LES LIGNES A RETARD ACOUSTIQUES DISPERSIVES POUR LA COMPRESSION D'IMPULSION *

par
Pierre TOURNOIS **

I. INTRODUCTION

I.1. Généralités.

Les radars et sonars classiques émettent des impulsions de fréquence pure dont la longueur est fixée par la précision en distance souhaitée, et dont la puissance crête est déterminée par la portée à atteindre. Pour accroître cette portée, sans dégrader la précision en distance, les impulsions émises doivent présenter des amplitudes de plus en plus grandes, dont les valeurs maximales sont bornées par les effets non linéaires qui apparaissent au niveau des émetteurs. Une fois la puissance crête limitée par l'émetteur ou son environnement, la portée et la précision de détection deviennent des paramètres incompatibles ; en effet, pour accroître la portée, il faut accroître l'énergie en augmentant la longueur des impulsions, et pour améliorer la résolution il faut diminuer la longueur de ces impulsions.

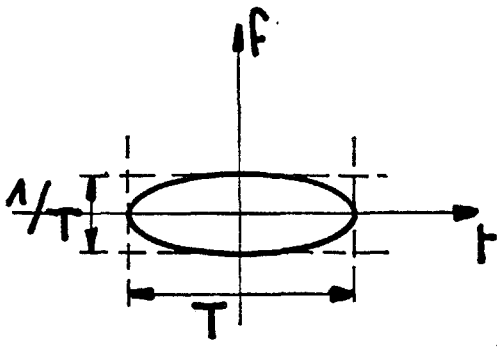
Le produit BT, produit de la bande passante par la longueur du signal émis, qui est égal à l'unité, traduit bien cet aspect contradictoire puisqu'à la plus grande bande passante correspond la meilleure résolution et à la plus grande longueur de signal correspond la meilleure portée [1].

Pour obtenir, à la fois, une bonne résolution et une grande portée, il est nécessaire de choisir « séparément » la bande du signal à émettre et sa durée. Ceci conduit à des produits BT très supérieurs à l'unité et aux impulsions codées qu'émettent les radars et les sonars modernes. A la réception, pour extraire les informations du bruit, il ne suffit plus de choisir la bande du récepteur, il faut aussi l'adapter au code reçu. Ce « traitement du signal » se fait dans des corrélateurs ou des filtres adaptés aux codes que l'on s'attend à recevoir.

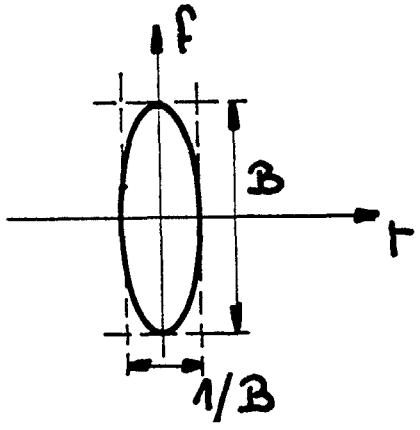
Les performances optimales de ces corrélateurs et de ces filtres sont liées à la fonction d'auto-corrélation du signal émis que l'on représente depuis le travail de Woodward [2], sous forme de diagrammes d'ambiguïté. C'est de l'étude de ces diagrammes d'ambiguïté que l'on déduit le code le plus apte à résoudre un problème donné (Fig. 1).

I.2. Principe de la compression d'impulsion.

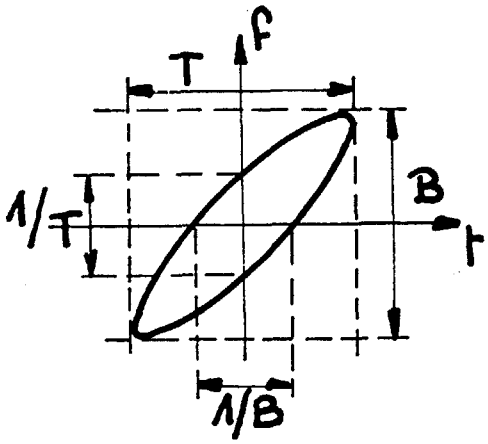
Klauder, Price, Darlington et Albersheim du Bell Telephone Laboratories ont publié en 1960 [3] le principe de la compression d'une impulsion longue modulée linéairement en fréquence par un filtre dispersif dont le temps de retard varie linéairement avec la fréquence (Fig. 2). Ils ont montré, d'autre part, que cette compression réalise le traitement optimal de



a



b



c

(*) Conférence prononcée le 5-10-1966 lors d'une réunion de la 9e section de la S. F. E. R.
(**) Ingénieur au département d'électro-acoustique de la C. S. F. — Cagnes-sur-mer.

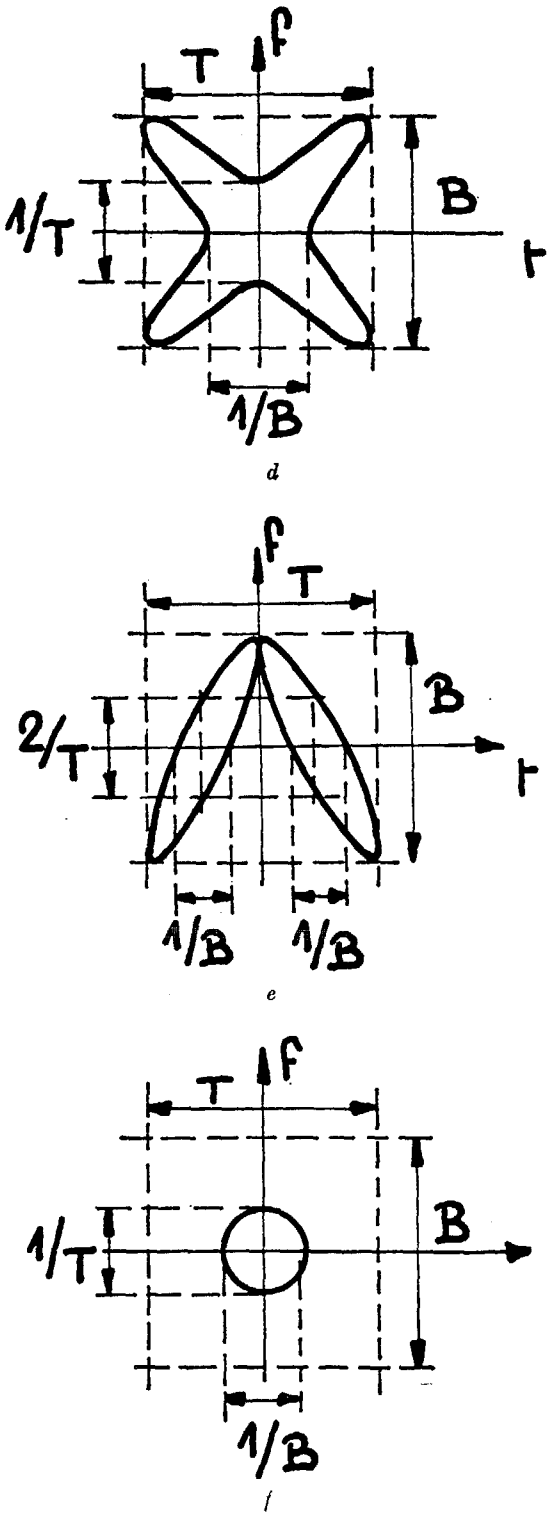


FIG. 1. — Différents diagrammes d'ambiguïté. *a*) impulsion longue à fréquence pure ; *b*) impulsion courte à fréquence pure ; *c*) impulsion modulée linéairement en fréquence ; *d*) impulsion à modulation parabolique de fréquence ; *e*) impulsion à modulation de fréquence en toit ; *f*) impulsion modulée suivant un code pseudo-aléatoire.

l'impulsion longue. La même année, Meitzler [4], May [5], Meeker [6] du Bell Telephone Laboratories, ont décrit des lignes à retard acoustiques dispersives susceptibles de comprimer ces impulsions longues.

Dans son principe, une ligne à retard linéairement dispersive « focalise », à sa sortie, l'impulsion modulée qu'on lui entre, de la même manière qu'une lentille, en optique, focalise le faisceau de lumière parallèle qu'on lui envoie [7]. Cette analogie qui est précisée sur la figure 3, permet de rendre compte,

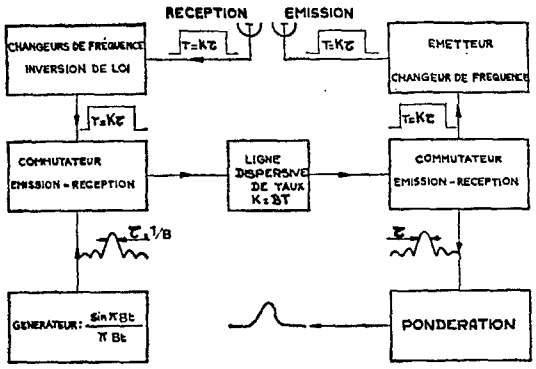


FIG. 2. — Schéma synoptique d'un radar à compression d'impulsion.

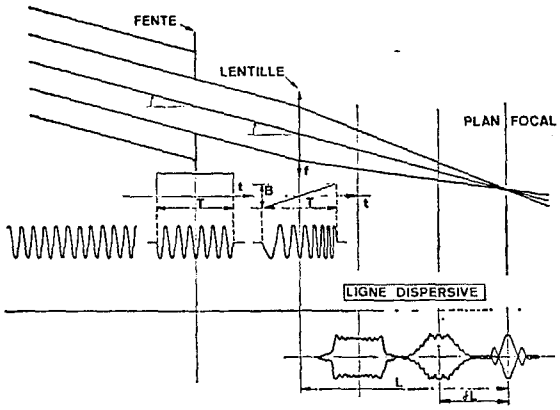


FIG. 3. — Analogie optique de la compression d'impulsion.

simplement, de la transformation de Fourier qui relie les amplitudes d'entrée et de sortie de la ligne.

Ainsi une impulsion rectangulaire de longueur T, d'amplitude unité, modulée linéairement en fréquence dans une bande B est transformée, par la ligne, en une impulsion dont l'enveloppe est un $(\sin t)/t$ de longueur $1/B$ à 3 dB et d'amplitude $(BT)^{1/2}$. L'impulsion origine a donc été comprimée BT fois à énergie constante.

L'évolution du signal entre l'entrée et la sortie de la ligne est semblable à l'évolution du faisceau lumineux entre la lentille et son foyer. La figure 4 présente divers signaux intermédiaires obtenus par le calcul tandis que la figure 5 présente ces signaux obtenus expérimentalement.

Cette analogie avec l'optique permet de déterminer les écarts admissibles à la linéarité du temps de retard à partir de la tolérance de Rayleigh [8] ou de Maréchal [9] sur les surfaces d'onde. On trouve ainsi [7] que le plus grand écart possible normalisé par rapport à la variation totale du retard utile doit rester inférieur à l'inverse du taux de compression ($\delta t/T < 1/BT$).

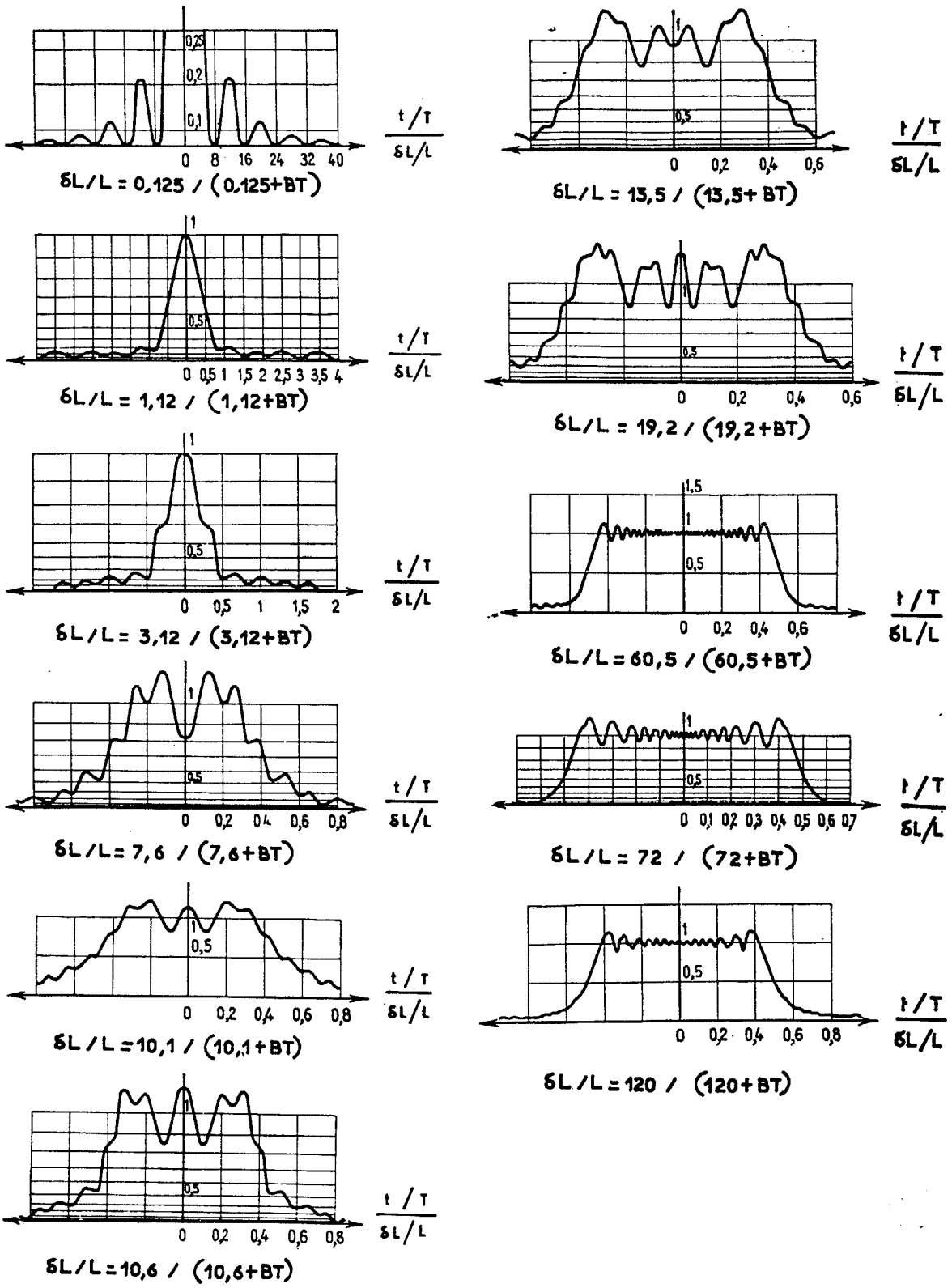


FIG. 4. — Courbes d'amplitude théoriques des signaux intermédiaires. L = longueur de la ligne nécessaire à la focalisation, δL = distances du point considéré au point de focalisation.

II. LES LIGNES A RETARD ACOUSTIQUES DISPERSIVES DONT LA BANDE B EST COMPRISE ENTRE 100 ET 1000 kHz

II.1. La propagation dans les corps solides.

Un corps solide indéfini et isotrope peut propager indépendamment une onde longitudinale (onde P) et une onde transversale (onde S) de vitesses différentes C_p et C_s. Lorsqu'une onde P atteint une frontière du corps solide, une partie de son énergie se convertit à la transmission, comme à la réflexion, en onde S dont la vibration se trouve dans le plan d'incidence de l'onde P. On appelle SV cette onde pour insister sur la polarisation. Réciproquement lorsqu'une onde SV atteint une frontière du corps

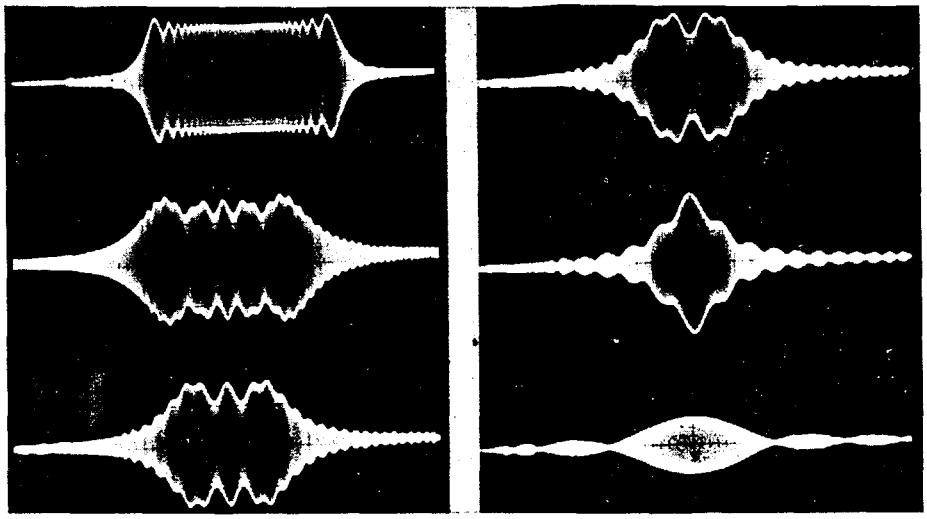


FIG. 5. — Signaux intermédiaires expérimentaux.

solide, une partie de son énergie se convertit en onde P. Par contre, une onde S dont la vibration est perpendiculaire au plan d'incidence (onde SH) ne se convertit ni à la réflexion, ni à la transmission (Fig. 6).

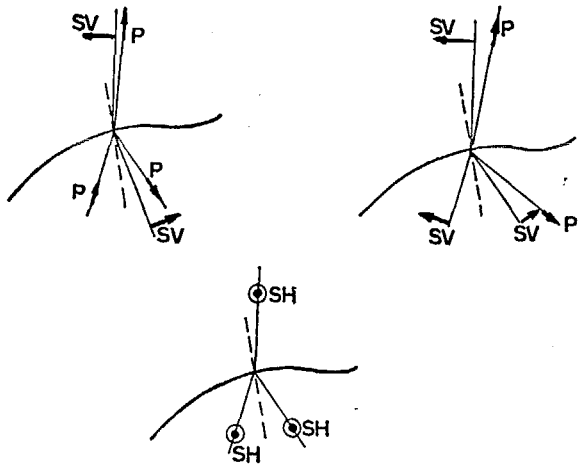


FIG. 6. — Conversion possible des modes à la frontière d'un corps solide.

Ces considérations expliquent que les guides d'ondes solides, à partir desquels sont construites les lignes à retard, utilisent deux types de propagation : un type de propagation (SH), dont le premier mode est non dispersif aussi bien dans les rubans à section rectangulaire que dans les fils (onde de torsion) et un type de propagation (P + SV) qui tient compte des interférences inévitables entre les ondes P et les ondes SV. Ce dernier type de propagation, bien connu dans les plaques minces sous le nom d'« ondes de Lamb » [10], se sépare en deux mouvements qui peuvent prendre naissance indépendamment : un mouvement symétrique d'extension et un mouvement antisymétrique de flexion.

En résumé, deux types de propagation font apparaître trois ondes dans les guides solides : une onde SH, une onde d'extension et une onde de flexion.

Le premier mode de l'onde SH est utilisé dans les fils sous forme d'onde de torsion, pour construire des lignes à retard magnétostrictives ajustables, non dispersives dans une large gamme de température, pour le stockage des informations numériques dont la fréquence d'horloge est de l'ordre du mégahertz [11]. Ce même premier mode SH est utilisé dans les rubans ou les blocs de silice pour la même application, lorsque la fréquence d'horloge est plus élevée, la gamme de température moins étendue, et lorsque le retard n'a pas à être ajusté [12].

Le premier mode des ondes d'extension et de flexion est dispersif et est utilisé pour construire des lignes à retard dispersives pour la compression d'impulsion.

II.2. La ligne « ruban » en onde d'extension.

Le premier mode de l'onde d'extension d'un ruban métallique est dispersif car il est formé par la superposition d'ondes P et d'ondes S de vitesses différentes dont les proportions relatives varient avec la fréquence. Les vitesses de phase et de groupe de ce mode normalisées par rapport à la vitesse des ondes S ainsi que le temps de retard de groupe normalisé par rapport au temps de retard de l'onde S sont portés sur la figure 7 en fonction du paramètre

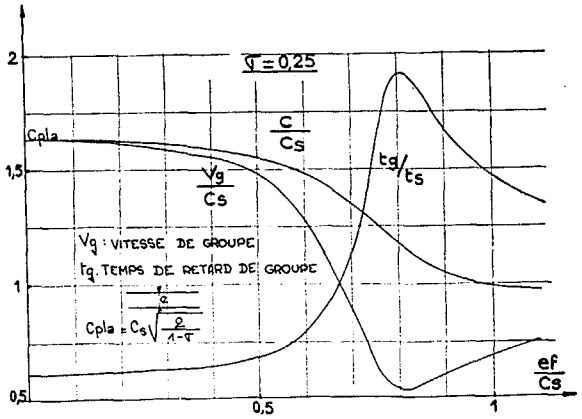


FIG. 7. — Courbes théoriques de dispersion dans une plaque mince.

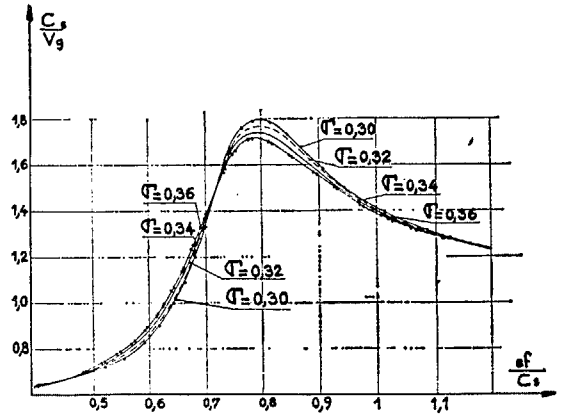


FIG. 8. — Dispersion du 1er mode d'extention E_{01} dans un ruban.

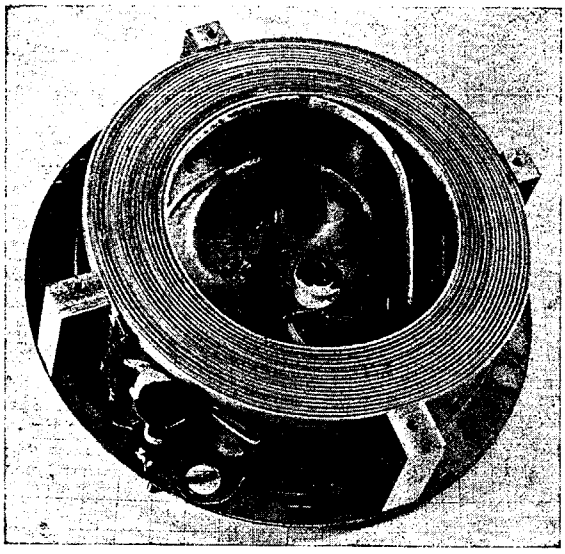


FIG. 9. — Ligne dispersive « ruban » : $B = 200$ kHz, $T = 0,5$ ms.

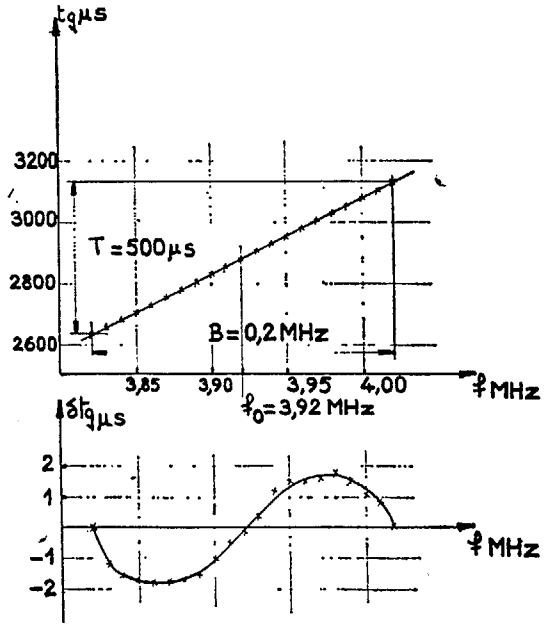
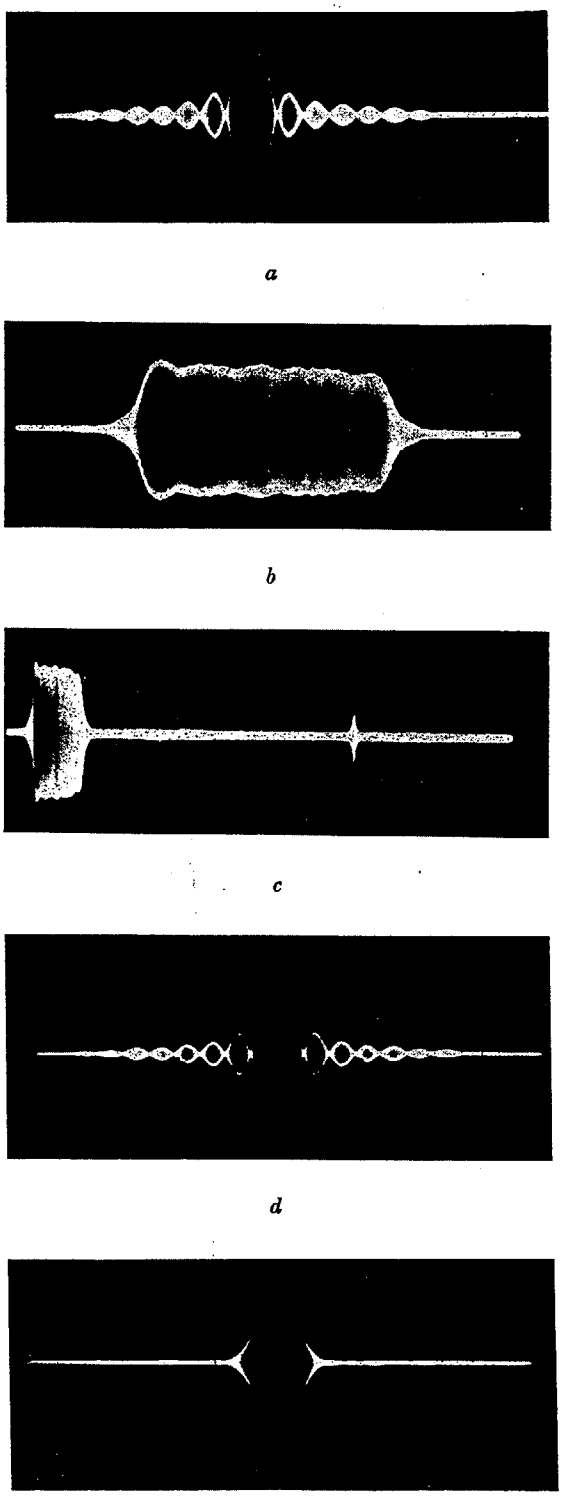


FIG. 10. — Résultats expérimentaux des mesures de linéarité effectuées sur la ligne dispersive « ruban » de la figure 9.



a

b

c

d

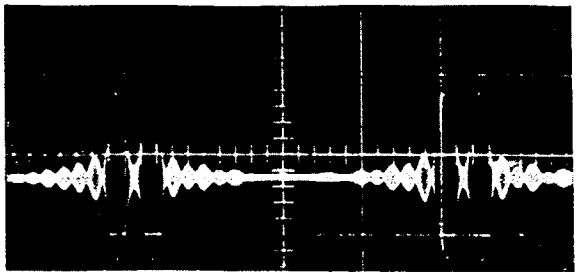
e

FIG. 11. — Ligne « ruban » de taux de compression K = 100. *a*) Impulsion courte origine à l'entrée de la ligne dispersive. *b*) Impulsion longue en sortie de la ligne dispersive. *c*) Impulsion longue suivie de l'impulsion comprimée. *d*) Impulsion comprimée avant pondération. *e*) Impulsion comprimée après pondération.

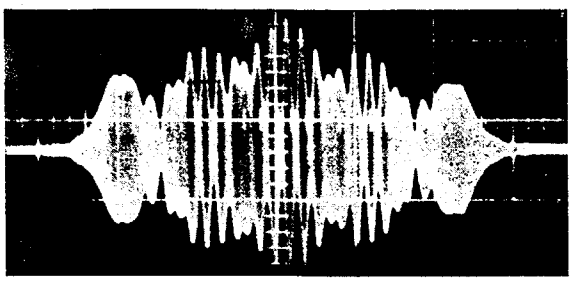
ef/C_s (e = épaisseur du ruban ; f = fréquence).

L'influence du matériau sur la courbe du temps de retard est représentée sur la figure 8 en fonction du coefficient de Poisson σ.

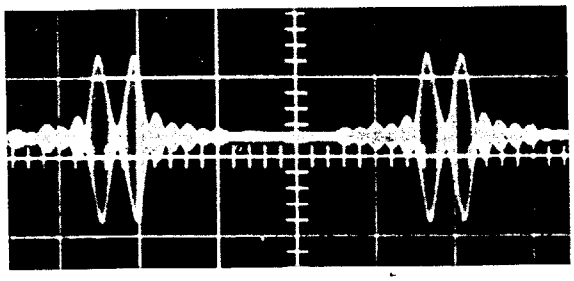
L'idée d'utiliser la partie linéaire de la variation



a



b



c

FIG. 12. — Ligne « ruban » de taux de compression K = 100 ; superposition de quatre échos. *a*) Impulsion origine à l'entrée de la ligne dispersive. *b*) Impulsion longue en sortie de la ligne dispersive. *c*) Impulsion comprimée avant pondération.

de ce temps de retard pour comprimer des impulsions, est due à Meeker [6]. On peut voir une réalisation de ligne dispersive ($B = 200$ kHz, $T = 0{,}5$ ms) basée sur ce principe sur la photographie de la figure 9, tandis que la figure 10 donne les résultats expérimentaux des mesures de linéarité et les figures 11 et 12 les résultats des expériences de compression d'impulsion.

L'abaque de la figure 13 relie, pour un matériau donné, la bande passante et la linéarité désirées à l'épaisseur du ruban et sa fréquence centrale et dès lors, la variation du temps de retard aux pertes d'insertion totales de la ligne.

Du point de vue de la plus grande largeur de bande B, la principale limitation de ces lignes provient de leur fréquence centrale. En effet, les tolérances de linéarité, ne permettent d'exploiter qu'une bande de 5 à 10 % de la fréquence centrale et deux facteurs viennent limiter cette fréquence centrale : d'une part, l'épaisseur la plus petite qu'il est possible de donner au ruban et, d'autre part,

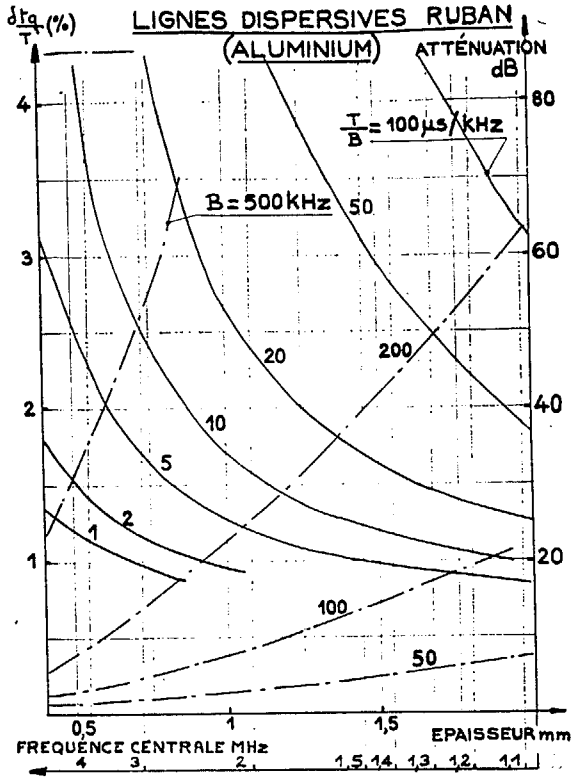


FIG. 13. — Abaque relatif aux lignes « ruban ».

l'absorption en f^4 due à la diffusion des ondes élastiques par les grains du métal.

Ces facteurs limitent la largeur de bande de ces lignes à 1000 kHz environ.

Du point de vue de la bande la plus étroite, la limitation provient de l'encombrement de la ligne et des pertes d'insertion dues à sa longueur. La vitesse moyenne de l'onde d'extension dans la zone de linéarité du temps de retard est, en effet, trop élevée pour que les impulsions longues associées aux bandes étroites puissent être emmagasinées aisément. Il est, de ce fait, difficile d'envisager des bandes inférieures à 100 kHz.

II.3. La ligne « fil » en onde d'extension.

Le premier mode de l'onde d'extension de révolution d'un fil métallique présente une dispersion tout à fait semblable à celle du ruban (Fig. 14)

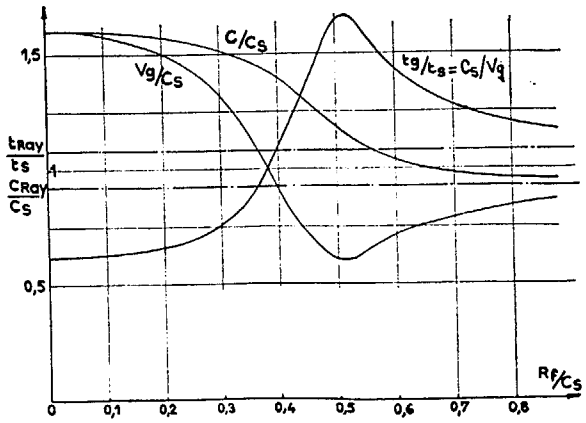


FIG. 14. — Courbes théoriques de dispersion pour $\sigma = 0{,}29$ dans un fil.

et a été choisi par May [5] pour réaliser des lignes dispersives.

On peut voir sur la figure 15, l'influence du coefficient de Poisson du matériau sur la courbe de temps de retard, sur la figure 16 des courbes expérimentales de ce temps de retard et, sur la figure 17, une réalisation américaine de ce type de ligne ($B = 100$ kHz ; $T = 0{,}2$ ms).

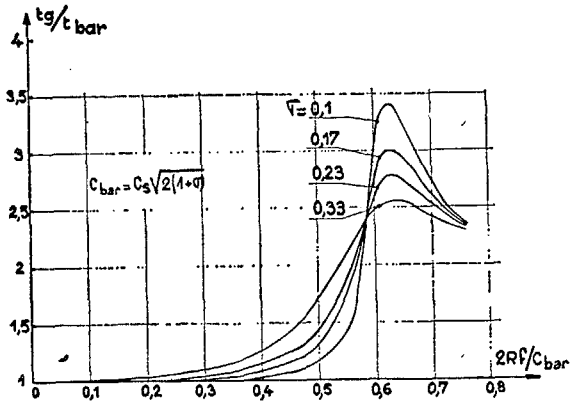


Fig. 15. — Comparaison de la dispersion dans un fil pour différents σ.

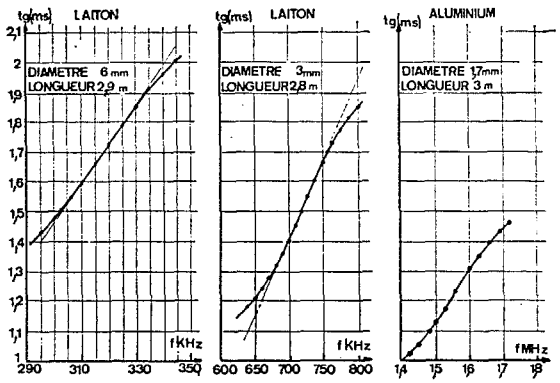


Fig. 16. —Courbes expérimentales du temps de retard dans un fil.

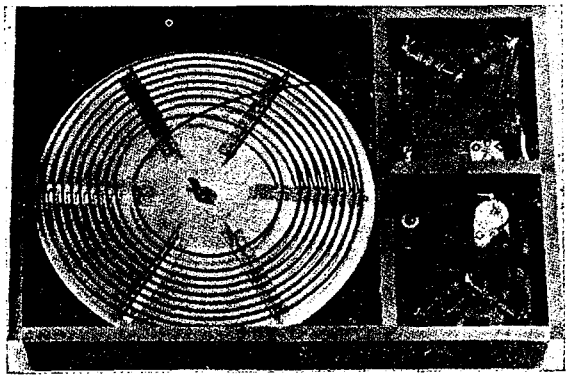


Fig. 17. —Ligne dispersive « fil » : $B = 100$ kHz, $T = 10$ µs, (extrait de la revue citée en référence [5]).

Les limitations sur les largeurs de bande proviennent des tolérances de linéarité donc de la fréquence centrale pour les bandes larges, et de la longueur de ligne, donc des pertes d'insertion, pour les bandes étroites.

Ces lignes sont moins linéaires mais moins encombrantes que les lignes rubans, si bien qu'elles peuvent être construites pour des bandes comprises entre 50 et 200 kHz.

III. LES LIGNES A RETARD ACOUSTIQUES DISPERSIVES DONT LA BANDE B EST SUPÉRIEURE A 1000 kHz

Ainsi qu'on vient de le constater, une des limitations de la largeur de bande provient de la bande relative exploitable des courbes de dispersion. Le lignes dispersives de ce chapitre ont des bandes relatives utilisables au moins égales à 40 %.

III.1. La ligne ruban en onde d'extension à modulation d'épaisseur.

Pour une épaisseur donnée, la bande relative exploitable du premier mode d'extension est

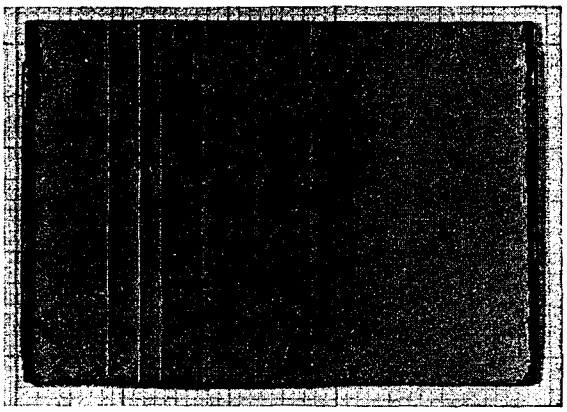


Fig. 18. — Ligne dispersive « ruban » à modulation d'épaisseur : $B = 2$ MHz, $T = 10$ µs.

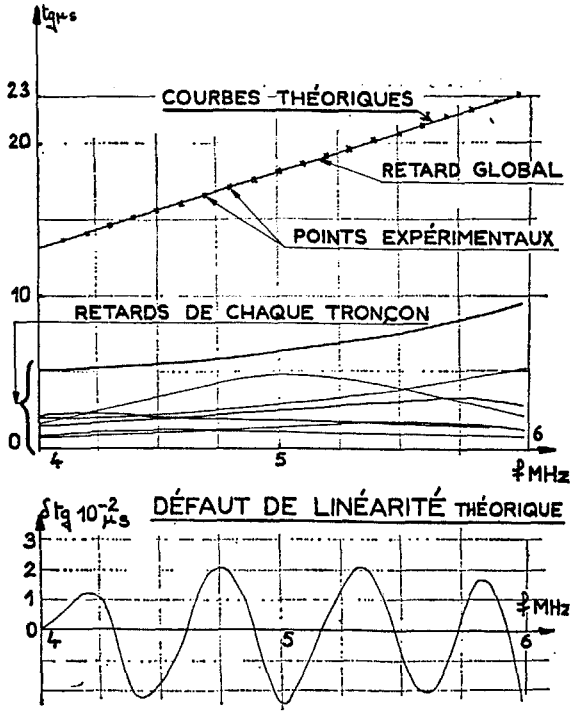
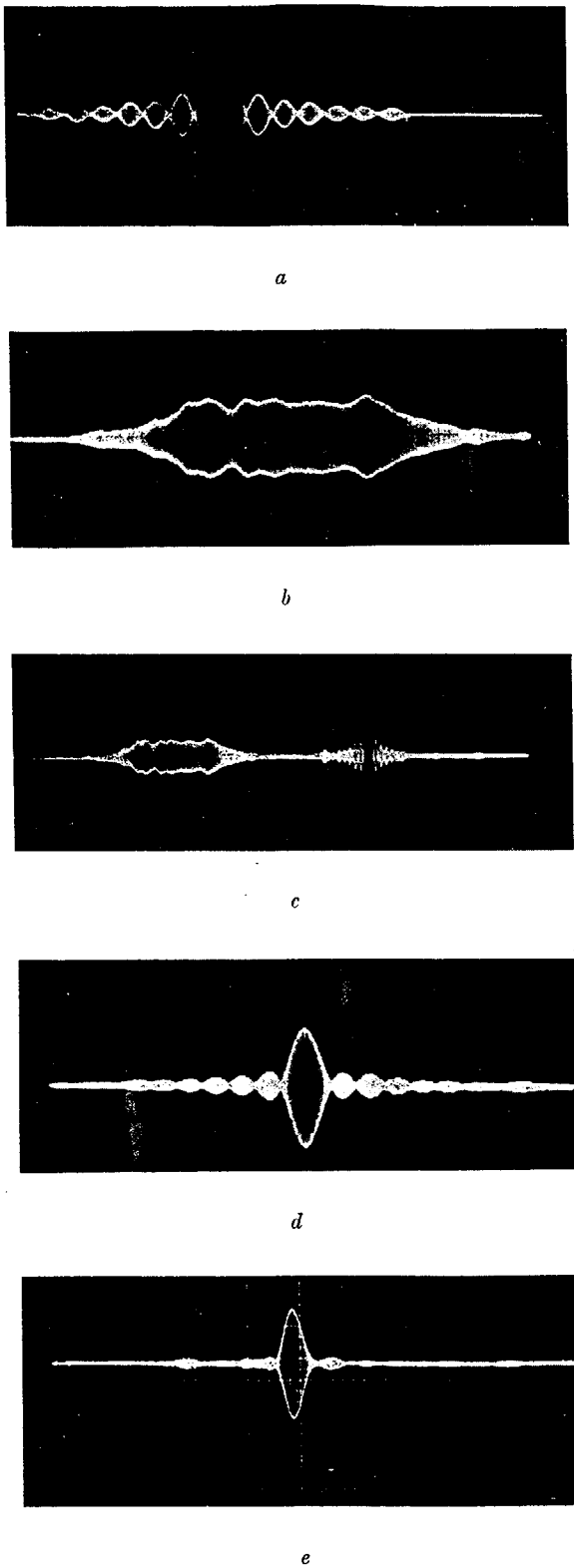


Fig. 19. — Résultats expérimentaux des mesures effectuées sur la ligne dispersive de la figure 18.



a

b

c

d

e

FIG. 20. — Ligne « ruban » à modulation d'épaisseur, de taux de compression K = 20. *a*) Impulsion courte origine à l'entrée de la ligne dispersive. *b*) Impulsion longue en sortie de la ligne dispersive. *c*) Impulsion longue suivie de l'impulsion comprimée. *d*) Impulsion comprimée avant pondération. *e*) Impulsion comprimée après pondération.

seulement de 5 à 10 %. Fitch [13] eut l'idée d'élargir cette bande en modulant l'épaisseur du ruban. En effet, la fréquence autour de laquelle se produit le phénomène de dispersion dépend directement de cette épaisseur, si bien qu'en plaçant, en série, plusieurs lignes d'épaisseur et de longueur bien calculées, on peut obtenir, par superposition, une courbe de temps de retard linéaire à une approximation près fixée à l'avance dans une bande donnée.

C'est ce principe qui a été appliqué à la ligne de la figure 18 ($B = 2$ MHz ; $T = 10$ µs) dont les caractéristiques globales et de chaque tronçon sont représentées sur la figure 19. Les figures 20 et 21 donnent les résultats des expériences de compression d'impulsion réalisées avec cette ligne.

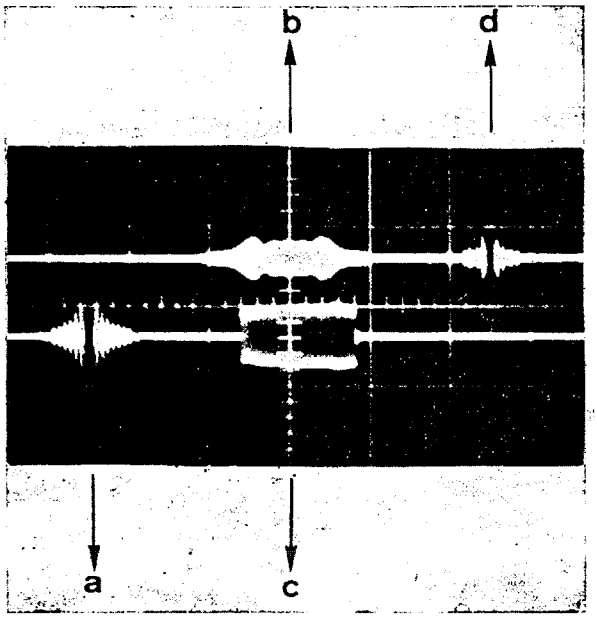


FIG. 21. — Ligne « ruban » à modulation d'épaisseur, de taux de compression K = 20 ; *a*) impulsion origine à l'entrée de la ligne dispersive ; *b*) impulsion longue en sortie de la ligne dispersive. *c*) impulsion longue après écrêtage et découpe à l'entrée de la ligne dispersive ; *d*) impulsion comprimée en sortie de la ligne dispersive.

De par la fréquence centrale et l'épaisseur minimale du ruban, ce type de ligne est limité aux bandes d'environ 3 à 4 MHz. Il présente de plus quelques signaux parasites liés aux variations brusques de l'épaisseur le long du ruban.

III.2. Les lignes à diffraction.

Indépendamment du phénomène de diffusion des grains, l'obstacle à la largeur de bande provient donc, pour les guides précédemment rencontrés, de leur dimension transversale. Devant le peu d'espoir de franchir cet obstacle, une autre idée est née : une variation de temps de retard avec la fréquence peut être obtenue par variation d'une vitesse de groupe entre deux capteurs mais aussi par variation de la longueur d'un trajet parcouru à vitesse constante entre un plus grand nombre de capteurs. Par exemple, dans la suite de capteurs de plus en plus espacés de la figure 22, seulement deux d'entre eux adjacents et de distance λ, sont susceptibles de capter en phase une onde de fréquence pure et de longueur d'onde λ ; lorsque la fréquence varie, les capteurs

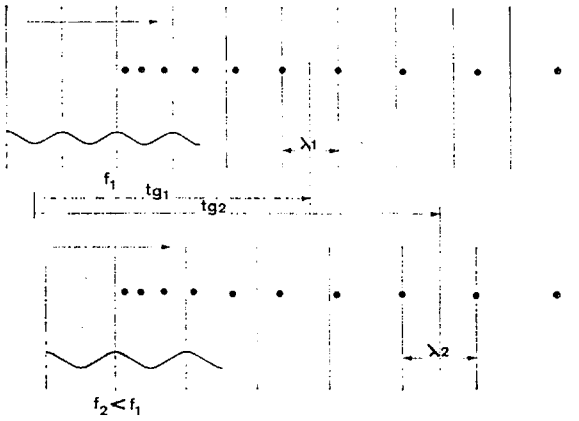


FIG. 22. — Répartition dispersive de capteurs.

adjacents intéressés ne sont plus les mêmes et le temps de retard varie.

Si la loi d'espacement des capteurs est quadratique, la variation du temps de retard avec la fréquence est linéaire puisqu'une impulsion modulée linéairement en fréquence (à phase parabolique) intéresse tous les capteurs au même moment pendant un temps très court et de ce fait est parfaitement comprimée. Mortley en Angleterre [14] a utilisé la propagation d'ondes de volume dans des cristaux pour s'affranchir de la diffusion des grains ; ses excitateurs et capteurs sont constitués de réseaux d'électrodes à écartement quadratique déposés sur des quartz piézoélectriques (Fig 23)

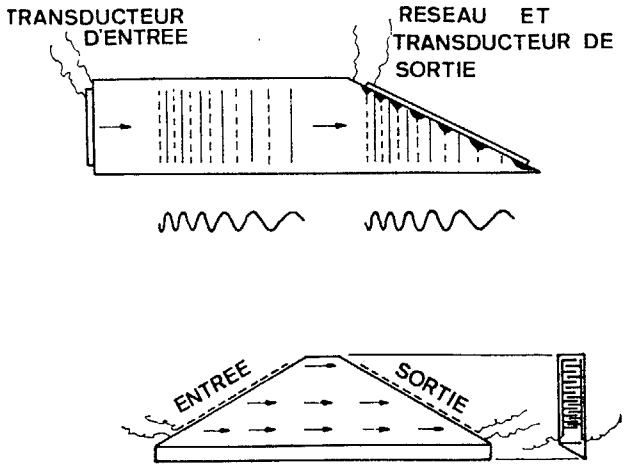


FIG. 23. — Montage dispersif en ondes de volume de Mortley.

Rowen aux États-Unis [15] a préféré utiliser la propagation de l'onde de surface de Rayleigh, dans un guide piézoélectrique ; les capteurs sont alors constitués de réseaux d'électrodes à écartement quadratique qu'on peut déposer directement sur le guide sans adjonction de quartz résonnant (Fig 24).

Duncan et Parker [16] puis Coquin et Tsu [17] aux États-Unis ont utilisé le montage plus compliqué à diffraction perpendiculaire de la figure 25.

Les montages de Mortley et de Rowen ont l'avantage de pouvoir se passer d'excitateurs résonnants mais ils sont limités en taux de compression par la

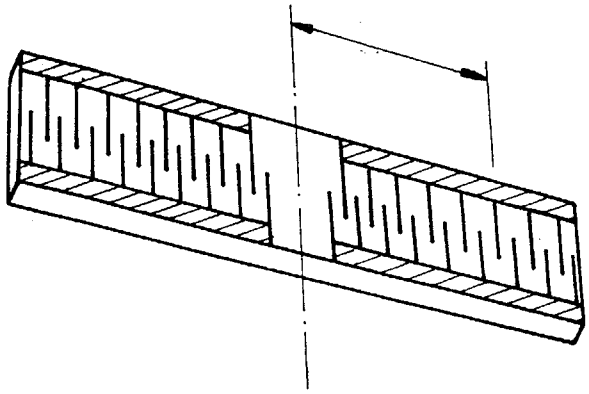


FIG. 24. — Montage dispersif en ondes de surface de Rowen.

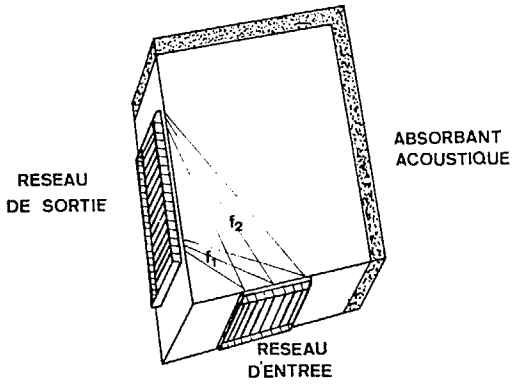


FIG. 25. — Montage dispersif à diffraction perpendiculaire de Duncan et Parker.

plus grande dimension des échantillons cristallins susceptibles d'être obtenus. Certains signaux parasites sont d'autre part difficiles à éliminer. Le montage à diffraction perpendiculaire (P. D. D. L.) nécessite des excitateurs résonnants qui viennent souvent limiter la bande des réseaux mais présente l'avantage de pouvoir utiliser comme milieu de propagation des blocs de silice dont les dimensions permettent de grands taux de compression.

Grossièrement assimilable par la géométrie, le fonctionnement fin de toutes ces lignes n'est calculable que par la diffraction des ondes acoustiques par les réseaux d'électrodes et comme pour les réseaux optiques, on démontre que différents ordres de diffraction peuvent se mélanger dans une

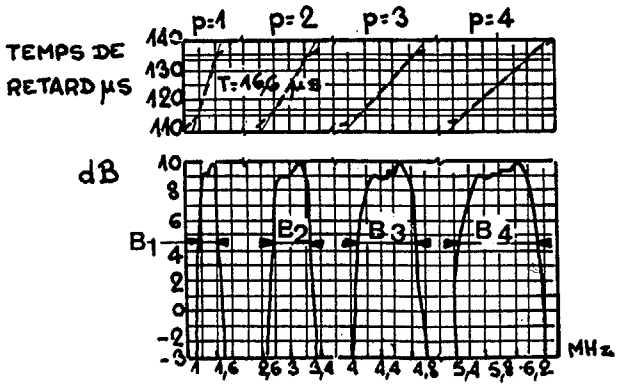


FIG. 26. — Courbes théoriques de la réponse en amplitude et du temps de retard en fonction de la fréquence pour les quatre premiers ordres d'une ligne à diffraction perpendiculaire.

même direction. Pour éviter cet enchevêtrement, il est nécessaire de limiter la bande relative utile B/f_0 à 50 % (Fig. 26).

Dans l'état actuel de la technique, des lignes de 10 MHz de bande sont aisément réalisables ; des lignes de bande supérieure de 30 MHz à 100 MHz sont en cours d'étude. La limitation large bande de ces lignes à diffraction risque de provenir des excitateurs piézoélectriques avant de provenir de la gravure des réseaux d'électrodes.

Avant d'abandonner ce sujet, on peut noter que le principe des capteurs à espacement variable utilité pour réaliser les lignes dispersives de ce paragraphe peut aussi être employé pour construire une antenne adaptée à un signal donné dans une direction donnée [18].

III.3. La ligne en ondes de Love.

Au moment où naissaient les lignes à diffraction dans les pays anglo-saxons, on examinait, en France, une autre solution susceptible de conduire à des lignes dispersives de très large bande [19]. Le principe de cette solution repose sur la dispersion des ondes de surface acoustiques guidées par un milieu stratifié.

On considère le guide stratifié solide de la figure 27

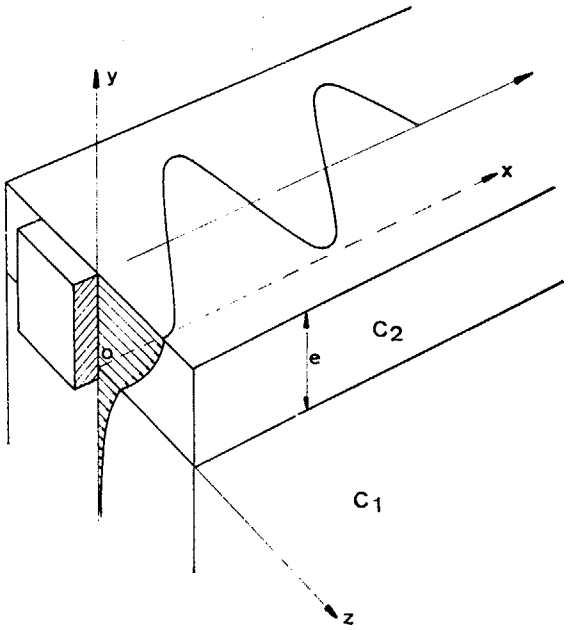


Fig. 27. — Guide stratifié solide pour la propagation des ondes de Love.

constitué d'un substrat de vitesse acoustique C_1 et d'une couche de vitesse acoustique C_2 inférieure à C_1. Une onde de surface, dont les vibrations ont une structure évanescente dans le substrat et sinusoïdale dans la couche, peut se propager dans un tel guide. Pour les basses fréquences, la longueur d'onde est grande devant l'épaisseur de la couche et pratiquement toute l'énergie de l'onde est contenue dans le substrat : la vitesse C est donc voisine de C_1. Au contraire, pour les fréquences élevées, la longueur d'onde est petite devant l'épaisseur de la couche et toute l'énergie de l'onde est pratiquement contenue dans la couche : la vitesse C est alors voisine de C_2. Pour les fréquences intermédiaires, la vitesse C est comprise entre C_1 et C_2 (Fig. 28). Le guide stratifié est donc dispersif entre deux vitesses susceptibles d'être choisies à l'avance ; l'épaisseur du dépôt qui constitue la couche peut être très fine et ne limite pas la fréquence centrale de la zone de dispersion utilisable pour la compression d'impulsion.

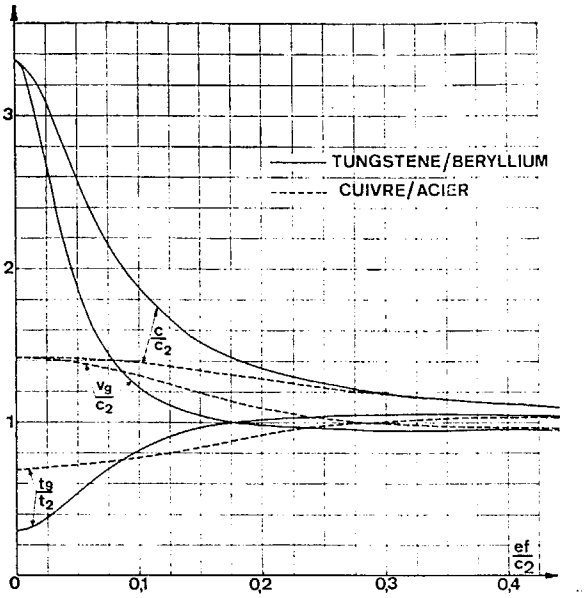


Fig. 28. — Courbes théoriques de dispersion des ondes de Love.

L'onde de surface peut avoir plusieurs structures et être formée à partir d'ondes (P + SV) ou (SH) (cf. paragraphe II.1). Lorsqu'elle est formée à partir des ondes (P + SV) symétrique et antisymétrique on l'appelle « onde de Rayleigh dispersive symétrique ou antisymétrique » [20] parce qu'à la limite, sans aucun dépôt solide, elle existe encore et coïncide avec l'onde de Rayleigh non dispersive [21]. Lorsqu'elle est formée à partir d'ondes (SH), on l'appelle « onde de Love » [20].

De ces trois structures d'ondes applicables à la compression d'impulsion large bande [23, 24]l'onde de Love apparaît comme la plus simple et a très vite donné de bons résultats [25]. La figure 29

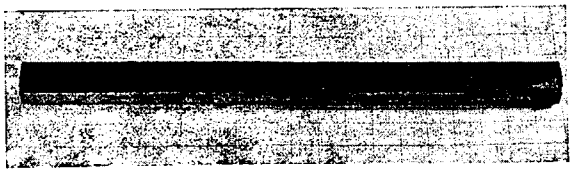


Fig. 29. — Ligne dispersive en ondes de Love : $B = 2{,}5$ MHz, $T = 13$ µs.

montre une ligne en onde de Love de 2,5 MHz de bande centrée autour de 4 MHz. Elle est constituée d'une couche de cuivre de 80 µ déposée sur un substrat d'acier : sa longueur est de 200 mm.

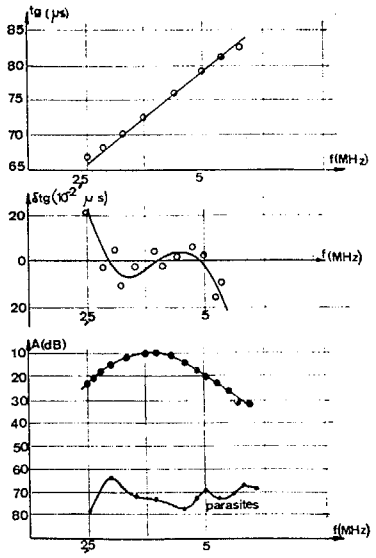


FIG. 30. — Résultats expérimentaux des mesures effectuées sur la ligne en ondes de Love de la figure 29. Ligne cuivre/acier L = 197 mm.

La figure 30 donne les résultats des mesures de temps de retard, de défaut de linéarité, de perte d'insertion et de niveau des signaux parasites, effectuées sur cette ligne.

Les résultats des mesures de temps de retard et de défaut de linéarité qui ont été effectuées sur une ligne en onde de Love de 90 mm constituée d'un dépôt de tungstène de 12 µ sur un substrat de béryllium sont présentés sur la figure 31. On y remarque que la bande de linéarité est de 10 MHz autour d'une fréquence centrale de 10 MHz : la bande relative est de 100 % pour un défaut de linéarité de 1 %.

Les ondes de Love sont le seul procédé actuel susceptible de procurer d'aussi large bande relative.

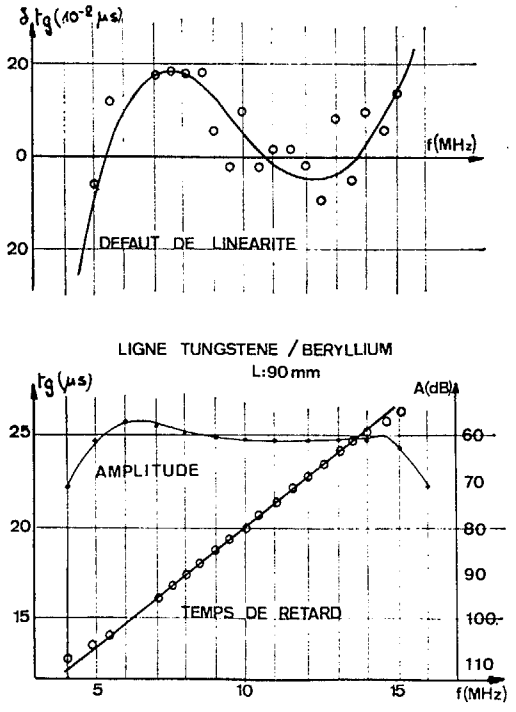


FIG. 31. — Résultats expérimentaux des mesures effectuées sur la ligne en ondes de Love : $B = 10$ MHz, $T = 13$ µs.

Ce fait autorise l'emploi des dépôts polycristallins pour des largeurs de bande importantes (10 MHz). Pour les largeurs de bande supérieures on doit constituer le guide stratifié à partir de corps monocristallins ou amorphes. Des études sont actuellement en cours pour réaliser des lignes de 50 MHz à 100 MHz de bande.

IV. LES LIGNES A RETARD ACOUSTIQUES DISPERSIVES DONT LA BANDE *B* EST INFÉRIEURE A 100 kHz

Les variations de temps de retard qu'il est nécessaire d'obtenir lorsque les bandes de traitement sont étroites, sont très importantes si bien que le problème de lignes dispersives à bande étroite est, avant tout, un problème d'encombrement et de pertes d'insertion. Pour limiter l'encombrement, on peut tenter d'utiliser les milieux dans lesquels la vitesse acoustique est faible (plastiques, liquides et gaz), ou rechercher des phénomènes de dispersion très surtendus qui présentent de grandes variations de vitesse dans des bandes très étroites.

IV.1. La ligne fil en plastique avec ou sans modulation de diamètre.

Le principe de fonctionnement de cette ligne est identique à celui qui est décrit au paragraphe II.3 lorsqu'on ne module pas le diamètre du fil et à celui qui est décrit au paragraphe III.1 lorsqu'on module ce diamètre.

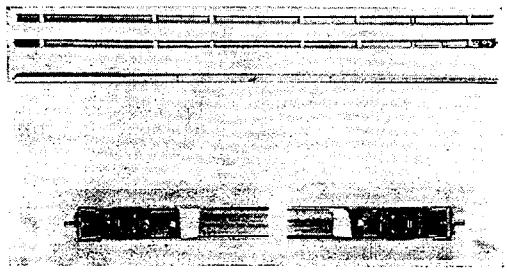


FIG. 32. — Ligne dispersive « fil » en plastique, à modulation de diamètre : $B = 100$ kHz, $T = 0{,}5$ ms.

La figure 32 montre une réalisation de ligne modulée en polystyrène dont la longueur est de 117 cm pour une variation de temps de retard de 0,5 ms dans une bande 100 kHz centrée autour de 200 kHz. Les résultats de mesures effectuées sur cette ligne sont présentés figure 33.

Ces lignes en plastiques sont utilisables pour des bandes de traitement comprises entre 30 et 100 kHz.

IV.2. La ligne en onde de surface dans les liquides [26].

Le principe de la dispersion des ondes de surface qui a été exposé au paragraphe III.3 et qui est utilisé dans les solides pour les ondes de Love peut aussi être exploité dans les fluides.

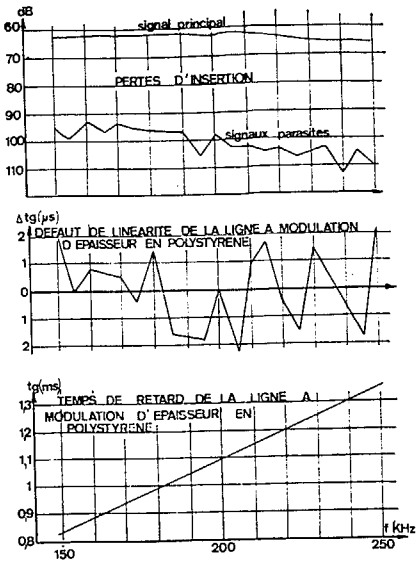


FIG. 33. — Résultats expérimentaux des mesures effectuées sur la ligne de la figure 32.

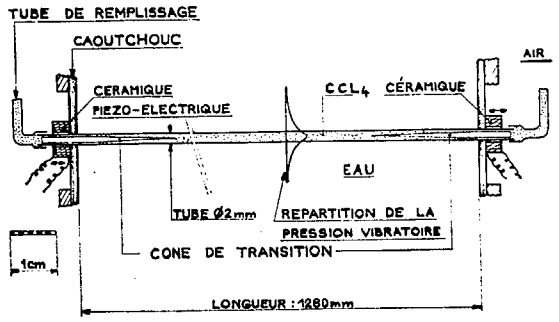


FIG. 34. — Guide stratifié liquide pour la propagation d'ondes de surface dispersives.

Sur la figure 34, un guide stratifié cylindrique est constitué d'un tube métallique à paroi très fine qui contient un liquide de faible vitesse acoustique (CCl_4 ou CF_3 COOH) ; ce tube est plongé dans un liquide de plus grande vitesse acoustique (eau). Les courbes de dispersion relatives à ce guide sont

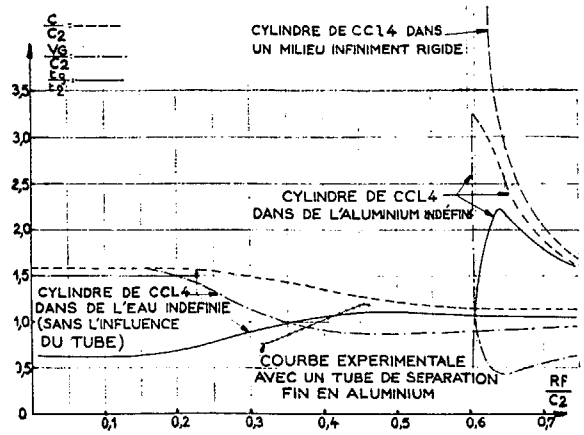


FIG. 35. — Courbes théoriques de dispersion d'un guide stratifié liquide CCl_4 — eau.

portées sur la figure 35 en grandeurs normalisées. On peut y remarquer l'influence du tube de séparation des liquides dont l'épaisseur de la paroi est 30 fois plus faible que le diamètre du tube. La

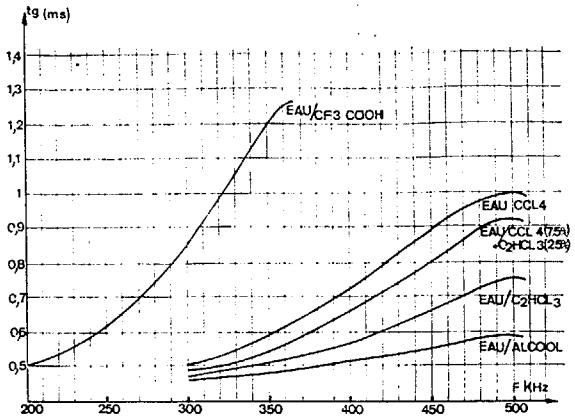


FIG. 36. — Courbes expérimentales de temps de retard d'un tube plongé dans l'eau contenant différents liquides. Tube : longueur 68,5 cm, épaisseur 0,07 cm, diamètre extérieur 2 mm.

figure 36 donne les courbes expérimentales de temps de retard obtenues avec un tube plongé dans l'eau, de 68 cm de longueur, de 2 mm de diamètre et de 0,07 mm d'épaisseur lorsqu'il contient divers liquides.

Ces lignes en onde de surface dans les liquides sont aisées à mettre au point pour des bandes comprises entre 30 et 100 kHz.

IV.3. La ligne en onde de surface dans les gaz [27].

Un gaz lourd (SF_6) de faible vitesse acoustique (135 m/s) enfermé entre une paroi rigide et une membrane mince (6μ) de mylar qui le sépare de l'air ambiant, constitue un guide stratifié plan apte à propager une onde de surface dispersive. Ce montage expérimental est représenté figure 37. Les

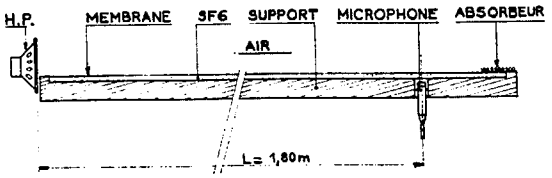


FIG. 37. — Guide stratifié gazeux SF_6 — air.

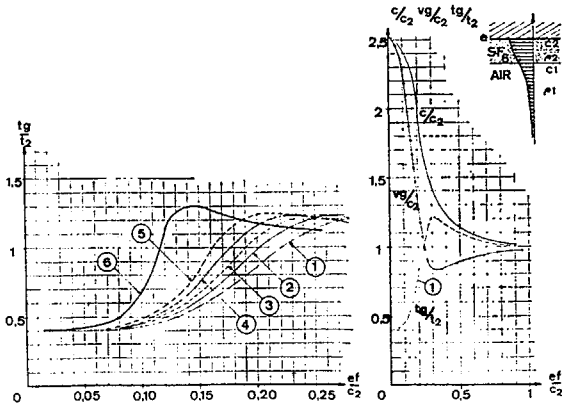


FIG. 38. — Influence d'une membrane de séparation solide sur la dispersion d'une onde de surface dans une ligne à gaz SF_6/Air. e = épaisseur du SF_6, ε = épaisseur de la membrane de mylar. (1) $\varepsilon/e = 0$ (sans membrane), (2) $\varepsilon/e = 0{,}0004$, (3) $\varepsilon/e = 0{,}00075$, (4) $\varepsilon/e = 0{,}0012$, (5) $\varepsilon/e = 0{,}002$, (6) $\varepsilon/e = 0{,}006$.

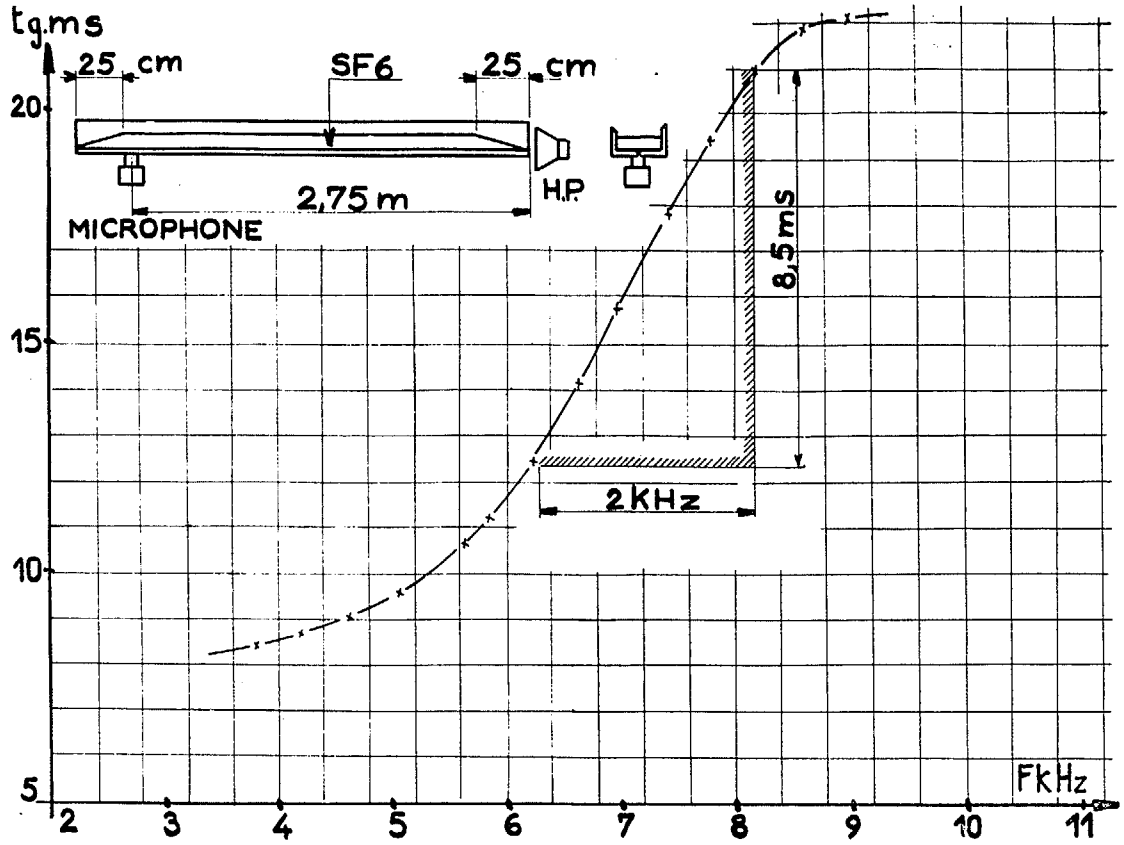


FIG. 39. — Résultats expérimentaux sur une ligne à gaz : air et SF_6 — SF_6 épaisseur 2 mm, largeur : 6 cm, épaisseur de la membrane de mylar : 6 μ, longueur de la ligne : 3 m.

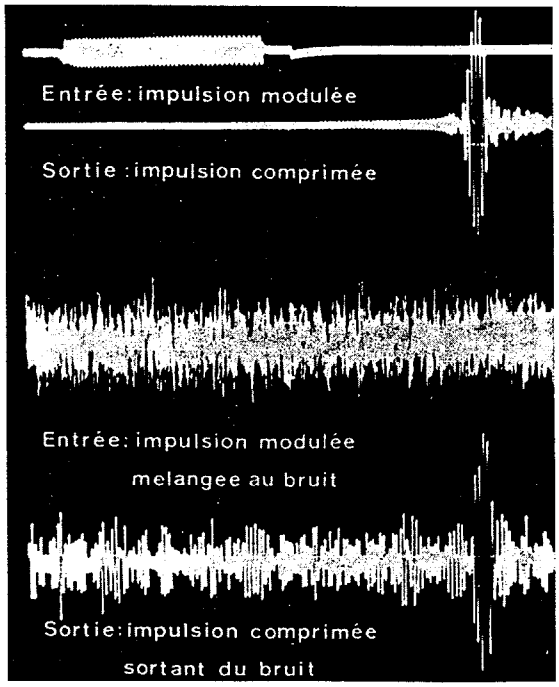


FIG. 40. — Résultats expérimentaux de l'expérience de compression d'impulsion relative à la courbe de la figure 39.

courbes de dispersion théoriques, tenant compte de l'influence de la membrane solide, sont portées figure 38. Les résultats expérimentaux se trouvent sur les figures 39 et 40.

Ces lignes dans les gaz sont utilisables pour les bandes comprises entre 1 et 5 kHz.

IV.4. La ligne en onde de flexion à symétrie de révolution dans les tubes métalliques.

De même qu'une plaque mince ou un ruban est susceptible de guider une onde de flexion et une onde d'extension (ondes de Lamb), un tube métallique peut guider ces deux ondes le long de ses parois avec une symétrie de révolution (Fig. 41).

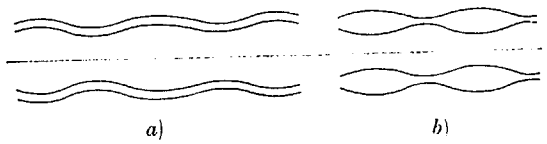


FIG. 41. — Déformations des ondes de flexion F_{01} et d'extension E_{01} guidées par un tube métallique. *a*) Onde de flexion, *b*) onde d'extension.

Les équations de dispersion relatives à ces ondes ont été établies par Mirsky et Herrmann [28]. Un calcul effectué récemment [29] a montré qu'en fonction de la fréquence quels que soient le coefficient de Poisson et le coefficient géométrique du tube, la vitesse de phase du mode de flexion reste comprise entre celle du mode de flexion du ruban et celle du mode d'extension du fil, que le mode d'extension est coupé et que sa vitesse de phase est toujours supérieure à celle du mode d'extension du ruban (Fig. 42). Le calcul des temps de retard de groupe a montré et l'expérience a confirmé [30], que la fréquence de coupure du mode d'extension est

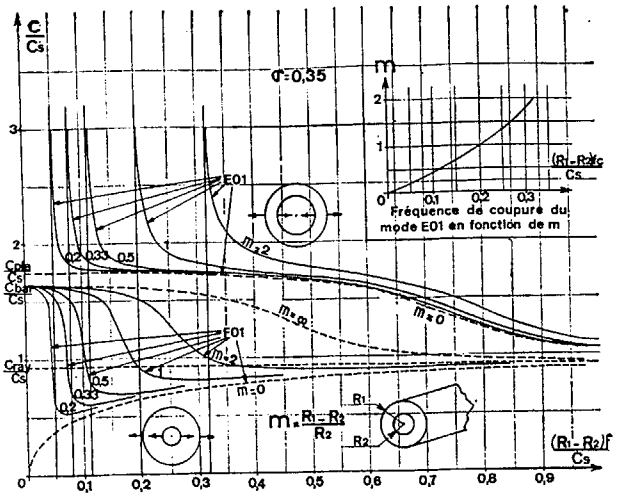


FIG. 42. — Courbes de dispersion des modes F_{01} et E_{01} pour diverses valeurs de m et pour $\sigma = 0,35$.

toujours supérieure à la fréquence pour laquelle le temps de retard du mode de flexion atteint son maximum et qu'avant ce maximum, le temps de retard présente une partie linéaire (Fig. 43). On

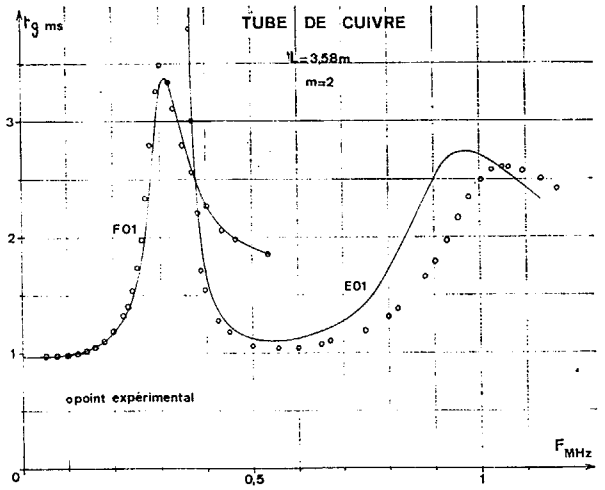


FIG. 43. — Temps de retard des modes F_{01} et E_{01} dans un tube de cuivre pour m = 2 ; courbes théoriques et points expérimentaux.

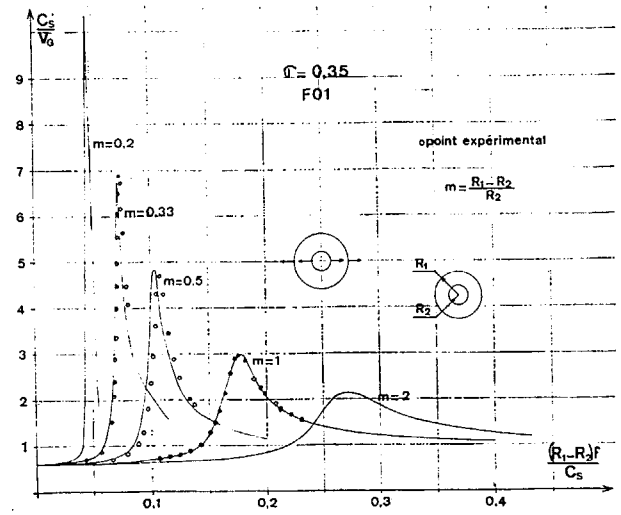


FIG. 44. — Courbe de variation du temps de retard de groupe du mode F_{01} pour diverses valeurs de m et pour $\sigma = 0,35$.

peut donc utiliser cette variation linéaire sans être gêné par le mode d'extension. Plus le coefficient géométrique *m*, rapport de l'épaisseur des parois du tube au rayon intérieur, est petit, plus la variation de temps de retard du mode de flexion est grande dans une bande de fréquence plus étroite (Fig. 44). Le phénomène de dispersion est donc très surtendu et se prête bien à la compression des impulsions longues modulées en fréquence dans une bande étroite.

La figure 45 donne l'évolution du temps de retard en fonction du coefficient de Poisson pour une valeur particulière de *m*.

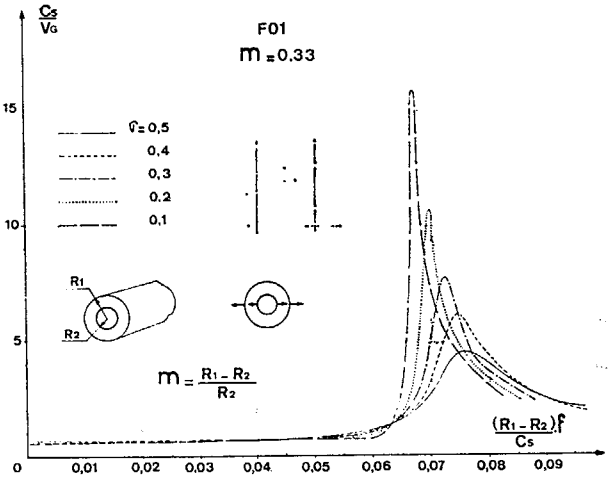


FIG. 45. — Courbes de variation du temps de retard en fonction du coefficient de Poisson pour m = 0,33.

Une ligne de 5 kHz de bande centrée autour de 186 kHz et de 10 ms de variation de temps de retard est présentée sur la photographie de la figure 46. Les résultats des mesures effectuées sur cette ligne sont donnés sur la figure 47 ; enfin la figure 48

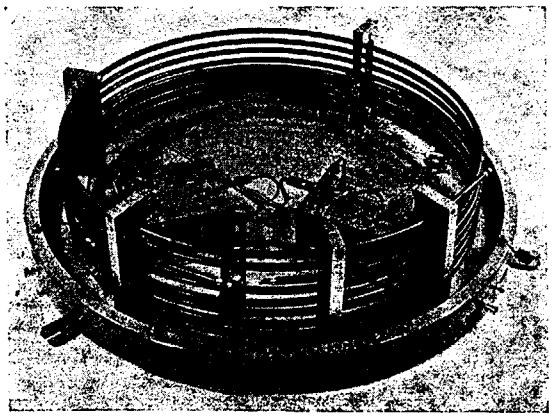


FIG. 46. — Ligne dispersive métallique tubulaire : $B = 5$ kHz, $T = 10$ ms.

est relative à l'expérience de compression d'impulsion correspondante.

Ces lignes tubulaires sont bien adaptées à la compression des impulsions dont la bande est comprise entre 1 et 30 kHz.

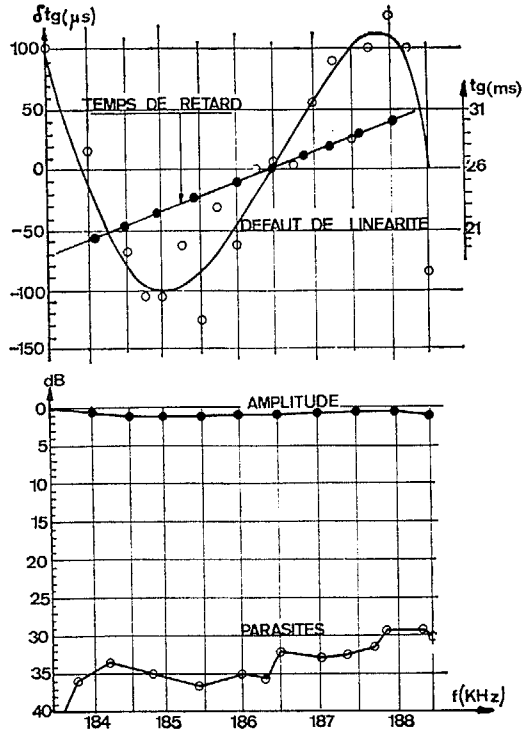


FIG. 47. — Résultats expérimentaux des mesures effectuées sur la ligne de la figure 46.

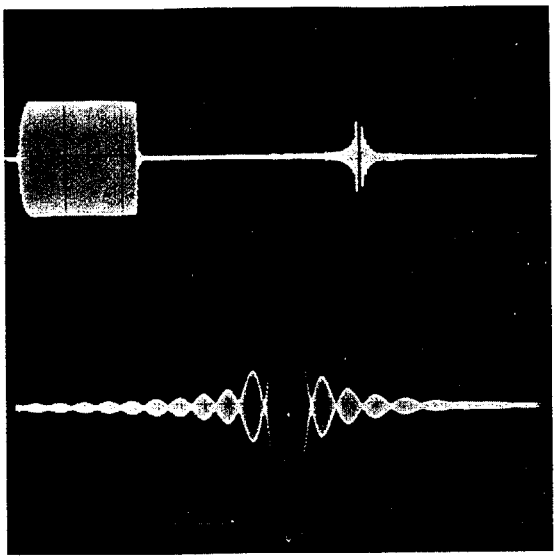


FIG. 48. — Résultats expérimentaux de l'expérience de compression d'impulsion relative aux courbes de la figure 47.

V. CONCLUSION

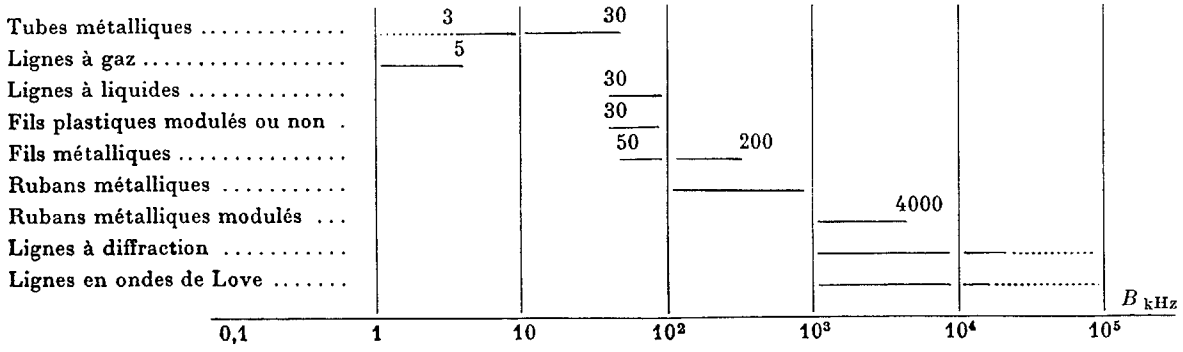
Le tableau I récapitule les divers domaines d'utilisation des lignes dispersives qui ont été décrites dans cet article.

d'environnement et le fait que leur domaine d'application est couvert par des lignes plus robustes, les lignes utilisant des fluides n'ont plus qu'un intérêt académique.

Les études qu'il est souhaitable de voir aboutir dans un proche avenir devraient porter sur les

TABLEAU I

DOMAINES D'APPLICATION DES DIFFÉRENTES LIGNES DISPERSIVES



En cours d'étude : ...

L'examen de ce tableau montre que les lignes en onde de surface dans les liquides ont un domaine d'application identique à celui des lignes en plastique et que le domaine d'application des lignes en onde de surface dans les gaz est contenu à l'intérieur de celui des lignes tubulaires en onde de flexion. Étant donné la sensibilité des fluides aux conditions

largeurs de bandes extrêmes, c'est-à-dire sur les lignes à retard à bande très étroite capables d'emmagasiner les impulsions longues des sonars et sur les lignes à retard à très large bande susceptibles d'apporter plus de définition aux radars et d'être plus efficaces contre la réverbération.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Carpentier (M. H.). Radars, théories modernes. *Dunod* (1963).

[2] Woodward (P. M.). Probability and information theory, with application to radar. *Mc Graw-Hill*, New-York (1953).

[3] Klauder (J. R.), Price (A. C.), Darlington (S.) et Albersheim (W. J.). The theory and design of chirp radars. *Bell Syst. Techn. J.*, U. S. A. (juil. 1960), p. 745.

[4] Meitzler (A. H.). Ultrasonic delay lines using shear modes in strips. *I. R. E. Trans., U. E.*, U. S. A. (juin 1960), p. 35.

[5] May (J. E.), Wire-type dispersive ultrasonic delay lines. *I. R. E. Trans., U. E.*, U. S. A. (juin 1960), p. 44.

[6] Meeker (T. R.). Dispersive ultrasonic delay lines using the first longitudinal mode in strip. *I. R. E. Trans., U. E.*, U. S. A. (juin 1960), p. 53.

[7] Tournois (P.), Analogie optique de la compression d'impulsion. *Ann. de Radioélectr. Fr.*, (oct. 1964) **19**, n° 78, p. 267.

[8] Rayleigh (Lord), *Phil. Mag.*, (1879), n° 8, p. 403.

[9] Maréchal (A.), Françon (M.). Diffraction, structure des images. *Édition de la Revue d'optique théorique et instrumentale* (1960), p. 103.

[10] Lamb (H.). *Proc. Roy. Soc. London*, (1917) **A93**, p. 114.

[11] Scarrott (G. G.), Naylor (R.), Wire-type acoustic delay lines for digital storage. *Proc. I. E. E. E.*, U. S. A., Part B, **103**, (avr. 1956), p. 497.

[12] Meitzler (A. H.), Ultrasonic delay lines for digital data storage. *I. R. E. Trans., U. E.*, (déc. 1962), p. 30.

[13] Fitch (A. H.). Synthesis of dispersive delay characteristics by thickness tapering in ultrasonic strip delay lines. *J. Acoust. Soc. Amer.*, (mai 1963), **35**, n° 5, p. 709.

[14] Mortley (W. S.). Pulse compression by dispersive gratings in crystal quartz. Marconi Review, (1965), **28**, 159.

[15] Rowen (J. H.), *Ultrasonics Symp.*, Paper J6, Santa Monica, Calif., (14-16 oct. 1964).

[16] Duncan (R. S.), Parker (M. R.). The perpendicular diffraction delay line : a new kind of ultrasonic dispersive device. *Proc. I. E. E. E.*, (1965), **53**, p. 413.

[17] Coquin (G. A.), Tsu (R.). Theory and performance of perpendicular diffraction delay lines. *Proc. I. E. E. E.*, (1965), **53**, p. 581.

[18] Tournois (P.), Bocquillon (F.). Expérience de corrélation espace-temps par une antenne acoustique. *C. R. Acad. Sci.*, Fr. (1966), **263**, p. 881.

[19] Tournois (P.). Application des ondes de Love à la compression d'impulsions modulées linéairement en fréquence. *C. R. Acad. Sci.*, Fr., (1964), **259**, p. 2081.

[20] Tolstoy (I.), Usdin (E.). Dispersive properties of stratified elastic and liquid media : a ray theory. *Geophysics*, (1953), **18**, p. 844.

[21] Rayleigh (Lord). On waves propagated along the plane surface of an elastic solid. *Proc. London Math. Soc.*, (1885), **17**, p. 4.

[22] Love (A. E. H.). Some problems of geodynamics. *Cambridge University Press*, London, (1911), (1926).

[23] Tournois (P,). Brevet français n° 960 326 (15 janv. 1964).

[24] Tournois (P.). Brevet français n° 53 860 (17 mars 1966).

[25] Tournois (P.), Jouffroy (H.), Dubois (M.). Mesures sur la dispersion des ondes de Love en vue de leur application à la compression d'impulsion. *C. R. Acad. Sci.*, Fr. (1965), **261**, p. 1611.

[26] Tournois (P.), Vernet (J. L.). Application de la dispersion d'une onde de surface dans les liquides stratifiés à la compression d'impulsions. *C. R. Acad. Sci.*, Fr. (1966), **263**, p. 337.

[27] Tournois (P.), Bertheas (J.), Vernet (J. L.). Sur la dispersion d'une onde de surface dans les gaz stratifiés. *C. R. Acad. Sci.*, Fr. (1965), **261**, p. 2451.

[28] Mirsky (I.), Herrmann (G.). Axially symetric motions of thick cylindrical shells. *J. Appl. Mech.*, (1958), **25**, p. 97.

[29] Tournois (P.), Vernet (J. L.), Bienvenu (G.). Modes de flexion F_{01} et d'extension E_{01} dans les tubes cylindriques circulaires. *C. R. Acad. Sci.*, Fr. (1967), **264**, p. 1094.

[30] Tournois (P.), Vernet (J. L.), Bienvenu (G.). Mesures sur la dispersion des modes F_{01} et E_{01} dans les tubes en vue de l'application du mode F_{01} à la compression d'impulsion. *C. R. Acad. Sci.*, Fr. (1967), **264**, p. 1153.