Des atomes vus au microscope ionique

Autor(en): **Zingg, W.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Actes de la Société jurassienne d'émulation**

Band (Jahr): **82 (1979)**

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-555477

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Des atomes vus au microscope ionique

par W. Zingg

Chacun sait que la matière est constituée d'atomes. Et pourtant, qui ne serait pas dans l'embarras pour en fournir une preuve simple et évidente ? C'est pourquoi nous avons jugé utile de révéler quelques secrets d'une technique de recherche sur la constitution des matériaux, technique dont la vertu première est de permettre de voir les atomes. Il s'agit de la microscopie ionique à champ électrique appelée aussi microscopie à émission d'ions.

L'aspect le plus frappant de la microscopie ionique tient au fait que l'agrandissement gigantesque nécessaire pour reconnaître des atomes individuels s'obtient par un principe très simple qui ne fait appel à aucun système d'optique traditionnel ni même d'électronique.

Au même titre que les microscopes électroniques les plus perfectionnés, le microscope ionique est un instrument d'analyse et d'observation destiné plus particulièrement à l'étude de la structure des matériaux à caractère métallique. L'agrandissement réalisable dépasse couramment un million, une performance environ mille fois supérieure à celle d'un microscope optique traditionnel.

Structure cristalline des matériaux

Pour bien saisir l'importance d'un instrument d'analyse ayant une résolution atomique[1], il convient de souligner que les propriétés des matériaux sont souvent exploitées jusqu'à leurs limites ultimes, et ceci dans pratiquement tous les domaines de la technique industrielle. Il en est ainsi dans la miniaturisation des composants électroniques comme dans la construction aéronautique et spatiale. Chaque année, on assiste, sur le marché des

[1] Pouvoir de distinguer deux atomes adjacents.

ordinateurs et des appareils électroniques équipés de microprocesseurs à des progrès déconcertants quant aux performances, au volume et aux prix. Dans le secteur de la construction d'avions ou de véhicules, il s'agit d'assurer la solidité des structures tout en améliorant le rapport de la charge utile à la masse totale.

Les progrès techniques sont en grande partie le fruit de la qualité et de l'amélioration des propriétés des matériaux autant que des moyens de fabrication. Aujourd'hui, il n'est plus guère concevable de découvrir ou de développer des matériaux avec des propriétés compétitives de façon strictement empirique, qu'il s'agisse de câbles de téléfériques, de détecteurs de rayons laser ou encore de substrats pour les mémoires d'ordinateurs. Ainsi, les connaissances théoriques sur les semiconducteurs ont sans doute fortement contribué à l'essor de l'intégration dans l'industrie électronique. Les circuits intégrés sont réalisés sur des plaquettes de silicium monocristallines, c'est-à-dire que leurs atomes sont disposés selon un réseau géométrique bien ordonné et d'une seule «pièce». Les métaux et alliages tels qu'ils nous sont familiers se composent, quant à eux, d'une multitude de cristaux minuscules: ils sont polycristallins. Par une attaque chimique appropriée, on peut généralement reconnaître à l'œil nu les nombreux petits cristaux ou grains qui constituent un corps métallique. Leurs dimensions varient typiquement du micromètre au centimètre.

Dans chaque cristal élémentaire, les atomes occupent les nœuds d'un réseau à trois dimensions, très régulier, dont la cellule primitive est appelée structure cristallographique. Un exemple illustre bien l'importance de la structure: c'est celui du graphite et du diamant qui sont deux formes allotropiques d'un seul et même élément chimique: le carbone.

C'est sans aucun doute en métallurgie que les problèmes liés de près ou de loin à la structure cristalline jouent le rôle le plus significatif industriellement. Ainsi, de nombreuses propriétés des alliages, telles la limite de rupture, l'élasticité, la dilatation thermique, la vitesse de croissance de fissures et même la corrosion, dépendent étroitement de la structure cristalline et de la morphologie des alliages, en plus, bien sûr, de leur constitution chimique et de paramètres extérieurs comme la température. Il appartient au métallurgiste d'étudier la nature des relations entre les propriétés macroscopiques et les caractéristiques structurelles.

Dans cette perspective, la microscopie optique et la microscopie électronique sont une aide substantielle pour la compréhension des transformations et d'autres phénomènes qui se déroulent dans les corps solides. Les rayons X constituent un outil irremplaçable pour en déterminer la structure cristallographique. Cependant, il est impossible de voir directement la disposition des atomes eux-mêmes dans la matière à l'aide des rayons X.

Avec le microscope ionique, la science des matériaux dispose aujourd'hui d'un instrument qui, grâce à un agrandissement supérieur à un million, permet de voir les atomes individuels à la surface d'une pointe métallique. Le microscope ionique a été inventé en 1955 par Erwin Müller, un physicien allemand qui a dû s'expatrier aux Etats-Unis pour pouvoir réaliser ses ambitions. Il fut le premier à voir des atomes d'un échantillon de tungstène. A nous maintenant de découvrir les arcanes et les possibilités fabuleuses de cette technique.

Le microscope ionique

La fascination du microscope ionique (ou microscope à émission d'ions) tient autant à la simplicité de son principe qu'à sa vertu de rendre visibles des atomes. En effet, l'image formée sur l'écran phosphorescent d'un microscope ionique n'est rien d'autre qu'une projection géométrique de la minuscule calotte formée par l'extrémité de la pointe très fine qui sert d'échantillon sur le plan constitué par l'écran d'observation (Fig. 1). Le rayon de courbure **r** au bout de la pointe comporte typiquement moins d'un dixième de micromètre; quant à la distance **d** entre la pointe et

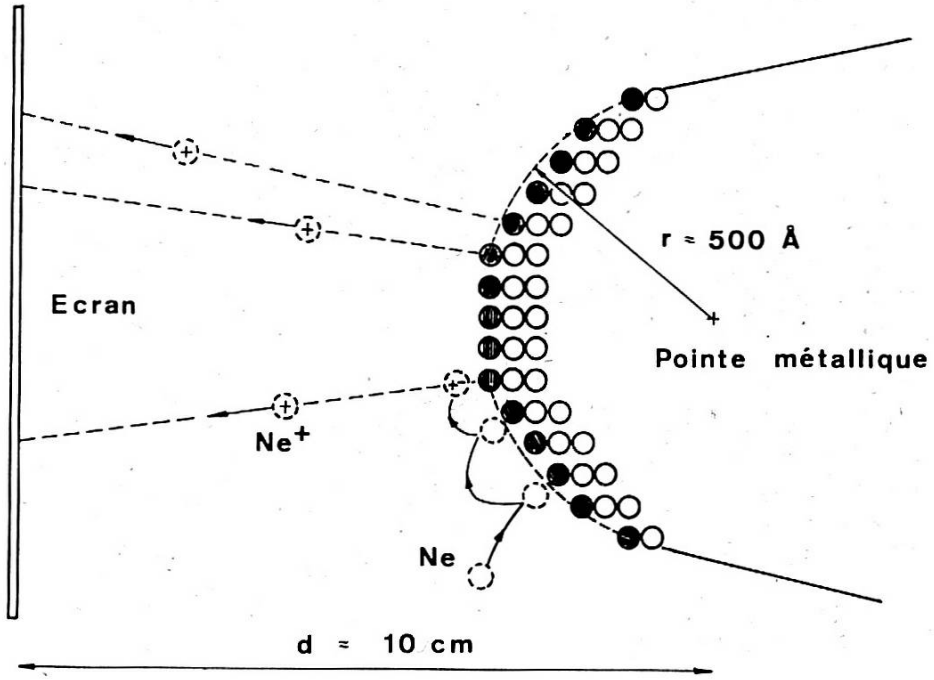

Figure 1 Principe de la formation de l'image dans un microscope ionique. L'agrandissement, donné approximativement par le rapport **d/r**, est de l'ordre du million.

l'écran, elle est de cinq à dix centimètres. Par un raisonnement géométrique élémentaire, on s'aperçoit instantanément que l'effet de projection entraîne un agrandissement linéaire de l'ordre de grandeur d'un million égal au facteur **M=d/r**. Comme les distances interatomiques dépassent toujours un angström[2], elles atteignent facilement un millimètre sur l'écran d'un microscope ionique.

Pour produire l'image, on place la pointe métallique perpendiculairement en face de l'écran phosphorescent (Fig. 2). Après avoir fait le vide dans le microscope, on y introduit un gaz rare, tel que le néon (chimiquement inerte), à faible pression. On applique ensuite une tension électrique de plusieurs milliers de volts entre l'échantillon (pôle positif) et l'écran. A l'extrémité de la pointe métallique, il règne alors un champ électrique particulièrement intense: un effet physique bien connu exploité dans le cas du paratonnerre. L'intensité du champ est suffisante pour ioniser les atomes du gaz rare qui entrent en contact avec la surface de l'échantillon.

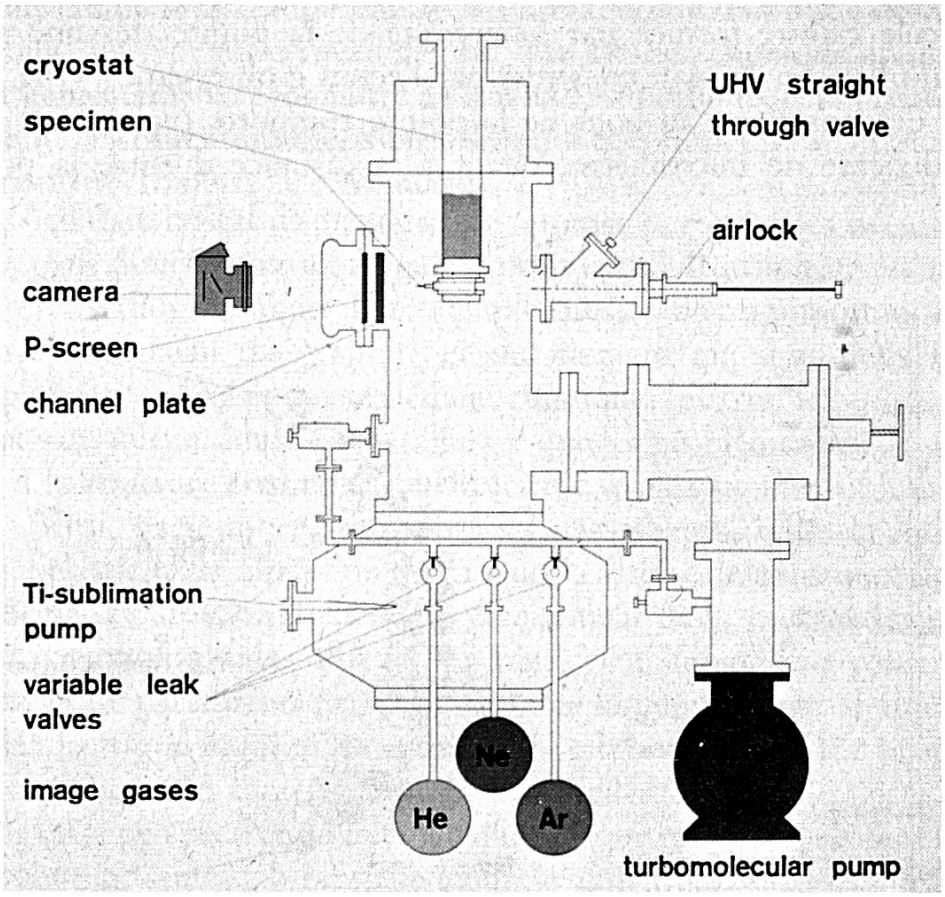

Figure 2 Schéma d'un microscope ionique.

[2] Un angström vaut un dix-millième de micromètre; l'angström est donc au micromètre ce que le micromètre est au centimètre.

En raison de leur charge électrique, les ions positifs ainsi formés sont repoussés par la pointe métallique et propulsés vers l'écran. Ce phénomène se produit de façon ininterrompue, de sorte qu'il s'établit un courant d'ions, comme si de chaque atome situé à la surface de l'échantillon jaillissait un faisceau d'ions gazeux. Les ions d'un même faisceau, c'est-à-dire issus d'un même atome de l'échantillon, suivent tous une trajectoire identique appelée ligne de champ électrique. Ils engendrent par conséquent sur l'écran une minuscule tache lumineuse qui est l'image de l'atome situé à l'origine du faisceau d'ions. L'image globale ainsi obtenue (photos 1, 2 et 3) reflète dans ses moindres détails la topographie atomique de l'échantillon.

Malgré le principe élémentaire du microscope ionique, et en particulier l'absence de système optique, la réalisation pratique exige néanmoins un certain savoir-faire expérimental. Ainsi, l'enceinte du microscope doit être évacuée selon les exigences de vide ultraélevé avant l'introduction du gaz rare de haute pureté. Pour l'obtention d'une stabilité et d'une netteté d'image satisfaisantes, l'échantillon doit être refroidi à une température inférieure à —200°C (technique cryogénique). En dernier lieu, il importe

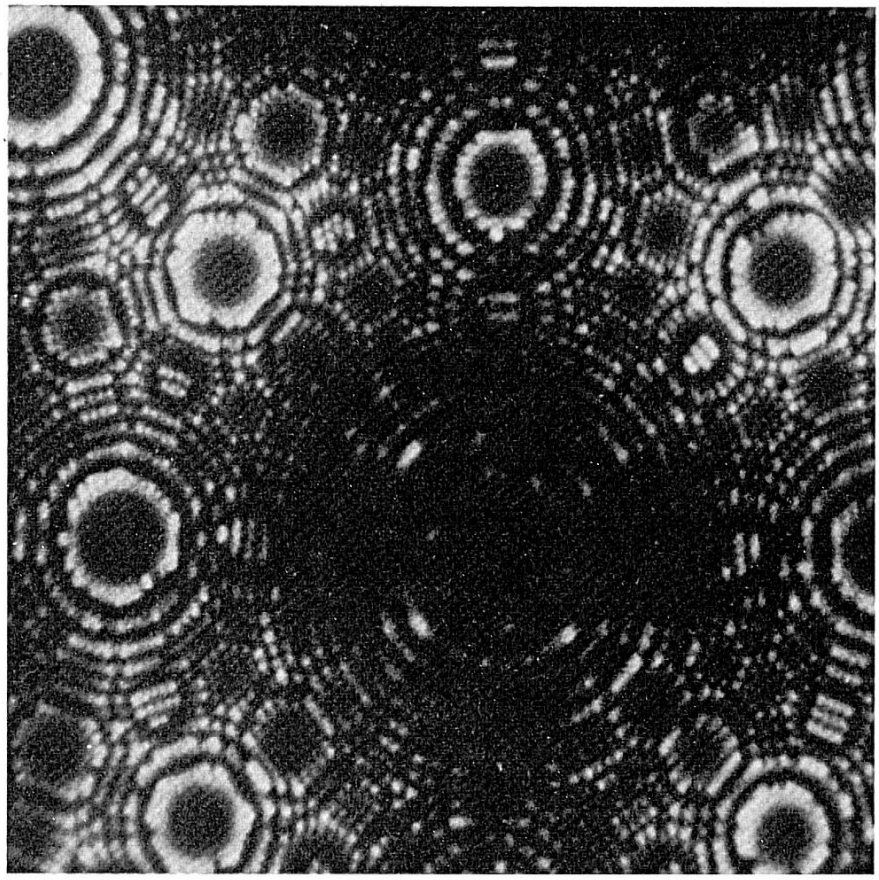

Photo 1 Atomes (taches minuscules claires) d'une pointe en aluminium vue au microscope ionique avec un agrandissement d'environ un million de fois.

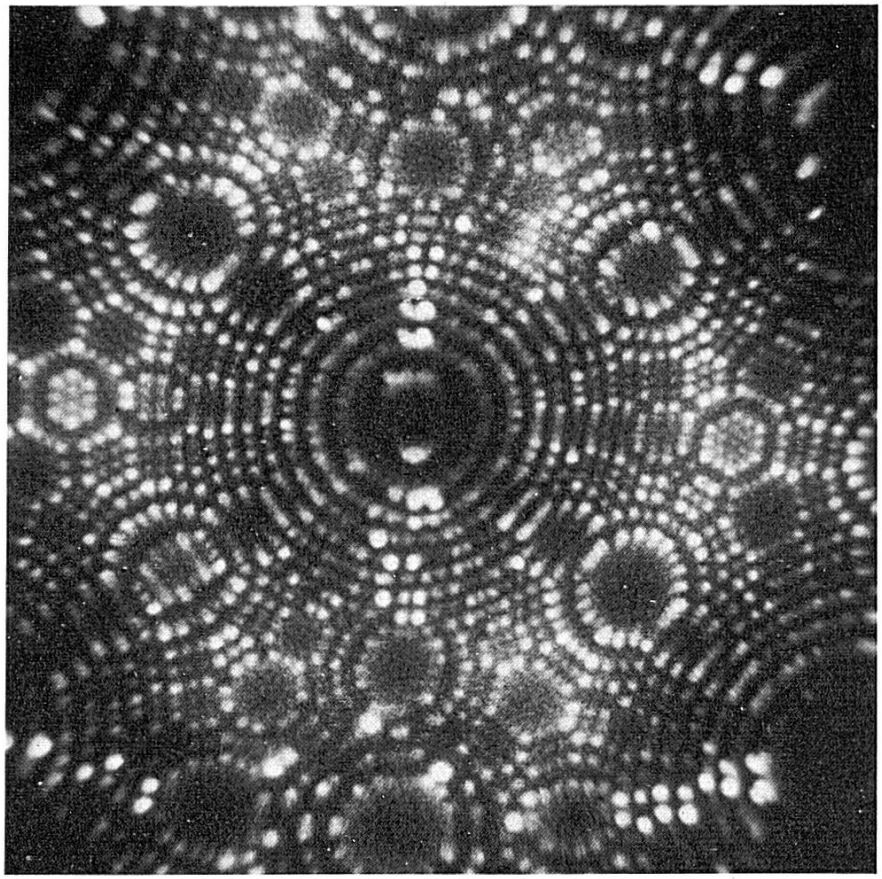

Photo 2 Disposition régulière des atomes d'un échantillon de tungstène.

d'amplifier l'intensité de l'image phosphorescente à l'aide d'un élément appelé galette à microcanaux.

La photo 1 montre une image caractéristique d'une surface d'aluminium très pur vue au microscope ionique. Les petits points clairs représentent chacun un atome. De façon évidente, leur disposition est remarquablement régulière et il y a de quoi s'émerveiller devant l'ordre savant et subtil qui règne dans l'édifice cristallin. En revanche, l'intensité est loin d'être constante; elle dépend en effet de la position plus ou moins protubérante d'un atome spécifié à la surface de l'échantillon.

En termes mathématiques, l'image correspond à une projection stéréographique. Avec un peu d'imagination plastique, on se représente facilement la disposition des atomes dans l'espace. Chaque cercle d'atomes correspond à l'intersection d'un plan cristallin avec la surface de l'échantillon. Des plans cristallins équidistants et parallèles déterminent sur la surface (considérée comme sphérique) des cercles parallèles. Sur l'image, chaque famille de cercles concentriques doit par conséquent être associée à une famille de plans cristallins parallèles ayant dans l'espace une orien-

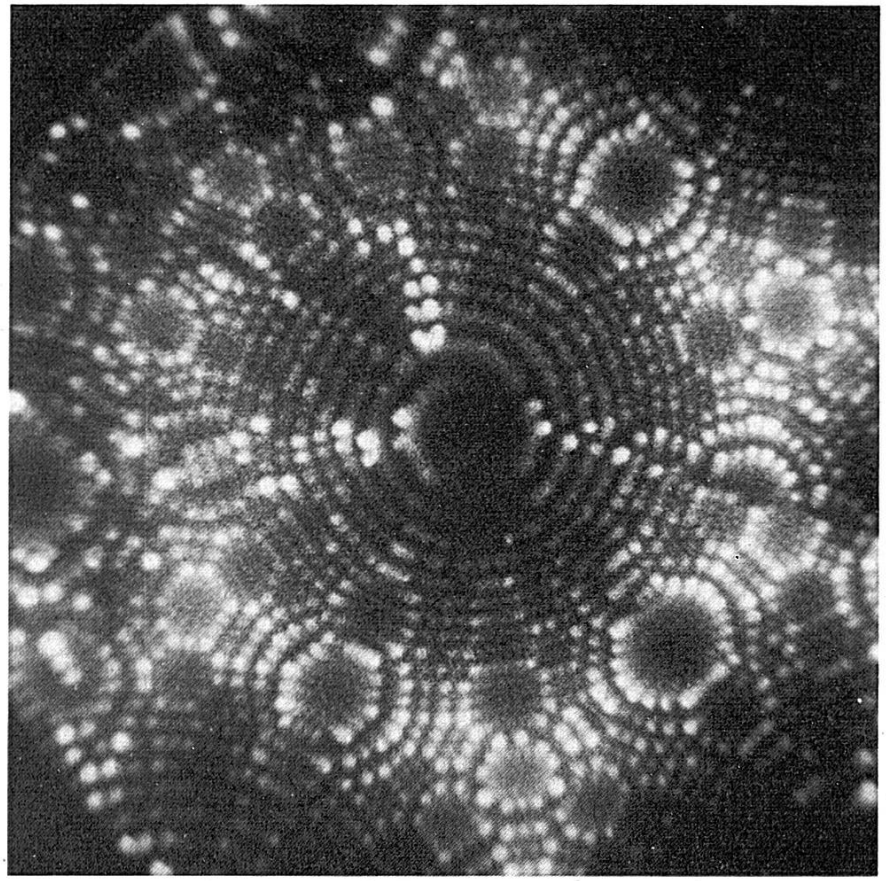

Photo 3 Joint de grain dans une pointe de tungstène observée au microscope ionique.

tation cristallographique caractéristique. Aux centres de ces familles, certains plans apparaissent comme des facettes où l'on dénombre aisément les atomes disposés en rangées régulières.

La photo 2 montre la disposition parfaite des atomes à la surface d'un échantillon de tungstène. Dans la partie droite de la photo 3, un examen attentif permet de reconnaître une ligne sombre qui correspond à un joint de grain et qui est caractérisée par une discontinuité dans la disposition atomique d'un côté à l'autre de cette frontière.

Applications

A ce stade, on pourrait croire que la microscopie ionique ne fournit qu'une image unique d'une surface figée et arbitraire d'un échantillon. Il n'en est rien, car cette technique présente au contraire l'avantage de pouvoir arracher des atomes, couche par couche, de la surface observée. On dispose donc d'un moyen d'analyser les échantillons en profondeur. Cette

dissection progressive s'effectue par élévation momentanée de la tension électrique. L'augmentation de champ électrique qui en résulte provoque l'évaporation (ou la sublimation) d'atomes superficiels, à cause des forces irrésistibles que le champ électrique exerce sur eux. Cette astuce permet en outre d'arrondir la surface et d'éliminer la contamination superficielle produite lors de la préparation de la pointe métallique.

Malgré certaines restrictions pratiques, qui tiennent avant tout au fait que l'échantillon doit être électriquement conducteur ainsi qu'à sa géométrie particulière, la microscopie ionique est actuellement un outil unique pour l'étude des alliages au niveau atomique. Elle se prête particulièrement bien à l'examen des imperfections et des défauts structurels. Il en existe de nombreux types, dont nous citerons les lacunes (positions atomiques inoccupées), les atomes étrangers, les dislocations (discontinuités dans l'alignement des plans atomiques), les joints de grains (frontières entre deux régions ayant des structures ou des orientations cristallographiques différentes) et des précipités (régions de composition modifiée). La présence de telles caractéristiques morphologiques et surtout leur densité et leur distribution se répercutent directement sur les propriétés métallurgiques. A titre d'exemple, la malléabilité d'un alliage est liée au mouvement des dislocations. Des atomes étrangers et des précipités peuvent enrayer le déplacement des dislocations et rendre ainsi l'alliage plus rigide.

Au cours des différents traitements que subit pratiquement un alliage (solidification, recuit, trempe, laminage, etc.), de nombreuses modifications structurelles ou transformations métallurgiques peuvent se produire. Beaucoup de ces réactions présentent une phase de nucléation à laquelle ne participe qu'un nombre restreint d'atomes. Il est par exemple important de pouvoir observer à l'échelle atomique l'apparition d'un précipité et les premiers stades de sa croissance. A cet égard, la microscopie ionique est un moyen de recherche fort utile pour le développement de matériaux dont on exige toujours davantage.

Depuis quelques années, les microscopes ioniques sont d'ailleurs devenus encore plus fascinants grâce à l'adjonction de systèmes d'analyse spectrométrique de masse. Avec un microscope ionique équipé d'une sonde atomique, on peut aujourd'hui identifier la nature chimique d'un atome préalablement repéré à la surface en procédant à sa sublimation par une impulsion électrique. Cette technique confère à la microscopie ionique une dimension nouvelle lui permettant de fournir, simultanément, sur les aspects structurels et sur la composition chimique des matériaux une information à l'échelle atomique.

W. Zingg