

Image des atomes dans un cristal par microscopie électronique

La visualisation directe des structures atomiques par un système grossissant vient d'être récemment rendue possible. *A priori*, rien ne s'oppose à envisager un système optique capable de « voir » les atomes si, toutefois, deux conditions indispensables sont remplies :

- la première concerne les particules qui servent à éclairer l'objet : elles doivent avoir une longueur d'onde inférieure aux distances atomiques qui sont de l'ordre de 1 à 2 Å (10^{-10} m) ;
- la seconde est relative au système optique : il faut pouvoir réaliser des lentilles de qualité dont les aberrations soient suffisamment faibles pour permettre la résolution recherchée, soit 1 à 2 Å.

Malgré un large choix possible de particules (X, électrons, protons, neutrons), seuls, les microscopes utilisant des électrons satisfont simultanément aux deux conditions précédentes. Des microscopes électroniques commerciaux fonctionnant avec des électrons d'énergie variant entre 100 keV et 1 MeV permettent d'atteindre les résolutions de l'ordre de l'Angström. Des progrès constants effectués dans la technologie de ces appareils autorisent un travail à des grossissements directs de l'ordre de 10^6 .

Les électrons sont sensibles à la charge, noyau et électrons, et sont donc déviés à la traversée de l'objet. Si cet objet est très mince (environ 100 Å pour un cristal), la modulation d'intensité qui résulte de cette interaction reproduit la projection des positions atomiques dans le cristal. Lorsque le cristal est convenablement orienté, c'est-à-dire lorsqu'on aligne les rangées denses cristallines avec le faisceau d'éclairage, les rangées atomiques deviennent visibles sur l'image obtenue à travers le système grossissant.

La fig. 1 montre ainsi un cristal d'aluminium observé selon une direction [110] où chaque point blanc représente la projection d'une colonne atomique. Sur cette projection, la nature périodique du cristal apparaît de manière claire. On reconnaît également les symétries caractéristiques d'un cristal cubique lorsqu'il est observé selon un axe [110] : la nature bidimensionnelle de cette image ne permet pas cependant de reconstituer la struc-

ture tridimensionnelle complète, plusieurs projections selon des axes différents seraient nécessaires pour trouver la nature cubique à face centrée de ce cristal.

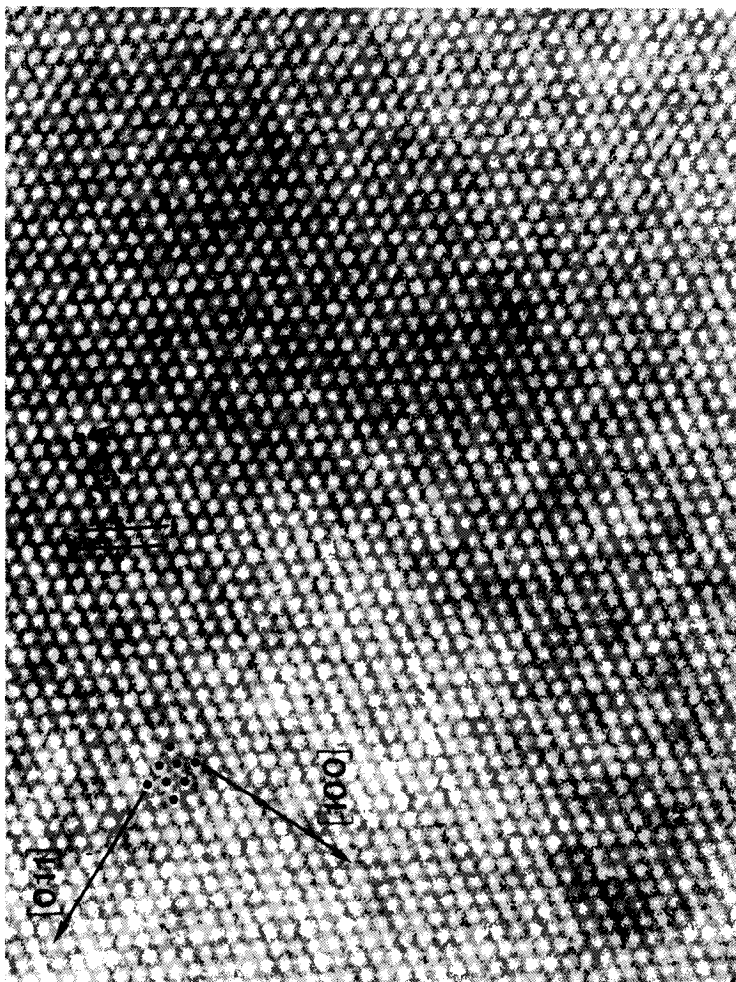


Fig. 1. — Image d'un cristal d'aluminium (cubique à face centrée) tel qu'il apparaît lorsqu'on le regarde selon une direction $[110]$. Chaque point blanc correspond à la projection d'une colonne alignée d'atomes. La maille de cristal est visualisée par des points noirs. La distance entre points est de $2 \cdot 3 \text{ \AA}$.

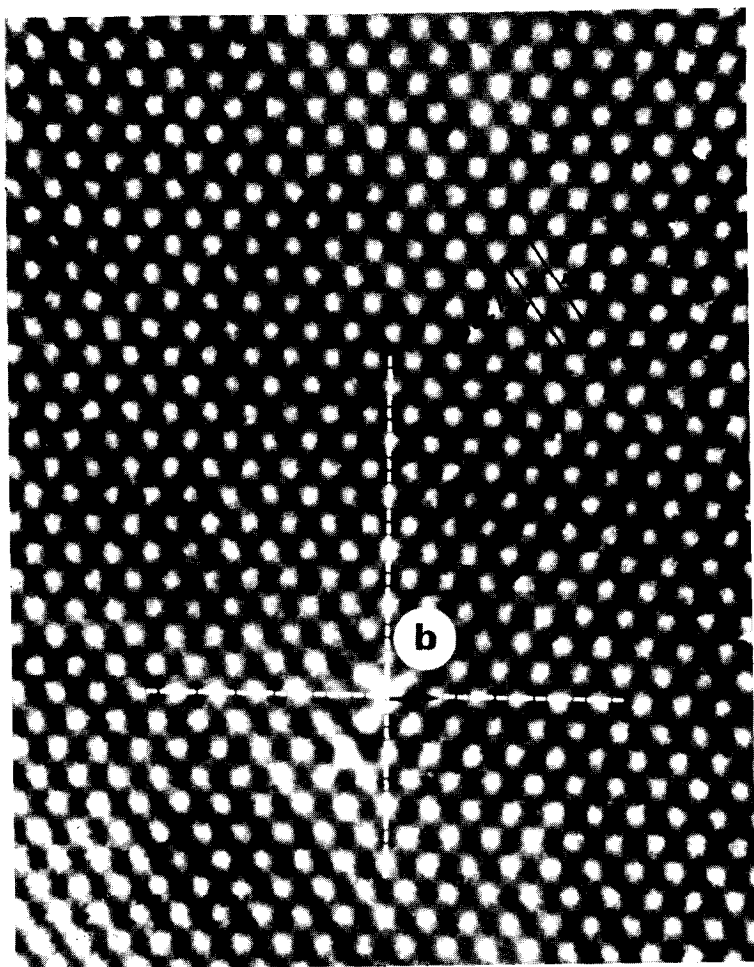


Fig. 2. — Une dislocation b, observée dans un cristal de germanium (cubique diamant) le long d'une direction $[110]$. Une observation en condition rasante permet de visualiser la discontinuité du cristal en b.

La plupart des structures cristallines sont observables par cette méthode (métaux, oxydes, semi-conducteurs...) malgré quelques exceptions notables (matériaux biologiques ou covalents) qui se détruisent sous le faisceau d'électrons.

Les structures cristallines parfaites des matériaux à très grandes mailles complexes ont ainsi pu être étudiées complète-

ment par des équipes australiennes et américaines. Les oxydes mixtes de métaux de transition présentaient d'intéressants problèmes structuraux non résolus par les rayons X car ils contiennent des mélanges de phase ou des surstructures plus ou moins périodiques.

Les structures cristallines plus simples (cas des métaux purs) sont, elles, déjà parfaitement connues par les méthodes de diffraction. Aussi ces objets ont-ils servi d'objets-tests pour étudier la validité des théories de la formation des images dans le microscope. Ces images de cristaux parfaits présentent également un intérêt pédagogique certain car elles illustrent de manière convaincante ce qu'est la perfection et l'ordre cristallin. Cependant, les perturbations à l'ordre cristallin dans ces matériaux sont assez nombreuses et ont en général une structure atomique peu connue. Parmi ces défauts qui déterminent une grande partie des propriétés (mécaniques en particulier) de ces matériaux, citons les défauts linéaires ou dislocations, et les défauts plans ou joint de grains. La déformation permanente d'un métal conduit par exemple à l'introduction d'un grand nombre de dislocations dans le cristal. Ces perturbations se caractérisent par une discontinuité locale et linéaire de l'arrangement cristallin qui est illustrée sur la fig. 2 en b. Cette discontinuité devient très visible si le lecteur regarde cette figure en condition rasante le long d'un alignement d'atomes.

De même, les cristaux contiennent fréquemment des joints de grains qui permettent le raccord sur un plan de 2 cristaux désorientés. La fig. 3 montre une telle paroi dite « de macle » pour une désorientation particulière dans un cristal de germanium. L'observation détaillée de ces défauts à l'échelle atomique est en train de renouveler les idées déjà anciennes sur leurs structures et font apparaître une complexité insoupçonnée. Enfin la localisation précise des atomes dans des conditions cristallines perturbées permettra d'aborder d'importants problèmes de physique de l'état solide, en particulier de préciser la forme des potentiels interatomiques loin de l'équilibre.

Outre ces défauts, les matériaux contiennent également des éléments minoritaires qui peuvent se diluer dans l'élément majoritaire ou, au contraire, former des nouvelles phases de structure différentes : ce sont les précipités. Ces précipités peuvent être bénéfiques, par exemple en entraînant un durcissement du matériau, ou au contraire néfastes (fragilisation ou modification des propriétés électriques dans le cas des semi-conducteurs). La microscopie électronique à l'échelle atomique permet d'étudier ces phénomènes dès leur apparition pour obtenir une meilleure compréhension des conditions de nucléation de la précipitation.

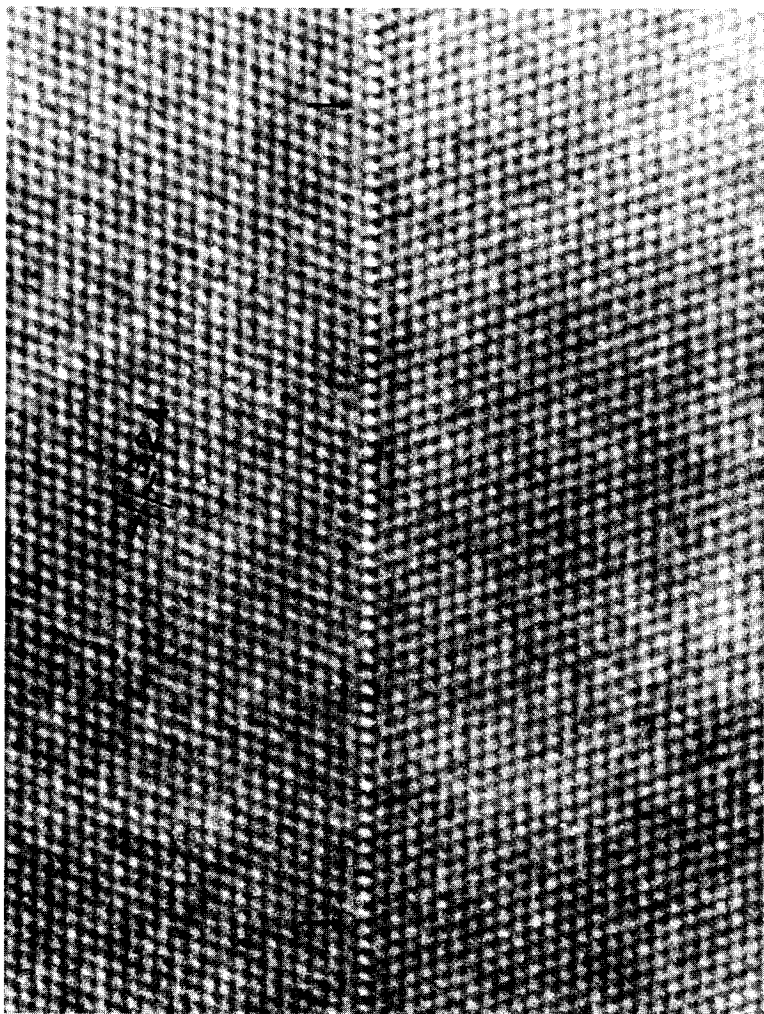


Fig. 3. — Une macle traverse ce cristal de germanium séparant deux parties désorientées de 73° l'une par rapport à l'autre. L'accolement des atomes sur le plan de macle est parfait, ceux-ci étant communs aux deux cristaux.

Pour conclure, il faut insister sur le fait que la diffusion à des scolaires, des images atomiques de structure cristalline permettrait de donner une vue juste de ce qu'est l'ordre cristallin, et donnerait une image concrète de l'existence de l'atome. Alors

que notre œil perçoit rarement la nature cristalline de beaucoup de matériaux (les métaux, les semi-conducteurs, les roches...), il serait nécessaire de mettre l'élève rapidement en contact avec la périodicité de l'arrangement cristallin. Enfin, ces images rappellent que, contrairement à une opinion fréquente, rien ne s'oppose à la vision des atomes : bien que ceux-ci aient été depuis très longtemps « vus » par les méthodes de diffraction, l'imagerie directe en fournit un support plus aisément perceptible.

Enfin, outre son intérêt pédagogique, ces images fournissent aux chercheurs de discipline très diverses, la réponse à quelques questions très anciennes mais non encore résolues, et bien sûr, soulèvent d'intéressantes questions nouvelles.

A. BOURRET,

(Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble).
