

ÉVOLUTION ET ASPECT ACTUEL DU MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE*

LE CONGRÈS INTERNATIONAL DE MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE,
PARIS, 14-22 SEPTEMBRE 1950

par

PIERRE GRIVET

Laboratoire de Radio-électricité, Faculté des Sciences, Paris (France)

Le Congrès de Paris rassembla au mois de septembre de cette année, 600 congressistes appartenant à 17 nations, qui apportèrent plus de 120 communications originales et de très nombreuses photographies; les Professeurs WYCKOFF^{2**}, FINCH^{3***}, MARK^{4§}, COSSLETT^{5§§}, firent quatre conférences d'ensemble particulièrement applaudies, et huit constructeurs différents exposèrent des microscopes de leur fabrication, en fonctionnement. A côté du Congrès, une Exposition didactique retraçait l'évolution historique des différents microscopes, depuis VAN LEEUWENHOEK jusqu'à nos jours.

Deux caractères marquent les développements de 1950: Ce sont les microscopistes et non plus seulement les physiciens qui orientent les recherches sur le microscope; les problèmes attaqués de nos jours sont posés par les observateurs. Corrélativement, une tendance nette à la spécialisation des appareils se manifeste. Les caractères importants de cette orientation nouvelle et générale, semblent être les suivants:

1. *En métallurgie*, l'attention se porte encore essentiellement sur l'art de préparer les répliques: les méthodes actuelles ne permettent pas de reproduire les sculptures de la préparation lorsque leur taille est inférieure ou égale à 8 ou 10 m μ , dans les cas les plus favorables et par ailleurs les méthodes chimiques susceptibles de révéler des structures significatives d'aussi petite taille, sont encore fort rares, les artefacts nombreux. *La finesse ne pose donc pas de problème instrumental*. D'autre part, la tendance à l'observation directe de l'échantillon mène à des appareils nettement distincts des microscopes classiques: microscope à émission thermique^{6,7}, microscopes à émission secondaire de rayons X⁸ ou d'électrons, dont le développement est sans répercussion sur l'instrument normal.

2. Dans le domaine délimité avec quelque imprécision par le terme "*chimique*" et qui englobe l'observation des poudres, fibres, colloïdes, etc., les objets les plus étudiés sont de taille assez grande, ce qui paraît naturel puisque les propriétés caractéristiques de l'état colloïdal n'apparaissent que par un groupement de molécules simples en nombre assez important. La question du pouvoir séparateur n'est pas primordiale. mais par contre, on attache beaucoup d'importance à reconnaître la nature chimique et cristallographique des particules. *C'est pourquoi la diffraction électronique est d'une aide précieuse* en ce cas, surtout lorsqu'elle parvient à donner le diagramme d'une portion très exigüe du spécimen. C'est ce genre de recherche qui a nécessité l'adaptation du microscope proprement dit à l'obtention de diagrammes de diffraction favorisant ainsi l'usage des lentilles plus nombreuses.

3. *En biologie*, les problèmes sont tout différents. Les objets délicats ne sauraient être chauffés, et leur structure est si complexe que les diagrammes de diffraction sont indéchiffrables: *la microscopie pure reste la méthode de choix et le problème central est celui du pouvoir séparateur*. La question devient

* Une bibliographie complète, concernant le microscope électronique, a été donnée récemment par C. MARTON¹.

** The electron microscopy of sectioned tissues and the visualisation of virus within them.

*** A short general survey of the study of surface and particle structure by electron diffraction and electron microscopy.

§ Electronmicroscopy of macromolecules.

§§ The prospects of examining living matter in the electron microscope.

d'ailleurs de plus en plus nuancée et difficile, car il ne s'agit plus seulement d'examiner des répliques de structure simple, de contraste artificiellement et judicieusement accrus; on tend dès aujourd'hui à *observer directement des coupes de tissus*. Elles paraissent bien minces si l'on s'arrête à la difficulté de les obtenir, bien épaisses encore si l'on remarque la complexité de l'obstacle qu'elles présentent aux électrons. C'est ainsi que les types de microscopes les plus évolués sont construits pour la recherche biologique: les appareils simplifiés, destinés au travail de routine en ce domaine, suffisent encore aux besoins de la "recherche" en métallurgie et en chimie.

I. CONSTRUCTION

A. Les trois étages d'agrandissement

Une tendance très sensible de la construction moderne est l'utilisation de trois lentilles successives comme il a été proposé d'abord par MARTON il y a plusieurs années, ce qui permet d'augmenter le grandissement, tout en diminuant la hauteur de l'instrument. Les avantages de cette structure sont les suivants:

1. Les résultats obtenus par des expérimentateurs variés, ont montré que l'on obtenait la finesse maxima des images, avec le moins de peine possible, en adoptant un grossissement électronique compris entre 25,000 et 30,000; au-delà de 35,000, les images ne sont plus assez brillantes et deviennent plus difficiles à observer, les durées de pose s'allongent jusqu'à plusieurs secondes, et l'objet risque d'être soumis à un bombardement trop intense; au-dessous de 20,000 le grain photographique limite le pouvoir séparateur (sauf précautions spéciales) et la mise au point exacte est plus difficile à apprécier.

2. L'obtention d'un pouvoir séparateur élevé n'est possible que moyennant une stabilité considérable des conditions de fonctionnement. Nombre d'entre elles dépendent de la longueur de l'appareil et à ce point de vue, une réduction de la distance objet-image finale est toujours favorable, en particulier elle diminue l'influence des champs électromagnétiques parasites et des vibrations.

3. La nécessité d'avoir trois étages est particulièrement impérieuse pour les microscopes électrostatiques car leur lentilles ont en général des distances focales plus longues (deux fois en gros, soit 6 mm pour l'objectif, 3 mm pour le projecteur à 50 kV) que les lentilles magnétiques, toutes choses égales d'ailleurs. L'introduction d'une troisième lentille fait disparaître cette inégalité car elle permet d'obtenir facilement un grossissement total de 50,000, dans un instrument électrostatique de 75 cm de longueur totale. Les Fig. 1 et 2 montrent les proportions d'un appareil de ce genre, construit récemment au laboratoire de l'auteur⁹. La Fig. 3 montre les proportions ramassées d'un microscope magnétique à très haute tension (jusqu'à 200 kV) et à plusieurs lentilles, construit par HILLIER ET ELLIS, dans leurs recherches sur le rôle du facteur tension dans le contraste¹⁰.

B. Grossissement variable en l'absence de distorsion

L'introduction d'une troisième lentille ouvre d'autres possibilités:

a. On maintient le grossissement de la dernière lentille fixe et il est alors possible de proportionner ses dimensions, qu'elle soit magnétique ou électrique, de manière à supprimer toute distorsion; le grossissement au bord du champ reste égal à celui qu'on observe au centre de l'image. Les recherches sur les lentilles au cours de ces dernières années, fournissent de nombreux moyens de parvenir simplement à ce résultat, sans même sacrifier la simplicité des lentilles "unipotentiellles" dans le modèle électrostatique.

b. On conserve la possibilité de varier le grossissement de manière continue dans de larges limites en modifiant la distance focale de la lentille intermédiaire; on peut,

par exemple, dans l'appareil de la Fig. 1, parcourir une gamme totale de grossissements allant de 2,000 à 50,000 sans cesser de couvrir entièrement la plaque ou l'écran final de 6×6 cm, en modifiant le potentiel de l'électrode centrale de 12 kV environ pour 60 kV de tension d'accélération des électrons, et la stabilité du potentiomètre n'a pas besoin

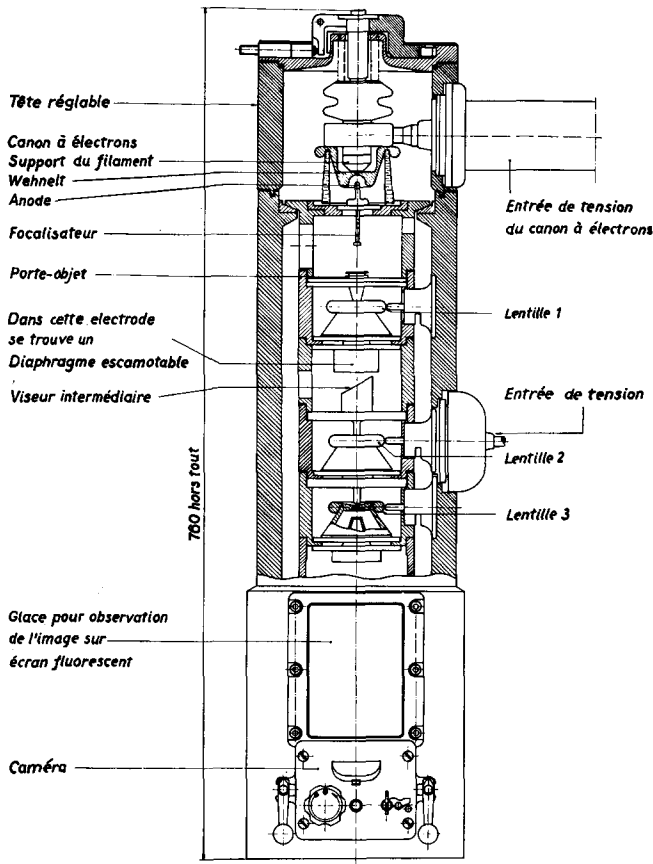


Fig. 1. Microscope électrostatique expérimental à 3 lentilles de GRIVET ET REGENSTREIF⁸, vu en coupe. Longueur du tube optique 76 cm; hauteur totale de l'appareil 150 cm. Grossissements: objectif $g_1 = 20$, lentille intermédiaire $g_2 = 1-25$, lentille projective $g_3 = 100$; $G = 2,000-50,000$.

de dépasser quelques millièmes en valeur relative. La solution est encore plus simple dans le domaine magnétique où il est très facile d'agir sur le courant d'alimentation d'ores et déjà stabilisé.

C. Diaphragme de contraste amovible et diffraction

Voici une autre nouveauté qui semble promise au succès; il s'agit d'un mécanisme d'escamotage et de remise en position précise du diaphragme de contraste pendant le fonctionnement du microscope. On obtient ainsi deux résultats utiles:

a. On peut nettoyer le diaphragme facilement et on améliore à la fois le pouvoir séparateur pratique et le contraste. Il est bien établi aujourd'hui que l'insertion d'un

diaphragme de petit diamètre (supprimant les faisceaux diffractés du premier ordre) augmente considérablement le contraste de l'image et par conséquent la qualité de l'image enregistrée (par un effet direct, et aussi parce que l'observation oculaire et la mise au point sont facilitées^{11, 12}). Mais le diaphragme doit être très propre (il commence à se souiller en quelques heures de fonctionnement avec les pompes à huile), sinon il introduit un astigmatisme d'ellipticité qui ruine les avantages escomptés.

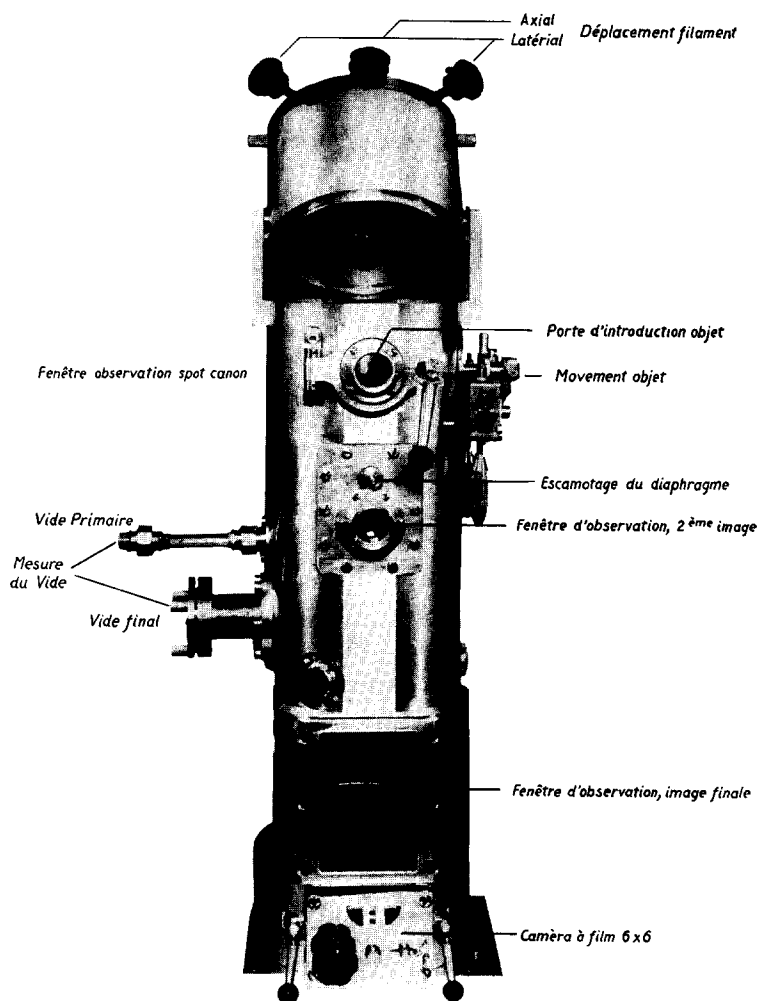


Fig. 2. Microscope électrostatique de GRIVET ET REGENSTREIF⁹, vu de face, canon ouvert pour le changement du filament

b. On peut, en escamotant le diaphragme et en réglant convenablement la deuxième lentille, amener sur l'écran final l'image du plan focal de l'objectif. On observe ainsi et on enregistre les diagrammes de diffraction par transparence. L'insertion d'un deuxième et petit diaphragme sélecteur au niveau de la première projective est une

Bibliographie p. 17/18.

complication facultative. Elle devient utile lorsqu'on veut observer un diagramme qui ne caractérise qu'une zone minuscule (de diamètre d/g , où d = diamètre du deuxième diaphragme, g = grandissement de l'objectif) dans l'objet.

D. Canons à électrons

Il se manifeste peu de changements dans ce domaine. L'usage de l'autopolarisation semble maintenant général, la stabilisation efficace du courant électronique qu'apporte ce schéma simple suffit à expliquer son succès. La plupart des microscopes magnétiques conservent un condenseur séparé; dans le domaine électrostatique, la voie ouverte par BRUCK ET BRICKA¹³ a été suivie et un deuxième dispositif à trois électrodes, remplaçant l'ensemble canon classique-condenseur, a été décrit¹⁴ et équipe l'appareil AEG Zeiss.

Le canon à cathode froide de INDUNI¹⁵ monté sur le microscope suisse Trüb Tauber & Co, a été l'objet d'investigations nombreuses et MÖLLENSTEDT¹⁶ a prouvé par spectrométrie directe, que le faisceau d'électrons produit, était tout aussi monocinétique que celui qui sort d'un filament chaud.

E. Aspects constructifs variés

Aucune contribution nouvelle n'a été enregistrée à ce Congrès, ni peut être même dans la bibliographie de cette année sur des questions, qui les années précédentes semblaient préoccuper vivement les microscopistes. Nous citerons par exemple:

- a. souillure de l'appareil par le fluide de la pompe,
- b. amélioration des écrans fluorescents,
- c. qualité des matériaux magnétiques pour pièces polaires et blindages,
- d. résistance au claquage des surfaces métalliques soumises à la tension.

Par contre, le problème de la stabilisation des tensions dont la solution est essentielle, pour la focalisation magnétique, a fait l'objet d'une communication très importante de HAINE¹⁶: cet auteur a mis au point, un dispositif électronique qui doit remplacer

Bibliographie p. 17/18.

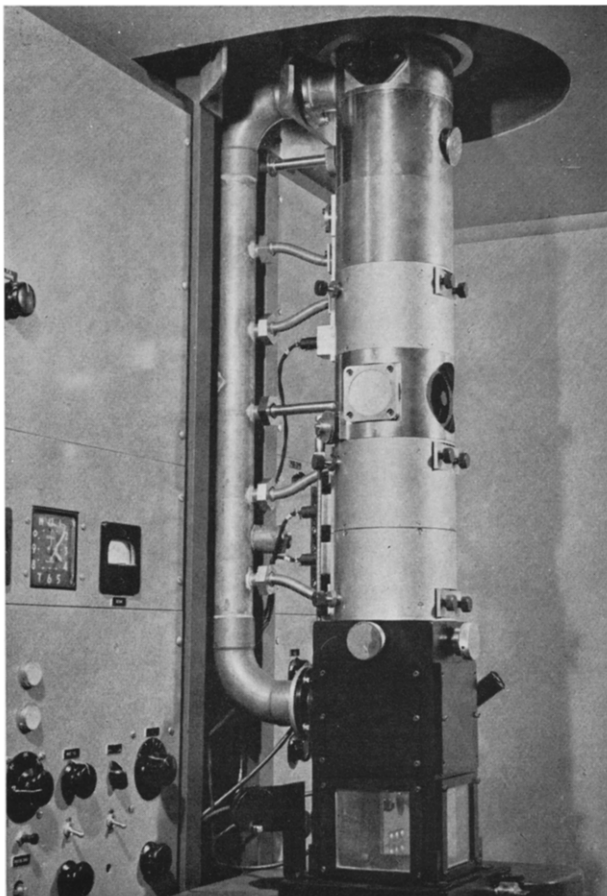


Fig. 3. Microscope expérimental à très haute tension de HILLIER ET ELLIS¹⁰.

avantageusement le potentiomètre résistant, organe essentiel, mais de stabilité souvent critiquable dans tous les régulateurs de tensions électroniques automatiques. Enfin, il a été montré¹⁷ que dans certains appareils, tout progrès dans la finition des objectifs devait s'accompagner d'une révision soignée de l'efficacité du blindage.

F. *Optique électronique*

Il faut bien noter qu'une grande partie des progrès enregistrés dans les paragraphes précédents et dans la suite, est due au succès d'une floraison récente d'études expérimentales et théoriques, consacrées aux lentilles électroniques. Le Congrès a été l'occasion de plusieurs importantes communications de ce genre. Leur mérite, aux yeux des microscopistes est de rendre clairs, précis et faciles, les projets de construction; on peut ainsi parvenir pratiquement à serrer de très près les conditions optima pour le but poursuivi, en éliminant les longs tâtonnements expérimentaux, les mises au point lentes décourageantes et dispendieuses, qui étaient de règle en la matière il y a quelques années. Les lentilles magnétiques, de tout temps les plus faciles à mettre en équation ont continué à être l'objet de soins attentifs: LIEBMANN¹⁸ a décrit les propriétés expérimentales d'une vaste série de telles lentilles et les a comparées au modèle mathématique usuel, celui de GLASER; il a décrit une machine "analogique" simple pour calculer automatiquement leurs caractéristiques. GLASER a fouillé¹⁹ l'étude du modèle si simple auquel son nom reste attaché et donné un moyen nouveau et pratique de l'adapter au mieux à chaque cas réel²⁰, en rendant minimum — à la Rayleigh — l'erreur sur la distance focale du modèle. Les lentilles électrostatiques depuis toujours les plus rebelles à la description mathématique ont été amenées à un traitement simple et complet par REGENSTREIF, qui règle par des formules précises et cependant maniables, les lois de l'imagerie et des aberrations, dans les lentilles²¹ et les miroirs²² et calcule leurs coefficients à partir des tensions appliquées et des dimensions géométriques. COTTE²³ et CASTAING²⁴ enfin, s'attaquent à des problèmes tout récents, ceux qu'offrent l'ellipticité des trous, et ils en donnent des solutions nouvelles.

II. POUVOIR SÉPARATEUR

A. *Objectifs améliorés*

Le problème central de la microscopie, celui du pouvoir séparateur présente aujourd'hui des aspects multiples et très différenciés, ce n'est plus "une" question à laquelle on puisse espérer donner "une" réponse unique.

Une voie de progrès naturelle suit une ligne tracée antérieurement, lorsqu'on essayait de schématiser davantage le problème. Si l'on envisage les objets les plus simples et les plus faciles à examiner, ceux où il n'y a que des "blancs" très transparents et des "noirs" très opaques — certaines répliques en forment un bon exemple — on parvient à une théorie assez complète de l'image et on possède des méthodes de mesure relative du pouvoir séparateur assez précises et assez simples, pour diriger et vérifier les progrès obtenus dans la construction. Ainsi depuis les théories fondamentales de HILLIER ET RAMBERG²⁵, SCHERZER²⁶ et BERTEIN²⁷, de nombreuses expériences ont établi que le défaut pratique essentiel des objectifs de toute nature est l'astigmatisme d'ellipticité, dû aux imperfections résiduelles de la finition mécanique, de la structure magnétique du métal ou des couches isolantes de sa surface.

Une première voie de progrès consiste à adapter au mieux la structure de l'objectif

à l'existence de ces sources de défauts, supposés inévitables. C'est le chemin choisi par LE POOLE²⁸ dans ses travaux à Delft et qui a conduit à la construction de l'appareil Philips. C'est dans les mises au point de ce genre, que la connaissance précise du rôle des paramètres constructifs dans l'expression des grandeurs optiques, distance focale, coefficient d'aberration, s'avère précieuse et que l'on recueille le fruit des recherches d'optique électronique mentionnées au paragraphe précédent. Aussi ne faut-il pas s'étonner que l'objectif magnétique se trouve ainsi amélioré indépendamment de tout progrès dans la métallurgie des pièces polaires.

Le même travail a pu être mené à bien par REGENSTREIF^{9, 21} pour l'objectif électrostatique, une fois qu'il a été en possession d'un arsenal de formules commodes pour le décrire: là, deux variantes sont possibles, on peut réaliser un gain sensible en conservant le caractère unipotentiel de la lentille, mais on obtient un avantage plus marqué en appliquant à l'électrode centrale une assez forte polarisation négative (quelque 10 kV); ce qui est devenu possible sans complication notable grâce aux progrès réalisés dans la technique des alimentations haute tension.

Il est à noter que l'introduction de ces perfectionnements n'a de valeur que si le diaphragme de contraste est escamotable et facilement nettoyable, sinon la souillure du diaphragme empêche de mettre en valeur les avantages obtenus.

B. Correcteurs d'astigmatisme

Le mérite des physiciens précités^{26, 27, 28} est attaché non seulement à la description du mal des objectifs, mais aussi à la découverte des moyens efficaces pour y porter remède. C'est l'objet d'un appareil qu'on désigne actuellement sous le nom de "correcteur d'ellipticité" ou plus vaguement de "stigmatiseur". La première en date de ses réalisations, les six vis magnétiques de HILLIER ET RAMBERG²⁶ est très largement utilisée et a mené dans la main de ses auteurs et de beaucoup d'autres adeptes à des résultats remarquables: on pouvait admirer à l'Exposition, plusieurs photographies dont la finesse paraissait atteindre la limite du réalisable à l'heure actuelle (Fig. 4, 5, 6). Mais ce système garde un inconvénient: la compensation n'est pas ajustable en marche, on ne peut obtenir le stigmatisme que dans des conditions de propreté rigoureuse du tube et des diaphragmes, on ne peut pas rattraper progressivement les effets des souillures dont l'importance va croissant avec le

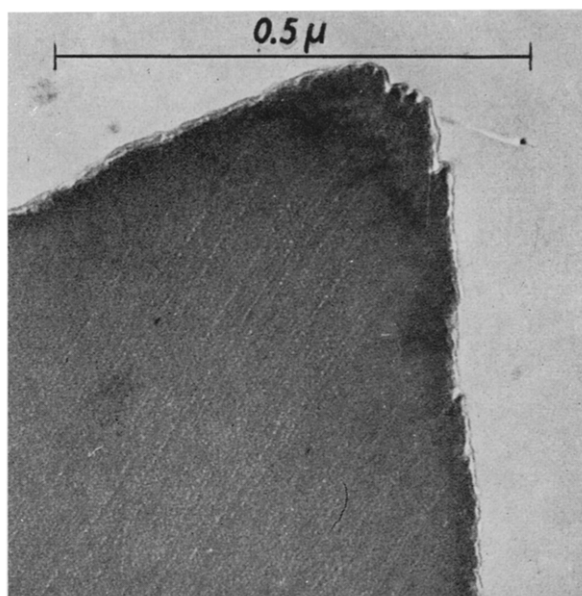


Fig. 4. Cristall laminaire d'oxyde d'aluminium monohydraté. On remarquera les striations parallèles, dans le cristal. Grossissement électronique: 23,400. Grossissement de la photographie: 125,000. Photographie JAMES HILLIER, RCA Laboratories, Princeton, N.J. (Reproduite avec l'autorisation de l'auteur).

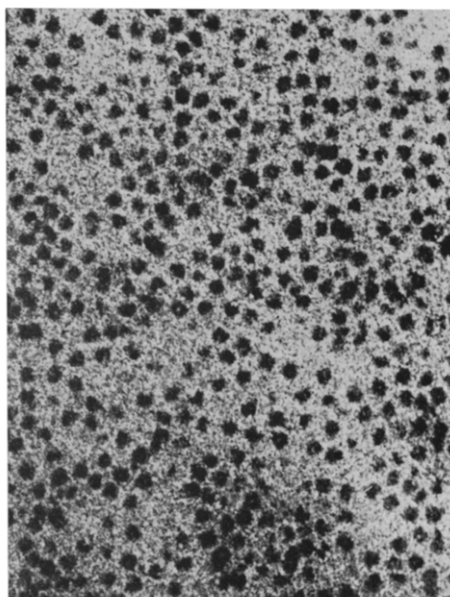


Fig. 5. Micelles d'hydroxyde de fer de la ferritine (protéine). Grossissement: 320,000. On remarquera la forme angulaire des particules et le trou en leur milieu. Photographie de J. M. FARRANT, of the Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation, Australia. (Reproduite avec l'autorisation de l'auteur).

temps. Il est bien certain qu'une correction exacte est d'autant plus difficile à ajuster que le défaut est plus grand et qu'il vaut toujours mieux opérer dans des conditions de propreté optima: néanmoins, il serait très commode en pratique, de pouvoir ajuster la compensation et l'adapter au vieillissement du diaphragme.

Différents stigmatiseurs réglables de l'extérieur, peuvent être envisagés; l'un d'entre eux décrit d'abord par BERTEIN^{27, 29} a été étudié en détail en Allemagne au laboratoire de BRÜCHE³⁰ et équipe actuellement l'appareil AEG Zeiss. Ces appareils sont de structure simple, et très efficaces, mais une difficulté importante appelle encore des études; il faut trouver un indicateur plus net du degré de compensation obtenu. L'observation de la symétrie des franges de contour, à un fort grossissement, mène au but mais requiert un observateur très averti. L'indicateur de mise au point proposé il y a quelques années par LE POOLE et largement répandu aujourd'hui devrait faciliter la besogne; nous avons bon espoir de ce côté, mais aucun progrès de cette tendance n'a été enregistré au Congrès.

Un autre espoir de solution, est fourni par les beaux travaux de CASTAING^{24, 31, 32}; il a établi expérimentalement qu'on pouvait mesurer l'astigmatisme d'un objectif quelconque en l'employant à l'envers à produire un spot très fin et en examinant l'ombre d'un fil à la lumière de ce spot. Les déformations de l'ombre indiquent de manière caricaturale la grandeur de l'astigmatisme comme le montre la Fig. 7. La théorie faite par CASTAING²⁴ explique quantitativement les apparences comme le montre la Fig. 8, et donne une mesure exacte du coefficient d'aberration correspondant. On possède là le moyen rêvé de contrôler le réglage d'un correcteur d'ellipticité, on peut d'ores et déjà l'employer avec fruit à vérifier la fabrication des objectifs, à l'ajustement des compensateurs fixes, mais un travail important reste à faire pour employer l'appareil au réglage des stigmatiseurs sur un microscope en marche.

C. Mise au point – Franges de Fresnel

Un point important restait assez obscur dans la théorie des images: dans un objectif entaché d'aberration sphérique et d'aberration d'ellipticité (si on le suppose non corrigé) comment doit-on mettre au point, pour obtenir l'image scientifiquement la plus nette, dans les conditions où la diffraction joue un rôle important? Est-ce que l'oeil est susceptible d'apprécier ces conditions, et l'opérateur peut-il se guider dans son choix de la meilleure image par la considération des franges de contour et comment? De nombreux travaux apportés au Congrès ont éclairci grandement ces questions sans en épuiser l'intérêt:

HAINE ET MULVEY³³ par des calculs extrêmement simples et des expériences très

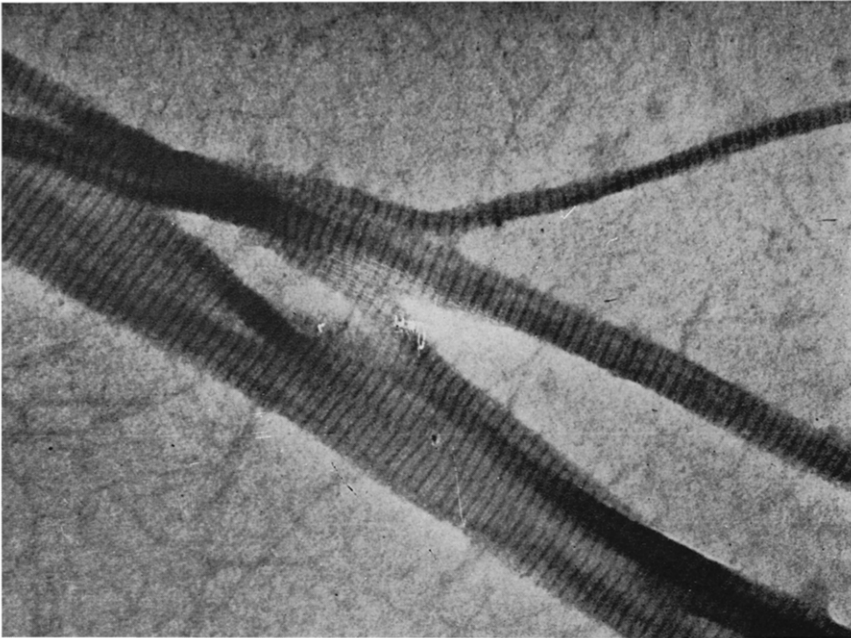


Fig. 6. Fibrine de boeuf traitée à l'acide phosphotungstique. Grossissement 79,000. Photographie C. E. HALL, Mass. Inst. Tech. (Reproduite avec l'autorisation de l'auteur).

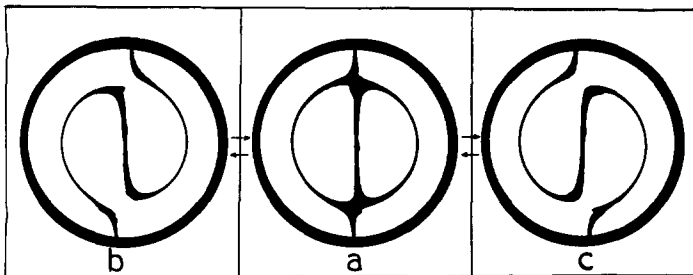


Fig. 7. Réglage d'un correcteur d'astigmatisme suivant CASTAING²⁴: a. correcteur bien réglé; b. et c. astigmatisme résiduel caractérisé par une valeur $Ce = \pm 0.5$, du coefficient d'astigmatisme d'ellipticité.

soignées, ont précisé clairement les caractères essentiels des franges, quel que soit le plan où on les observe (au voisinage bien entendu de l'image de Gauss):

a. La largeur de ces franges ne dépend pas des aberrations géométriques. Ces figures ne peuvent donc pas servir à mesurer le pouvoir séparateur comme on l'avait cru d'abord et l'on peut en observer dont l'équidistance est de l'ordre du tiers de la plus petite distance résolue. Il faut donc abandonner tout espoir de mesure du pouvoir de résolution par le procédé dit des "franges".

b. La largeur des franges ne dépend que de la cohérence des pinceaux élémentaires, qui concourent au point considéré de l'image. Elle dépend donc au premier chef de la cohérence de l'éclairage fourni par le canon à électrons et pour observer le phénomène il faut régler l'ouverture du faisceau frappant l'objet à une très faible valeur.

Bibliographie p. 17/18.

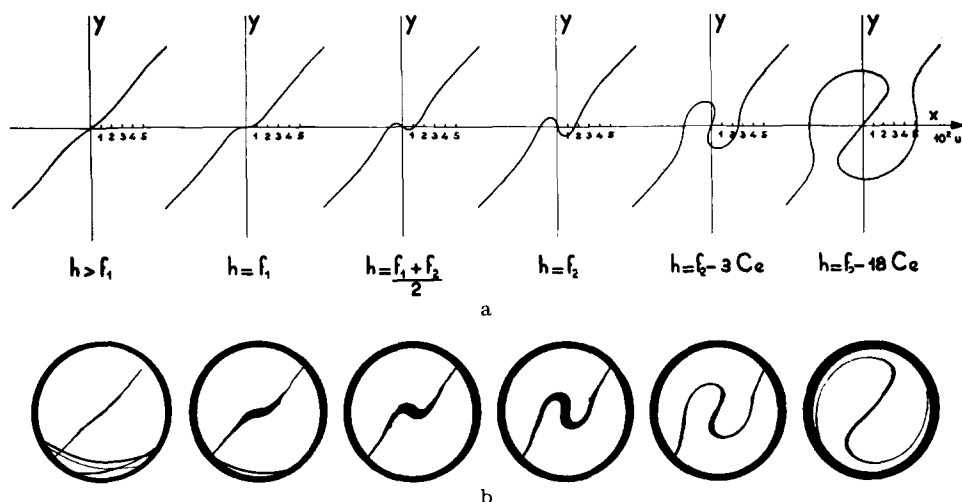


Fig. 8 a et b. Ombre d'un fil (diamètre 0.3μ) orienté à 45° des focales, d'après CASTAING²⁴: a. calculée: h distance du fil au plan principal image, f_1 f_2 distances focales dans les plans méridiens perpendiculaires aux focales, Ce constante d'aberration d'ellipticité; b. observée.

c. Mais la cohérence finale dépend aussi sensiblement de toutes les causes perturbatrices, agissant entre l'objet et l'image, tels les champs parasites, les variations accidentelles de tension ou du courant alimentant les lentilles etc. . . Ceci corrobore les impressions des premiers expérimentateurs; ils avaient raison de conclure qu'un microscope qui montre de belles franges est un appareil bien réglé, qui marchera bien en microscope une fois l'angle d'éclairage élargi, car on est alors sûr que beaucoup de causes de troubles sont éliminées. Les auteurs du rapport³³ donnent une liste étendue des maladies de l'appareil qu'il est ainsi possible de détecter et ils montrent aussi comment on peut, par le même moyen mesurer leur gravité. En particulier, il est montré comment la redoutable dérive thermique peut être ainsi dépitée.

BREMER³⁴ choisit une voie plus savante, mais ramène élégamment le problème à une solution géométrique très claire; elle donne le moyen d'évaluer l'éclairement en un point du champ de franges considéré au paragraphe précédent. Par ce moyen, on pourra peut être résoudre avec plus de précision, des problèmes pratiques dont BRUCK³⁵ avait autrefois dégrossi la solution par des moyens plus frustes. On pourra peut être vérifier si la mise au point correcte correspond bien à la règle de Lord RAYLEIGH (elle porte le foyer au-delà de l'objet à une distance égale aux tiers de l'aberration longitudinale). Il est à espérer aussi qu'on précisera les conditions, dans lesquelles il faut mesurer la largeur de la transition entre les noirs et les blancs pour en tirer une évaluation correcte du pouvoir de résolution.

D'autres études mettent en jeu de bien plus vastes moyens encore. Elles sont dues à MARÉCHAL^{36, 37}, FRANÇON^{38, 39}, HOPKINS⁴⁰. Ces auteurs cherchent la répartition exacte de l'intensité électronique dans tous les plans au voisinage de l'image de Gauss. Pour ce faire, on utilise les dernières ressources des méthodes élaborées en optique et les machines à calculer les plus puissantes, dont un exemplaire remarquable a été construit par MARÉCHAL à l'Institut d'Optique de Paris; il est spécialement conçu pour la résolution de ce genre de problème.

La conclusion préliminaire de ces études de vaste envergure est que la limite théorique ultime imposée aux appareils par l'aberration sphérique et la diffraction dans les cas simples et favorables cités précédemment se situe très sensiblement *au-dessous* de ce que l'on croyait jusqu'à présent. Auparavant, on se contentait de superposer quadratiquement les effets, au lieu de composer les causes, et l'on opérait toujours dans le plan de l'image de Gauss, qui est défavorable. Ce procédé grossier ne donne qu'une limite supérieure du pouvoir séparateur, ce que l'expérience commence à révéler. Il semble acquis maintenant qu'il existe encore une marge de progrès possible pour les expérimentateurs, entre les 10 Å atteints aujourd'hui et peut être quelques 4 ou 5 Å que la théorie laisse espérer avec quelque incertitude. Beaucoup de travail sera sans doute nécessaire pour franchir cette dernière étape mais la région du "très petit" envisagée là est si intéressante que l'effort sera vraisemblablement tenté.

Il faut bien remarquer que cette prévision optimiste repose sur une extrapolation hardie, qui peut se révéler injustifiée pour une cause étrangère au calcul — mais bien évidente si nous réfléchissons à la portée du résultat. Toutes les méthodes décrites précédemment si savantes soient-elles partent de l'hypothèse, que l'objet diffracte comme s'il était continu, elles ne tiennent pas compte de sa structure *particulière*, ce qui semble bien dangereux lorsqu'on arrive à des distances de l'ordre de 5 Å, du même ordre de grandeur que les distances interatomiques dans un solide. Le paradoxe apparaît clairement dans un calcul de GLASER⁴. Cet auteur étudie l'expérience la plus directe qu'on ait imaginée pour mesurer le pouvoir séparateur, c'est la détermination de la plus faible distance qui puisse séparer deux points pour qu'ils apparaissent comme des taches distinctes dans l'image. Comment faut-il choisir pour cela le diamètre des deux grains objets? Les plus gros possibles évidemment, ce choix naturel mène à prendre un disque tel que l'angle d'ouverture moyenne du pinceau qu'il diffracte soit juste égal à l'angle optimum d'éclairage du microscope, défini par l'équilibre à réaliser entre les effets des aberrations de l'objectif et ceux de la diffraction. On trouve alors que le diamètre de chaque grain doit être égal à la moitié du pouvoir de résolution escompté ce qui mène à 5 Å pour les pouvoirs de résolution d'ores et déjà mesurés. Le grain ne comptera que bien peu d'atomes et il semble prudent de n'accorder aux conclusions des théories continues qu'une valeur relative; elles permettent par exemple de comparer les résultats obtenus pour des mises au point différentes mais il serait illusoire d'accorder sa confiance à la valeur absolue des coefficients de leurs formules.

D. Haute tension

Une branche nouvelle de recherche est ouverte par l'observation directe des coupes de tissu^{2, 42}. Leur épaisseur est encore notable, 0.05 à 0.1 micron pour les mieux réussies, et l'action d'un tel objet sur le faisceau est plus complexe que celle d'une mince réplique. Que devient le pouvoir séparateur? Quels sont les facteurs du contraste et leurs répercussions sur la finesse des images? Peut-on compter sur l'aide de plus hautes tensions pour améliorer les résultats et nous ramener en gros à des conditions plus semblables à celles que nous étions habitués à trouver à basse tension dans le cas des répliques?

HILLIER ET ELLIS donnent une réponse précise à l'une de ces questions à la suite d'un travail expérimental d'une remarquable minutie¹⁰. Ils ont construit un microscope à haute tension aux lentilles interchangeables et ont étudié avec rigueur la finesse et surtout le contraste des photographies de coupes de tissu en fonction de la tension jusqu'à 200 kV; ils donnent le résultat global de leur enquête sous la forme suivante:

a. L'emploi de la haute tension dans les meilleures conditions possibles n'améliore pas le pouvoir séparateur; ce qu'on gagne par augmentation de la transparence se trouve voilé par la baisse du contraste; on observe une baisse intrinsèque due à la vitesse accrue des particules, mais aussi une confusion due à la superposition des effets des couches nombreuses et variées dont la grande profondeur de champ permet la vision simultanée.

b. Elle diminue la peine qu'on a, à obtenir un résultat donné. En effet, un instrument légèrement défectueux (propreté négligée, champs parasites légers) fonctionne toujours mieux lorsqu'on élève la tension.

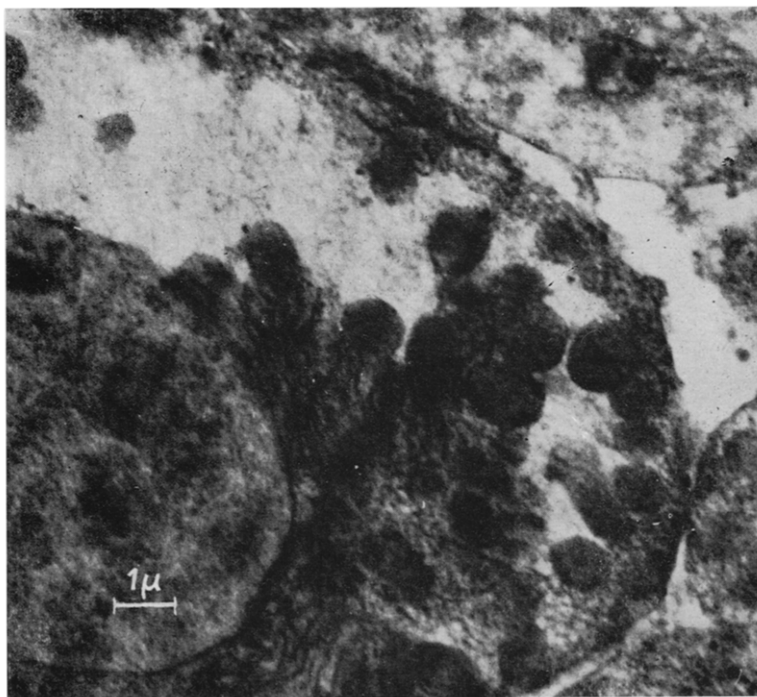


Fig. 9. Coupe épaisse ($0.3\ \mu$) de tissu (foie de souris) photographiée à 100 kV par HILLIER⁴². Grossissement électronique: 7,500.

c. Par contre, pour certains objets, naturellement minces, il semble intéressant d'abaisser la tension à 25 kV pour atteindre la résolution et le contraste maximum.

Il faut bien remarquer qu'il se pose là des problèmes constructifs importants: il faut employer un jeu d'objectifs, chacun étant adapté à une gamme assez étroite de tension. En effet, pour une lentille donnée, le pouvoir de résolution diminue lentement mais sensiblement encore, quand on augmente la tension et si l'on veut obtenir une baisse presque insensible, il faut adapter la construction au choix de la tension.

Nous devons être reconnaissants à HILLIER de s'être avancé dans cette voie difficile mais prometteuse comme le montre une de ses photographies (Fig. 9) et de nous avoir donné les premières images enregistrées sous haute tension avec une bonne résolution.

Ce souci d'introduire dans la pratique l'usage des hautes tensions se manifeste

également dans les réalisations et les projets de l'un des fondateurs de la microscopie électronique, E. RUSKA; les congressistes purent admirer le plus récent des instruments (100 kV) dont il ait dirigé la construction. Il se trouve décrit en détail dans une publication récente⁴³; l'auteur y expose aussi ses desseins pour l'avenir; ils doivent le mener à réaliser un appareil industriel allant jusqu'à 220 kV.

C'est déjà quitter le domaine des hautes tensions que de mentionner la belle conférence où COSSLET⁵ a examiné les possibilités d'observer directement les êtres vivants sans les tuer; il ne semble malheureusement pas y avoir de possibilité de parvenir à ce but, en extrapolant même largement les caractéristiques des appareils actuels. Le problème requiert des moyens d'un autre ordre, et des idées neuves; souhaitons comme tous les congressistes qu'un problème aussi important retienne dès aujourd'hui l'attention et les soins de chercheurs hardis.

E. Commission du pouvoir séparateur

L'importance de la qualité "pouvoir séparateur" est si grande que le Congrès néerlandais de Delft (1949), dans l'espoir que d'autres Congrès internationaux continueraient son oeuvre, avait créé une Commission du pouvoir séparateur. Cette Commission s'est réunie à Paris et a contribué efficacement à animer les discussions dont nous avons essayé de résumer les résultats. Le but de cette Commission est de centraliser toutes les informations sur les aspects théoriques et expérimentaux de ce problème, de les diffuser et de les discuter à l'occasion des Congrès futurs. Le Président de cette Commission est le Professeur GABOR; les lecteurs peuvent lui envoyer leurs demandes ou leurs propositions*.

III. PERSPECTIVES D'AVENIR

Les pages qui précèdent prouvent bien que le microscope classique est un organe parvenu à l'état de développement adulte, et que nous ne verrons pas ses qualités de pénétration changer d'ordre de grandeur, sans introduire une révolution dans sa conception: les microscopistes électroniques sont arrivés aujourd'hui au même point de leur histoire que les microscopistes optiques en 1932. Si l'on veut pénétrer plus loin, distinguer l'arrangement des molécules et des atomes**, il faut abandonner la voie des améliorations progressives et adopter des principes révolutionnaires. C'est ce que pensaient nombre de physiciens depuis quelques années déjà, mais ce sentiment ne les avait jusqu'à présent portés qu'à échafauder la théorie des instruments de l'avenir et il restait à faire un choix délicat entre les nombreuses possibilités que leur imagination nous faisait entrevoir. Aujourd'hui cette critique expérimentale, travail courageux et difficile est chose faite et trois nouveaux systèmes seulement retiennent l'attention.

A. Microscope à lentilles cylindriques de Scherzer

SCHERZER qui avait lui-même exploré largement la théorie des possibilités nouvelles, en avait retenu deux qui furent essayées^{26, 46}.

La première, expérimentalement la plus simple, consistait à prendre une lentille électrostatique ordinaire et à remplacer le trou central par une très mince membrane métallique⁴¹. Le dispositif était simple, la correction de l'aberration sphérique pouvait être complète et la technique des membranes métalliques en béryllium étant bien connue, à la suite des travaux de HALST^{50, 51}, cette voie semblait très tentante. Les expériences

* L'adresse de la Commission est présentement la suivante: Professeur D. GABOR, Président de la Commission du pouvoir séparateur, Imperial College of Science and Technology, City and Guilds College, South Kensington, London, S.W.7.

** Cette question a-t-elle un sens? Plusieurs physiciens, et non des moindres, MM. DE BROGLIE, GABOR, BOERSCH, SCHERZER, se sont penchés sur ce problème difficile et il semble bien qu'une tranche importante d'infiniment petit, au-dessous des $10 \text{ \AA} = 1 \text{ m}\mu$, actuels soit accessible. Le lecteur trouvera une introduction à ces questions dans le chapitre XIV et l'appendice II du livre récent de LOUIS DE BROGLIE⁴⁴, dans la dernière publication de D. GABOR⁴⁵ et dans les références^{46, 47, 48, 49}.

de SCHERZER ont révélé un écueil qui semble devoir faire sombrer nos espérances: la diffusion des électrons dans la membrane la plus mince, trouble les images, par effet chromatique, la lentille étant stigmatique mais non achromatique. On perd là tout ce que l'on avait gagné d'autre part, et le défaut semble presque irréductible car la variation de vitesse à la traversée de la feuille est discontinue, ou plus exactement quantique (quelques dix volts) comme les travaux de RUTHEMANN^{52,53} et MÖLLENSTEDT⁵⁴ l'ont montré et il n'est pas possible de réduire de manière continue la cause nouvelle de flou. Un faible espoir subsiste d'éliminer ces effets, car s'il est très difficile d'achromatiser

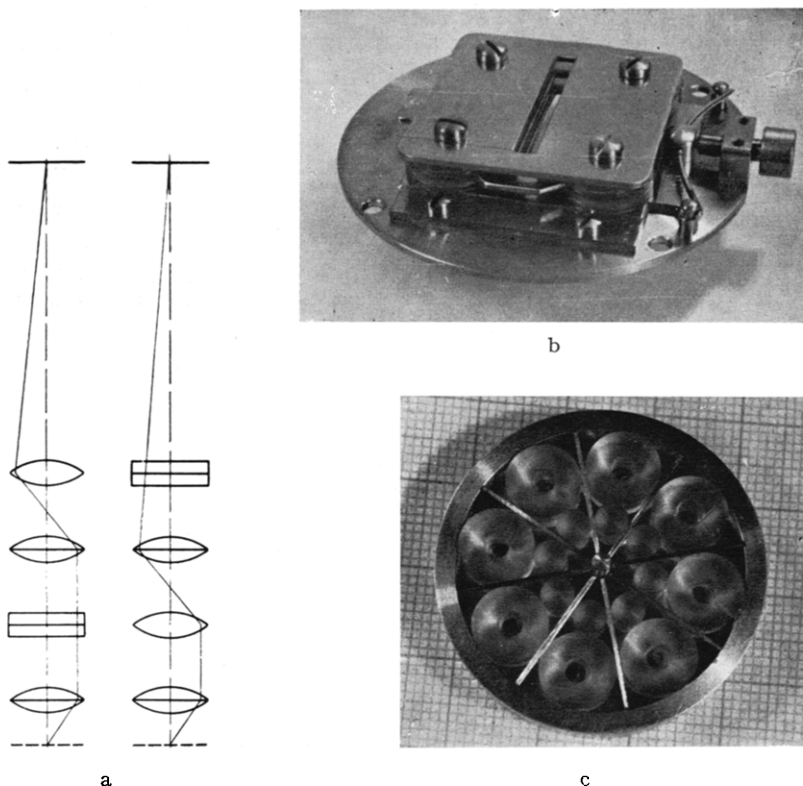


Fig. 10. Lentilles synthétiques de SCHERZER⁵⁷. a. Marche des électrons dans deux plans méridiens perpendiculaires. L'ensemble est équivalent à un objectif et une projective ordinaires, mais il est corrigé de l'aberration sphérique. b. Lentille cylindrique. c. Compensateur d'ellipticité; son but est de parfaire l'équilibrage des deux lentilles cylindriques.

directement la lentille, il est peut-être possible d'éliminer les électrons retardés quantiquement par un filtre de vitesse du genre de ceux que BOERSCH⁵⁵ et MÖLLENSTEDT^{54, 56} emploient depuis quelque temps avec beaucoup de succès. La question qui reste à éclaircir est la suivante: lorsque des électrons traversent une feuille métallique *très mince*, y en a-t-il qui ne subissent pas d'interaction quantique et sont-ils en nombre suffisant?

Les chances de succès de cette première méthode apparaissent bien minimes et sa simplicité est à coup sûr perdue. Aussi SCHERZER s'est-il engagé audacieusement⁵⁷ dans une autre voie qu'il avait lui-même ouverte dans un mémoire théorique fondamental

en 1947²⁶: l'optique électronique diffère de l'optique de verre en ce que l'indice des dioptries élémentaires que l'on met en oeuvre est lié à leur courbure, par une loi de la nature et l'opticien ne peut choisir indépendamment l'indice du milieu et la courbure des surfaces, comme il est possible dans de larges limites pour une lentille de verre. SCHERZER a eu l'idée de tourner cette barrière en synthétisant une lentille électronique ordinaire par une série de plusieurs lentilles cylindriques, judicieusement croisées; l'effet global est d'obtenir une forte convergence moyenne en conservant une grande liberté dans le choix des éléments cylindriques composants; on peut alors les choisir de manière à annuler simultanément, le défaut sphérique et le défaut chromatique de l'ensemble.

Tel est l'espoir offert par la théorie de SCHERZER, mais les microscopistes qui ont aligné le microscope classique, n'auront certes pas de peine à imaginer les énormes difficultés que rencontre la réalisation de cette idée: il faut compenser, c'est-à-dire équilibrer avec une haute précision, les défauts individuels très importants des morceaux de l'appareil (Fig. 10) créer des axes de révolution en croisant exactement des plans de symétrie et aligner ensuite ces axes artificiels avec plus de précision que les axes naturels des lentilles ordinaires. Nul ne s'étonnera du nombre de boutons de réglage visibles sur la Fig. 11, mais nous devons considérer comme un tour de force expérimental admirable le succès obtenu à ce jour et présenté au Congrès: les photographies obtenues avec le prototype représenté sur la Fig. 8 sont déjà d'une qualité presque comparable à celle des microscopes classiques.

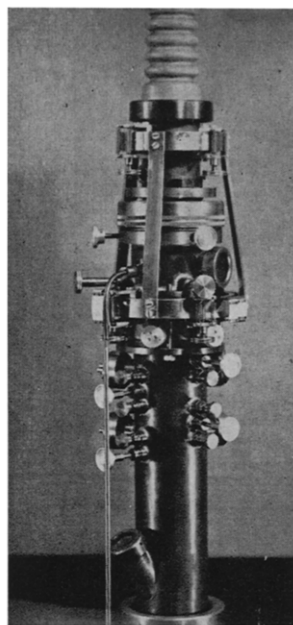


Fig. 11.
Microscope de SCHERZER⁵⁷.

B. Microscope à diffraction de Gabor

Lord RAYLEIGH retrouvant à l'usage des microscopistes anglais les résultats annoncés par E. ABBE à leurs collègues germaniques découvrit que la répartition de l'éclairement dans le plan focal d'un objectif parfait (à supposer qu'on y mît un écran) était liée de manière mathématiquement simple, à celle qu'on observe ordinairement dans l'image; on peut énoncer le résultat en disant que les deux fonctions qui représentent idéalement la répartition spatiale de ces éclaircissements, sont des fonctions jumelles dans une transformation de Fourier. Si donc nous étions assez bon mathématicien ou si nous disposions d'une machine mathématique appropriée, il semble que nous pourrions photographier ce qui se passe dans le plan focal de l'objectif et en déduire ou en faire déduire par la machine l'image ordinaire. A première vue cette opération compliquée paraît d'un intérêt purement académique. Mais avec GABOR, on peut être plus exigeant. Pourrait-on gagner en finesse par une opération du même genre mais plus perfectionnée et en améliorant ainsi la machine, obtenir non plus l'*image ordinaire entachée de flou par les défauts de l'objectif*, mais au contraire une *image bien plus nette*, bien plus finement semblable à l'objet, une *image corrigée*?

GABOR⁵⁸ a non seulement montré que cette amélioration était possible, mais il a donné un schéma de machine pour résoudre pratiquement le problème. La machine est

simplement une optique de verre qui utilisant la lumière transforme "l'hologramme" du plan focal électronique, enregistré sur une plaque photographique en une véritable "image". Elle pourra devenir plus nette que celle qu'on aurait eu dans un microscope classique, muni du même objectif mais elle l'est déjà autant. Pour arriver à ce résultat deux grandes difficultés furent vaincues: les unes théoriques, par GABOR^{58, 59, 60} les autres expérimentales.

La théorie donnée quelques lignes auparavant, est trop simplifiée; prise à la lettre elle est inexacte: il faut au moins y remplacer le mot éclairement par "répartition exacte du vecteur lumineux", c'est-à-dire répartition en grandeur et en *phase*; s'inspirant probablement d'analogies bien connues dans la théorie des communications, GABOR a su montrer que dans de larges limites l'enregistrement de l'intensité seule, suffisait; point fondamental puisque cet enregistrement est le seul réalisable simplement avec la plaque photographique. D'autre part, Lord RAYLEIGH avait énoncé son théorème pour un objectif géométriquement parfait et achromatique, dont l'optique de verre nous donne des réalisations très approchées. Il fallait l'adapter au cas électronique, comprendre le rôle des aberrations sphériques et chromatiques, et trouver le moyen d'introduire les coefficients d'aberration comme "données" dans la machine à reconstruire les images.

La première machine proposée par GABOR s'est avérée dans une première série d'expériences trop peu précise. Elle a été remplacée depuis par une autre, assez différente de la première, que HAINE ET MULVEY⁶¹ pour la partie électronique, et DYSON⁶² pour le synthétiseur optique, ont imaginée, réalisée et présentée au Congrès. Ces efforts cristallisent aujourd'hui en un grand succès c'est-à-dire en un petit nombre: 10 Å pour le pouvoir séparateur du nouvel ensemble.

C. Microscope à protons

Depuis longtemps l'on savait qu'un microscope électrostatique garderait le même grossissement pour des ions positifs que pour les électrons si on changeait seulement le signe des tensions appliquées, et l'on avait pressenti que les images pourraient gagner beaucoup en finesse dans cette opération: on peut espérer en effet balancer différemment les effets de l'aberration sphérique et de la diffraction, utiliser pour l'éclairage des pincesaux d'ions très déliés et obtenir un pouvoir séparateur environ 10 fois meilleur pour les ions ^1H que pour les électrons⁴⁴.

Dans une première série d'expériences, BOERSCH⁶³ utilisa fort ingénieusement les ions de Lithium ^7Li , émis par une anode chaude de KUNSMANN; ainsi un microscope ordinaire peut servir à l'expérience, sans changements de construction. Il n'est besoin que de beaucoup d'habileté dans les réglages pour obtenir un instrument assez stable qui puisse fonctionner "correctement" pendant plusieurs heures de pose; elles sont nécessaires vu la faible intensité de la source. Dans ces conditions difficiles BOERSCH réussit néanmoins à obtenir des photographies d'oxyde de zinc avec une netteté qui correspondrait à une résolution de 80 m μ .

Les recherches de MAGNAN *et coll.*⁶⁴ commencées bien avant et poursuivies parallèlement à celles de BOERSCH, attaquent plus profondément la question. Les conditions de succès furent élucidées en détail par la théorie⁴⁴ et un appareil utilisant une source d'ion ^1H , d'intensité suffisante pour raccourcir raisonnablement les poses, fut réalisé. Mais la théorie a montré que la difficulté essentielle était l'aberration chromatique des lentilles car les ions perdent plus de vitesse à la traversée des objets que les électrons et le seul moyen simple d'éviter cet inconvénient consiste à réduire sa cause et à employer

des ions rapides; 300,000 volts sont nécessaires et MAGNAN⁶⁵ a vivement intéressé le Congrès en décrivant les moyens qu'il met en oeuvre actuellement pour satisfaire à cette condition dans l'instrument dont il termine la construction.

Les expériences révèlent d'ores et déjà un grand nombre de particularités propres à l'optique ionique: certaines représentent des difficultés de réalisation, qui ont été résolues par MAGNAN et nous devons lui être reconnaissants de poursuivre avec courage son oeuvre de pionnier dans un continent inconnu. Il recèle peut-être nos chances les plus sûres d'apercevoir les molécules et les atomes.

BIBLIOGRAPHIE*

- ¹ C. MARTON, U.S. Dept of Commerce, National Bureau of Standards - *Circular* 502 (1950).
- ² R. W. G. WYCKOFF, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ³ G. I. FINCH, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁴ H. MARK ET F. R. EIRICH, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁵ V. E. COSSLETT, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁶ A. SEPTIER ET M. OAUZIT, Communication 34, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁷ W. RATHENAU, Communication 117, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁸ R. CASTAING ET A. GUINIER, Communication 50, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁹ P. GRIVET ET E. REGENSTREIF, Communication 32, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ¹⁰ J. HILLIER ET S. G. ELLIS, Communication 11, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ¹¹ J. HILLIER, *R.C.A. Review*, 8 (1947) 29.
- ¹² S. G. ELLIS, *Can. J. Research*, 25 (1947) 322.
- ¹³ M. BRICKA ET H. BRUCK, *Ann. Radioélectricité*, 3 (1948) 339.
- ¹⁴ K. H. STEIGERWALD, *Optik*, 5 (1949) 469.
- ¹⁵ G. INDUNI, *Helv. Phys. Acta*, 20 (1947) 463.
- ¹⁶ M. E. HAINE, Communication 31, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ¹⁷ R. BERNARD, Communication 3, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ¹⁸ G. LIEBMANN ET E. M. GRAD, Communication 20, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ¹⁹ W. GLASER, Communication 23, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ²⁰ W. GLASER, Communication 24, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ²¹ E. REGENSTREIF, Communication 26, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ²² E. REGENSTREIF, Communication 27, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ²³ M. COTTE, Communication 22, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ²⁴ R. CASTAING, Communication 21, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ²⁵ J. HILLIER ET E. G. RAMBERG, *J. Appl. Phys.*, 18 (1947) 48.
- ²⁶ O. SCHERZER, *Optik*, 2 (1947) 114.
- ²⁷ F. BERTEIN, *Ann. Radioélectricité*, 2 (1947) 379.
- ²⁸ J. B. LE POOLE, *Philips Techn. Rev.*, 9 (1947) 33.
- ²⁹ F. BERTEIN, *Compt. rend.*, 225 (1947) 863.
- ³⁰ O. RANG, *Optik*, 5 (1949) 518.
- ³¹ R. CASTAING, *Compt. rend.*, 231 (1950) 835.
- ³² R. CASTAING, *Compt. rend.*, 231 (1950) 994.
- ³³ M. E. HAINE ET T. MULVEY, Communication 10, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ³⁴ H. BREMMER, Communication 5, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ³⁵ H. BRUCK, *Compt. rend.*, 224 (1947) 1553.
- ³⁶ A. MARECHAL ET G. PIEUCHARD, Communication 14, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ³⁷ A. MARECHAL, Communication 15, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ³⁸ M. FRANÇON, Communication 6, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ³⁹ M. FRANÇON, Communication 7, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁴⁰ H. H. HOPKINS, Communication 12, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁴¹ W. GLASER, Communication 9, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁴² J. HILLIER, Communication 71, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁴³ E. RUSKA, *Kolloid-Z.*, 116 (1950) 101.
- ⁴⁴ L. DE BROGLIE, *L'optique électronique et corpusculaire*, Hermann, Paris 1950.

* Les conférences et communications faites au Congrès seront réunies en un volume édité par *Revue d'Optique théorique et instrumentale*, Paris; ce volume paraîtra en Mars 1951. On pourra se le procurer en s'adressant à M. MARCEL LOCQUIN, Secrétaire de la Société Française de Microscopie, 12 rue de Buffon, Paris.

- ⁴⁵ D. GABOR, *The development, present performance and future possibilities of the Electronic Microscope*, Chemical Publishing Co, Brooklyn, N.Y., 1948.
- ⁴⁶ O. SCHERZER, *J. Appl. Phys.*, 20 (1949) 20.
- ⁴⁷ H. BOERSCH, *Monatsh.*, 76 (1946) 86 et 163.
- ⁴⁸ H. BOERSCH, *Z. Naturforschung*, 2 a (1947) 615.
- ⁴⁹ H. BOERSCH, *Z. Phys.*, 127 (1950) 391.
- ⁵⁰ N. HAST, *Nature*, 159 (1947) 370.
- ⁵¹ N. HAST, *Nature*, 162 (1948) 892.
- ⁵² G. RUTHEMANN, *Naturwissenschaften*, 29 (1941) 648.
- ⁵³ G. RUTHEMANN, *Naturwissenschaften*, 30 (1942) 145.
- ⁵⁴ G. MOLLENSTEDT, Communication 16, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁵⁵ H. BOERSCH, *Optik*, 5 (1949) 436.
- ⁵⁶ G. MÖLLENSTEDT, *Optik*, 5 (1949) 499.
- ⁵⁷ O. SCHERZER, Communication 28, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁵⁸ D. GABOR, *Nature*, 161 (1948) 177.
- ⁵⁹ D. GABOR, *Proc. Roy. Soc. A.*, (1949) 454.
- ⁶⁰ D. GABOR, Communication 19, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁶¹ M. E. HAINE ET T. MULVEY, Communication 17, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁶² J. DYSON, Communication 18, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).
- ⁶³ H. BOERSCH, *Experientia*, 4 (1948) 1.
- ⁶⁴ C. MAGNAN, *Nucleonics*, 4 (1949) 52.
- ⁶⁵ C. MAGNAN, Communication 35, *Congrès Intern. Microsc. Electr.*, Paris (1951).

Reçu le 15 janvier 1951