissant 3 électrons et chaque atome de Cu 1 électron seulement. Un alliage contenant $100x$ atomes d'Al pour 100 aura donc, en moyenne, par atomes, $2x + 1$ électrons de conductibilité.

Nous allons examiner chacun des alliages étudiés en calculant approximativement, par les formules de l'approximation des électrons libres, ainsi qu'on a coutume de le faire, les énergies correspondant aux diverses zones de Brillouin. Rappelons que l'énergie qui correspond au maximum du nombre d'électrons

d'énergie donnée, dans une zone, est égale à

$$\frac{h^2}{2m} d^2,$$

d étant la plus petite distance de l'origine aux plans limitant la zone considérée et m la masse de l'électron, en prenant pour zéro d'énergie, l'énergie minima des électrons de conductibilité. L'énergie donnée par cette formule correspond en général à un maximum d'intensité dans la bande d'émission [1].

Nous allons dans la suite calculer, avec Mott et Jones [2], les zones de Brillouin en admettant que les plans qui ont un facteur de structure nul ne correspondent à aucune zone. Lorsque les atomes sont répartis au hasard dans le réseau, on peut admettre, pour calculer ce facteur de structure, que le réseau est formé d'atomes identiques; les discontinuités d'énergie à la limite des zones de Brillouin ainsi négligées, qui seraient exactement nulles si tous les atomes étaient identiques, sont sûrement très faibles et ne doivent perturber que d'une façon très petite la répartition des électrons en fonction de l'énergie.

Rappelons [1] que la raie du cuivre pur est due à la superposition des raies émises par les électrons $3d$ et $4s$, alors que la partie située du côté des courtes longueurs d'onde (grandes énergies) du point B, est due à des atomes de cuivres ionisés.

La raie de l'aluminium est due à la superposition des électrons de deux zones : la première, seule complète, est responsable du maximum situé au point C. Le bord net du côté des courtes longueurs d'onde indique que la deuxième zone est incomplètement remplie.

Alliage à 19 pour 100 d'Al. — Cet alliage est une solution solide de première espèce où certains atomes de cuivre, dans le réseau de cuivre sont remplacés par des atomes d'Al : Le réseau est cubique à faces centrées, d'arête $a = 3,6 \text{ \AA}$.

La première zone de Brillouin est limitée par les plans 111 et 200 qui correspondent à des distances de l'origine respectivement égales à $\frac{\sqrt{3}}{2a}$ et $\frac{1}{a}$. Les énergies correspondantes sont approximativement 8,6 et 11,5 eV. Si la première zone était entièrement remplie elle contiendrait 2 électrons par atome, or l'alliage étudié n'en contient que 1,38.

La courbe d'intensité de la raie $K \beta_1$ montre que les électrons sont répartis en deux zones. Il semble donc probable que seule une partie de la première zone, de l'ordre de la moitié, soit remplie, le surplus des électrons étant dans la deuxième zone.

La raie du cuivre présente peu de différence avec celle du métal pur, à part une légère augmentation de l'intensité du côté des courtes longueurs d'onde, due à l'augmentation du nombre d'électrons de conductibilité par rapport au cuivre pur.

(1) SKINNER m'a signalé ce fait, pour la raie L de Al pur, il y a un certain temps déjà.

Alliage à 35 pour 100 d'Al. — Cet alliage est l'alliage γ , appelé quelquefois δ , qui cristallise dans le système du laiton γ : sa cellule est cubique et contient 52 atomes [9]. Elle a pour arête $a = 8,7 \text{ \AA}$. Les zones de Brillouin ont été déterminées par Mott et Jones pour la structure γ en général. Les seules qui aient une importance sont formées la première par les plans 222, la deuxième par les plans 330 et 411. La distance de l'origine aux plans entourant la première zone est $\frac{\sqrt{3}}{a}$, ce qui correspond à une énergie de 6,2 eV. La distance aux plans limitant la deuxième zone est $\frac{3\sqrt{2}}{2a}$, ce qui correspond à une énergie de 9,4 eV. La zone limitée par les plans 330 et 411 qui a une forme assez voisine d'une sphère contient 1,731 électron par atome, alors que notre alliage en contient 1,70. Cette zone est donc presque remplie complètement, et le maximum de densité électronique doit être très voisin du bord de grande énergie. *On doit donc s'attendre à observer deux maximums vers 6,2 et vers 9,4 eV.* La forme que la théorie prévoit pour la bande d'émission $K \beta_x$ est donc tout à fait semblable à celle de notre raie expérimentale; seuls les valeurs numériques qui ne peuvent d'ailleurs être que grossièrement approchées sont différentes : l'expérience donne en effet 7,5 et 11,5 eV au lieu de 6,2 et 9,4 eV. La concordance est donc assez bonne. On voit, de même que précédemment, qu'il y a une légère augmentation de l'intensité de la raie du cuivre, du côté des grandes énergies, correspondant à un accroissement du nombre d'électrons de conductivité.

Alliage à 49 pour 100 d'Al. — Cet alliage cristallise dans un système orthorhombique mal connu contenant 32 atomes par cellule. Il contient en moyenne 2 électrons de conductivité par atome. La structure de cet alliage étant mal connue, on ne peut déterminer les zones de Brillouin. La raie $K \beta_x$ a cependant de grands rapports avec celle de l'alliage à 35 pour 100.

Alliage à 66 pour 100 d'Al (Cu Al²). — Cet alliage cristallisé dans un système quadratique [9] d'arêtes $a = 6,05 \text{ \AA}$, $c = 5,04 \text{ \AA}$, et contenant 12 atomes par cellule.

Les plans ayant un grand facteur de structure, et qui par conséquent doivent limiter une zone de Brillouin importante sont les plans indiqués dans le Tableau ci-dessous :

	1 ^{re} zone.		2 ^e zone.		3 ^e zone.	
Plans	200	002	112	220	202	222
Énergies en eV . . .	4,2	6,1	8,3	8,6	10,4	14

On peut donc s'attendre à trouver dans la bande d'émission $K \beta_x$ trois maximums. Le premier situé vers 5 ou 6 eV, le deuxième vers 8,5 eV, le troisième vers 11 eV, très près du bord de courte longueur

d'onde. Cet aspect est bien celui qu'on observe sur la raie $K \beta_x$.

Alliage à 82 pour 100. — Cet alliage correspond à l'eutectique du mélange Cu Al², phase η . La raie $K \beta_x$ de Al est intermédiaire entre celle de Cu Al² et celle de l'aluminium pur qui n'est pas différenciable de celle de la phase η .

Alliage à 96 pour 100 d'Al. — Cet alliage qui est dans la phase η a été étudié récemment par Guinier [10] qui a montré que par vieillissement, le cuivre se rassemblait en *petits cristaux plans*. Ce vieillissement ne peut guère être décelable sur nos clichés : en effet, Mott [18] estime que dans le cas du laiton γ la différence d'énergie entre l'ordre et le désordre est inférieure à 0,04 eV par atome, ce qui est inférieur au pouvoir séparateur de notre méthode qui ne permet pas de déceler des variations d'énergie inférieures à 1/4 d'électronvolt. De plus quelles que soient les précautions prises, il est certain que la surface bombardée par les électrons et qui émet les rayons X est à une température assez élevée peut-être de l'ordre de 100°. Le vieillissement doit donc se faire entièrement pendant une pose de 4 h, nécessaire pour obtenir une raie du cuivre intense. *La raie de l'aluminium est tout à fait la même que celle du métal pur. La raie du cuivre est différente de celle des alliages précédents; on ne voit plus une augmentation de l'intensité du côté des courtes longueurs d'onde, due à l'augmentation du nombre d'électrons de conductivité. La raie ressemble à la raie du cuivre pur, la partie due aux atomes non ionisés qui nous intéresse seule, est toutefois plus étroite dans ce cas que dans le cas du cuivre pur.* Ceci est tout à fait conforme à ce qu'on pourrait attendre à la suite du résultat de Guinier : si le cuivre se rassemble en petits cristaux plans, la répartition électronique dans ces cristaux doit être assez voisine de celle du métal cristallisé dans un réseau à trois dimensions; comme chaque atome de cuivre a moins de voisins dans un réseau plan que dans un réseau à trois dimensions, les niveaux électroniques doivent être moins élargis que dans un réseau à trois dimensions.

L'alliage à 92 pour 100 donne des résultats très voisins de celui de 96 pour 100 et intermédiaires entre celui à 96 pour 100 et celui à 82 pour 100.

Comparaison des différents alliages et conclusion. — De la comparaison des courbes données dans les figures 1 et 2, il résulte d'abord que *la raie de Al a toujours sensiblement les mêmes largeurs*, et que les variations de structure de cette raie se font d'une *façon continue*. La structure de cette raie s'interprète bien en admettant suivant la théorie de Jones que tous les électrons de conductivité sont mis en commun et sont répartis à l'intérieur de zones de Brillouin. Toutes les fois où la structure du cristal nous a permis de déterminer les zones de

Brillouin, l'allure de la courbe d'intensité concorde bien avec ce qu'on peut déduire de ces zones.

La raie du cuivre se comporte différemment : lorsque la teneur en aluminium augmente, la raie s'élargit du côté des courtes longueurs d'onde, mais elle ne semble jamais être aussi large que celle de Al; on ne voit jamais de bord net comme sur la raie de Al; s'il existait, ce bord se verrait malgré les satellites qui se trouvent sur le bord de grande énergie de la raie. Pour les faibles teneurs en cuivre, la raie redevient semblable à celle du cuivre pur. Il résulte de tout ceci que la répartition des électrons de conductivité dans l'espace n'est pas la même autour des ions Al et des ions Cu, bien que ces électrons soient répartis en fonction de l'énergie à peu près comme des électrons libres. En effet, la raie du cuivre devrait avoir, sans les satellites, la même largeur que la raie de l'aluminium. Or il semble bien que la partie la plus intense de la raie, qui est due aux atomes neutres, a une largeur qui ne dépasse jamais 8 à 9 eV alors que la raie de l'aluminium a toujours au moins 12 eV. Il est remarquable que pour les teneurs en aluminium inférieures à 82 pour 100 la partie de la raie située aux environs de 930 eV augmente d'intensité avec la teneur en aluminium. Il semble donc logique de penser que cette partie de la raie est surtout due aux électrons de conductivité qui correspondent à la partie de la raie de Al ayant une intensité maxima, c'est-à-dire aux électrons d'énergie maxima. Il semblerait donc dans ce cas que les électrons de faible énergie cinétique ne pénètrent pas dans l'atome Cu, mais qu'ils restent de préférence près des ions Al.

ALLIAGE Al-Ni.

La raie $K \beta_x$ de Al est donnée pour ces alliages dans la figure 3, celle de Ni (L_α) dans la figure 4. Remarquons que, de même que pour les alliages Cu Al, les électrons de conductivité ne semblent pas tous pénétrer dans les atomes de Ni. La raie de Ni devient symétrique. On ne voit pas apparaître une bande ayant 12 eV environ de largeur que l'on pourrait attendre si les électrons de conductivité étaient disposés librement dans le cristal.

La caractéristique essentielle de la raie de Al est que le bord de courte longueur d'onde devient de moins en moins net, à mesure qu'on augmente la teneur en nickel de l'alliage.

Le seul alliage dont on connaît la structure cristalline est l'alliage à 50 pour 100 qui cristallise dans le système cubique à corps centré, d'arête $a = 2,82 \text{ \AA}$.

La première zone de Brillouin est limitée par les plans 110. La plus petite distance de l'origine à un de ces plans est $\frac{1}{\alpha\sqrt{2}}$, ce qui correspond à une

énergie de 9,7 eV pour l'intensité maxima de la raie. Expérimentalement ce maximum est à 8,5 eV du bord de faible énergie. Les deux valeurs sont donc en excellent accord. Cette zone complète conten-

drait 2 électrons par atome. Pour connaître le nombre exact d'électrons de conductivité il faudrait savoir si cet alliage est ferromagnétique ou non. Les

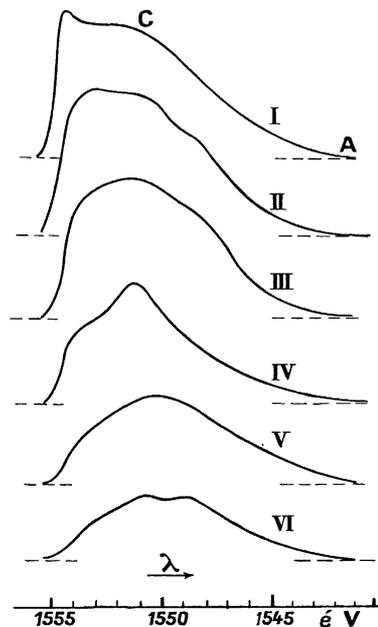


Fig. 3. — Raie $K \beta_x$ de Al dans les alliages Ni-Al.

I, 0 pour 100 de Ni; II, 11 pour 100; III, 32 pour 100; IV, 52 pour 100; V, 65 pour 100; VI, 82 pour 100.

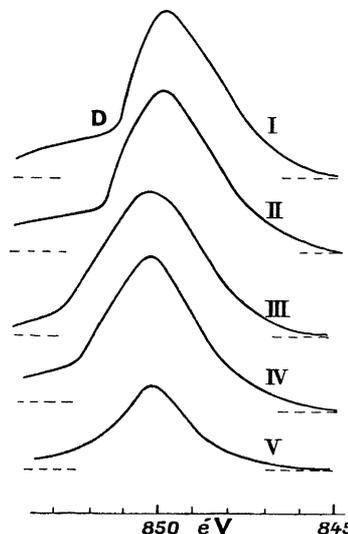


Fig. 4. — Raie $L \alpha$ de Ni dans les alliages Al-Ni.

I, 100 pour 100 de Ni; II, 82 pour 100; III, 52 pour 100; IV, 32 pour 100; V, 11 pour 100.

La partie de la raie située à gauche de D est due à des atomes ionisés (satellites).

mesures magnétiques de Chevenard [C. F. 9] ne portent que sur des alliages contenant moins de 22 pour 100 d'Al. Ce dernier alliage est d'ailleurs encore ferroma-

gnétique, son point de Curie est au-dessous de 0° C. L'alliage Al-Cu a donc un ferromagnétisme nul ou très faible. Les atomes de nickel ont, très probablement, une couche 3 *d* complète dans cet alliage. De plus, puisque les alliages ayant une teneur en nickel de l'ordre de 22 pour 100 sont ferromagnétiques, c'est que les électrons de conductivité ont une énergie maxima qui est voisine de l'énergie maxima de la couche 3 *d* du métal; ces électrons sont donc répartis comme l'indique la figure 5.

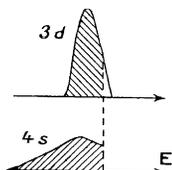


Fig. 5. — Schéma de la répartition des électrons 3 *d* du nickel et des électrons de conductivité pour un alliage riche en nickel.

Pour un alliage riche en aluminium la bande 3 *d* serait au contraire complètement remplie.

Les atomes de nickel ayant leur couche 3 *d* complète ont alors une configuration de gaz rare et forment un ensemble électriquement neutre; un électron de conductivité ne pourra pénétrer que difficilement dans un tel atome, alors qu'il sera attiré par les ions Al, ce qui explique pourquoi on ne trouve pas de traces de la raie due aux électrons de conductivité tombant sur un niveau *L* du nickel.

Les atomes de Ni ne fournissant aucun électron de conductivité, et les atomes de Al en fournissant 3, il y a en moyenne 1,5 électron par atome, les électrons sont donc répartis dans la première zone qu'ils ne remplissent pas complètement. Remarquons

pour terminer que le silicium dont les électrons remplissent complètement une zone de Brillouin, qui est la même que celle de Ni Al, a une raie *K* de forme très voisine de celle de la raie de Al dans l'alliage considéré [1].

En résumé on peut interpréter les résultats expérimentaux en disant que dans les alliages Ni-Al, les électrons de conductivité sont rassemblés autour des ions Al et ne pénètrent que peu dans les atomes de Ni. Ce résultat est tout à fait différent de celui que nous avons trouvé précédemment [1] pour les alliages Al-Mg.

Les alliages que j'ai étudiés m'ont été aimablement fournis par les établissements Alais, Froges et Camargue, sauf celui à 96 pour 100 d'Al qui m'a été donné par mon camarade Guinier. Je suis heureux de les remercier ici de leur amabilité. Je remercie aussi M. Morand, Professeur à l'Université de Liège, dans le Laboratoire de qui ce travail a été effectué, pour l'intérêt qu'il a constamment porté à ces recherches et pour les conseils qu'il m'a donnés.

Manuscrit reçu le 20 février 1939.

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] FARINEAU, *Ann. de Physique*, 1938, **10**, p. 20.
- [2] MOTT et JONES, *Theory of the properties of metals and alloys*, Oxford, 1938.
- [3] O'BRYAN et SKINNER, *Phys. Rev.*, 1934, **45**, p. 370.
- [4] GWINNER, *Zeit. für Physik.*, 1938, **108**, p. 523.
- [5] SKINNER et JOHSON, *Proc. Phil. Soc.*, Cambridge, 1938, **34**, p. 111.
- [6] FARINEAU et MORAND, *J. de Physique*, 1938, **9**, p. 447.
- [7] YOSHIDA, *Scientific papers*, Tokio, 1936, p. 243.
- [8] MOTT, *Proc. Roy. Soc.*, 1937, **49**, p. 258.
- [9] *Handbuch der Metall Physik*, Leipzig, 1935.
- [10] GUINIER, *Nature*, 1938, p. 569.