Quelques aspects des ultrasons

Autor(en): **Mercier, R.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **78 (1952)**

Heft 11

PDF erstellt am: **16.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-58996

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

78e année 31 mai 1952 N° 11

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les quinze jours

Abonnements :
Suisse : 1 an, 24 francs
Etranger : 28 francs
Pour sociétaires :
Suisse : 1 an, 20 francs
Etranger : 25 francs
Pour les abonnements s'adresser à :
Administration du « Bulletin technique de la Suisse romande » Librairie Rouge & Cie S. A., Lausanne
Compte de chèques postaux II. 5775, à Lausanne
Prix du numéro : Fr. 1.40

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Société vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des Anciens élèves de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

Comité de patronage — Président : R. Neeser, ingénieur, à Genève ; Vice-président : G. Epitaux, architecte, à Lausanne ; Secrétaire : J. Calame, ingénieur, à Genève — Membres, Fribourg : MM. P. Joye, professeur ; E. Lateltin, architecte — Vaud : MM. F. Chenaux, ingénieur ; E. d'Okolski, architecte ; A. Paris, ingénieur ; Ch. Thévenaz, architecte — Genève : MM. L. Archinard, ingénieur ; Cl. Grosgurin, architecte ; E. Martin, architecte ; V. Rochat, ingénieur — Neuchâtel : MM. J. Béguin. architecte ; G. Furter, ingénieur ; R. Guye, ingénieur — Valais : MM. J. Dubuis ingénieur ; D. Burgener, architecte.

Rédaction : D. Bonnard, ingénieur. Caste postale Chauderon 475, Lausanne.

Conseil d'administration de la Société anonyme du Bulletin Technique : A. Stucky, ingénieur, président ; M. Bridel ; G. Epitaux, architecte ; R. Neeser, ingénieur.

Tarif des annonces
Le millimètre (larg. 47 mm) 24 cts
Réclames : 60 cts le mm (largeur 95 mm)
Rabais pour annonces répétées
Annonces Suisses S.A.
5 Rue Centrale. Tél. 22 33 26
Lausanne et succursales

SOMMAIRE : *Quelques aspects des ultrasons*, par R. Mercier, professeur à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne. — Divers : *Automotrice CFe 4/4 et wagon de commande BCt 4ü des Chemins de fer fédéraux.* — Société suisse des ingénieurs et des architectes : *Registre suisse des Ingénieurs, des Architectes et des Techniciens ; Communiqué du Secrétariat général de la S. I. A.* — Les Congrès : *16me journée de la Haute fréquence.* — Bibliographie. — Communiqué. — Carnet des concours. — Service de Placement. — Informations diverses.

QUELQUES ASPECTS DES ULTRASONS

par R. MERCIER, professeur à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne

Les ultrasons constituent un mode de transmission d'énergie mécanique dont l'étude, délaissée pendant quelques décades, a trouvé, grâce au développement de l'électronique, un essor remarquable depuis une vingtaine d'années.

L'oreille humaine perçoit les sons dont la fréquence est comprise entre 20 et 15 000 cycles par seconde ou dont tout au moins le spectre des fréquences s'étend tout ou partiellement dans ce domaine. Les infrasons, dont les fréquences sont inférieures, quoique inaudibles, n'en sont pas moins perceptibles au moyen de dispositifs spéciaux sur lesquels nous ne nous arrêtons pas ici et qui permettent de déceler dans tout un bâtiment l'ouverture ou la fermeture d'une porte, par exemple. Les ultrasons, par contre, sont des phénomènes ondulatoires mécaniques pouvant se propager aussi bien dans un solide que dans un fluide et dont les fréquences dépassent les 15 000 c/sec indiqués plus haut ; on peut actuellement produire, déceler et mesurer des U. S. dont la fréquence dépasse 1000 mégacycles par seconde.

L'étude des U. S. ressortit au domaine de l'acoustique et, par conséquent, de la mécanique générale. Si les ultrasons ont des propriétés qui sont celles des ondes sonores audibles, ils en possèdent d'autres qui leur sont propres et qui permettent de les considérer comme un agent énergétique nouveau. Leur étude mérite donc une place spéciale dans la physique classique et nous verrons qu'ils ne manquent pas d'intérêt du point de vue de la physique moderne des quantas.

Comme dans tous les phénomènes acoustiques, on a affaire à une propagation d'ondes élastiques et celles-ci, dans les cas les plus simples, ont un mécanisme qui fait intervenir les notions de compression, dilatation. Considérons, pour fixer les idées, un barreau solide parcouru par une onde mécanique. Les propriétés fondamentales qui déterminent l'évolution de son mouvement sont l'*inertie* de la matière et son *élasticité* (compressibilité, rigidité). Supposons que chaque section droite de ce barreau soit animée d'un mouvement de translation longitudinale et repérons au moyen de l'abscisse x la position de repos de cette section. A chaque instant cette dernière est le siège de forces intérieures caractérisées par une tension normale σ et une vitesse de déplacement v. Cette tension est liée aux déformations locales (dilatation ou raccourcissement) et, comme la vitesse v, est une fonction du temps t et de l'abscisse x. La loi fondamentale de la dynamique (loi de Newton) exprimant que la force totale s'exerçant sur une tranche provoque son accélération, donne, en première approximation, une relation différentielle linéaire entre la tension σ et la vitesse v de déplacement de chaque section :

$$\frac{\delta\sigma}{\delta x} = \rho \frac{\delta v}{\delta t} \qquad (1)$$

où ρ est la densité de la matière à l'état de repos. Si le barreau est formé d'une matière homogène purement élastique, il existe une deuxième relation entre σ et v : c'est celle donnée au XVIIe siècle par Robert Hooke [1] et que nous pouvons écrire sous forme moderne et différentielle

[1] Hooke donna sa découverte sous la forme de l'anagramme ce iii no sss tt vv, celant la loi « Ut tensio sic vis ».

$$\frac{\delta\sigma}{\delta t} = E\,\frac{\delta v}{\delta x}. \tag{2}$$

Elle exprime simplement que l'allongement d'une tranche élémentaire est proportionnelle à la tension ; E est le module d'Young de ce matériau. L'élimination de σ entre (1) et (2) nous amène à une équation de d'Alembert

$$\nabla^2 v = \frac{\rho}{E}\,\frac{\delta^2 v}{\delta t^2} \tag{3}$$

équation jouant un rôle très important dans toute la physique.

Si au lieu de considérer un barreau solide nous avions envisagé un fluide se mouvant dans un tuyau rectiligne, les équations de l'hydrodynamique du fluide parfait nous auraient également conduit, moyennant quelques hypothèses simplificatrices, à la même équation de d'Alembert pour la vitesse de déplacement ; toutefois le coefficient $\frac{E}{\rho}$ du second membre aurait été remplacé par l'expression

$$\left(\frac{dp}{d\rho}\right).$$

Or on sait que l'équation (3) admet comme intégrales une superposition de deux fonctions de la forme

$$v = F(x - ut) + G(x + ut) \tag{4}$$

où

$$u = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

pour le barreau et

$$u = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}$$

pour le fluide. On en déduit que dans les deux cas les lois d'évolution sont les mêmes et s'expriment par la superposition de deux ondes planes indéformables se propageant en sens inverses. En effet, la forme même de l'argument de F montre que le mouvement d'une section x se « transmet » aux autres sections avec un simple décalage dans le temps (fig. 1) ; ce décalage Δt est proportionnel à la distance Δx des sections, car si l'on ajoute Δx à x et $\Delta t = \frac{\Delta x}{u}$ au temps t, on retrouve la même valeur pour la fonction F. C'est ce fait qui fait dire que F

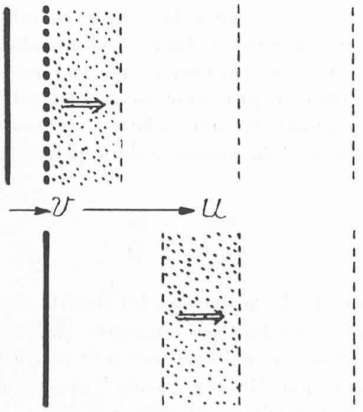

Fig. 1. — Formation d'une onde. La couche comprimée à gauche, se met en mouvement mais est progressivement arrêtée par la couche suivante à laquelle elle transmet pression et vitesse.

représente une onde progressive dont u est la *célérité* ou rapidité de progression [1]. Cette célérité est l'une des grandeurs fondamentales de l'acoustique et de l'ultracoustique ; elle est liée au mécanisme intime de liaison entre les molécules ou les atomes.

Si l'on avait éliminé la vitesse v entre les équations (1) et (2), on aurait obtenu la même équation de d'Alembert pour la tension (ou la surpression dans le cas du fluide). Ce résultat montre que, comme la vitesse, la tension se propage par onde plane indéformable avec la même célérité u. Il est facile de démontrer, en utilisant précisément les expressions (1) ou (2), que dans une onde mécanique progressive (ou rétrograde) la tension σ est strictement proportionnelle à la vitesse de déplacement v ; le quotient de ces deux grandeurs est appelé la résistance d'onde ou *résistivité acoustique* : R :

$$\frac{\sigma(t, x)}{v(t, x)} = R = \rho u \tag{5}$$

(voir le tableau II, donnant quelques valeurs numériques de R pour différents milieux) (fig. 2).

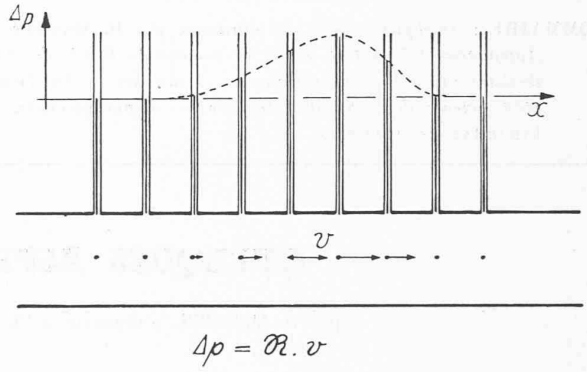

Fig. 2. — Résistance d'onde. Les régions comprimées sont aussi celles qui se déplacent en avant. Le quotient constant de la pression par la vitesse est la résistance d'onde du milieu.

La déformation locale de la matière élastique implique l'existence d'une énergie élastique ou potentielle ; de même l'existence du mouvement avec la vitesse v correspond à une énergie cinétique. Ces énergies sont localisées dans la tranche en cause, aussi l'on peut parler d'une *densité d'énergie*. On établit facilement que lorsque le milieu est traversé par une onde (progressive ou rétrograde) ces deux densités d'énergie sont égales et qu'elles se propagent aussi par onde de même célérité u.

Dans le cas des ultrasons, comme en acoustique habituelle, il suffit de considérer le problème des ondes sinusoïdales dans le temps ; le théorème de Fourier permet alors, en vertu du théorème de superposition lié à la forme linéaire des équations (1) et (2), d'en déduire les propriétés d'une onde de forme quelconque. Or, dans l'onde sinusoïdale, la densité d'énergie totale vaut

$$e = \rho v^2$$

et comme la répartition de la vitesse est sinusoïdale le long de la matière, celle de l'énergie présente une succession de zones contenant de l'énergie, séparées par des régions (équidistantes de la moitié de la longueur d'onde) de densité d'énergie nulle ; ainsi l'énergie se propage par bouffées pério-

[1] Cette célérité ne doit pas être confondue avec la vitesse v du déplacement de la matière. Les hypothèses postulées ici impliquent que $u \gg v$.

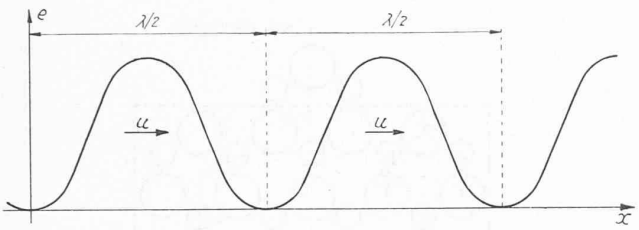

Fig. 3. — Densité d'énergie. Dans une onde sinusoïdale progressive, l'énergie totale progresse par paquets périodiques séparés par des frontières à énergie nulle.

diques, sans liaison entre elles ! (fig. 3). Si l'on considère par contre la valeur moyenne de l'énergie prise sur une longueur d'onde, on voit qu'elle vaut :

$$\bar{e} = 1/2\, \rho V^2$$

où V est l'amplitude de l'onde de vitesse. L'*intensité* I de l'onde, qui est la puissance transmise par l'onde au travers de l'unité de section, est alors

$$I = \frac{u\, dt\, \bar{e}}{dt} = \rho u V^2/2 = 1/2\, RV^2$$

(expression qui rappelle la loi de Joule dans les conducteurs parcourus par un courant électrique alternatif). Remarquons le fait que la propagation peut se faire dans les deux sens, chaque onde transmettant son intensité propre ; d'ailleurs lorsque deux ondes opposées se superposent, il n'en résulte aucune altération pour chacune d'elles. On dit qu'il n'y a *pas d'interaction* entre ces ondes et ce fait est aussi lié à la linéarité des équations de base. Toutefois lorsque la densité d'énergie devient très grande (v voisin de u), les paramètres ρ, E et u sont alors modifiés par la présence même de l'onde, qui prend le nom d'« onde de choc », et le principe de superposition cesse d'être applicable ; les ondes se heurtent alors et se réfléchissent partiellement lors de leur croisement.

L'hypothèse de la matière parfaitement élastique n'est jamais réalisée exactement et tous les matériaux dissipent plus ou moins l'énergie des ondes qui les traversent. Par exemple on observe dans bien des milieux une *viscosité* qui demande un supplément d'effort pour réaliser dans un temps fini une déformation donnée ; de même certains corps présentent le phénomène de *plasticité* qui, par une relaxation des liaisons internes, rend définitive une fraction plus ou moins importante de la déformation imprimée. Mais lorsque ces effets ne sont pas trop marqués, on peut encore établir l'existence possible d'une propagation d'ondes mécaniques. Toutefois ces ondes sont alors affaiblies au cours de leur propagation, on dit que l'onde est *atténuée*. Cette atténuation croît avec la fréquence de l'onde et la célérité de celle-ci présente une dispersion.

Considérons maintenant d'un autre point de vue le problème des U. S. On sait que la matière est formée de particules dénombrables, discernables et localisables jusqu'à un certain point ; la théorie cinétique de la matière est basée sur les notions de molécules et d'atomes. Mais il existe des phénomènes, comme la diffraction des jets électroniques et atomiques, qui ne s'expriment clairement qu'en attribuant à cette même matière des propriétés que la physique classique considère comme apanage des ondes. Ainsi la matière présente deux aspects complémentaires : grains et ondes. Les théoriciens modernes (de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Dirac, etc.) ont réussi à construire une théorie unitaire de la matière où ses deux aspects sont conciliés, ceci évidemment au prix de l'abandon de notions classiques par trop arbitraires. D'autre part, et d'une façon symétrique, si l'on veut concilier les propriétés ondulatoires de la lumière, propriétés établies tout au long du XIXe siècle, avec les phénomènes photoélectriques ou de Compton par exemple, on est amené à admettre pour la lumière une structure granulaire (photons), complémentaire de sa constitution ondulatoire. Or il est naturel d'étendre à l'acoustique cette complémentarité et l'on peut construire une théorie granulaire ou « quantifiée » de l'énergie sonore. Les grains sonores sont appelés « phonons ». En vertu de la loi générale d'Einstein, l'unité naturelle d'énergie sonore de fréquence ν sera

$$e = h\nu$$

et on devra admettre qu'une onde mécanique est formée d'un jet de phonons. Ainsi, un générateur ultrasonique de fréquence 4 mégacycles/sec émet des phonons dont l'énergie est

$$e = 6{,}6\ 10^{-27} 4.10^{6} = 2{,}64\ 10^{-20}\text{erg.}$$

Il en résulte que si ce générateur fournit 1 watt sonore par centimètre carré, il éjecte en fait 4.10^{26} phonons par seconde ; dans l'eau par exemple, il y en aurait environ $2{,}75\ 10^{21}$ par cm³, et dans une des bouffées d'énergie dont il a été question plus haut se trouvent encore $0{,}5\ 10^{20}$ phonons. Vu leur nombre énorme il n'est pas possible de les déceler individuellement, mais si nous admettions l'existence d'U. S. de fréquence égale à

$$4\ 10^{14}\ \text{c/sec}$$

l'énergie des phonons serait alors de 1,65 électronvolt. En admettant un générateur de même intensité (1 watt/cm²), chaque paquet classique ne contiendrait plus que 10^4 phonons et leur individualité jouerait un rôle important. En fait ces U. S. existent dans la nature car cette fréquence correspond à celle des ondes mécaniques d'*agitation thermique* dans les solides cristallins. L'individualité des phonons se manifeste en fait dans le mouvement brownien et d'autre part la théorie moderne de la chaleur spécifique des solides (Debye, Born), basée sur ces hypothèses, rend très bien compte des lois générales établies expérimentalement.

On peut donc raisonner et calculer avec les phonons en acoustique comme on calcule avec les photons en optique. Et c'est dans le domaine des U. S. à hyperfréquences que l'on peut espérer pouvoir contrôler les lois individuelles de ceux-ci.

Toutefois les chiffres nous montrent que dans le domaine actuel des fréquences des U. S. la représentation classique ondulatoire de l'acoustique suffit au calcul des faits observables.

Production des ultrasons

Il semble que le problème de la production des U. S. soit très simple puisqu'il suffit de provoquer la vibration d'une région matérielle élastique pour que sa propagation soit assurée dans ce milieu. Toutefois le problème comporte quelques aspects qui le compliquent et qui expliquent le fait que l'on soit encore aujourd'hui limité à des intensités relativement faibles.

Le procédé le plus direct et le plus simple pour produire des U. S. dans un fluide sera le sifflet. En raccourcissant la colonne vibrante de celui-ci on arrive facilement à des fréquences de 25 000 c/sec (Galton), et en utilisant des jets à vitesse supersonique (Hartmann) on atteint 100 000 c/sec avec une puissance sonore d'une centaine de watts [1]. On a

[1] Un dispositif à sifflet monté sur l'aspiration du moteur a été mis au point aux U.S.A. pour commander de la voiture automobile l'ouverture des portes du garage.

également mis au point des sirènes pouvant émettre jusqu'à 200 watts sur 200 000 c/sec. Mais ces procédés, dont la mise en œuvre compliquée et le faible rendement excluent l'emploi généralisé, sont délaissés et ce sont des procédés électriques utilisant la technique des hautes fréquences qui ont été développés. Les générateurs ultrasoniques, eux-mêmes, sont basés sur trois phénomènes :

la magnétostriction ;
la piézoélectricité des cristaux ;
l'électrostriction.

Les sources ultrasonores appliquant la *magnétostriction* utilisent des barreaux ou des tubes de matière ferromagnétique. On sait que les dimensions d'un ferromagnétique varient avec son aimantation, de sorte que si on le soumet au champ magnétique produit par un courant électrique alternatif de haute fréquence, le barreau ou le tube se met à vibrer. Sa section extrême jouera le rôle d'un piston ou bien servira à mouvoir une membrane. On a pu réaliser ainsi des intensités de 10 watts/cm². La magnétostriction est indiquée pour des fréquences relativement basses (20 000 à 40 000 c/sec), quoiqu'il soit possible d'atteindre 200 kc/sec. L'avantage de ce procédé réside dans la simplicité de la construction et surtout dans le fait qu'il fonctionne avec des courants à basse tension. Outre le fer et le nickel, on utilise des alliages spéciaux, comme le monel (Ni-Cu), l'invar (Ni-Fe), le Ceka (Cr-Ni-Fe-Mn) dont la viscosité est particulièrement faible.

L'*électrostriction* réside dans le fait qu'un diélectrique soumis à l'action d'un champ électrique change de forme (solide) ou de volume (fluide). Cet effet est généralement extrêmement faible et la simple mise en évidence du phénomène est souvent délicate. Toutefois on a découvert au cours des dernières années une série de solides (titanate de barium, etc.) qui, sous forme de poudres ou de matériaux frittés, présentent une polarisation rémanente et une électrostriction intenses. Après avoir polarisé le diélectrique par l'action d'un champ électrique intense, il suffit d'en faire une sorte de condensateur qui, placé dans un circuit à haute fréquence, vibrera intensément en épaisseur. On a là un générateur U. S. de très grande efficacité et qui est en plein développement.

Toutefois les générateurs U. S. les plus utilisés jusqu'ici sont à cristal piézoélectrique. Le quartz, la tourmaline, le sel de Seignette, le phosphate d'ammonium ADP, le phosphate de potassium KDP en sont les représentants les plus courants pour cet usage. Ils sont électrostrictifs, c'est-à-dire qu'ils se déforment sous l'action du champ électrique mais leur particularité réside en ce que le renversement du champ entraîne le renversement de la déformation. Ainsi, à l'encontre des corps ordinaires, leur électrostriction est une fonction impaire et même linéaire du champ et ce comportement est dû à leur structure cristalline spéciale. Par exemple, le quartz (SiO_2) contient dans son réseau des ions de signes opposés, disposés en colonnes hexagonales parallèles à l'axe optique (fig. 4). Lorsqu'on taille dans le cristal une lame normale à la bissectrice de l'hexagone et qu'on la place dans un condensateur-plan chargé, les forces électriques qui sollicitent les ions déforment l'hexagone régulier et modifient l'épaisseur et la largeur de cette lame (fig. 5). Il en résulte qu'un champ électrique à haute fréquence aura pour effet de faire vibrer celle-ci avec la même fréquence ; cette lame est alors capable de transformer une part de l'énergie électrique reçue en énergie mécanique sous forme d'ondes U. S. On peut alors parler d'un « coupage électromécanique » du cristal, d'autant plus que le phénomène inverse existe dans lequel une déformation imposée au réseau par des forces extérieures y produit une polarisation diélectrique, donc crée un champ de

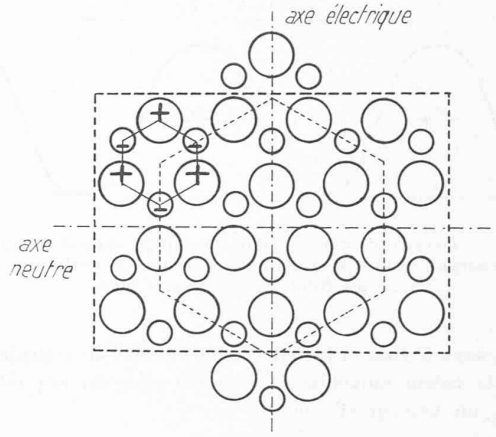

Fig. 4. — Structure du quartz. Le quartz est formé de fibres ou colonnes hexagonales, juxtaposition d'ions de Si++ et de O—. Leur réseau dicte la forme naturelle du cristal prismatique parfois terminé par des pyramides.

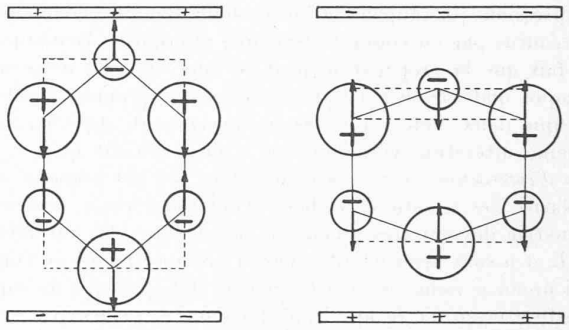

Fig. 5. — Piézoélectricité du quartz. Sous l'influence du champ électrique, les ions sollicités se déplacent ; la fibre est déformée transversalement.

potentiel dans l'espace environnant (fig. 6). Si l'on désigne sous le nom de coefficient de couplage k^2 la fraction de l'énergie fournie sous forme électrique qui est emmagasinée dans le cristal sous forme mécanique, on obtient les valeurs données au tableau I.

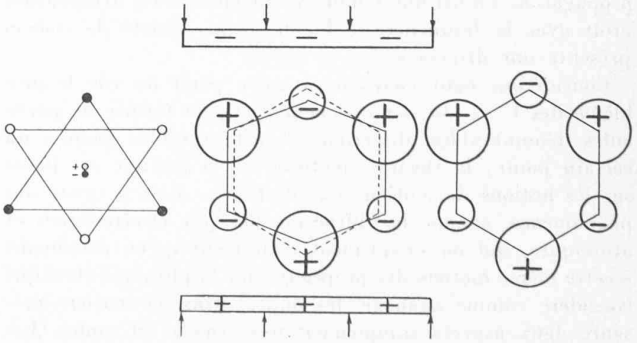

Fig. 6. — Piézoélectricité du quartz. Une pression bien orientée déforme la fibre qui acquiert un moment électrique dipolaire. Des charges électriques sont induites sur les armatures conductrices voisines.

TABLEAU I

	k
Quartz, coupe X	0,095
Quartz, coupe Y	0,142
ADP, coupe Y	0,300
KDP, coupe Y	0,105
Titanate de Ba	0,500

On voit que le quartz n'est pas le cristal le plus efficaec du point de vue de la transformation de l'énergie mais ses qualités élastiques et sa solidité le font encore préférer dans la plupart des applications techniques.

Il semble, de ce qui précède, qu'il soit relativement facile d'obtenir un générateur U. S. qui fournisse des ondes planes, indéfinies et parfaites. Toutefois un certain nombre de difficultés apparaissent en réalité. Tout d'abord le générateur U. S. est limité dans ses dimensions transversales et ensuite le cristal peut aussi ne pas être homogène et présenter des mâcles électriques, de sorte que ses propriétés piézoélectriques varient d'un point à l'autre. Alors les déformations utiles sont toujours accompagnées d'autres déformations (strictions, flexions, torsions), qui réagissent sur le pouvoir rayonnant de la surface efficace ; le champ ultrasonore obtenu n'est alors pas homogène, même dans les environs immédiats du générateur [1]. Citons ici un procédé d'analyse de ce champ élaboré au laboratoire de physique de l'E. P. U. L. par L. Pétermann [2] et basé sur l'extinction de la fluorescence par les U. S. Le procédé consiste à placer une plaque fluorescente dans le champ ultrasonore et de la photographier ensuite par simple contact avec une plaque photographique. De la répartition des zones plus ou moins noircies, on peut tirer des conclusions sur l'émission U. S. du cristal [3] (fig. 7).

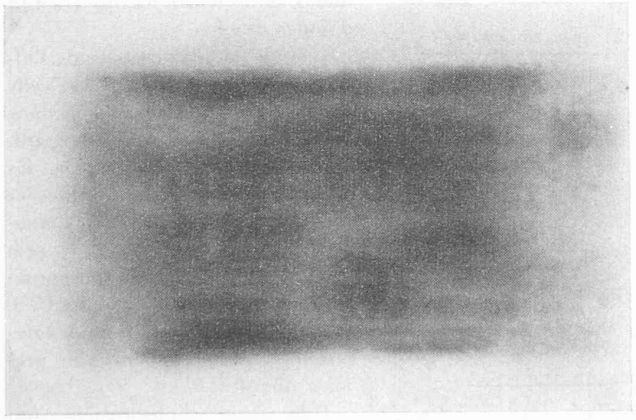

Fig. 7. — Photographie d'un champ ultrasonore. Le champ émis par un cristal n'est pas uniforme. Des irrégularités apparaissent ainsi qu'un quadrillage décelant des vibrations parasites du cristal.

Il résulte de ce qui a été dit sur la piézoélectricité qu'un générateur constitue également un récepteur plus ou moins sensible aux U. S. incidents : ce récepteur « traduit » l'énergie ultrasonore en potentiel électrique à même fréquence, potentiel faible mais qui peut être amplifié par les méthodes courantes de la radiotechnique. D'autres méthodes sont aussi mises en œuvre pour la détection et la mesure des U. S. qui sont déjà connues en acoustique : le tube de Kundt, le disque de Rayleigh, etc. Un procédé intéressant est basé sur l'existence de la *pression de radiation*. Toute surface matérielle placée dans un faisceau d'ondes mécaniques subit une pression qui est proportionnelle à la densité moyenne d'énergie. La théorie de cet effet est actuellement élucidée [1]. Il suffit alors de placer une surface réceptrice dans le faisceau et de mesurer la force qui agit sur elle ; on obtient ainsi un radiomètre ultrasonique. On peut encore mesurer les U. S. par la chaleur qu'ils dégagent dans un milieu absorbant ou par les variations (prévues par la thermodynamique) de température accompagnant les variations de pression dans l'onde. Citons encore les procédés de mesures basés sur la variation de l'indice de réfraction provoquée par les pressions dans l'onde et qui, si le milieu traversé est transparent, peuvent être décelés optiquement.

Toutes ces méthodes montrent que l'intensité U. S. reste relativement faible et ne dépasse que rarement une dizaine de watts par cm². Malgré cette faiblesse, des effets spectaculaires peuvent être observés dans les liquides : à leur surface apparaît souvent une sorte de geyser (fig. 8) qui est dû

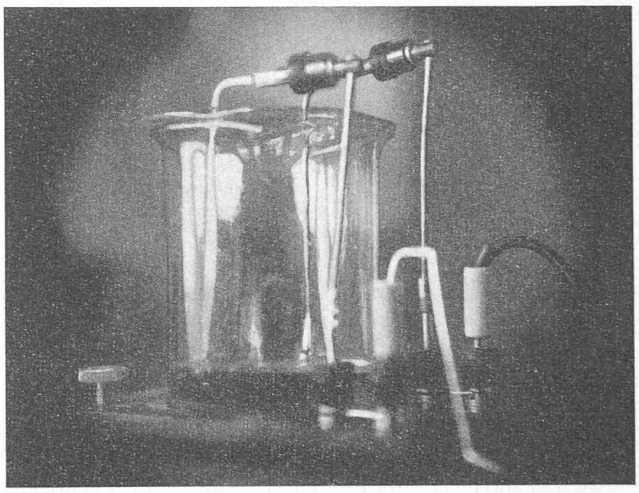

Fig. 8. — A la surface de séparation de 2 milieux, les pressions de radiations ne s'équilibrent pas. Un jet peut alors prendre naissance.

à la discontinuité de la pression de radiation. La hauteur de ce jet peut servir à une estimation de l'intensité du faisceau.

Problème de la transmission

L'une des causes de la valeur de faibles intensités U. S. obtenues jusqu'à présent réside dans les lois mêmes qui régissent la propagation des ondes mécaniques au travers de milieux juxtaposés. Le premier milieu en contact avec le générateur va être mis en vibration avec la même amplitude que ce dernier : les vitesses des particules seront donc égales de part et d'autre de cette surface de contact. De plus, le principe de l'égalité de l'action et de la réaction impose l'égalité des surpressions instantanées dans les deux milieux. Il résulte de ces deux conditions que l'onde incidente sera partiellement réfléchie, sauf si les résistivités acoustiques sont égales. Comme ce n'est généralement pas le cas, on peut établir que l'onde réfléchie aura une intensité qui sera la fraction r de l'onde incidente. r est le coefficient de réflexion (en intensité) et sa valeur, qui ne dépend que des résistivités acoustiques des deux milieux sera :

$$r = \left(\frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1}\right)^2$$

[1] où les effets de diffractions sont encore négligeables.
[2] *L. Pétermann*, Helv. Phys. Acta XXIV 1951, p. 596.
[3] Ces plaques décèlent une sorte de pavage régulier dû à un couplage entre la vibration principale et une vibration transversale.

[1] *Lucas*, Actes du Congrès d'Ultra-acoustique, Rome 1950.

tandis que la fraction transmise, t, vaudra

$$t = \frac{(4R_1R_2)}{(R_2 + R_1)^2}.$$

Remarquons, en passant, que ces deux expressions restent les mêmes lorsqu'on intervertit les deux milieux : la reflexion et la transmission sont donc indépendantes du sens de propagation de l'énergie incidente.

Ces relations sont générales et sont valables à chaque surface de passage placée normalement aux ondes planes.

Le tableau II donne quelques valeurs des résistivités acoustiques et le tableau III les facteurs de réflexion et de transmission à la surface de séparation de quelques couples de milieux.

Tableau II

	Célérité u	*Résistivité* $\rho u = R$
Quartz (coupe X)	5680 m/sec	1,44 10^6
Air	340	43
Acier	5100	4,76 10^6
Huile	1440	0,128 10^6
Eau	1410	0,143 10^6
Plomb	2160	2,94 10^6
Aluminium	6260	1,7 10^6
Tungstène	5460	10,5 10^6

Tableau III

	r	t
Quartz-Air	0,999 88	0,000 12
Quartz-Acier	0,29	0,71
Quartz-Eau	0,68	0,32
Acier-Eau	0,89	0,11

On voit par ces chiffres que l'énergie mécanique emmagasinée dans le quartz générateur a de la peine à être exportée et cet effet est particulièrement frappant lorsque le quartz doit rayonner dans l'air. Il se pose donc un problème fondamental de la technique des U. S. : réaliser les conditions optimum de transmission du générateur au milieu d'utilisation.

On améliorera la puissance émise en profitant d'abord des effets de résonance qui permettront d'augmenter l'amplitude des ondes incidentes en accordant les circuits électriques et la partie mécanique du générateur U. S. Mais il est aussi possible de prévoir des dispositifs spéciaux qui pourraient fonctionner comme « transformateurs d'impédance mécanique » et ce problème présente une analogie formelle fructueuse avec la théorie des lignes électriques et de leurs adaptations aux générateurs alternatifs et utilisateurs. La tension mécanique σ et la vitesse v de vibration mécanique correspondent à la tension électrique V et au courant i. On sait que lorsque la ligne débite sur un courtcircuit des ondes stationnaires apparaissent, dans lesquelles le quotient V/i, c'est-à-dire l'impédance locale, varie d'un point à l'autre de la ligne. Il en est de même pour une ligne (ou un guide d'ondes) ouverte à son extrémité. Des effets plus compliqués encore ont lieu lorsque la ligne de transmission alimente un utilisateur dont l'impédance diffère de l'impédance caractéristique de la ligne. Pour éviter ces effets d'ondes stationnaires et les surtensions qu'elles peuvent entraîner, on doit adapter la ligne à l'utilisateur et pour obtenir le maximum de puissance du générateur, il faut également adapter la ligne à l'impédance de sortie de celui-ci. A cet effet on dispose de circuits à « constante localisée », condensateurs, bobines de réactance, transformateurs, etc. Or, en technique ultrasonore, comme d'ailleurs dans celle des guides à hyperfréquences, on ne dispose pas de ces éléments et il faut les remplacer par des éléments de lignes dont les constantes soient bien choisies. La première solution au problème de l'adaptation donnée sous cette forme pour les U. S. l'a été par le fondateur génial de cette technique, P. Langevin : il intercala entre le quartz vibrant et le milieu de propagation (eau) un système adaptateur constitué d'une lame d'acier. C'est la raison de la construction des générateurs U. S. en « sandwich », le quartz se trouvant enfermé entre deux plaques d'acier solidement collées (la colle doit pouvoir résister aux tractions).

Actuellement cette technique est fortement développée et les générateurs (et récepteurs) ultrasonores à cristal sont plus ou moins bien adaptés au milieu de travail par une succession de plaques 1/4 ou 1/2 ondes soigneusement calculées.

Affaiblissement

Maintenant que le problème du rayonnement des U. S. dans un milieu semble à peu près résolu, parlons des conditions dans lesquelles cette énergie se propage et disparaît.

Si le corps était parfaitement élastique, il restituerait aux particules suivantes la totalité de l'énergie apportée par l'onde mécanique. Mais, en réalité, on observe toujours un *affaiblissement* des ondes le long de leur parcours qui implique une perte progressive de puissance, même lorsqu'on a tenu compte des élargissements de faisceau dus à la diffraction. On observe aussi quelquefois une dispersion de la célérité, c'est-à-dire que celle-ci dépend de la fréquence de l'onde. Cette dispersion implique la déformation graduelle d'une onde non sinusoïdale, mais il ne faut pas confondre cette déformation avec celle que présentent même les ondes sinusoïdales lorsqu'il s'agit d'ondes de choc.

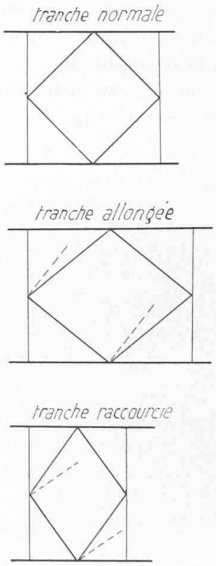

Fig. 9. — Viscosité. Dans une onde de compression il y a glissement des couches obliques. S'il existe une viscosité, l'onde perdra de l'énergie et sera affaiblie.

L'étude la plus poussée de l'affaiblissement des U. S. est celle qui concerne la propagation dans les gaz. Les gaz sont à cet égard, comme en bien d'autres cas, les corps les plus simples à étudier théoriquement et on peut y analyser avec passablement de précision les circonstances accompagnant la propagation d'ondes U. S. Celles-ci sont pourtant plus compliquées qu'il n'apparaît au premier abord.

Une cause d'absorption (qui existe d'ailleurs aussi dans les liquides et les solides) est leur *viscosité* (fig. 9) et son effet a déjà été étudié il y a une centaine d'années dans le cas acoustique par Stokes. L'affaiblissement du faisceau est caractérisé par une décroissance exponentielle de son intensité et l'extinction par viscosité est proportionnelle au carré de la fréquence (tableau IV).

Tableau IV

Trajets d'absorption

Longueur du trajet après lequel la puissance de l'onde plane est réduite à $1/e$ de sa valeur initiale. Le coefficient d'absorption est l'inverse de cette longueur.

Fréquences	10 000 c/sec	100 000 c/sec	1 000 000 c/sec
Milieux :			
Eau	400 km	4 km	40 m
Air	220 m	2,2 m	2,2 cm

Une deuxième cause de dissipation de l'énergie réside dans la conductibilité thermique du fluide, qui permet la diffusion irréversible de chaleur des régions comprimées (et légèrement plus chaudes) de l'onde aux régions dilatées. Lorsque le fluide est formé de plusieurs constituants comme l'air, l'agitation thermique du constituant léger (azote) étant plus vive que celle des constituants lourds, le premier diffuse en avant du front de l'onde, ce qui produit également un affaiblissement de celle-ci. D'autre part, l'énergie d'agitation thermique d'une molécule composée se distribue sur ses divers degrés de liberté ; lors de l'échauffement local dû à la surpression, la vibration ou la rotation de la molécule reste en retard sur son énergie de translation. Il y a donc un retard de transfert de cette énergie et à haute fréquence la chaleur spécifique apparente du fluide paraît plus faible qu'à basse fréquence. Il en résulte une dispersion de la célérité de propagation et une absorption supplémentaire qui est particulièrement marquée dans la zone des fréquences où la célérité varie fortement. D'autres phénomènes de relaxation peuvent encore exister qui provoquent des absorptions dont l'étude est précisément en cours actuellement. Le tableau V donne quelques valeurs du coefficient mesuré d'absorption d'où l'on peut déduire le parcours sur lequel l'intensité est réduite à $1/e$ de sa valeur initiale.

TABLEAU V

	Absorbtion	*Célérité*
Gaz :		
Oxygène 0_2	1,49 10^{-13}	3,16 10^4 cm/sec
Anh. carbonique . . .	1,3 10^{-13}	2,59 10^4
Azote N_2	1,3 10^{-13}	3,34 10^4
Liquides :		
Eau	25 10^{-17}	1,41 10^5
Mercure	6,6 10^{-17}	1,46 10^5
Benzène	800 10^{-17}	1,32 10^5

La mesure de la célérité se fait facilement en observant les internœuds d'ondes stationnaires. Pour les fluides, le dispositif constitue un interféromètre formé d'un émetteur d'ondes planes U. S. (quartz) auquel on oppose un réflecteur solide parallèle à distance variable (fig. 10). Cette distance est mesurable avec grande précision et on observe la réaction du fluide interposé sur le générateur lui-même dont le circuit électrique d'alimentation présente une impédance qui dépend précisément des propriétés du fluide et de son épaisseur. Il suffit en effet de déplacer le réflecteur pour observer une variation du courant d'alimentation. Il est aussi possible de déceler directement l'existence des ondes stationnaires dans le fluide par l'observation de celui-ci au moyen de la technique des stries de Toeppler ou du contraste de phase de Zernike.

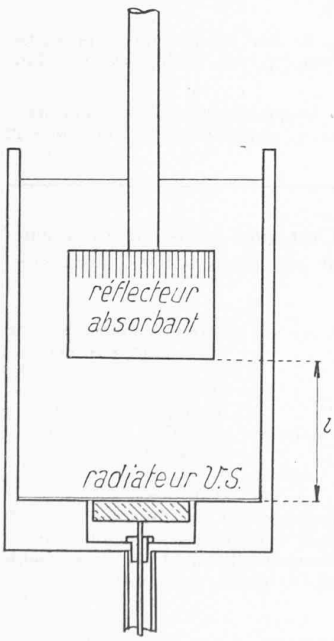

Fig. 10. — Interféromètre ultrasonique. Des ondes stationnaires plus ou moins intenses prennent naissance entre un générateur à cristal et un réflecteur. Il y a résonance chaque fois que le réflecteur s'est déplacé d'une demi-longueur d'onde.

La mesure de l'absorption peut se faire avec des récepteurs étalonnés ou encore par un procédé indirect consistant à utiliser l'impédance électrique du générateur ultrasonore.

Si les mesures abondent concernant les propriétés des fluides, elles sont beaucoup plus rares sur les solides, qui d'ailleurs ne présentent qu'une très faible absorption en général. La théorie prévoit que s'il existe une dispersion de la célérité (et une absorption correspondante), celle-ci ne doit apparaître que pour des fréquences extrêmement élevées, 1000 mégacycles au moins.

Applications

Ce qui précède montre que les U. S. présentent un intérêt à plus d'un point de vue. Leur technique présente en soi déjà un problème qui ne se résout que par une maîtrise de la technique des hautes fréquences. Mais ils constituent également un outil d'investigation et un moyen d'enseignement.

En effet, nous avons vu que leur propagation obéit, dans les cas les plus simples, à l'équation de d'Alembert. Or cette même équation régit la propagation des ondes lumineuses. Par analogie, on doit pouvoir répéter avec les U. S. toutes les expériences d'optique ondulatoire et vérifier, plus facilement qu'avec les ondes lumineuses, les conséquences de cette théorie. En particulier, on pourra constituer des miroirs, des prismes, des lentilles à U. S. qui permettront de concentrer leur énergie et aussi de suivre, en faisant varier par continuité la fréquence, de passer de « l'optique ondulatoire » à l'« optique géométrique ». C'est ainsi qu'il est possible d'étudier la formation du foyer d'une lentille et d'y observer « de visu » l'existence de canaux latéraux (diffraction) ainsi que le déphasage de 1/4 d'onde prévu par Sturm au passage d'une focale. La figure 11 que l'auteur a obtenue avec L. Pétermann montre assez nettement ce glissement de phase.

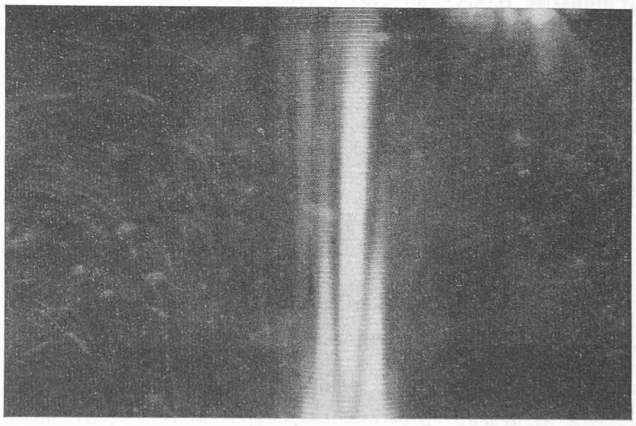

Fig. 11. — Focalisation d'ondes ultrasonores. Le passage au foyer d'un faisceau convergent est accompagné de canaux latéraux et d'un glissement de phase.

Lorsque l'intensité du faisceau U. S. devient assez grande, dans un liquide, la pression négative périodique devient inférieure à la pression de vapeur ou à la pression des gaz dissous. Il en résulte alors des phénomènes de *cavitation*. Ceux-ci sont généralement accompagnés d'un bruissement caractéristique et d'une luminescence au sein du liquide. L'intensité nécessaire à ce phénomène est de l'ordre de 1 watt/cm² sous pression atmosphérique. Des effets secondaires apparaissent,

dégazage du liquide, effets abiotiques sur les cellules vivantes, dissociation de hauts polymères, etc. Ils semblent tous dus à la formation d'ondes de chocs localisées et produites lors de l'écrasement des bulles microscopiques de cavitation. Grabar et Prudhomme [1] ont pu s'en assurer en faisant varier la pression sous laquelle se trouvait le liquide traité ou encore en introduisant artificiellement sous forme dissoute des gaz dans la suspension de macromolécules : le clivage de celles-ci (ovalbumine de poule, polystyrolènes, gélatine, etc.) est supprimé tant que la cavitation gazeuse est inhibée.

Avant de citer quelques applications techniques des U. S., il paraît intéressant de constater que la nature les a utilisées bien avant les hommes. Certains insectes les produisent avec une intensité qui permet, grâce aux récepteurs dont nous disposons, de les déceler à plusieurs centaines de mètres. De même, des crustacés ont été découverts sur les côtes du Pacifique, qui par leur émission ultrasonore fantaisiste troublaient l'écoute sous-marine. Rappelons encore le cas des chauves-souris qui émettent, en une sorte de roulement, des trains d'ondes ultrasonores dont la fréquence s'étend entre 30 000 et 70 000 c/sec, leur servant de radar acoustique. Ces émissions peuvent facilement être décelées en laboratoire et enregistrées à l'oscillographe.

Quant aux applications des U. S. en technique, leur nombre est déjà étendu, que ce soit sous forme de détecteurs d'échos (sondage sous-marin, recherche de fissures dans les gueuses de fonte, localisation des défauts d'épaisseur dans les canalisations, etc.) ou par les actions directes de brassage qu'ils peuvent produire. Cette dernière application a été mise en œuvre dans la production de suspensions très fines (émulsions photographiques, pharmaceutiques, etc.), de verres optiques à grande homogénéité ou dans l'élaboration d'alliages nouveaux ; toutefois les difficultés déjà exposées que l'on rencontre dans la production de grosses puissances ultrasonores ont empêché jusqu'ici cette dernière application au niveau industriel. Quoi qu'il en soit, l'emploi des U. S. dans l'industrie réserve un grand avenir à ceux-ci.

Les biologistes et les médecins n'ont pas négligé cet outil nouveau mais délicat d'application que constituent les U. S. La production d'émulsions difficiles à obtenir par d'autres méthodes a déjà conduit à la préparation de nouvelles médicamentations pour injections intraveineuses. La pénétration par voie cutanée peut être accélérée si l'on soumet la région traitée aux U. S. Enfin on essaie d'utiliser directement les U. S. comme moyen thérapeutique contre le rhumatisme ou l'inflammation du nerf sciatique.

On a pu voir, par ce qui précède, que les ultrasons, objets d'études très nombreuses, intéressent un grand cercle de savants et de réalisateurs. Physiciens, chimistes (mathématiciens même !), biologistes, médecins, industriels peuvent trouver un intérêt à leur développement ; aussi les chercheurs sont-ils nombreux et déjà les congrès internationaux d'ultra-acoustique sont-ils fréquentés par un nombre respectable de participants, chacun apportant une contribution et aidant à éclaircir ce problème qui, comme tous ceux que pose la nature à l'esprit, peut être passionnant.

[1] *P. Grabar*, Colloque international sur les ultrasons, Bruxelles 1951. — *R. Prudhomme*, ibid.

Littérature

Théorie des ultrasons : Biquard, P. *Les ondes ultrasonores.* Revue d'acoustique, vol. 1 (1932), p. 93 et 315 ; vol. 2 (1933), p. 228 ; vol. 3 (1934), p. 104. — Mason W. *Electromechanical Transducers and Wave-Filters.* New-York, 1942.

Construction des émetteurs : Hartmann J. *A new Method for Generation of Sound Waves.* Phys. Rev. (2), Vol. 20 (1932), p. 719. — Edelmann M. Th. *Studien über die Erzeugung sehr hoher Töne vermittels der Galtonpfeife.* Ann. Phys., Lpz. (4), Vol. 2 (1900), p. 469. — *Atlaswerke*, Bremen. D. R. P. 436815 (1941) : « Emetteur magnétostrictif. » — Bundy F. P. *Design of laminated magnetostrictive longitudinal oscillators.* J. Acoust. Soc. Am., Vol. 20 (1948), p. 297. — Born H. *Physikalische Grundlagen der Ultraschalltherapie.* Mitteilungen der Firma Ultrakust Gerätebau, Vol. 1 (1947), p. 1.

Adaptation : Ernst P. G. *Ultrasonic Lenses and Transmission Plates.* J. Sci. Instr., Vol. 22 (1945), p. 238.

Absorption : Biquard P. *Sur l'absorption des ultrasons.* Ann. Phys., Paris (11), vol. 6 (1936), p. 195.

Interféromètre : Hubbard J. C. *A sonic Interferometer.* J. Opt. Soc. Am., Vol. 17 (1928), p. 295.

Etude des matériaux : Kruse F. *Zur Werkstoffprüfung mittels Ultraschall.* Akust. Z., Vol. 4 (1939)., p. 153, et *Dissertation*, Hannover, 1938.

Applications : Marinesco N. *Propriété chimico-physiques, physiques et biophysiques des ultrasons.* — *Actualités sci. et ind.*, vol. 522 et 533. Paris, Hermann, 1937.

DIVERS

Automotrice CFe 4/4 et wagon de commande BCt 4ü des Chemins de fer fédéraux

Quelques données techniques [1]

Sur un réseau entièrement électrifié, la rame automotrice devient en général avantageuse lorsqu'il faut moins de deux cents places assises dans un convoi et que les tâches accessoires (amenée et enlèvement de wagons dans les gares, par exemple) ne sont pas trop nombreuses. C'est notamment le cas sur les *lignes secondaires*, ce qui explique que l'automotrice ait été, jusqu'ici, beaucoup plus utilisée sur les chemins de fer privés que sur les Chemins de fer fédéraux. Ces derniers, ayant électrifié plusieurs lignes secondaires pendant et après la guerre, éprouvent maintenant le besoin d'avoir un plus grand nombre de ces véhicules moteurs et surtout d'automotrices électriques modernes. C'est ainsi qu'ils ont été amenés à faire construire une nouvelle *automotrice* $CFe^4/_4$, dont voici les caractéristiques :

Longueur hors tampons	22,7 m (comme les voitures légères en acier)
Places assises de 3e classe	44
Superficie du local à bagages	19 m²
Poids à vide	55 tonnes
Puissance unihoraire des quatre moteurs	1600 CV
Vitesse maximum	100 km/h
Charge remorquée maximum sur les rampes de plus de 12 ‰	250 tonnes

Frein à air Oerlikon et frein électrique sur résistances.

Dispositif de commande à distance (d'un wagon de commande) et de commande multiple permettant de conduire d'une seule cabine des trains ayant jusqu'à quatre automotrices ou des rames automotrices.

L'aménagement et la disposition intérieurs de l'automotrice sont adaptés aux besoins de l'exploitation d'une *ligne secondaire*. L'équipement électrique permet cependant l'emploi d'un véhicule du même type, simplement aménagé et disposé autrement à l'intérieur, pour le trafic de banlieue.

Il est probable que l'automotrice aura rarement assez de places et qu'il faudra lui ajouter des voitures. Pour éviter

[1] Texte communiqué par la Division de la Traction et des Ateliers de la *Direction générale des Chemins de fer fédéraux*, lors d'une excursion de démonstration de ces véhicules organisée le 17 mai 1952. (Réd.).