

où α est le coefficient de dilatation thermique moyenne. L'erreur δx cherchée peut s'écrire :

$$\delta x = \frac{\partial x}{\partial \theta} \delta \theta + \frac{\partial x}{\partial f_0} \delta f_0 + \frac{\partial x}{\partial f_0} \delta f_0$$

Or,

$$\frac{\partial x}{\partial \theta} \delta \theta = \frac{f_0}{f_0} \cdot \alpha \cdot \delta \theta + \frac{(1 + \alpha \theta)}{f_0} \cdot \frac{\partial f_0}{\partial \theta} \cdot \delta \theta.$$

Mais,

$$\left| \alpha \frac{f_0}{f_0} \right| < \alpha \simeq 0,4 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}.$$

En effet, pour le silicium, les fréquences discrètes diminuent quand la température s'élève. D'autre part, compte tenu que $\alpha \theta \leq 0,4 \cdot 10^{-2}$, on a,

$$\left| \frac{(1 + \alpha \theta)}{f_0} \frac{\partial f_0}{\partial \theta} \right| \simeq \left| \frac{1}{f_0} \frac{\partial f_0}{\partial \theta} \right| \leq \frac{1}{f_0} \left| \frac{\partial f_0}{\partial \theta} \right|_{\text{maxi}} \leq 5 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}.$$

Le dernier nombre est obtenu à partir des courbes expérimentales des variations des fréquences discrètes avec la température pour les trois vitesses de propagation. Comme nous verrons plus loin, ces variations sont plus rapides aux températures élevées. Nous avons donc :

$$\left| \frac{\partial x}{\partial \theta} \delta \theta \right| \leq 16,5 \cdot 10^{-5}.$$

De l'autre côté, étant donné que

$$f_0 \simeq f_0 \simeq 30 \text{ MHz} \quad \text{et} \quad |\delta f_0| \simeq |\delta f_0| \leq 0,7 \text{ kHz}$$

on peut écrire :

$$\left| \frac{\partial x}{\partial f_0} \delta f_0 \right| = \left| (1 + \alpha \theta) \frac{f_0}{f_0^2} \delta f_0 \right| \simeq \left| \frac{\delta f_0}{f_0} \right| \leq 2,5 \cdot 10^{-5}$$

$$\left| \frac{\partial x}{\partial f_0} \delta f_0 \right| = \left| (1 + \alpha \theta) \frac{\delta f_0}{f_0} \right| \simeq \left| \frac{\delta f_0}{f_0} \right| \leq 2,5 \cdot 10^{-5}.$$

L'incertitude globale maximale δx dans x est donc de l'ordre de $0,2 \cdot 10^{-3}$ à la température la plus élevée des mesures. Celle-ci est de 830°C pour les ondes transversales et de 930°C pour les longitudinales. Néanmoins, au-delà de 830°C , nous avons remarqué une

certaine dispersion des résultats pour les ondes longitudinales. Cette dispersion, qui est vraisemblablement due au collage, est de $\pm 0,2 \cdot 10^{-3}$. Nous estimons donc que l'erreur maximale qui peut avoir lieu dans les rapports V_0/V_0 est :

$$\left| \Delta \left(\frac{V_0}{V_0} \right) \right| \leq 0,25 \cdot 10^{-3} \quad \text{pour} \quad \theta \leq 830^\circ\text{C}$$

$$\leq 0,4 \cdot 10^{-3} \quad \text{pour} \quad \theta > 830^\circ\text{C}.$$

III-B. Appareillage électronique. — 1) **Principe de l'installation.** — La figure 13 donne le schéma synoptique de l'installation. On voit que nous avons adopté la technique de réflexion ultrasonore afin d'éviter la nécessité de réaliser deux collages à chaud sur les deux faces parallèles du monocristal. C'est ainsi que nous avons utilisé un seul transducteur en quartz pour l'émission et la réception des ultrasons. Comme la température de Curie du quartz piézoélectrique est de 570°C seulement, il a fallu éloigner le transducteur de la zone chaude du four. Un barreau connecteur en silice fondue constitue le milieu convenable pour la propagation des ultrasons du transducteur au monocristal et *vice versa*. Par ailleurs, l'extrémité du connecteur qui porte le transducteur est refroidie par une circulation d'eau. Ceci permet d'utiliser un liant ordinaire en salol pour réaliser le joint transducteur-connecteur.

L'appareillage électronique comprend deux chaînes : l'une, d'émission à la fin de laquelle on a des impulsions H. F. pour exciter le transducteur, l'autre de réception qui reçoit les échos, les amplifie et permet de les observer. Nous donnons ci-dessous un aperçu rapide de cet appareillage dont on trouvera ailleurs une description détaillée [17].

2) **Chaîne d'émission.** — Comme dans la méthode que nous avons employée, la mesure de vitesse et de sa variation avec la température se ramène en fait à une mesure de fréquence, les impulsions H. F. d'excitation du transducteur sont obtenues par découpage d'une onde sinusoïdale de fréquence bien définie. C'est pour-

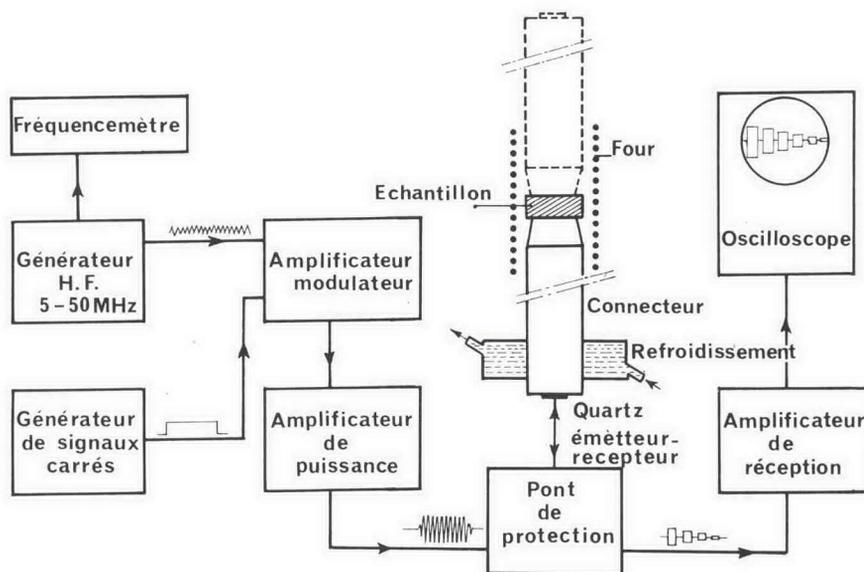


FIG. 13. — Schéma synoptique de l'installation.

quoi on emploie un générateur H. F. stable d'une fréquence réglable, celle-ci étant mesurée par un fréquence-mètre digital. A la sortie du générateur, l'onde sinusoïdale est amplifiée à un niveau voisin du volt dans un amplificateur de tension apériodique à large bande. Ensuite, on découpe cette onde à l'aide d'un modulateur piloté par un générateur d'impulsions rectangulaires. Les impulsions H. F., ainsi obtenues, sont amplifiées dans un préamplificateur de puissance push-pull accordé, puis réamplifiés dans un amplificateur de puissance également en push-pull accordé. C'est ce dernier qui alimente le transducteur en impulsions H. F. de puissance dont la tension de crête peut atteindre 150 V sur une impédance de 120 ohms qui représente l'impédance caractéristique du coaxial de liaison entre le transducteur et la chaîne d'émission. Pour diminuer les « fuites » H. F. entre impulsions, le préamplificateur et l'amplificateur sont normalement bloqués par une surpolarisation. Ce n'est qu'au moment du déblocage du modulateur par les impulsions rectangulaires que ces dernières débloquent également les étages de puissance.

Les caractéristiques de la chaîne d'émission sont les suivantes :

a) Fréquences porteuses : 5, 10, 15, 20, 25, 30 et 45 MHz (les résultats dont nous ferons état par la suite sont obtenus à 30 MHz environ).

b) Bande passante globale : variable de 2 MHz aux alentours de 5 MHz à 5 MHz aux alentours de 45 MHz.

c) Tension de crête des impulsions H. F. à la sortie (sur 120 ohms) : variable de 250 V vers 5 MHz à 80 V vers 45 MHz.

d) Tension de crête des fuites entre impulsions : 10 mV environ.

e) Temps de montée des impulsions à la sortie : 2 microsecondes.

f) Temps de descente des impulsions à la sortie : 2 microsecondes.

g) Durée des impulsions : réglable de 0,5 à 20 microsecondes.

h) Fréquence de répétition : 500 à 2 000 c/s.

3) **Chaîne de réception.** — Elle comprend le pont de protection, l'amplificateur de réception, et l'oscilloscope qui sert à observer les échos non redressés. Pour se rendre compte du rôle capital du pont de protection, il suffit de remarquer que le transducteur émetteur-récepteur des ultrasons est relié à la fois à la chaîne d'émission et à la chaîne de réception. Il en résulte que les impulsions H. F. de puissance qui sont appliquées au transducteur pour l'exciter arrivent simultanément à l'entrée de l'amplificateur de réception. Or, cet amplificateur est conçu pour amplifier les échos lesquels sont atténués de 40 à 60 db, par rapport aux impulsions d'excitation. Ceci est dû aux pertes par absorption et réflexion des signaux ultrasonores aussi bien qu'au rendement médiocre du transducteur. Par conséquent, si l'amplificateur de réception est relié directement au transducteur, il subira la totalité de la tension des impulsions H. F. d'excitation qui le satureront ou le mettront hors d'usage.

Le rôle du pont de protection, dont le schéma est donné dans la figure 14, est de réaliser à l'entrée de

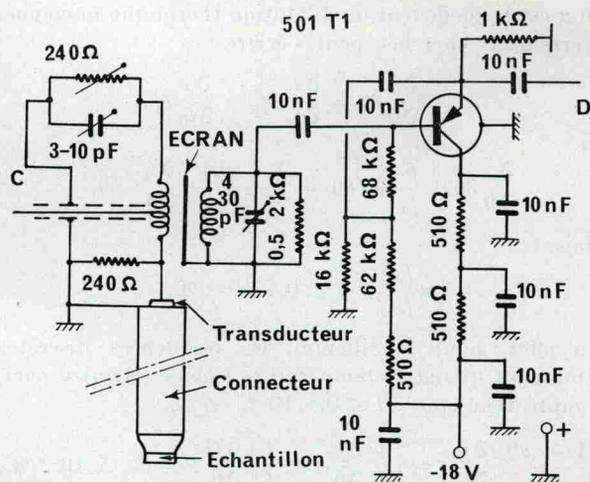


FIG. 14. — Pont de protection (réjecteur).

l'amplificateur de réception une atténuation suffisante (~ 60 db) des impulsions H. F. d'excitation. Il ne doit pas atténuer pour autant les échos délivrés par le transducteur à ce même amplificateur. En outre, il ne doit pas entraver la transmission intégrale des impulsions H. F. d'excitation au transducteur.

Le pont est constitué essentiellement d'un transformateur dans lequel on applique les impulsions H. F. d'excitation au point-milieu de l'enroulement primaire. Une des bornes de ce primaire est reliée, par une courte longueur (~ 10 cm) d'un coaxial, au transducteur shunté par une résistance de 240 ohms. La deuxième borne du primaire est connectée, par l'intermédiaire d'un morceau identique du coaxial, à un circuit à éléments ajustables qui servent à équilibrer électriquement les deux moitiés du primaire. A l'équilibrage parfait du primaire, les impulsions H. F. d'excitation ne doivent induire aucun courant dans l'enroulement secondaire lié à l'amplificateur de réception. En fait, au point optimum d'équilibrage, les signaux induits dans le secondaire sont atténués de 60 db environ. Par contre, les échos reçus par le transducteur, monté sur un demi-primaire, sont transmis au secondaire sans atténuation.

Par ailleurs, l'impédance du coaxial de liaison entre l'émetteur et le pont est de 120 ohms. On recueille donc la totalité de la tension d'émission aux bornes de la résistance de 240 ohms en parallèle avec le transducteur. Ce dernier, qui est un cristal de quartz, a une impédance très élevée ; sa réponse ultrasonore ne dépend donc que de la tension d'excitation. Dans ces conditions, la présence du pont ne diminue guère l'amplitude des impulsions ultrasonores.

Il est intéressant de noter que le pont de protection, en plus de son rôle principal déjà mentionné, relève le niveau des échos par un gain de tension de 10 db environ. Ce gain est obtenu par le choix du rapport des nombres de spires dans les enroulements du transformateur et par la mise dans le secondaire d'un circuit accordé amorti. Afin que le gain de ce circuit accordé ne soit pas entièrement perdu par la faible impédance du coaxial de liaison (75 ohms) un étage séparateur en émetteur-follower est interposé entre les deux.