

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- Le Conservatoire numérique communément appelé le Cnum constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](https://cnum.cnam.fr))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment possible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

| NOTICE DE LA REVUE | |
|------------------------------|--|
| Auteur(s) ou collectivité(s) | Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers |
| Auteur(s) | Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers |
| Titre | Publication : Laboratoire d'essais |
| Adresse | Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 193.-195. |
| Nombre de volumes | 125 |
| Cote | CNAM-BIB P 1329-B et P 1329-C |
| Sujet(s) | Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle |
| Note | La collection comporte des lacunes : n°24; n°58; n°63; n°67; n°76-n°77 |
| Notice complète | https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL ?PPN=261820893&RELTYPE=NT |
| Permalien | https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C |
| LISTE DES VOLUMES | |
| | N°25 (1936) |
| | N°26 (1937) |
| | N°27 (1937) |
| | N°28 (1937) |
| | N°29 (1938) |
| | N°30 (1939) |
| | N°31 (1936) |
| | N°32 (1938) |
| | N°33 (1938) |
| VOLUME TÉLÉCHARGÉ | N°34 (1938) |
| | N°35 (1938) |
| | N°36 (1938) |
| | N°37 (1938) |
| | N°38 (1938) |
| | N°39 (1938) |
| | N°40 (1939) |
| | N°41 (1939) |
| | N°42 (1939) |
| | N°43 (1939) |
| | N°44 (1939) |
| | N°45 (1938) |
| | N°46 (1940) |
| | N°47 (1940) |
| | N°48 (1940) |
| | N°49 (1940) |
| | N°50 (1940) |
| | N°51 (1941) |
| | N°52 (1941) |
| | N°53 (1941) |
| | N°54 (1941) |
| | N°55 (1942) |
| | N°56 (1942) |
| | N°57 (1942) |
| | N°59 (1942) |

| | |
|--|-------------------------------------|
| | N°60 (1941) |
| | N°61 (1942) |
| | N°62 (1943) |
| | N°64 (1943) |
| | N°65 (1943) |
| | N°66 (1943) |
| | N°68 (1943) |
| | N°69 (1943) |
| | N°70 (1943) |
| | N°71 (1943) |
| | N°72 (1944) |
| | N°73 (1943) |
| | N°74 (1944) |
| | N°75 (1944) |
| | N°78 (1944) |
| | N°79 (1944) |
| | N°80 (1944) |
| | N°81 (1944) |
| | N°82 (1944) |
| | N°83 (1944) |
| | N°84 (1944) |
| | N°85 (1944) |
| | N°86 (1945) |
| | N°87 (1945) |
| | N°88 (1945) |
| | N°89 (1945) |
| | N°90 (1945) |
| | N°91 (1945) |
| | N°92 (1945) |
| | N°93 (1945) |
| | N°94 (1945) |
| | N°95 (1946) |
| | N°96 (1946) |
| | N°97 (1946) |
| | N°98 (1944) |
| | N°99 (1945) |
| | N°100 (1945) |
| | N°101 (1946) |
| | N°102 (1946) |
| | N°103 (1946) |
| | N°104 (1946) |
| | N°105 (1946) |
| | N°106 (1946) |
| | N°107 (1947) |
| | N°108 (1947) |
| | N°109 (1947) |
| | N°110 et 111 (1947) |
| | N° 112 (1947) |
| | N° 113 (1947) |
| | N° 114 (1947) |
| | N° 115 (1947) |
| | N° 116 (1947) |
| | N° 117 (1947) |
| | N° 118 (1948) |
| | N° 119 (1948) |
| | N° 120 (1948) |
| | N° 121 (1948) |
| | N° 122 (1947) |

| | |
|--|-------------------------------|
| | N° 123 (1948) |
| | N° 124 (1948) |
| | N° 125 (1948) |
| | N° 126 (1948) |
| | N° 127 (1948) |
| | N° 128 (1948) |
| | N° 129 (1948) |
| | N° 130 (1949) |
| | N° 131 (1949) |
| | N° 132 (1949) |
| | N° 133 (1948) |
| | N° 134 (1949) |
| | N° 135 (1948) |
| | N° 136 (1949) |
| | N° 137 (1950) |
| | N° 138 (1950) |
| | N° 139 (1950) |
| | N° 140 (1950) |
| | N° 141 (1950) |
| | N° 142 (1948) |
| | N° 143 (1950) |
| | N° 144 (1950) |
| | N° 145 (1951) |
| | N° 146 (1951) |
| | N° 147 (1951) |
| | N° 148 (1951) |
| | N° 149 (1951) |
| | N° 150 (1951) |
| | N° 151 (1951) |
| | N° 152 (1951) |
| | N° 153 (1952) |
| | N° 154 (1952) |
| | N° 155 (1952) |

| NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ | |
|------------------------------------|--|
| Auteur(s) volume | Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers |
| Titre | Publication : Laboratoire d'essais |
| Volume | N°34 (1938) |
| Adresse | Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 1938 |
| Collation | 1 vol. (8 p.) : ill. ; 28 cm |
| Nombre de vues | 12 |
| Cote | CNAM-BIB P 1329-B (10) |
| Sujet(s) | Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle |
| Thématique(s) | Histoire du Cnam |
| Typologie | Revue |
| Langue | Anglais Français |
| Date de mise en ligne | 10/04/2025 |
| Date de génération du PDF | 07/02/2026 |
| Recherche plein texte | Disponible |
| Notice complète | https://www.sudoc.fr/039014541 |
| Permalien | https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B.10 |

Note de présentation du

...

P1389-B

9° Rue 107. (11)

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
LABORATOIRE D'ESSAIS



LA STRUCTURE DES
SURFACES MÉTALLIQUES

par G. A. Boutry

PUBLICATION N° 34

(Extrait de « Métaux et
Corrosion » N° 152 - Avril 1938)



LA STRUCTURE DES SURFACES MÉTALLIQUES



par G.-A. BOUTRY

*Directeur du Laboratoire d'Essais
au Conservatoire National des Arts-et-Métiers*

En Novembre et Décembre 1937 un cycle de Conférences relatives à l'étude des surfaces métalliques fut organisé par le Conservatoire National des Arts-et-Métiers. MM. Rocard, Ponte, Goldsztaub, Portevin, Nicolau, Brillié étudièrent les différentes parties de ce vaste sujet. C'est la sténographie de la Conférence d'introduction prononcée par M. Boutry que l'on trouvera ci-dessous.

1. La plupart d'entre vous connaissent les conférences d'actualités scientifiques et industrielles qu'organise chaque année le Conservatoire National des Arts et Métiers. Vous savez quel en est le but : examiner l'état présent d'un grand problème scientifique, les solutions plus ou moins bonnes qu'on en possède et leurs répercussions sur le progrès industriel. Dans les années passées, chacune des conférences prononcées ici examinait une question distincte. Nous avons pensé qu'il y avait quelque inconvénient à une telle dispersion, et c'est pourquoi les conférences d'actualités scientifiques et industrielles sont maintenant divisées en cycles, plusieurs conférences étant, dans chacun, consacrées à examiner d'une façon un peu plus profonde les différents aspects d'un même problème.

Sept conférences, dans le cycle qui s'ouvre aujourd'hui, sont ainsi réservées à l'examen, sous ses divers aspects, d'un problème d'importance capitale en mécanique; une seule question sera posée, mais d'envergure; il s'agit de savoir ce que c'est que la **surface d'un métal**, d'étudier les propriétés qui singularisent cette zone de séparation entre deux phases très distinctes, le solide métallique et conducteur, le vide ou le milieu gazeux ou liquide qui se trouve à son contact.

Au moment où je vais essayer de vous donner une vue d'ensemble d'un problème qui compte parmi les plus ardus et les plus attachants de la physique moderne, j'éprouve, je vous l'avoue, beaucoup de gêne : ma compé-

tence est bien faible devant celle des spécialistes très avertis qui vont me succéder. Parce que les phénomènes qui vont être étudiés se présentent sous de multiples aspects, cette conférence d'introduction était nécessaire; l'on m'a chargé de la faire, et j'ai l'audace de la tenter parce que le Laboratoire d'Essais, au cours des recherches et des mesures qu'il effectue, a sans cesse l'occasion de se préoccuper de ces phénomènes et de tenter d'apprécier leurs conséquences.

2. **Qu'est-ce que la surface d'un métal?** Posée de cette manière directe et simple, mais grossière, la question n'a presque aucun sens et ne comporte point de réponse. Connaissez-vous une petite Anglaise du nom d'Alice? Née à Oxford, c'est la fille spirituelle d'un grand mathématicien anglais qui l'a créée pour distraire la fille de son doyen, qu'il avait en grande affection. Se promenant dans un monde merveilleux, Alice rencontra un jour, assise sur un champignon, une chenille verte, savante et lettrée; celle-ci mit dans les deux poches du tablier d'Alice deux champignons merveilleux dont nous aurons besoin : mangeant de l'un, qui est bleu, on rapetisse jusqu'à une taille infime; absorbant l'autre, qui est rouge, on revient à des dimensions plus raisonnables.

Je vous invite à changer de taille avec moi; je vous demande d'adopter de nouvelles échelles pour mesurer les grandeurs. Nous en choisirons trois : l'échelle dans laquelle l'électron peut encore être considéré comme un point, mais où le noyau atomique prend des dimen-

sions importantes; notre unité de mesure la plus commode y sera le dixième d'Angström — l'échelle à laquelle l'atome, encore discernable, paraît petit : une bonne unité serait ici le centième de micron — enfin, l'échelle, encore très vaste, qui est directement accessible à nos sens, aidés par les instruments que nous possédons; c'est celle où la plus petite grandeur séparée est de l'ordre du micron; elle s'arrête, dans l'étude des surfaces, au dixième de millimètre. Je laisserai de côté tout un monde, et pour de bonnes raisons : c'est celui qu'Alice aurait vu en mangeant une si grande quantité du champignon bleu que l'électron lui aurait paru d'une vaste envergure... De ce monde-là nous ne connaissons rien, ce qui ne veut point dire qu'il n'existe pas.

Suivant chacune des échelles que nous choisirons, nous donnerons à la question que je posais au début de cet exposé une réponse distincte, valable seulement pour cette échelle; mais les diverses réponses données ne sont point contradictoires. C'est leur ensemble qui constituerait la réponse complète, la solution intégrale du problème.

3. L'échelle atomique. — Je voudrais d'abord vous montrer la nécessité qu'il y a de descendre à cette échelle.

Lorsque l'on veut, à partir de la théorie électromagnétique classique calculer le pouvoir réflecteur de la surface d'un solide, on est conduit à remplacer l'idée simpliste d'une séparation brusque de la phase « vide » et de la phase « solide » par une surface sans épaisseur, par un autre concept : celui d'une « couche de passage » dont il n'est d'ailleurs pas nécessaire de spécifier l'épaisseur, et dans laquelle les constantes optiques varient d'une manière continue entre celles du vide et celles du solide étudié. De même, la surface libre d'un liquide, pourtant parfaite, recevant de la lumière polarisée rectilignement, renvoie de la lumière faiblement elliptique, et pour expliquer ce phénomène, on est conduit à admettre l'intervention d'une couche limite dont l'épaisseur est de quelques diamètres moléculaires, toutes les parties de cette couche intervenant dans la « construction » de l'onde réfléchie : nous sommes donc conduits, d'une manière inéluctable, à descendre à l'échelle des plus petites particules matérielles connues, puisque c'est là que nous trouverons l'explication de phénomènes physiques appartenant à notre monde propre.

Dès l'abord, pour sérié les difficultés, il nous faut examiner le problème sous deux aspects : l'aspect électronique et l'aspect atomique.

Le premier ne semble avoir une très grande importance que dans le cas où l'on étudie les surfaces métalliques; mais c'est justement celui qui nous préoccupe.

Comment se représenter, à cette échelle, un volume métallique? Supposons-le régulièrement cristallisé : ce sera une sorte d'éponge formée d'atomes régulièrement espacés, tous de même nature, si le métal est chimiquement pur. La maille de cette éponge possède une symétrie déterminée. Elle est la pluspart du temps, cubique. Les atomes sont liés, c'est-à-dire que les distances qui les séparent ne peuvent varier que dans d'étroites limites définies par la température. Fixons les dimensions : le « centre » d'un atome est séparé du centre le plus voisin par une distance de l'ordre de quelques dixièmes d'Angströms. Devant cette distance, chaque atome est bien loin d'être un point. Il faut le considérer comme un volume, à l'intérieur duquel se trouve une certaine densité de matière, variable et décroissante au fur et à mesure que l'on s'éloigne de son centre (nous y reviendrons tout à l'heure). Dans ce volume se trouve le noyau; dans ce volume aussi gravitent les électrons liés à l'atome.

L'équilibre relatif des atomes est assuré par les forces interatomiques qui les « accrochent » les uns aux autres et qui suivent des lois que je n'ai pas l'intention d'exposer et de discuter ici, car je ne fais qu'effleurer le débat pour l'intelligence de ce qui suit, il nous suffit qu'elles existent.

En dehors des « volumes atomiques » n'y a-t-il rien? Bien au contraire, il y a le flot immense des électrons de conduction, des électrons libres, animés des énergies permises par la statistique de Fermi-Dirac, énergies qui sont toujours grandes même aux très basses températures : cela revient à dire que ces électrons, circulant dans toutes les directions au sein du cristal vont se comporter, **en première approximation**, comme un gaz soumis à des pressions très fortes. Négligeons l'action que les atomes fixes peuvent exercer sur ces électrons libres (grossière approximation, si l'on veut, mais justifiée par les résultats obtenus) : l'aspect électronique du métal est bien simple; c'est une outre gonflée par un gaz très com-

primé : le gaz est formé par les électrons, l'autre c'est la surface.

Et l'on voit de suite que cette surface doit être une zone qui jouit de propriétés particulières : sinon, comment retiendrait-elle les électrons, comment les empêcherait-elle de se « détendre » dans le vide? Il faut bien admettre qu'au point de vue électronique, la surface d'un métal se signale par une couche où existe une discontinuité de potentiel, de signe et d'amplitude tels que le champ électrique qu'elle crée arrête dans leur élan vers l'extérieur les électrons les plus rapides. La « hauteur » de cette **barrière de potentiel** est une propriété physique du métal. Pourrait-on la mesurer? Non, mais entre deux métaux en contact devrait s'établir une différence de potentiel qui n'est autre que la somme algébrique de leur différence de potentiel de surfaces respectives : c'est l'effet Volta. Hélas! nous verrons qu'il est pratiquement presque impossible à mesurer avec précision.

Quelle peut-être l'origine de cette discontinuité brusque du potentiel au voisinage de la surface métallique? On a fait plusieurs hypothèses; j'avoue que celle qui me séduit le plus est aussi la plus simple puisqu'elle ne fait appel à aucune autre considération que celles qui précèdent : imaginons que les électrons sortent, s'échappent dans le vide; ils vont créer au voisinage immédiat du métal, un champ électrique d'un sens tel qu'il tend à contenir dans le métal les électrons qui y sont restés; on peut montrer qu'il faut peu d'électrons expulsés pour que le champ qu'ils créent prenne une intensité suffisante; de même, ils n'iront pas loin : leur départ laisse le métal porteur d'une charge positive qui les attire et les maintient; nous sommes donc conduits à imaginer notre morceau de métal entouré d'une atmosphère électronique dont la raréfaction est extrêmement rapide : très forte dans le métal, la densité électronique décroît très vite au dehors : à quelques Angströms de distance, il n'y a presque plus d'électrons. Si nous dessinons grossièrement les variations de potentiel au voisinage du métal, nous obtiendrons le graphique ci-contre. Qu'est-ce alors que la surface du métal, sous cet aspect purement électronique? C'est la couche de passage indiquée sur la figure 1.

Des électrons peuvent sortir, néanmoins; pour provoquer ces départs, nous disposons de trois moyens : l'application d'un champ électrique, d'abord, pourra les aider, s'il est

suffisamment intense, en augmentant l'épaisseur de l'atmosphère électronique : le « pouvoir des pointes », l'un des plus vieux phénomènes électrostatiques connus, en est un exemple; l'effet Schottky en est un autre. Mais si nous fournissons aux électrons emprisonnés de l'énergie, soit en chauffant le métal (effet thermoionique) soit en l'éclairant (effet photoélectrique) nous pourrons obtenir aussi que quelques-uns d'entre eux sautent la barrière de surface; un champ électrique extérieur les captera alors aisément : vous savez quel

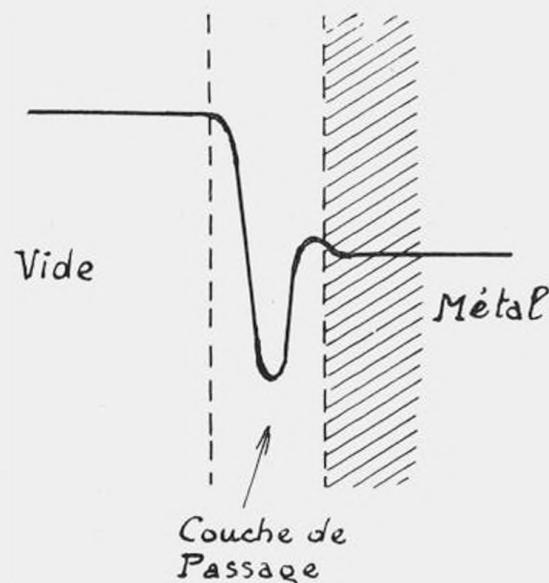


Fig. 1

champ d'applications immenses ont trouvé ces deux phénomènes. Mais notre propos est ailleurs et c'est pourquoi je ne fais que les nommer. Aussi bien je devrais faire appel, pour préciser, aux méthodes de la mécanique ondulatoire, méthodes qui n'ont encore que partiellement réussi à analyser cette question difficile.

Quoi qu'il en soit, nous avons une preuve expérimentale, une seule! presque directe de l'existence de cette barrière, et nous connaissons même l'ordre de grandeur de son amplitude. A un électron en mouvement l'hypothèse de de Broglie associe une longueur d'onde donnée par la relation :

$$\gamma = \frac{h}{mv}$$

où h est la constante universelle de Planck, m la masse de l'électron et v sa vitesse à un instant donné.

Dirigée comme je l'ai dit, la barrière ne s'opposera point à l'entrée d'un électron venant de l'extérieur; bien au contraire, elle l'accélèrera; mais si sa vitesse devient $v' > v$, la longueur de l'onde de de Broglie **diminue**; on assiste à un phénomène de **réfraction**; ce phénomène a été effectivement mis en évidence dès la première expérience de Davisson et Germer. On a même pu calculer de cette façon l'amplitude de cette barrière, ou tout au moins son ordre de grandeur. Voici ce que l'on trouve, pour les quelques métaux étudiés :

| Al | Cu | Ni | Ag | Au | Cr | Pb |
|----|----|----|----|----|----|----------|
| 18 | 17 | 18 | 18 | 17 | 20 | 11 Volts |

Je n'oublie pas que les applications dont se préoccupent nos conférenciers sont d'ordre mécanique. Mais vous penserez comme moi que tout ceci jette un jour singulier sur ce que l'on peut appeler le **contact** de deux surfaces métalliques. Est-il possible que les phénomènes dont je viens d'esquisser la forme soient sans influence sur la valeur des coefficients de frottement? J'en serais surpris, et je suis certain que des considérations de cet ordre devront intervenir dans la théorie complète de la lubrification et du frottement sec.

Abandonnons les électrons pour les atomes. Il est clair que, sous ce second aspect, la surface d'un métal doit encore être considérée comme une couche de passage d'épaisseur finie. L'équilibre des forces interatomiques n'est évidemment pas le même pour les atomes placés au voisinage du vide que pour ceux qui se trouvent dans la masse du métal. Cette remarque entraîne deux conséquences; tout d'abord, au voisinage de la « surface » la structure cristalline subit une distorsion, la maille se déforme, la densité atomique décroît. Je ne puis vous développer ici les raisons qui font attribuer à cette couche une épaisseur de quelques diamètres moléculaires. Mais il faut s'attendre aussi à ce que les atomes les plus voisins de la phase externe n'aient pas complètement saturé toutes les forces qui les maintiennent liés au reste de la masse métallique; et cela nous expliquera deux ordres de phénomènes; **l'orientation** d'abord: les métallurgistes savent que, lorsqu'on dépose une couche cristalline à la surface d'un métal, la structure cristalline de cette dernière se continue dans le film déposé, chaque fois que la chose est

possible; **l'adsorption** ensuite. Ce phénomène si général prend une forme relativement simple quand on considère des surfaces métalliques non poreuses comme celles qui nous occupent. Langmuir a pu en donner, en partant des idées qui viennent d'être exposées, une explication assez bonne dans laquelle il admet la présence d'une couche monomoléculaire stable fixée à la surface du métal et servant de support à d'autres couches qui viendront s'y ajouter.

Cette couche est d'une extraordinaire solidité. Il en est de même, aussi, pour les premiers films monomoléculaires qui s'établissent sur elle. Le nettoyage complet de la surface d'un métal ne peut être à peu près réalisé que par un chauffage prolongé dans le vide; précisons: la surface d'un morceau de platine n'atteint des propriétés optiques, thermoélectriques, et photoélectriques à peu près stables qu'après des centaines d'heures de chauffe à plus de 1.000° C dans un vide rigoureux! Vous connaissez aussi l'énergie avec laquelle les atomes de baryum « s'accrochent » à la surface du tungstène et les applications que Langmuir a pu donner de ce phénomène. Il faut bien dire, d'ailleurs, que cette hypothèse d'une couche simplement étalée à la surface du métal est peut-être trop simple; il est bien probable que le passage du métal à la couche adsorbée n'est pas plus discontinu que le passage du métal au vide, tel que nous le décrivions tout à l'heure; il y a toujours un peu de **diffusion** des atomes adsorbés au sein des atomes métalliques de la couche de passage; d'où une nouvelle distorsion du réseau cristallin et une altération, qu'on a étudiée, des travaux de sortie thermoioniques et photoélectriques.

4. A partir du moment où nous commençons à soupçonner l'existence de couches d'impuretés superficielles d'épaisseur supérieure à deux ou trois dizaines de plans réticulaires, nous faisons un pas dans l'échelle des grandeurs pour nous rapprocher de l'échelle submicroscopique que j'ai définie en débutant. Dans cette échelle-là, où l'atome ne nous paraît plus qu'un point à peine séparable, nous rencontrerons trois problèmes dont la solution correcte est d'importance capitale pour l'intelligence de nombreuses questions de mécanique appliquée; je veux dire le problème du **contact**, le problème du **polissage**, le problème de **l'onctuosité**.

A l'échelle que nous venons de quitter, nous ne pouvions guère concevoir un contact vrai entre deux surfaces métalliques; les barrières de potentiel siégeant à chaque surface sont fort difficiles à rapprocher beaucoup l'une de l'autre, probablement impossibles à superposer: il reste toujours « quelque chose » entre les deux couches superficielles; cette zone intermédiaire est le siège d'un champ électrique probablement fort élevé; il y a bien quelques expériences qui semblent démentir ce que je viens de dire en deux mots: on sait que des atomes d'or diffusent dans le plomb; mais il faut mettre en jeu des pressions très grandes et des temps très longs.

A l'échelle submicroscopique, le mot « contact » a un sens parfaitement défini: il désigne un phénomène que les mécaniciens connaissent sous le nom « d'adhérence des surfaces polies », et que les opticiens appellent « contact optique », désignation excellente puisqu'elle veut dire que la couche qui subsiste entre les deux surfaces ne peut avoir qu'une épaisseur faible devant une longueur d'onde lumineuse; elle ne dépasse point le $1/100^{\text{e}}$ de micron. Vous savez que lorsqu'un contact aussi parfait a été réalisé, il faut développer des efforts très grands pour le rompre; préciser davantage fait apparaître de suite le point faible des études faites sur cette question: la planéité des deux surfaces devrait être réalisée à quelques dizaines d'unités Angström près, si l'on voulait réaliser un contact optique vraiment impeccable. Dans les meilleurs cas, il a fallu développer des tractions de l'ordre de 50 kg/cm^2 pour rompre le contact! Il n'est point possible, dans l'état actuel de nos connaissances, de donner une explication acceptable et cohérente de cette adhérence. Mais il faut savoir que le phénomène est au moins partiellement réversible; un contact rompu peut se reformer, et en se reformant céder au milieu extérieur une fraction importante du travail que ce dernier lui avait fourni au moment de la rupture. Rayleigh, dans des expériences simples mais ingénieuses, a pu mesurer ce travail qu'il a trouvé de l'ordre de 50 ergs par cm^2 .

Ce qui n'est pas de nature à simplifier les essais d'explication théorique, c'est que ce phénomène ne peut être mis en évidence que sur des surfaces **polies par abrasion, donc modifiées**; nous ne savons point réaliser autre-

ment de surface solide suffisamment plane. Or, le polissage semble bien provoquer des modifications dans la structure du métal, modifications qui affectent des dizaines et peut-être même des centaines de couches monoatomiques. C'est Rayleigh encore qui, dans le cas de la slice polie, a montré directement (par simple examen optique) l'existence d'une couche superficielle très réfringente (1.596 au lieu de 1.460 dans le vert); il a pu, en attaquant la surface à l'acide fluorhydrique jusqu'à disparition de la lumière réfléchie par la couche, mesurer l'épaisseur de celle-ci qu'il a trouvée de l'ordre de $1/20^{\text{e}}$ de longueur d'onde ($\gamma = 0,55$).

Tout ceci n'est point particulier aux verres; la surface d'un solide cristallisé et en particulier celle d'un métal est profondément modifiée par polissage; son examen par diffraction électronique montre qu'elle se comporte, au moins pendant quelque temps, comme si, dans la couche superficielle, le métal était à l'état amorphe. On discute encore sur les raisons de cette apparence. Vous avez peut-être entendu M. Bernal dire, au Congrès de Physique récent, comment la simple friction de la surface d'un métal semble pouvoir amener celle-ci au voisinage de la température de fusion, ce qui semble indiquer que la pellicule superficielle est vraiment dénuée de structure. Il y a au moins une théorie de ces faits, moins simple, et qu'un autre conférencier vous exposera.

Ce n'est pas tout. Étalons maintenant sur cette surface polie un lubrifiant quelconque. Ce dernier formera un film relativement épais que nous pouvons considérer comme formé d'assises monomoléculaires superposées. Les premières sont solidement liées au métal comme nous l'avons vu. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface, les couches résistent de moins en moins à l'effort tangentiel, à l'arrachement. Un moment vient où leur fluidité prend le dessus; mais l'expérience montre qu'alors nous sommes déjà bien au-dessus de l'échelle que j'examine; aux frontières de celle-ci, le film ne commence à manifester son défaut de liaison rigide avec le métal que par son « onctuosité »; on peut parfois réaliser des films encore octueux et dont l'épaisseur ne dépasse guère 100 Angströms: c'est le cas du film qui subsiste entre

deux cales à faces planes très parfaites et qu'on amène à l'adhérence; cela est rare; avec des surfaces moins bien travaillées, le grippage se produit, par rupture du film, bien avant que l'on atteigne ces limites.

Je ne puis, dans cette introduction, faire autre chose que citer ces phénomènes.

5. Nous voici revenu à l'échelle humaine: la surface d'un métal nous apparaît maintenant comme la section par un plan, d'aggregats cristallins visibles au microscope. Même dans ce domaine, que de problèmes! Je ne ferai que les citer: ils vous sont plus familiers que ceux que nous venons de quitter, et une conférence de M. Portevin leur sera entièrement consacrée. Comment mesurer le degré de poli d'une surface? Comment les propriétés de la couche superficielle peuvent-elles être modifiées (cémentation, nitruration, oxydation, corrosion): c'est tout le problème de l'attaque chimique superficielle, l'un de ceux qui présentent le plus d'importance pour notre civilisation. Comment les modifications superficielles du métal influencent-elles ses propriétés de masse? La résistance au choc, entre autres, varie considérablement avec l'état de la surface. Ces problèmes peuvent, on le voit, se classer en deux groupes. Les uns sont d'aspect métallurgique et physico-chimiques; les autres sont d'aspect mécanique: les industriels les connaissent en bloc, et ce sont eux qu'ils rencontrent chaque fois qu'ils veulent, après rectification, définir le « degré de poli » d'une surface.

6. Avant d'en terminer, il me reste à vous dire de quels moyens d'expérimentation disposent les physiciens, les mécaniciens et les métallurgistes pour l'examen des phénomènes que je viens d'énumérer. Chacun des mondes que nous avons traversés peut être examiné d'assez près à l'aide de moyens que j'avais d'abord songé à vous énumérer en leur temps. Dans ce but, j'en avais dressé une liste qui comprenait bien une douzaine de lignes. Pourtant, à les bien regarder, ces moyens si divers se confondent en un seul: **l'examen d'une surface se fait, quelle que soit l'échelle examinée, par l'analyse des radiations qu'elle renvoie.** Suivant le mode de propagation qui nous intéressera, suivant la longueur d'onde des radiations choisies, nous nous trouverons disposer d'une douzaine de techniques ayant chacune leur domaine d'application.

Allons du plus petit au plus grand, comme nous l'avons déjà fait. Voici l'électron; vous savez qu'il « ondule »; les longueurs d'onde de de Broglie sont parmi les plus faibles qu'on connaisse: elles dépendent de la vitesse des électrons utilisés, mais elles sont toujours de l'ordre d'une fraction d'Angström (<0.1 Å). C'est-à-dire de l'ordre de grandeur des distances interatomiques elles-mêmes, et même



Fig. 2. — Un Diagramme électronique simple: Cristal unique de MOS².

moins! Vous devinez que nous nous adresserons à eux pour obtenir des renseignements sur la structure des surfaces, examinée à l'échelle atomique. Etudions la réflexion d'un faisceau d'électrons sur une surface: nous obtiendrons des figures d'interférence dont l'aspect nous renseignera sur la disposition relative des atomes dans la couche examinée. Le procédé n'est applicable qu'à l'étude des couches minces: les électrons incidents ont, en effet, un pouvoir de pénétration dans le métal très faible: après traversée de quelques plans réticulaires, tous sont réfléchis, et les plans sous-jacents ne participent plus au phénomène. C'est là un avantage ou un inconvénient?

nient; avantage puisque les résultats obtenus ne sont jamais influencés par les propriétés de masse; inconvénient, parce que quelques atomes d'impureté se signaleront par des effets brillants, qu'on ne désire pas toujours.

Ce moyen de travail, très souple et qui a donné des résultats très brillants n'est pas dépourvus d'aléas. Les diagrammes qu'il donne sont trop riches. La couche analysée joue pour les électrons, aussi bien le rôle de réseau

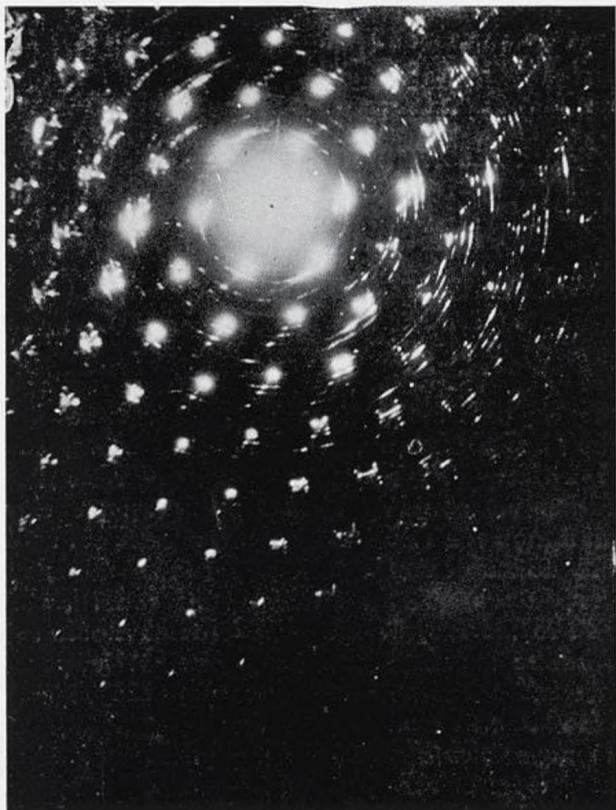


Fig. 3. — Deux phénomènes superposés sur le même diagramme : points isolés produits par les cristaux uniques et cercles indiquant une structure polycristalline (MOS²).

plan à deux dimensions, que de réseau de Bragg à trois dimensions; les deux effets peuvent fort bien se trouver superposés sur le même diagramme; d'autres raisons augmentent encore l'indétermination. Il en résulte des clichés magnifiques, mais d'une interprétation parfois ardue (Fig. 2, 3, 4).

L'interférence des rayons X que produisent les plans réticulaires d'un cristal nous fournit un second moyen de travail. Les longueurs d'onde employées sont à peine plus fortes (elles ne dépassent guère quelques Angströms); pourtant l'allure du phénomène est

bien différente. Cela tient à ce que le pouvoir de pénétration des rayons X dans le métal est incomparablement plus grand que celui des électrons. Les diagrammes d'interférence que l'on obtient sont toujours provoqués par un réseau à trois dimensions dont l'épaisseur intéresse en général des centaines de plans réticulaires. Ainsi, l'étude des couches très minces par ce procédé n'est point possible; les deux moyens de travail ne font pas double emploi, mais au contraire se complètent : le

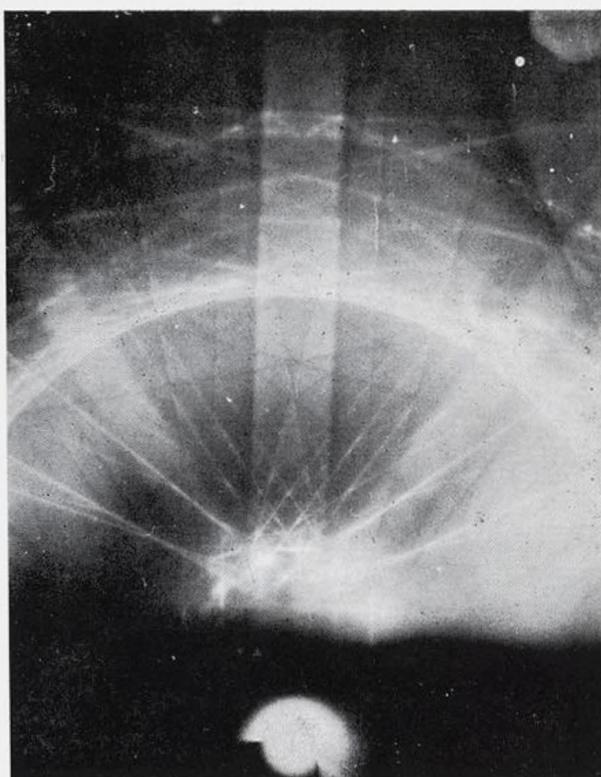


Fig. 4. — Un cas plus complexe : réflexion d'un faisceau d'électrons à la surface du diamant.

second est surtout utilisé pour l'examen des films relativement épais (cémentation, nitruration, films lubrifiants).

On ne peut guère agir sur la propagation rectiligne d'un faisceau de rayons X; leur focalisation est un problème qui n'a point reçu de solution générale. Le faisceau d'électrons est plus maniable : on peut, à l'aide de champs magnétiques ou électriques de forme convenable, le rendre convergent, divergent, élaborer une optique électronique fidèlement calquée sur l'optique géométrique classique. Il est possible de construire des **microscopes électroniques** capables de donner des images très agrandies des surfaces qui émettent ou qui

sont bombardées par des électrons. Le pouvoir de résolution théorique d'un tel appareil est, étant donné la petitesse des longueurs d'onde utilisées, énorme (plusieurs milliers de fois celui du microscope ordinaire). Avant de pouvoir l'utiliser, toutefois, il faudra réaliser des puissances utiles énormes, dont les appareils actuels se tiennent encore très loin.

J'en viens à la lumière visible. Elle reste un moyen de travail d'une étonnante puissance, capable de fournir des renseignements utiles dans un domaine extraordinairement vaste, que j'établirai, grossièrement, entre 10 Angströms et les dimensions humaines. La mesure des intensités diffusées, l'interférométrie, permettent la mesure, l'appréciation d'épaisseurs très faibles. Le microscope, amené à un étonnant degré de perfection,

reste l'outil fondamental du métallurgiste. Je voudrais signaler aussi un moyen de travail peu employé jusqu'ici dans le domaine qui nous occupe, mais qui a résolu nombre de problèmes du même ordre dans le domaine minéralogique : la mesure des pouvoirs réflecteurs et l'étude de l'ellipticité de la lumière réfléchie par une surface.

Tels sont les instruments et les moyens qu'ont employés les physiciens et les ingénieurs dont l'œuvre vous sera exposée par les conférenciers qui vont me suivre; mon rôle est maintenant terminé : c'était celui, antique, de l'acteur qui soulève le rideau et tente, avant la représentation véritable, d'intéresser le public à ce qui va se passer sur la scène. Je me tiendrais pour satisfait si j'ai pu éviter votre ennui.



