Microscope électronique 400 kV à lentilles supraconductrices. 2. Caractéristiques électrooptiques et fonctionnement

C. Severin, D. Genotel, M. Girard, A. Laberrigue

► To cite this version:

C. Severin, D. Genotel, M. Girard, A. Laberrigue. Microscope électronique 400 kV à lentilles supraconductrices. 2. Caractéristiques électrooptiques et fonctionnement. *Revue de Physique Appliquée*, 1971, 6 (4), pp.459-465. 10.1051/rphysap:0197100604045900 . jpa-00243571

HAL Id: jpa-00243571

<https://hal.science/jpa-00243571>

Submitted on 1 Jan 1971

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE 400 kV A LENTILLES SUPRACONDUCTRICES

2. CARACTÉRISTIQUES ÉLECTROOPTIQUES ET FONCTIONNEMENT

C. SEVERIN, D. GENOTEL, M. GIRARD et A. LABERRIGUE

Laboratoire de Physique Théorique du Collège de France
11, place Marcelin-Berthelot, 75-Paris, 5^e, France
et Laboratoire d'Electricité, Université de Reims, U. E. R. Sciences
B. P. N° 347, 51-Reims, France

(Reçu le 15 juillet 1971)

Résumé. — Nous donnons les caractéristiques électro-optiques, les conditions de fonctionnement et les performances actuelles d'un microscope électronique supraconducteur 400 kV.

Abstract. — Electron-optical features, working conditions and present performances of a 400 kV superconducting electron microscope are given.

I. Introduction. — L'utilisation de lentilles supraconductrices en microscopie électronique est une solution qui n'avait pas encore été retenue jusqu'à présent en dépit des avantages offerts, en particulier à très très haute tension. En effet avec les supraconducteurs il est possible d'obtenir des excitations importantes dans une lentille magnétique avec des enroulements de faible encombrement. Ces lentilles sont donc de petites dimensions et leurs caractéristiques optiques sont nettement améliorées par rapport à celles des lentilles classiques. Il n'y a par ailleurs aucune puissance dissipée dans l'enroulement et quand on fonctionne en « boucle fermée », la stabilité en courant des lentilles est parfaite. A côté de ces avantages l'utilisation des lentilles supraconductrices introduit bien sûr un certain nombre de difficultés nouvelles que nous avons abordées en mettant au point un microscope électronique dans lequel toutes les lentilles sont supraconductrices [1], [2], [3]. La figure 1 présente une coupe schématique générale de ce microscope. Sa conception mécanique et son cryostat ont été décrits dans un premier article [4]. Nous présenterons ici les caractéristiques électro-optiques de l'appareil ainsi que son fonctionnement et ses performances actuelles.

II. Accélérateur d'électrons. — Le générateur de tension 400 kV utilisé est un appareil Samtron du type Felici-Gartner dont la stabilité relative d'origine est de quelques 10^{-5} par minute.

— L'accélérateur est du type électrostatique pressurisé, le gaz d'isolement étant de l'hexafluorure de soufre à la pression de 1,6 kg/cm². Le pompage du tube accélérateur est assuré par une pompe ionique 200 l/s.

FIG. 1. — Coupe schématique de la colonne optique.

— Le faisceau d'électrons est fourni par une tête de canon classique qui fonctionne à 12 kV. Les électrons sont ensuite accélérés par trois lentilles électrostatiques « à deux tubes » dont les deux potentiels sont successivement 12 et 80 kV, 80 et 240 kV, 240 et 400 kV. Ces trois lentilles déterminent la conver-

gence du faisceau à la sortie de l'accélérateur, au-dessus des condenseurs. L'ouverture du faisceau à ce niveau est environ 10^{-3} rad, son intensité 200 μ A et sa brillance 3×10^5 A/cm² Stérad. Nous pouvons observer des objets à des grossissements allant jusqu'à 200 000 avec une visibilité satisfaisante sur l'écran d'observation. Pour des grossissements plus importants il conviendrait d'adjoindre un amplificateur de brillance.

III. Lentilles électromagnétiques. — **III. 1 TYPE DE LENTILLE UTILISÉ.** — Nous avons étudié [5], [6], [7] différents types de lentilles susceptibles d'être utilisées en microscopie à très haute tension. Nous n'avons pas retenu les lentilles supraconductrices sans fer, car dans le domaine des moyennes tensions où nous travaillons, elles présentent un astigmatisme trop important. D'autre part, la réalisation de lentilles avec fer totalement refroidies à la température de l'hélium liquide pose quelques problèmes cryogéniques délicats. Aussi avons-nous retenu le type de lentilles où seul l'enroulement supraconducteur est refroidi à la température de 4,2 °K, le circuit ferromagnétique restant à la température ambiante.

III. 2 CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES ET OPTIQUES DES LENTILLES. — La figure 2 présente une coupe schématique d'une lentille. La carcasse ferromagnétique avec pièces polaires est symétrique. Les deux pièces polaires sont solidaires l'une de l'autre et forment un ensemble qui est facilement interchangeable de l'extérieur sans démontage de la colonne.

FIG. 2. — Coupe schématique d'une lentille.

L'enroulement excitateur supraconducteur est au niveau du plan médian de la lentille ; son diamètre moyen est 100 mm. Les caractéristiques géométriques des pôles des lentilles ont été choisies en s'inspirant des travaux de Glaser, Durandeu, Liebmann, Mulvey et Kamminga [8], [9], [10], [11], [12]. Nous donnons ci-dessous les valeurs retenues pour l'entrefer (S) et le diamètre (D) du canal des pièces polaires.

	Cond. 1	Cond. 2	Objectif	Lent. int.	Projecteur
S (mm)	3	8	6	8	3
D (mm)	3	8	6	12	4,5

Les valeurs exactes des paramètres électro-optiques ont ensuite été calculées après détermination expérimentale de la topographie du champ magnétique axial de ces lentilles. Pour l'objectif en particulier nous donnons sur la figure 3 les valeurs à 400 kV

de la distance focale (f_0), de l'abscisse (z_0) du foyer par rapport au centre de la lentille, du coefficient d'aberration sphérique (C_s), du coefficient d'aberration chromatique (C_c) et du pouvoir séparateur théorique (δ). Sur la figure 4 nous donnons les variations de (f_0) et de (z_0) à 200, 300 et 400 kV.

FIG. 3. — Caractéristiques optiques de l'objectif à 400 kV.

FIG. 4. — Variations de (f_0) et (z_0) pour diverses tensions.

La colonne optique de l'appareil comprend cinq lentilles et le grandissement maximum théorique à 400 kV est 350 000. Les dimensions de cette colonne sont comparables à celles de la colonne d'un appareil classique 100 kV. Elle pourrait d'ailleurs être utilisée avec des électrons de 1 000 keV car les carcasses des circuits magnétiques sont largement dimensionnées et avec les enroulements supraconducteurs on dispose très facilement des excitations nécessaires pour des électrons de cette énergie.

III. 3 FORCES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS LES LENTILLES. — Pour les lentilles que nous avons retenues, les forces d'interaction entre la carcasse ferromagnétique à la température ordinaire et l'enroulement excitateur placé dans le cryostat sont la cause de contraintes non négligeables sur ce dernier. Ces forces s'annulent lorsque l'enroulement est disposé symétriquement par rapport au plan médian de l'entrefer des pièces polaires. Cette position est une position d'équilibre instable et la force qui apparaît quand on s'en éloigne est proportionnelle à l'écart. Elle vaut 9 kgp par millimètre d'écart pour une excitation de 15 000 At et elle varie comme le carré de l'excitation. Pratiquement, afin de fixer le sens des forces, nous avons introduit un écart systématique des enroulements par rapport à leur position d'équilibre instable. Nous avons cependant réduit au maximum cet écart en tenant compte des contractions à froid du cryostat et des incertitudes mécaniques de positionnement. Nous avons alors, dans la direction opposée aux forces, fixé les réservoirs contenant les enroulements à l'aide de tirants qui relient ces réservoirs à 4 °K à des points d'ancrage à 300 °K. Pour réaliser ces tirants nous avons utilisé la fibre de verre qui présente une grande résistance mécanique et une faible conductibilité thermique.

III. 4 ABERRATIONS DES LENTILLES. — Nous pouvons voir sur la figure 3 les courbes donnant les coefficients d'aberration chromatique et sphérique C_c et C_s de notre lentille objectif en fonction de son excitation. L'utilisation d'enroulements supraconducteurs permet de diminuer ces coefficients et de réduire ainsi les aberrations. En ce qui concerne l'aberration chromatique, un autre facteur intéressant est la parfaite stabilité en courant des lentilles supraconductrices fonctionnant en « boucle fermée ». La décroissance des courants piégés est en effet pratiquement nulle quand la soudure qui referme le circuit supraconducteur sur lui-même est de bonne qualité. Nous avons d'autre part réduit l'influence de l'aberration chromatique en abaissant l'instabilité relative de notre générateur haute tension 2×10^{-5} à 5×10^{-6} .

En ce qui concerne le défaut d'astigmatisme de nos lentilles, il n'est pas plus important que dans une lentille classique. En effet, le champ magnétique est dû essentiellement à l'aimantation du fer. La contribution du champ propre de l'enroulement est inférieure au dixième du champ total et l'astigmatisme est

dû principalement aux pièces polaires. Pour corriger ce défaut le second condenseur et l'objectif sont équipés chacun d'un stigmatiseur électrostatique.

IV. Alimentation en courant des enroulements supraconducteurs. — **IV. 1 MODE DE FONCTIONNEMENT DES LENTILLES.** — Toutes nos lentilles fonctionnent en « boucle fermée » conformément au schéma de la figure 5. Chaque enroulement supraconducteur est refermé sur lui-même par une « soudure supraconductrice ». L'alimentation en courant se fait entre deux points voisins A et B de la boucle, le petit brin AB étant appelé « court-circuit ». Pour piéger un courant dans la boucle on utilise un « interrupteur supraconducteur » placé sur le court-circuit et qui permet de faire transiter à l'état normal une petite portion de ce court-circuit qui devient alors résistant.

FIG. 5. — Schéma d'un enroulement en « boucle fermée ».

Il faut remarquer que la self du court-circuit est négligeable ($L < 10^{-6}$ henry) par rapport à celle de l'enroulement ($L \sim 1$ henry). Quand le court-circuit est supraconducteur le courant commandé se répartit dans le rapport inverse des selfs c'est-à-dire entièrement dans le court-circuit (Fig. 6a). Par contre quand le court-circuit est résistant le courant s'établit alors entièrement dans l'enroulement (Fig. 6b) avec une constante de temps qui pour nos lentilles est de l'ordre de la seconde. Si on veut établir un courant

FIG. 6. — Schémas d'alimentation d'un enroulement.

dans une lentille on procède de la façon suivante illustrée par les figures 6b, 6c, 6d :

1° Avec l'interrupteur on chauffe le court-circuit qui devient résistant.

2° Avec l'alimentation on établit le courant à la valeur désirée. Celui-ci s'établit alors entièrement dans l'enroulement (Fig. 6b).

3° On cesse de chauffer le court-circuit qui redevient alors supraconducteur. Le courant lancé dans l'enroulement est piégé dans la boucle entièrement supraconductrice (Fig. 6c). On peut à ce stade considérer que l'intensité commandée par l'alimentation passe à nouveau entièrement dans le court-circuit comme sur la figure 6a où le courant piégé est nul. Algébriquement l'intensité est donc nulle dans le court-circuit qui est alors le seul à voir les variations de courant commandé.

4° De ce fait on peut modifier ou couper (Fig. 6d) l'alimentation sans affecter le courant piégé dans l'enroulement.

IV. 2 ALIMENTATION « SÉRIE » DES ENROULEMENTS. — L'alimentation des cinq lentilles se fait selon le schéma présenté sur la figure 7. Les cinq enroulements supraconducteurs refermés sur eux-mêmes sont disposés en « série ». Ce système d'alimentation présente l'intérêt de ne nécessiter qu'un seul générateur de courant. On peut alimenter successivement les diverses lentilles sans modifier les courants déjà piégés. L'alimentation d'une lentille en particulier se fait par l'intermédiaire des fils d'amenée normaux, des liaisons normales entre les lentilles et des courts-circuits supraconducteurs des autres lentilles. L'utilisation d'une seule alimentation permet par ailleurs de n'avoir que deux descentes de courant principales dans le cryostat, ce qui simplifie sa réalisation et diminue ses pertes thermiques par conduction.

IV. 3 ETABLISSEMENT ET RÉGLAGE DES COURANTS. — L'affichage des intensités est tout aussi simple que dans un microscope classique. On dispose d'une commande de l'alimentation unique pour chaque lentille. Chacune de ces commandes peut ainsi rester dans la position d'affichage de l'intensité piégée dans la lentille correspondante. Si on modifie ensuite cette intensité cela permet de partir du réglage précédent et cela évite toute variation brutale de courant dans l'enroulement.

L'établissement du courant dans une lentille se fait avec une constante de temps qui dépend de la valeur de la self de la lentille (~ 1 henry) et de la valeur de la résistance introduite par l'interrupteur dans le court-circuit. Nous nous sommes fixé des constantes de temps de l'ordre de la seconde afin d'avoir une bonne souplesse dans les réglages. Il est bien sûr toujours possible de réduire encore ces constantes de temps en augmentant la valeur de la résistance introduite par l'interrupteur.

FIG. 7. — Schéma d'alimentation « série » des 5 enroulements.

Le courant qui traverse un enroulement à un instant donné est piégé avec une grande exactitude dès que l'on cesse de chauffer le court-circuit de l'enroulement. Ceci peut être mis à profit pour effectuer la mise au point avec la lentille-objectif : en effet au lieu de chercher à commander l'alimentation pour avoir exactement l'intensité correspondant à la mise au point, on peut très bien « saisir au passage » cette mise au point en coupant le chauffage du court-circuit quand l'intensité d'un courant qui s'établit dans l'objectif passe par la valeur requise.

Etant donné que les lentilles fonctionnent en « boucle fermée » leur stabilité en courant ne dépend pas de celle de l'alimentation de commande. La stabilité de cette alimentation doit donc simplement être suffisante pour permettre les observations pendant les phases de réglage en boucle ouverte des diverses lentilles et pour qu'on puisse obtenir une bonne mise au point à l'œil. Une alimentation stabilisée à 10^{-4} près convient très bien. Pour l'objectif

en particulier cette instabilité correspond à une incertitude de focalisation de $0,5 \mu$. Pour effectuer des variations très fines de focalisation on dispose d'un transformateur statique. Son enroulement secondaire supraconducteur comporte 10 tours qui sont pris sur la boucle fermée de l'enroulement excitateur de l'objectif. On dispose au primaire d'une excitation de ± 150 At pour obtenir des variations relatives d'intensité dans l'objectif jusqu'à $\pm 3 \times 10^{-4}$ ce qui correspond à une variation de focalisation de $\pm 1,5 \mu$.

IV. 4 SOUDURE ET INTERRUPTEURS SUPRACONDUCTEURS. — Le bon fonctionnement d'une lentille en « boucle fermée » dépend de la qualité de la « soudure supraconductrice » qui referme l'enroulement, et de l'interrupteur placé sur son court-circuit.

Le fil supraconducteur que l'on utilise pour nos lentilles est un fil en niobium — titane de diamètre total 35/100 mm (25/100 de supraconducteur, 8/100 de cuivre de stabilisation et 2/100 d'isolation en formvar). Pour réaliser nos soudures on décape complètement à l'acide les extrémités des fils à raccorder sur une longueur de 2 cm environ. Ces parties sont ensuite laminées et soudées simultanément par points sur une lame support en niobium dont on relève légèrement les bords afin de former une sorte de cupule. L'ensemble est ensuite noyé dans un alliage plomb-indium placé dans la petite cupule et que l'on porte en fusion sous vide afin d'obtenir un bon mouillage des matériaux en présence. Les soudures ainsi réalisées sont ensuite testées. Nous avons pu y faire passer des intensités jusqu'à 60 A sans observer aucune décroissance du courant dans la boucle étudiée. Nous avons fait des essais sur des boucles à faible self de façon à réduire au maximum la constante de temps de la décroissance du courant provoquée par la résistance résiduelle de la soudure. Nous avons fait des enregistrements de stabilité sur plusieurs heures ne montrant aucune décroissance de l'intensité du courant. Compte tenu de la sensibilité de nos moyens de détection nous avons calculé que la résistance résiduelle de la soudure était certainement inférieure à $10^{-11} \Omega$.

En ce qui concerne les interrupteurs, nous avons adopté des interrupteurs qui font transiter le fil en le portant au-dessus de sa température critique. Nous utilisons simplement des résistances au carbone en contact thermique avec le fil supraconducteur localement dénudé, l'ensemble étant collé à l'araldite. Nos résistances font 10Ω à chaud et nous y envoyons des puissances de l'ordre de 20 mW. Ces points chauffants introduisent dans les courts-circuits des résistances de l'ordre de $0,5 \Omega$: nous avons en effet des constantes de temps de l'ordre de la seconde pour l'établissement des courants dans nos bobines qui ont des selfs d'environ 1 H.

Enroulements, soudures et interrupteurs supraconducteurs montrent une grande robustesse à l'usage.

Ces divers éléments dans notre appareil sont en service depuis plus de deux ans sans aucune défaillance.

IV. 5 SÉCURITÉS. — Les éléments supraconducteurs sont donc très solides quand on les utilise dans de bonnes conditions. Ils présentent par contre une bien plus grande fragilité que les circuits classiques si on les soumet à de mauvais traitements. Il est donc important de prévoir un certain nombre de sécurités pour se prémunir contre toute fausse manœuvre ou toutes conditions qui pourraient conduire à leur détérioration.

L'énergie emmagasinée dans chacune des lentilles est de l'ordre de 50 joules. La libération accidentelle de cette énergie dans une partie de la bobine rendue normale et suivant une constante de temps propre au circuit, peut détériorer l'enroulement supraconducteur et même le cryostat. Nos enroulements fonctionnant en « boucle fermée » c'est principalement au niveau de ces courts-circuits que ces détériorations risquent d'intervenir. La protection la plus efficace de ces éléments en présence d'une perturbation quelconque consiste à limiter la tension à leurs bornes sans pour autant modifier les constantes de temps normales de charge et de décharge des lentilles. Nous avons pour cela utilisé un dipôle passif non linéaire (composé de deux diodes tête-bêche) que nous avons placé en parallèle avec l'alimentation en courant. Ce dipôle admet en régime permanent une intensité qui correspond à l'intensité maximale circulant dans les lentilles. Il présente une impédance infinie lorsque les variations d'intensité sont faibles (variations normales en fonctionnement) et se comporte comme un limiteur de tension de l'ordre du volt pour toute anomalie de charge ou de décharge.

En plus de cette protection des lentilles, nous avons prévu une sécurité de manœuvre quand on les alimente. Nous savons en effet que pour chaque opération de charge ou décharge d'une lentille il nous faut chauffer son court-circuit. Afin d'éviter toute variation brusque d'intensité dans l'enroulement nous retardons pour chaque manœuvre le chauffage de l'interrupteur pour qu'il n'intervienne que lorsque l'intensité affichée circule à nouveau dans le circuit d'alimentation.

Nous avons enfin prévu une sécurité en cas de panne de secteur. Nous disposons d'un montage de secours très simple qui permet dans cette éventualité de décharger les lentilles dans de bonnes conditions.

V. Centrage optique de l'appareil. — Dans un premier stade on aligne approximativement le faisceau électronique délivré par l'accélérateur avec l'axe mécanique de la colonne en utilisant les réglages suivants :

1° Inclinaison de l'accélérateur de $\pm 3^\circ$ par rapport à la colonne ;

2° Translation horizontale de la colonne de ± 5 mm par rapport à l'accélérateur.

Ce réglage préliminaire étant fait on effectue alors véritablement le centrage optique de la colonne en utilisant deux ensembles de déviation magnétique et en déplaçant mécaniquement les lentilles qui, à l'exception de l'objectif, peuvent être translatées horizontalement de ± 1 mm. Le premier ensemble de déviation est placé à la sortie de l'accélérateur et sert à aligner le faisceau sur les condenseurs. Le second, placé à la sortie des condenseurs, sert à aligner « l'éclairage » sur l'objectif. Chacun de ces systèmes ont deux fonctions distinctes : l'une permet de déplacer le faisceau en lui conservant son inclinaison, l'autre de varier son inclinaison en lui conservant le même point de recoupement avec l'axe optique.

VI. Observation d'échantillons. — **VI. 1 CONDITIONS D'OBSERVATION.** — L'introduction de l'échantillon à observer se fait par l'intermédiaire d'un sas dont une vue est présentée sur la figure 8A. Sur la figure 8B, on peut voir le porte-objet et la platine qui est à la température ordinaire. Les changements d'objet se font rapidement sans plus de difficultés que dans un microscope classique moderne.

FIG. 8. — Vues du sas-objet (A) et de la platine porte-objet (B) : (a) mouvement d'objet, (b) commande du sas, (c) introduction de l'objet, (d) pompage du sas, (e) et (h) fourchette de mise en place de l'objet, (f) porte-objet, (g) platine porte-objet.

Pour effectuer la mise au point fine de l'image observée sur l'écran fluorescent, on dispose d'une lunette binoculaire (grandissement $\times 10$). L'écran a été fabriqué de façon à avoir un rendement optimum à 400 kV [13].

Le vide réalisé dans l'enceinte de l'appareil est un vide élevé et propre. La présence des surfaces froides du cryostat permet encore une diminution de la pression résiduelle et la contamination des objets observés est pratiquement inexistante.

On pouvait craindre avec des lentilles supraconductrices que l'image ne soit perturbée par des vibrations engendrées par l'ébullition de l'hélium dans le cryostat. Avec la solution que nous avons adoptée et dans l'état actuel des performances de l'appareil nous n'avons jamais pu déceler une quelconque intervention de telles vibrations dans la qualité de l'image.

VI. 2 RÉSULTATS OBTENUS. — Nous avons déjà donné quelques résultats [14], [3] montrant le pouvoir de résolution obtenu et les qualités de stabilité électrique et mécanique de l'appareil. Nous présentons ici quelques images obtenues avec le porte-objet long de résolution et le porte-objet court de microscopie de Lorentz.

La figure 9 montre une microphotographie de grains d'or dans la zone d'ombrage d'une boule de latex (350 kV, grandissement direct 130 000). On distingue des points distants de 18 à 20 Å.

FIG. 9.

La figure 10 présente des boucles de dislocations dans un échantillon épais de Si-B (350 kV, grandissement direct 30 000).

La figure 11 montre des parois de domaines magnétiques dans un film de cobalt en microscopie de Lorentz (350 kV), grandissement direct 10 000).

FIG. 10.

VII. Conclusion. — Le bon fonctionnement de notre appareil montre que l'utilisation de lentilles supraconductrices en microscopie électronique est une solution viable qui peut être retenue à l'avenir en particulier à très très haute tension. Dans ce domaine, certains groupes pensent d'ailleurs encore accroître la tension accélératrice des électrons jusqu'à 5 et

FIG. 11.

même 10 MV : dans ces cas extrêmes, la « solution supraconductrice » doit être la seule raisonnable du simple point de vue des dimensions et des puissances qui seraient mises en jeu dans des lentilles classiques adaptées à ces tensions.

En ce qui concerne les performances de l'appareil, elles sont comparables à celles d'un appareil classique de même tension accélératrice. Toutefois si la résolution pratique actuelle sans correction d'astigmatisme n'est que de 15 à 20 Å, les qualités optiques de l'objectif permettent d'espérer une nette amélioration de celle-ci vers la limite théorique de 1,5 Å.

Bibliographie

- [1] LABERRIGUE (A.), GENOTEL (D.), HOMO (J.-C.), LEVINSON (P.), SEVERIN (C.), TESTARD (O.), *Electron Microscopy*, Rome, 1968, 29.
- [2] GENOTEL (D.), LABERRIGUE (A.), LEVINSON (P.), SEVERIN (C.), HOMO (J.-C.), GIRARD (M.), BALOSSIER (G.), *Electron Microscopy*, Grenoble, 1970, 93.
- [3] GENOTEL (D.), BALOSSIER (G.), SEVERIN (C.), GIRARD (M.), HOMO (J.-C.), LABERRIGUE (A.), *C. R. Acad. Sci., Paris*, 1971, **272**, 1461.
- [4] LABERRIGUE (A.), LEVINSON (P.), HOMO (J.-C.), *Rev. Phys. Appl.*
- [5] LABERRIGUE (A.), SEVERIN (C.), *J. de Microscopie*, 1967, **6**, 123.
- [6] GENOTEL (D.), SEVERIN (C.), LABERRIGUE (A.), *J. Microscopie*, 1967, **6**, 933.
- [7] GENOTEL (D.), LABERRIGUE (A.), PAYEN (F.), SEVERIN (C.), *Electron Microscopy*, Rome, 1968, 187.
- [8] GLASER (W.), *Grundlagen der Elektronen optik* (Springer Vienna 1952).
- [9] DURANDEAU (P.), FERT (C.), *Rev. Opt.*, 1957, **36**, 205.
- [10] LIEBMANN (G.), GRAD (E. M.), *Proc. Phys. Soc.*, 1951, **64B**, 956.
- [11] MULVEY (T.), WALLINGTON (M. J.), *J. Sci. Instr.*, 1969, **2**, 466.
- [12] KAMMINGA (W.), VERSTER (J. L.), FRANCKEN (J. C.), *Optik*, 1969, **28**, 442.
- [13] FISHER (R. M.), LALLY (J. S.), *Conf. on Current Developments in H. V. E. M.*, Monroeville, 1969 (Abstract only).
- [14] BALOSSIER (G.), GENOTEL (D.), SEVERIN (C.), GIRARD (M.), HOMO (J.-C.), LABERRIGUE (A.), *Colloque Caen, J. Microscopie*, 1971, **11**, 2.