

La fabrication du transistor N-P-N

Par Maurice BERNARD

Ingénieur des Télécommunications
Départements P.C.H., C.N.E.T.

Le Transistron.

Les études menées pendant la guerre sur les cristaux détecteurs ont amené la découverte en 1948, par Bardeen et Brattain, de la triode à cristal : deux pointes métalliques en contact avec un petit morceau d'un semi-conducteur comme le germanium ou le silicium (fig. 1) permettent d'obtenir un effet d'amplification : l'une des pointes appelée : collecteur, forme avec la base une diode ; le courant inverse de cette diode est modifié par le courant émis par l'autre pointe, appelée : émetteur. Un tel élément a reçu le nom de transistor à pointe (fig. 1).

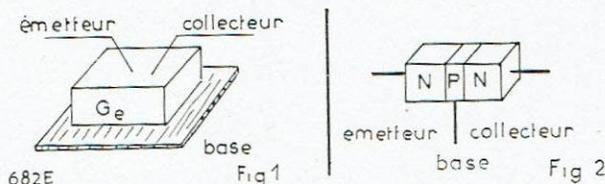


FIG. 1. — Schéma du transistor à pointe.
FIG. 2. — Schéma du transistor jonction.

En 1949, W. Shockley a décrit théoriquement un nouveau type de transistor, le transistor jonction ; le phénomène de transport électronique qui permet l'effet d'amplification est d'un principe assez analogue, mais a lieu dans un même morceau de cristal, comprenant trois régions : une mince zone de type P (1), la base, comprise entre deux portions de type N, l'émetteur et le collecteur (2) (fig. 2).

Cet appareil, d'abord réalisé en laboratoire, puis dans l'industrie, s'est montré rapidement conforme à la théorie de Shockley et a, en quelques années, détrôné l'ancien transistor à pointes : d'une technologie plus sûre, sinon plus facile, d'une stabilité plus grande, il possède un facteur de bruit plus faible, un gain plus élevé et peut fournir plus de puissance.

Le transistor qui connaît depuis quelques années un succès croissant intéresse le technicien par quelques qualités remarquables :

— ne comportant pas de chauffage, aussitôt polarisé, il est en service ;

(1) On rappelle qu'un cristal de Ge est dit de type P lorsqu'il contient des impuretés comme l'Indium ou le Gallium et que les charges électriques transportées sont des trous positifs ; au contraire, il est dit de type N s'il contient des impuretés comme l'Antimoine ou l'Arsenic et que les charges électriques transportées sont des électrons.

(2) Ou bien l'inverse, une mince région N comprise entre deux régions P.

— pour amplifier 20 mW en classe A, il ne demande guère plus de 40 mW ; c'est-à-dire qu'il a, au contraire du tube à vide, un rendement global très proche du rendement théorique ;

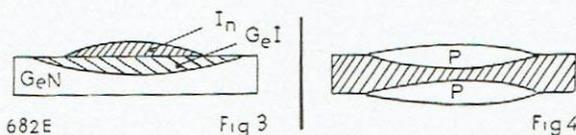


FIG. 3. — Schéma d'une jonction N-P par alliage d'indium.
FIG. 4. — Schéma d'un transistor P-N-P par alliage d'indium.
Nota. — Fig. 3 ; lire : GeP.

— il est robuste mécaniquement et il peut vivre longtemps avant d'être mis hors d'usage : il semble possible de le protéger efficacement des phénomènes qui entraînent sa destruction.

Le transistor pourtant n'est pas sans défauts :
— il est électriquement fragile et ne supporte pas de surcharges intempestives ;
— il est très sensible à la température et, à moins

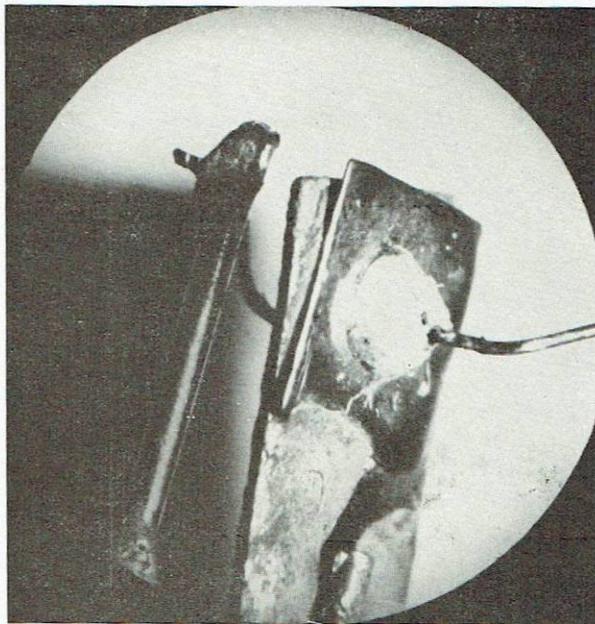


FIG. 5. — Transistron C.S.F.

qu'il ne soit fabriqué en silicium, son fonctionnement cesse au delà de 80° C ;

— enfin sa réponse en fréquence est encore limitée à l'heure actuelle à quelques dizaines de Mc/s.

La fabrication par alliage d'indium.

La fabrication d'un transistor jonction se ramène à la réalisation d'un petit cristal de Ge (ou de Si) de dimensions et de forme bien définies comportant trois régions de résistivités déterminées.

On peut par exemple tailler une petite plaquette très mince de germanium de type N, poser dessus une goutte d'indium et porter le tout dans un four à une température de l'ordre de 550°C ; l'indium fond et dissout un peu de germanium ; au refroidissement ce germanium recristallise avec un excès d'indium, c'est-à-dire qu'il est de type P ; on réalise ainsi une jonction N-P (fig. 3) qui possède de remarquables propriétés redresseuses. Si l'on recommence la même opération de l'autre côté de la plaquette, on obtient un transistor (fig. 4).

Cette technique dite par alliage d'indium est utilisée en France et la Compagnie Générale de T. S. F. fabrique depuis 1954 des transistors de ce type.

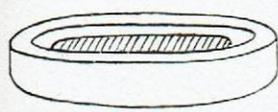
Nous allons décrire ici en détail une méthode toute différente où la structure N-P-N est obtenue au moment même de la cristallisation.

Prenons le cas du germanium et suivons les différents stades d'une telle fabrication.

Purification.

Il faut avant toute chose obtenir une matière première suffisamment pure ; le germanium disponible dans le commerce est d'une pureté de l'ordre de 10⁻⁹ (3) alors qu'il est souhaitable d'atteindre 10⁻¹⁰. On fond du germanium en un lingot que l'on dispose dans un creuset en graphite ultra pur, préalablement dégazé (fig. 6).

Un four annulaire permet de fondre une mince zone de ce lingot : une impureté présente va diffuser à travers les deux interfaces liquide-solide ; ce transport d'impuretés dépend de la valeur du rapport de la solubilité de l'impureté dans le germa-



682E

Fig. 6

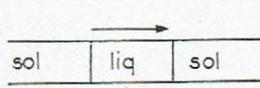


Fig 7

FIG. 6. — Creuset en graphite.
FIG. 7. — Principe de la fusion de zone.

nium en phase solide à la solubilité dans le germanium en phase liquide ; ce rapport $k = \frac{C_s}{C_l}$ est appelé coefficient de ségrégation. Si la zone fondue balaye lentement le lingot de gauche à droite, les

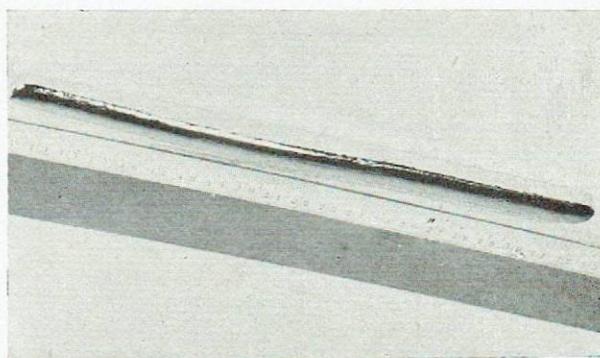
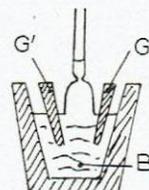


FIG. 8. — Lingot purifié par fusion de zone.

impuretés à coefficients de ségrégation inférieur à un, dont la solubilité est plus grande en phase liquide qu'en phase solide vont se concentrer vers la droite du lingot ; les autres inversement vont se concentrer vers la gauche. Après plusieurs passes on coupe les extrémités du lingot et la partie centrale qui atteint une pureté de 10⁻¹⁰ à 10⁻¹¹ est conservée ; c'est la méthode, dite de fusion de zone (fig. 8).

Cristallisation.

Il faut maintenant obtenir un monocristal N-P-N dont les trois zones aient des résistivités bien déterminées. M. Petit Ledu, Ingénieur Contractuel au C.N.E.T. a décrit dans « l'Echo des Recherches » (4), la méthode utilisée : partant d'un bain de germanium B maintenu en fusion et comportant les impuretés désirées (fig. 9 et 10) on fait pousser un cristal à partir d'une germe animé d'un mouvement hélicoïdal à faible pas.



682E Fig.9

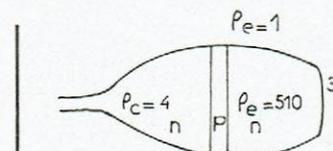


Fig.11

FIG. 9. — Coupe schématique du creuset.
FIG. 11. — Schéma d'un cristal N-P-N.

Prenons un exemple concret : pour 50 g de germanium on a introduit dans le bain initial quelques milligrammes d'antimoine de façon à avoir, vers le milieu du cristal, une résistivité de l'ordre de 4 ohms. La vitesse de retrait est de 15 mm à l'heure et la vitesse de rotation de 100 t/min. Au milieu de la cristallisation on va laisser tomber dans le bain par la gouttière G (fig. 9) quelques milligrammes d'indium ; ce corps va se dissoudre rapidement et, au bout d'un temps assez court, le germanium va

(3) C'est-à-dire, contenant un atome d'impureté pour 10⁹ atomes de germanium.

(4) G. PETIT-LEDU. — Echo des Recherches, n° 18, janvier 1955, p. 23.

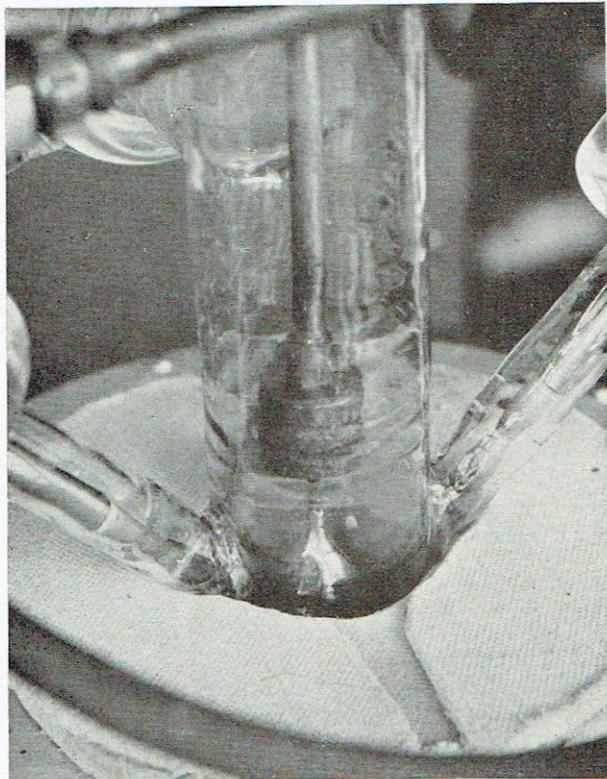


FIG. 10. — Creuset dont la représentation schématique est donnée fig. 9.

pousser de type P et d'une résistivité que l'on peut prévoir un exemple d'un ohm cm, selon la quantité d'indium introduite. Quelques secondes après on va laisser tomber dans le bain par la gouttière G' une centaine de milligrammes d'antimoine : le cristal à nouveau pousse de type N, de résistivité par exemple $5 \cdot 10^{-3}$ ohm cm.

On a donc ainsi réalisé une structure N-P-N dans un même monocristal, les trois zones ayant des résistivités respectives 4, 1, 0,005 ohm-cm (fig. 11 et 12). Plus la zone P est étroite, meilleures seront les performances haute fréquence du transistor. Pour obtenir une épaisseur de base de 40 microns avec une vitesse de tirage de plusieurs mm à l'heure il ne faut entre les chutes des deux impuretés (indium puis antimoine) que quelques secondes d'intervalle.

Mais l'introduction de quelques mg de matière solide dans le bain liquide, va entraîner des déplacements du front de cristallisation ; de plus, le mélange des impuretés n'est pas instantané. Pour ces deux raisons, les deux jonctions qui limitent la zone P ne sont pas parallèles et l'intervalle de temps entre les deux « dopages » ne peut pas être inférieur à quelques secondes.

Pour diminuer encore l'épaisseur de la base, on peut essayer des vitesses de tirage encore plus faibles ; mais on est limité dans cette voie par le risque d'accident de cristallisation. On pourrait accroître la vitesse de rotation pour augmenter le

brassage et améliorer le parallélisme des jonctions ; on est limité par les vagues qui prennent naissance dans un bain soumis à un brassage trop violent. Pour toutes ces raisons le fonctionnement des transistors est encore limité à quelques dizaines de Mc/s.

Mesures.

Admettons que nous ayons trouvé un compromis satisfaisant permettant en principe d'obtenir une épaisseur de 30 microns ; comment allons-nous vérifier que le cristal obtenu possède les propriétés prévues ? On va lui faire subir une série de mesures ou de traitements :

- il est électrolysé dans l'eau distillée pour faire apparaître les jonctions ;

- la résistivité est mesurée en chaque point : un courant I traverse le cristal et l'on mesure la différence de potentiel V apparaissant entre deux points A et B (fig. 13) ; la connaissance de la section moyenne permet de calculer la résistivité ;

- la tension thermo-électrique qui apparaît sur une pointe chaude en contact avec un semi-conducteur, s'inverse du type N au type P ; on peut ainsi repérer les deux jonctions N-P et mesurer la distance qui les sépare ;

- des mesures de photo-conductivité permettent de calculer la durée de vie des porteurs de charge

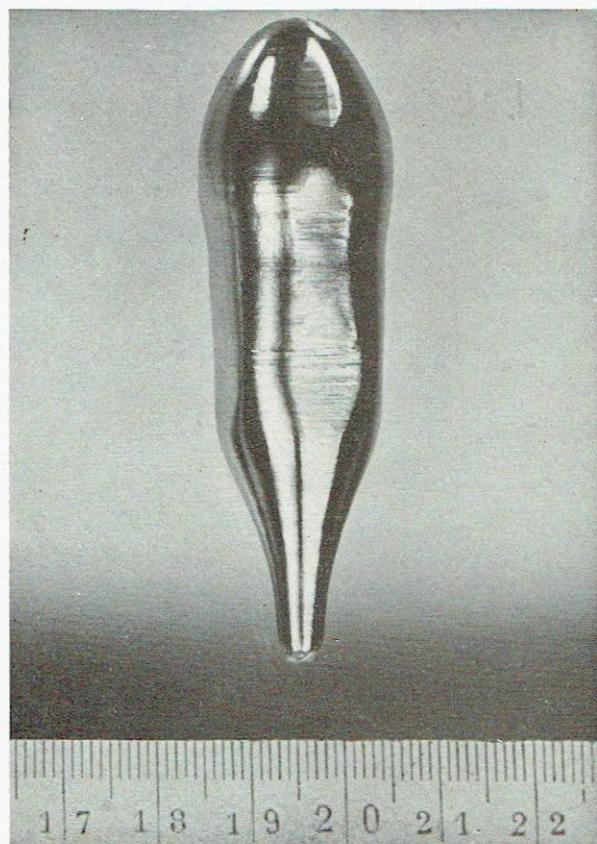


FIG. 12. — Vue d'un cristal N-P-N.

dans le cristal (5) ; cette grandeur est fort importante pour le fonctionnement d'un transistor ; il faut que cette durée de vie soit assez grande pour que les électrons injectés par l'émetteur aient le temps de traverser la base et d'atteindre le collecteur avant de s'être recombinés avec les trous.

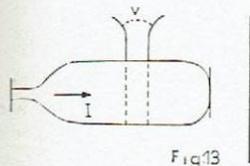


Fig.13

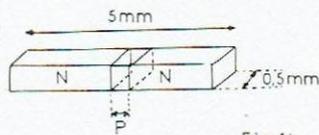


Fig.14

FIG. 13. — Mesure de la résistivité.
FIG. 14. — Bâtonnet de cristal.

Découpage.

Il faut maintenant obtenir des bâtonnets de 4 à 5 mm de long et d'une section aussi faible que possible (fig. 14) pour diminuer les capacités, par exemple une section de $0,25 \text{ mm}^2$.

On va donc scier le cristal en petits parallélépipèdes de 0,8 mm de côté (la section devant être réduite encore par d'autres traitements) et de 5 mm de long ; on utilise pour cela des scies diamantées très minces ; si l'épaisseur de matière détruite par



FIG. 15. — Transistor N-P-N fabriqué et monté au C.N.E.T.

(5) Voir pour la définition de la durée de vie, l'article de P. AIGRAIN dans les *Annales de Radioélectricité*, juillet 1954, IX, 37, p. 219.

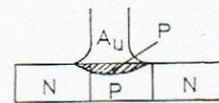
un trait de scie est de 0,8 mm, les pertes seront de près de 80 % ; si cette épaisseur est réduite à 0,4 mm les pertes sont encore de 60 % ; or, comme il est très difficile d'avoir une scie très mince ayant une profondeur de passe suffisante, les pertes restent importantes.

Traitements de surface.

C'est l'un des points technologiques les plus délicats ; en effet, un bâtonnet dont les surfaces sont brutes de sciage est inutilisable : les propriétés du transistor impliquent un réseau cristallin parfaitement ordonné ; or, une face brute de sciage est perturbée sur environ 1/10 de mm. Cette couche peut être partiellement enlevée par un traitement avec un abrasif très doux ; cette opération est longue et de toute façon laisse encore quelques centièmes de millimètres très perturbés ; il faut ensuite effectuer, soit une attaque électrolytique, soit une attaque chimique, soit les deux ; on connaît un très grand nombre de bains possibles, mais les paramètres différents, les interactions mutuelles sont si nombreuses et les possibilités si variées que l'étude complète de ces questions et la compréhension satisfaisante des phénomènes sont encore loin d'être réalisées.

Soudures.

Le bâtonnet ayant ainsi subi un premier traitement de surface est monté sur un boîtier dont le culot est une perle de verre traversée par trois connexions métalliques (fig. 15) ; le bâtonnet est pincé entre les connexions extrêmes préalablement étamées et l'ensemble est passé dans un four ; on obtient ainsi des connexions émetteur et collecteur satisfaisantes ; il reste à placer la connexion de base. On soude un fil d'or de 25 microns sur une toute petite queue en nickel ; l'ensemble est tenu dans un micromanipulateur et déplacé sur le bâtonnet de germanium ; les 3 connexions sont reliées à un traceur de caractéristiques et lorsque sur l'écran de



682E

Fig.16

FIG. 16. — Représentation schématique en cours de traitement évitant le court-circuit des jonctions.

l'oscilloscope apparaissent les caractéristiques d'un transistor, le fil d'or est alors en contact avec la partie centrale P. On décharge dans la connexion de base un condensateur et le fil d'or localement chauffé forme un alliage avec le germanium ; on obtient ainsi un contact satisfaisant ; on utilise un fil d'or contenant un petit pourcentage d'indium ou de gallium de telle sorte que s'il empiète sur les régions de germanium de type N il n'y ait pas court-circuit des jonctions (fig. 16).

En réalité, il faut prévoir encore d'autres traitements de surface avant et après la soudure de fil d'or.

Scellement.

Notre transistor possède désormais toutes ses propriétés ; il faut les lui conserver et éviter des phénomènes tels que des dépôts divers sur les jonctions, de lents transports d'ions, l'action de la vapeur d'eau, etc... et cela d'autant plus qu'au voisinage de la jonction base-collecteur règne, en fonctionnement, un champ électrique qui peut atteindre 200 000 volts/cm.

On va enduire le transistor d'une substance protectrice qui doit avoir de bonnes qualités de recou-

vrement, être un excellent isolant, ne pas posséder de moment électrique, être hydrophobe, etc...

Le transistor est ensuite scellé de façon aussi étanche que possible.

Conclusion

Le transistor est déjà entré dans la technique moderne ; tel qu'il est, il constitue pour le technicien un matériel nouveau permettant des solutions nouvelles ; il a théoriquement de grandes possibilités de perfectionnement, mais ces améliorations ne seront possibles que si le transistor actuel est d'abord, d'un point de vue technologique, fabriqué le plus parfaitement possible. Un très important travail de mise au point est encore nécessaire dans cette voie là.

INFORMATIONS

NOUVELLES DE L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

Les licenciés ès sciences vont accéder plus aisément au C.A.P.E.T.

Un arrêté paru au J.O. du 6 octobre, modifie la structure de la première partie du C.A.P.E.T. (section AI) qui est divisé désormais en deux options : option sciences mathématiques et option sciences physiques.

Les épreuves de cette première partie sont rendues plus accessibles aux licenciés ès sciences qui pourront ainsi continuer leurs efforts dans le sens de leur spécialisation.

Dès le 15 novembre, s'est ouverte une session spéciale de nouveau professorat AI. Les candidats sont invités à se faire inscrire à la Direction de l'Enseignement Technique, 5^e Bureau, 44, rue de Bellechasse, Paris (7^e).

Un second arrêté intéressant les licenciés ès sciences.

Dans le cadre des mesures destinées à faciliter l'accès des licenciés ès sciences au professorat de l'Enseignement Technique, un second arrêté vient d'être signé :

Il s'applique aux titulaires d'une licence d'enseignement ayant exercé au moins un an dans un établissement public. Les mesures qu'il prévoit auront leur effet immédiatement et pendant une durée de trois années. A la suite d'une Inspection Générale et à la condition de satisfaire à une

seule épreuve consistant en un exposé scientifique, les candidats éventuels peuvent désormais recevoir l'équivalence de la première partie du professorat AI.

Les licenciés désirant bénéficier de ces dispositions doivent se faire connaître, avant le 1^{er} janvier 1956, à la Direction de l'Enseignement Technique, 5^e Bureau, 44, rue de Bellechasse, Paris.

Le Bureau de l'Union des Ingénieurs du Conservatoire National des Arts et Métiers rappelle les mesures suivantes dont bénéficie le titre d'Ingénieur C.N.A.M., et qui constitue une nouvelle marque de l'intérêt que les Pouvoirs Publics et certaines grandes administrations portent à la qualité attachée à ce titre l'Ingénieur diplômé :

1^o Un arrêté du Ministre de l'Education Nationale en date du 29 décembre 1954, publié dans le J.O. du 14 janvier 1955 dispense les ingénieurs du Conservatoire National des Arts et Métiers des trois Certificats d'Etudes Supérieures de sciences exigés des candidats au diplôme d'Ingénieur-Docteur.

2^o Un décret du 31 janvier 1955 publié dans le J.O. du 3 février 1955 dispense les ingénieurs C.N.A.M. du baccalauréat de l'enseignement secondaire pour l'inscription en vue de la licence dans les facultés des sciences.

3^o Dans sa lettre du 14 mars 1955 (Pn n° 202) la Direction du Personnel de la S.N.C.F. fait connaître qu'elle a décidé de faire bénéficier désormais des avantages du groupe III des attachés, les Ingénieurs du Conservatoire National des Arts et Métiers dont elle aurait effectivement l'emploi dans un poste où leurs connaissances pourraient être utiles.

Des colloques publics sur les techniques de production et de construction auront lieu du 5 au 19 décembre, chaque lundi à 18 heures, 233, Boulevard Raspail, Paris. — Métro : Raspail — Danton 11-01.

DATES	CONFÉRENCIERS	SUJETS DES COLLOQUES
5 décembre	P. NASLIN, Ingénieur Militaire Principal de l'Armement, Professeur à l'E.N.S.A.R., à l'E.S.E. et à l'I.S.M.C.M.	Solution des systèmes électromécaniques sans équations.
12 décembre	G. PELLISSIER, ancien élève de l'Ecole Polytechnique.	Actualités sur l'usinage par électro-érosion.
19 décembre	R. CAZAUD, Ingénieur du C.N.A.M., Professeur à l'I.S.M.C.M.	Quelques nouveautés dans les domaines d'emploi des alliages antifriction.

PETITES ANNONCES

250 fr. la ligne de 35 signes ou espaces

★ Compagnie I. B. M. FRANCE recherche : **INGÉNIEURS** format. Grdes Ecoles, ayt. plus. années de réf. en PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE. Ecr. av. C. V., 20, av. Michel-Bizot, Paris-12^e.

★ **TECHNICIENNE CHIMISTE DE LABORATOIRE INDUSTRIEL**, diplômée de l'Ecole Supérieure de Chimie Gay Lussac, cherche situation dans industrie de préférence produits chimiques ou pharmaceutiques. Ecrire à la revue.

★ **INGÉNIEUR ELECTRONICIEN**, 43 ans, références de 1^{er} ordre, 10 ans de direction (technique, industrielle, administrative et commerciale), expérimenté questions Développement, Fabrication, Normalisation, Spécifications de qualité, Contrôle, Planning d'Etudes, Prospection de marchés, etc..., connaissant parfaitement anglais et espagnol, assez bien allemand, cherche situation en rapport avec aptitudes. Ecrire à *Electronique* sous le n° 1091.

★ Le Laboratoire Electro-Acoustique, 5, rue Jules-Parent, à Rueil-Malmaison, recherche un bon **DESSINATEUR D'ETUDES** ayant si possible quelques notions en BF et électro-acoustique. Ecrire directement avec références.

★ **AGENT TECHNIQUE ELECTRONICIEN**, chef d'équipe, groupe dépannage d'appareils électroniques, 40 ans environ, plusieurs années de pratique industrielle. Le candidat devra être familiarisé avec les différentes techniques de mesures modernes. Ecrire C.E.A., Boîte postale n° 307, Paris-7^e. Rappeler référence : C.E. 9.

★ **INGÉNIEUR**, marié, administration de l'Etat nommé à Paris, recherche petit appartement ou deux pièces chez particulier ayant loyer trop important. Références et moralité garanties par relations sérieuses. Ecrire à la revue dont la direction connaît parfaitement le demandeur.