



**HAL**  
open science

## Démonstration optique de la diffraction des électrons

Jean J. Trillat

► **To cite this version:**

Jean J. Trillat. Démonstration optique de la diffraction des électrons. Journal de Physique et le Radium, 1939, 10 (11), pp.465-469. 10.1051/jphysrad:019390010011046500 . jpa-00233705

**HAL Id: jpa-00233705**

**<https://hal.science/jpa-00233705>**

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.

# DÉMONSTRATION OPTIQUE DE LA DIFFRACTION DES ÉLECTRONS

Par M. JEAN J. TRILLAT.

Institut de Physique de Besançon.

**Sommaire.** — On décrit une méthode qui permet de matérialiser optiquement les divers types de diagrammes de diffraction d'électrons, en utilisant des modèles de réseaux réciproques convenablement éclairés.

On indique ensuite quelques applications à des travaux antérieurs de l'auteur, sur la diffraction des électrons par les métaux. Les résultats confirment entièrement les hypothèses qui avaient été faites; la méthode présente en outre un intérêt pour la démonstration et l'enseignement.

**Principe de la méthode.** — Le phénomène de la diffraction des électrons, étudié maintenant dans de nombreux laboratoires, constitue certainement l'une des plus belles expériences de la Physique moderne. Sa mise en œuvre nécessite malheureusement un outillage assez compliqué et coûteux, et il est difficile de réaliser des démonstrations en dehors du laboratoire, à moins d'utiliser des appareils spéciaux tels que celui que nous avons réalisé à l'occasion de l'Exposition internationale de 1937 [1].

Il existe un autre moyen, moins direct il est vrai, de matérialiser en quelque sorte la diffraction des électrons par des substances cristallisées ou orientées; ce moyen, qui fait appel à des notions de cristallographie, a été décrit en 1936 par W. G. Burgers et J. A. Ploos van Amstel [2].

Résumons-en rapidement le principe :

On sait, et nous ne le démontrerons pas ici, que l'image de diffraction obtenue sur le diagramme électronique est géométriquement semblable à la configuration du plan réticulaire  $(hkl)$  du réseau polaire, agrandie suivant le rapport  $\frac{D_i}{1}$ , le pinceau d'électrons incident étant parallèle à la direction  $(hkl)$  du cristal examiné [3]. Ce résultat s'obtient à partir des considérations bien connues d'Ewald [4], de Mauguin [5] et de V. Laue [6], qui permettent d'interpréter les diagrammes de rayons X, en remarquant que, pour les très courtes longueurs d'onde associées à des électrons de 30 à 40 kV (0,069 à 0,048 Å), la « sphère d'extension » de Laue peut être remplacée par un plan, perpendiculaire à la direction du faisceau électronique incident.

Autrement dit, si les points diffractants du plan  $(hkl)$  du réseau réciproque étaient visibles, et ceux-là seulement, on obtiendrait une image ayant le caractère géométrique du diagramme électronique réel en regardant ce plan  $(hkl)$  suivant une direction perpendiculaire.

On peut montrer cela d'une façon peut-être plus intuitive. On sait qu'étant donnée la petitesse des longueurs d'onde associées aux électrons rapides, l'angle de réflexion intervenant dans la formule de Bragg :

$\lambda = 2d \sin \theta$  est très petit [environ  $1^\circ$  pour les réflexions sur les faces (200) d'un cube élémentaire

de Pt ou Au]. Donc, pour pouvoir réfléchir des ondes associées à des électrons de 30 à 50 kV, les plans réticulaires devraient être parallèles, ou presque parallèles, à la direction du faisceau incident.

Considérons par exemple un cube élémentaire à faces centrées disposé de façon qu'une rangée [200] (arête du cube) soit parallèle à la direction du faisceau incident. On voit immédiatement, sur la figure 1, que les faces (020) et (002) du cube parallèles à cette direction, et perpendiculaires au plan de la figure, réfléchiront les électrons.

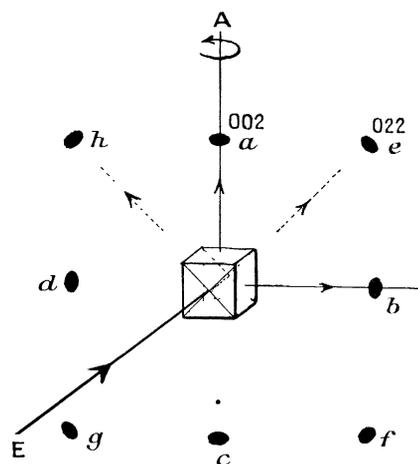


Fig. 1.  
E, direction des électrons incidents.

On obtiendra donc quatre faisceaux électroniques réfléchis, dont les traces sur une plaque photographique située derrière le cristal seront  $a, b, c, d$ . Les plans (022) et (0 $\bar{2}2$ ) (plans diagonaux perpendiculaires au plan de la figure) réfléchiront également les électrons incidents, en  $e, f, g, h$ . Il est facile de montrer que, dans un réseau cubique à faces centrées, les plans parallèles aux plans diagonaux du cube étant plus serrés que les plans parallèles aux faces du cube, les taches de diffraction telles que  $e, f, g, h$ , seront plus écartées que les précédentes, et qu'elles se placeront au sommet d'un carré dont les côtés passent par les taches  $a, b, c, d$ . Le même raisonnement sera valable pour tous les plans parallèles à la direction d'incidence des électrons.

Le diagramme observé aura donc l'aspect représenté sur la figure 1; un autre exemple en est donné sur la figure 2. Les résultats confirment complètement cette manière de voir (comparer avec les clichés A' et E', Pl. I).

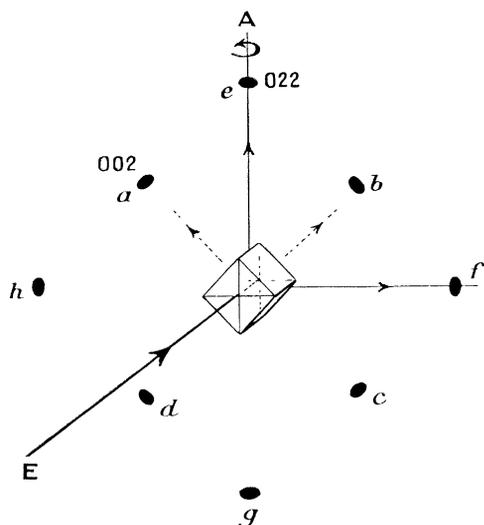


Fig. 2.  
E, direction des électrons incidents; A, axe de rotation.

Or, le diagramme théorique que nous venons de construire n'est autre chose que l'agrandissement géométrique de la configuration du plan réticulaire (200) appartenant au réseau réciproque du réseau réel.

Cette idée a été réalisée par Burgers et van Amstel [2] de la façon suivante :

Au moyen d'un projecteur, on produit un plan lumineux dans une chambre noire; dans ce plan, on dispose une représentation macroscopique d'un réseau réciproque à trois dimensions formé de points réfléchissant fortement la lumière (fig. 3).

Dans la chambre noire apparaissent alors seulement les points du réseau se trouvant dans le plan lumineux ou le traversant juste; si le réseau est fixe, ces points seront fixes; si au contraire le réseau est mobile, par exemple s'il tourne autour d'un axe cristallographique, les points n'apparaîtront qu'au moment précis de leur passage dans le plan lumineux.

La totalité des points visibles, observés perpendiculairement au plan lumineux, sera alors analogue, au point de vue géométrique, au diagramme électronique réel obtenu avec un cristal ayant des périodes d'identité en rapport avec celle du réseau réciproque utilisé, s'il est frappé par le faisceau d'électrons dans une position correspondant à celui du modèle de réseau réciproque.

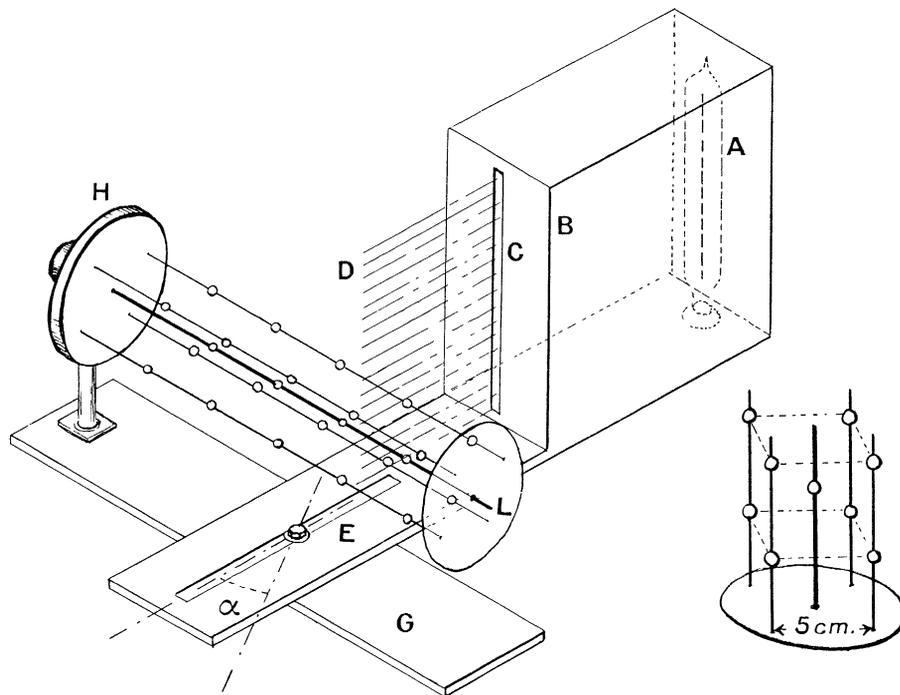
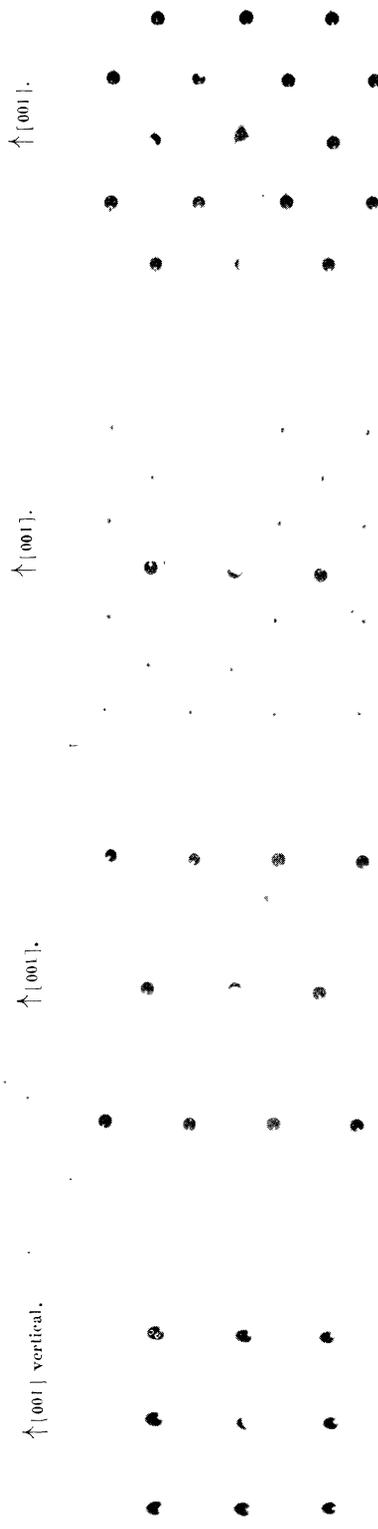


Fig. 3. — Schéma de l'appareil.

**Appareil.** — L'appareil décrit par Burgers et van Amstel a été réalisé très simplement de la façon suivante (fig. 3) : Une lampe à filament droit A est disposée à l'intérieur d'une boîte B en bois noir;

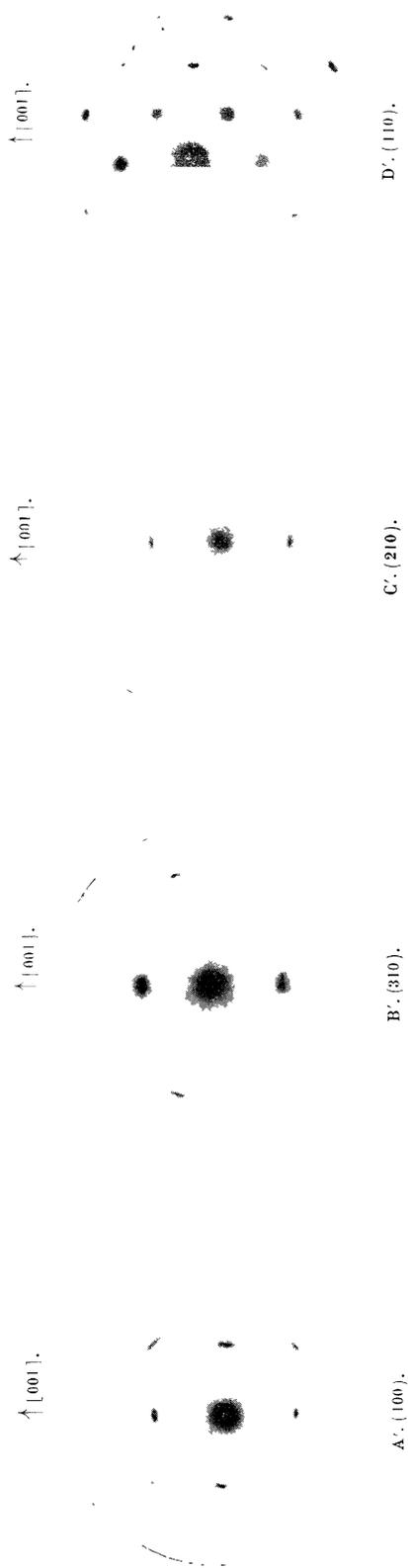
une fente réglable C délimite le plan lumineux D. La boîte est fixée sur une planche E qui peut tourner d'angles connus par rapport à une seconde planche G, qui sert à supporter les modèles de réseaux réciproques.



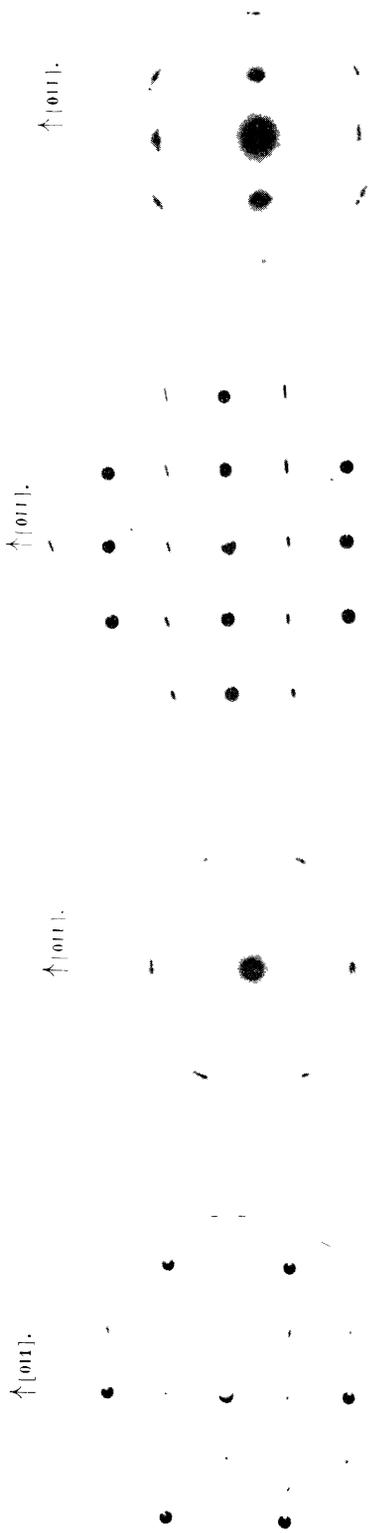
B. (310)  $\perp$  électrons,  $18^\circ 5'$ .

C. (210)  $\perp$  électrons,  $26^\circ 5'$ .

D. (110)  $\perp$  électrons,  $43^\circ$ .



H. (100)  $\perp$  électrons,  $0^\circ$ .



F. (411) 1 électrons, 49°5'.

G. (211) 1 électrons, 35° 25'

G'. (211)

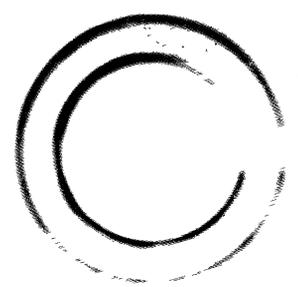


H. (311) 1 électrons.

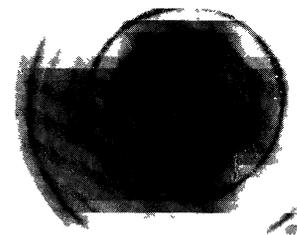
I. (111) 1 électrons.

J. Oscillation de 15° autour de [001].

J'. Diagramme électronique de structure fibreuse (J).



K. Rotation de 360°. Anneaux (200) et (220).



L. Structure fibreuse partielle, par rotation autour de [001]. Diagramme électronique.

Ces derniers sont construits au moyen de tiges parallèles de 30 cm environ de longueur, dont une extrémité est fixée dans un bloc de bois ou d'aluminium circulaire H, leur autre extrémité étant maintenue à l'aide d'une feuille transparente de celluloid ou de verre organique « Plexiglas ». Les tiges sont peintes en noir mat; les points du réseau eux-mêmes sont figurés par de la peinture blanche, ou mieux par des perles de verre opalin.

Le modèle de réseau réciproque peut tourner autour d'un axe horizontal L, le mouvement étant obtenu à la main, ou par un moteur électrique. Il est aisé de comprendre que le modèle peut être amené dans le plan lumineux, soit dans une position fixe, soit en tournant rapidement autour de l'axe L, et que son inclinaison peut être déterminée de façon que le plan lumineux passe exactement à travers un point du réseau réciproque se trouvant sur la tige centrale du modèle, ce point représentant l'origine du réseau.

J'ai cherché à utiliser cette méthode élégante dans un but de démonstration et d'enseignement, et aussi en vue de vérifier certains résultats que j'avais obtenus antérieurement [3].

**Application à l'étude des métaux.**

**Rappel des résultats antérieurs.** — Dans un travail publié en 1932 [3], j'avais, avec Th. von Hirsch, étudié la diffraction des électrons par des feuilles métalliques minces d'or et de platine. Ces feuilles donnent, en effet, de belles diffractions du type « cristal unique »; les diagrammes obtenus permettent de montrer qu'il s'agit là d'une diffraction par des réseaux à trois dimensions.

Les expériences consistent essentiellement en ceci : on prend des séries de clichés électroniques en faisant varier l'angle d'incidence entre la feuille métallique et la direction du pinceau d'électrons, la feuille tournant toujours autour d'un axe normal au pinceau électronique (fig. 4).

Le procédé expérimental est le suivant : l'appareil étant en marche, on cherche avant tout, en déplaçant la feuille métallique perpendiculairement au faisceau d'électrons, à trouver un cristal orienté de façon à avoir une direction [100] (arête du cube) normale à la feuille et une direction [001] (autre arête du cube) parallèle à l'axe de rotation du rodage supportant la préparation (fig. 4); le diagramme électronique est alors celui de la figure 1 et du cliché A' (Pl. I). Dans ces conditions, la rotation du film métallique se fait autour d'une direction parallèle à l'arête du cube (fig. 4), et c'est bien toujours le même cristal qui se trouve frappé par le pinceau d'électrons au cours de la rotation.

Les positions les plus intéressantes sont, en premier lieu, celles pour lesquelles une rangée du réseau cristallin est parallèle à la direction du faisceau d'électrons.

Si la feuille a tourné par exemple d'un angle  $\alpha = 45^\circ$  à partir de sa position primitive (normale au faisceau d'électrons), une direction [110] ou diagonale

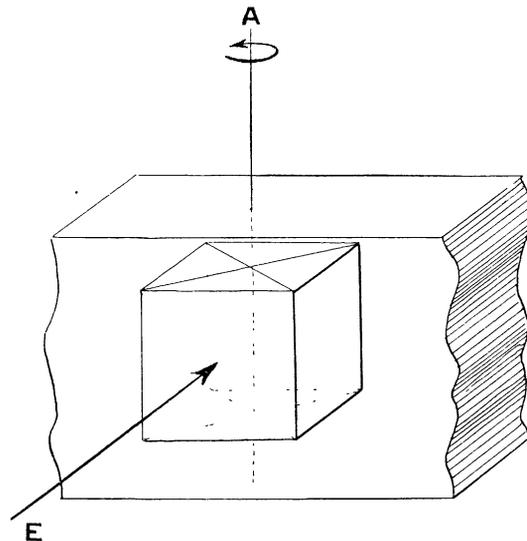


Fig. 4. — Section du film métallique avec disposition du cristal frappé par les électrons (voir aussi fig. 1).  
E, direction des électrons; A, axe de rotation [001].

de face va se trouver parallèle au pinceau d'électrons incidents. Comme on l'a vu plus haut, le diagramme de diffraction sera alors géométrique-

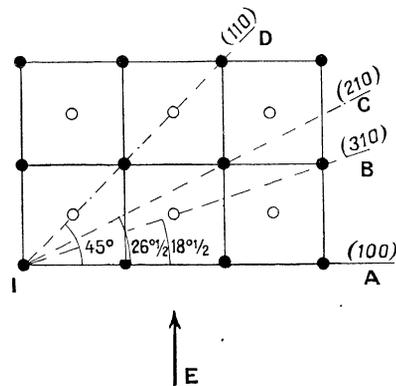


Fig. 5. — Section du réseau réciproque perpendiculairement à l'axe de rotation.

Les points noirs (nœuds des cubes) sont situés dans le plan de la figure, les cercles (centres des cubes) sont situés au-dessus du plan de la figure à une distance  $a/2$  ( $a$  = arête du cube). Les lignes pointillées sont les traces des plans qui sont successivement amenés par rotation dans une position normale au faisceau d'électrons E.

ment semblable au plan (110) du réseau polaire; ce plan sera alors normal au faisceau d'électrons. La figure 5 représente une section du réseau polaire perpendiculairement à l'axe de rotation; les diagrammes de diffraction représenteront les configurations atomiques des plans normaux à la figure, dont la trace est IA, IB, IC, ID.

La figure 6 fournit les diagrammes théoriques de diffraction pour quelques angles  $\alpha$  correspondant aux principaux plans réticulaires (partie supérieure). A la partie inférieure figurent les diagrammes théoriques qui seraient fournis pour les mêmes valeurs de  $\alpha$ ,

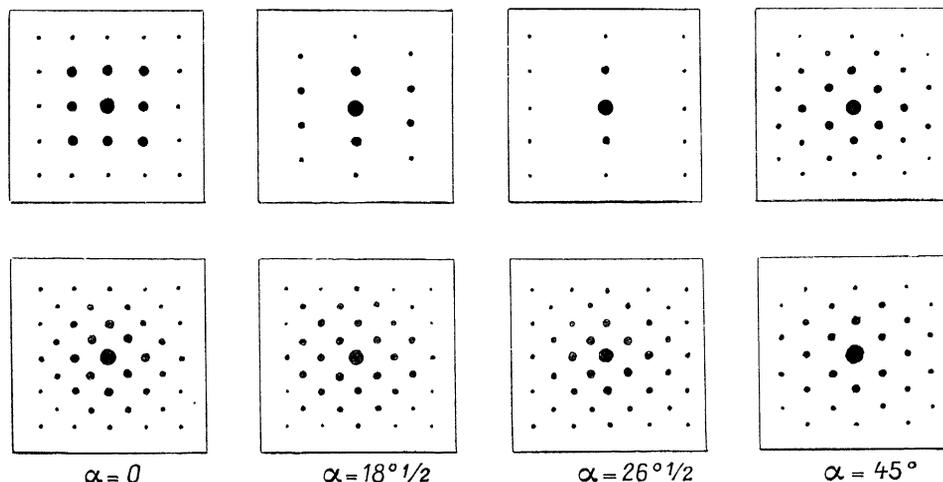


Fig. 6. — Diagrammes schématiques d'un cristal unique (cubique à faces centrées) pour divers angles  $\alpha$  de rotation à partir de la position normale.

En haut : Diffraction par un réseau à trois dimensions. — En bas : Diffraction par un réseau à deux dimensions.

La figure 6 montre immédiatement la différence entre les diagrammes donnés théoriquement par des réseaux à deux ou trois dimensions ; on voit que pour les seconds, un nombre important de taches a disparu.

Les résultats expérimentaux montrent un accord parfait avec les diagrammes théoriques donnés par les réseaux à trois dimensions, ainsi qu'il ressort de la comparaison des clichés électroniques A' B' C', D' de la planche I avec les représentations théoriques de la figure 6.

D'autres essais ont également entièrement confirmé cette conclusion. En prenant cette fois un cristal orienté toujours avec l'arête [100] du cube perpendiculaire à la surface de la feuille, mais avec la direction [011] (diagonale de face) placée suivant l'axe de rotation (fig. 2), on obtient les diagrammes E', F', G' (planche I et II), qui coïncident également exactement avec les diagrammes que l'on peut trouver théoriquement dans ce cas.

Dans toutes ces expériences, les images de diffraction apparaissent brillamment sur l'écran au sulfure de zinc lorsque l'angle  $\alpha$  a la valeur théorique prévue, et s'éteignent dès que cet angle est dépassé.

**Utilisation de la méthode du réseau réciproque éclairé.** — Les résultats précédents peuvent être confirmés et étendus en utilisant la méthode de Burgers et van Amstel; l'intérêt de cette étude réside également dans sa valeur démonstrative, qui permet de matérialiser les diagrammes électroniques devant tout un auditoire.

Les métaux examinés (Pt, Au, Ni, Al, Cu, ...) étant cubiques à faces centrées, le réseau réciproque

si le réseau étudié était seulement à deux dimensions, et ne se composait que des atomes contenus dans un seul plan réticulaire (ou, d'une façon plus générale, si l'épaisseur du film était si faible que la troisième condition d'interférence ne jouerait pas).

est un réseau cubique centré. Ce réseau est construit, comme il a été indiqué plus haut (fig. 3), au moyen de tiges noircies portant des perles translucides, celles-ci étant disposées de façon à réaliser un réseau cubique centré, ayant 5 cm de côté.

Les planches I et II (clichés A, B, C, D, E, F, G) donnent quelques exemples des figures obtenues en photographiant directement l'image optique présentée par le modèle dans différents cas, l'appareil étant disposé dans une chambre noire. Les photos sont obtenues simplement en inclinant le modèle de réseau réciproque par rapport à son axe, d'angles  $\alpha$  convenablement choisis pour amener un plan réticulaire à se trouver en entier, avec ses perles translucides, dans le plan lumineux vertical.

La Planche I représente les principaux types de diagrammes obtenus à partir d'une position définie par le cliché A, dans laquelle le plan (100) du modèle de réseau réciproque est photographié normalement à la direction de l'axe, les boules translucides formant un carré ayant ses côtés horizontaux et verticaux. Ceci correspond dans la réalité à un cristal cubique à faces centrées, orienté par rapport au faisceau d'électrons comme il est indiqué sur les figures 1 et 4, c'est-à-dire avec une direction [100] parallèle au faisceau d'électrons et une direction [001] servant d'axe de rotation.

Les clichés B, C, D sont obtenus en inclinant le modèle d'angles  $\alpha = 18^\circ 1/2$ ,  $26^\circ 1/2$  et  $45^\circ$ , ce qui a pour effet d'amener dans le plan lumineux les plans (310), (210) et (110) du modèle (fig. 5 et 6).

Les diagrammes réels, représentés en A', B', C', D' confirment entièrement les diagrammes optiques.

C'est donc là la preuve absolue qu'il s'agit bien d'une diffraction par des réseaux à trois dimensions; on peut en effet distinguer, sur certains clichés optiques (B, C), de faibles points dus à l'intersection des tiges noircies avec le faisceau lumineux; ces points, joints aux autres plus lumineux, représentent la figure qui serait observée s'il s'agissait seulement d'un réseau à deux dimensions, ce qui n'est pas le cas ici.

Les clichés E, F, G et E' F' G' sont relatifs à une autre orientation initiale, le cristal pouvant tourner autour d'une direction [011] verticale. Dans ces conditions, le faisceau d'électrons serait encore perpendiculaire à une face cubique du cristal, mais cette fois le cristal tourne autour d'une diagonale de face, suivant le schéma de la figure 2.

On a de plus représenté Planche II deux diagrammes optiques (clichés H et I) qui n'ont pu être trouvés expérimentalement, mais qui n'en existent pas moins certainement.

On voit par ces quelques exemples l'intérêt que peut présenter la méthode optique pour l'interprétation immédiate des diagrammes électroniques.

Les clichés A, J, K et A', J', K' mettent en évidence la formation de diagrammes de fibres et d'anneaux de Debye-Scherrer.

On sait qu'une structure fibreuse est constituée de petits cristaux orientés par exemple suivant une direction cristallographique déterminée; prenons le cas de cristaux cubiques tournant autour d'un axe [001] (arête du cube), celui-ci étant en outre parallèle au faisceau d'électrons incidents. Dans ces conditions les seuls plans réticulaires capables de donner lieu à une réflexion seront ceux qui seront parallèles ou à peu près parallèles à cet axe (ceci du fait que la réflexion des électrons se fait toujours, pour des électrons rapides, avec des angles extrêmement faibles) <sup>(1)</sup> (fig. 7).

Ce cas d'une structure fibreuse idéale peut également s'obtenir en faisant tourner d'une façon continue, durant la pose, le cristal autour d'une direction parallèle à la fois à l'arête du cube et au faisceau d'électrons. Les plans réticulaires qui donneront lieu à réflexion seront en premier lieu les plans (200) et (220), puis (240), etc.

L'expérience peut être réalisée très simplement en faisant tourner rapidement, dans le plan lumineux, le modèle de réseau réciproque, et en photographiant la figure obtenue, l'objectif restant ouvert un certain temps. La figure A, Planche I est relative

<sup>(1)</sup> Il n'en serait plus de même pour les rayons X, dont les longueurs d'onde et les angles de réflexion sont beaucoup plus grands.

au modèle immobile et la figure K, Planche II, au modèle animé d'un vif mouvement de rotation; les boules éclairées correspondant aux taches (200) et (220) décrivent alors deux cercles. Ce seront les anneaux (200) et (220), effectivement trouvés dans le diagramme réel K'. La figure 7 montre clairement ce phénomène.

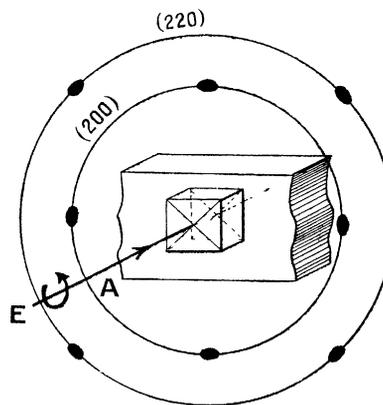


Fig. 7.

E, direction des électrons et axe de fibre.

Au lieu de taches isolées, on observe des anneaux complets.

Entre les deux cas extrêmes : cristal unique, cristal en rotation (structure fibreuse parfaite) existe toute la gamme des structures fibreuses intermédiaires, caractérisées par une oscillation du cristal autour d'une position moyenne. Ce cas peut être également obtenu en faisant osciller à la main, d'un angle de quelques degrés, le modèle éclairé; on obtient alors le diagramme optique J (Pl. II), correspondant exactement au diagramme réel donné par une feuille d'or battu (cliché J').

**Conclusion.** — La méthode optique décrite dans cet article permet donc de matérialiser très simplement les diagrammes de diffraction électronique; elle permet en outre de les rendre visibles à tout un auditoire, et aussi d'apporter une aide précieuse pour les interprétations. Elle peut apporter également une confirmation directe des théories : c'est le cas ici.

D'autres exemples d'applications ont été donnés par Burgers et van Amstel [2], et nous n'y insisterons pas ici. Je rappellerai simplement que cette méthode a permis de vérifier entièrement les hypothèses que nous avons faites sur l'orientation des molécules grasses sur certaines surfaces, et sur la réalité d'une diffraction intramoléculaire par les atomes de carbone régulièrement disposés des chaînes hydrocarbonées [7].

Manuscrit reçu le 1<sup>er</sup> mars 1939.

#### BIBLIOGRAPHIE.

- [1] J.-J. TRILLAT, *Rev. gén. d'Électr.*, 1939, t. 6, p. 183.
- [2] W. G. BURGERS et J. A. PLOOS VAN AMSTEL, *Z. Kristall.*, 1936, A, t. 95, p. 54.
- [3] J.-J. TRILLAT et Th. VON HIRSCH, *J. Physique*, mai 1932, t. 185; et *Z. für Physik*, B, 1932, t. 87, H. 11-12.
- [4] P. P. EWALD, *Z. Kristall.*, 1936, t. 93, p. 396.
- [5] Ch. MAUGUIN, *Bin. Soc. Minér.*, XLVIII, janvier-février 1926.
- [6] M. VON LAUE, *Z. Kristall.*, 1932, t. 82, p. 127.
- [7] J.-J. TRILLAT et H. MOTZ, *Ann. de Physique*, 1935, t. 4, p. 281; *Z. für Kristall.*, 1935, t. 91, p. 248.