Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Band: 64 (1948-1950)

Heft: 272

Artikel: Contribution à l'étude des ultrasons : absorption par les solides

Autor: Mercier, Robert

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-273965

Contribution à l'étude des ultrasons
Absorption par les solides

PAR

Robert MERCIER

(Séance du 30 juin 1948).

1. *Notions générales.*

Il peut sembler, à première vue, que l'étude de la propagation des ondes mécaniques dans les milieux isotropes soit actuellement sans intérêt parce qu'achevée depuis longtemps, lorsqu'on a établi les bases de l'acoustique. Or, à regarder de plus près, les choses ne sont pas aussi claires qu'elles ne paraissent et si certains aspects de ce problème sont classiques et même « scolaires », il se pose encore une foule de questions qui relèvent de la théorie de la matière et de sa constitution. De plus, le renouveau d'intérêt qu'a présenté l'acoustique lors de la mise au point des procédés de l'électroacoustique a été accompagné d'un développement extrêmement rapide des moyens d'investigation dans cette discipline; cet enrichissement de la technique d'expérimentation a permis aussi une investigation très poussée dans le domaine des fréquences ultrasonores et de nouveaux effets des ondes élastiques ont été découverts et mis en valeur dans de nombreuses directions. La chimie, la physico-chimie et la biologie en ont profité.

Nous avons entrepris une série de recherches concernant les ultrasons en vue de résoudre divers problèmes; les uns sont purement techniques, d'autres nettement physiques. Le premier que nous exposons concerne le *mécanisme* de la propagation des ondes mécaniques dans les milieux absorbants.

Rappelons quelques notions générales.

Lorsqu'une onde mécanique se propage dans la matière, il y a en chaque point et simultanément déplacement de la matière et contrainte de celle-ci; dans le cas le plus simple cette dernière est une compression ou une traction. On peut dire qu'il y a propagation de deux ondes complémentaires de vitesse v et de pression p, l'une étant considérée comme la cause de l'autre.

Dans un fluide parfait, ces deux ondes sont proportionnelles et le rapport

$$R = p/v$$

est appelé la *résistivité acoustique* ou *résistance d'onde*. Comme la célérité de propagation, c'est une constante caractéristique de la matière. Cette notion peut se généraliser et s'étendre également aux fluides visqueux et même aux solides isotropes.

La propagation des ondes planes sinusoïdales dans la matière est caractérisée par une *absorption* de celles-ci : l'amplitude décroît au cours de l'avance de l'onde, en général selon une loi exponentielle. On dit qu'il y a extinction, et cela correspond à une dissipation d'énergie qui se transforme en chaleur. Un problème important consiste à rechercher les causes et le mécanisme exact de cette dissipation, afin d'en pouvoir prévoir l'importance et les lois. Cette recherche a déjà été poussée assez loin pour la propagation dans les fluides, gaz et liquides, tandis que l'absorption par les solides est beaucoup moins connue.

Les différents paramètres qui régissent la propagation des ondes acoustiques dans les divers milieux matériels dépendent de la fréquence de celles-ci. Or, les ultrasons, avec leurs fréquences qui s'étagent entre 20 000 et 5 000 000 per/sec permettent l'étude de cette dépendance sur un large domaine; il est de plus facile de produire des ondes planes harmoniques et intenses dans ce domaine. Enfin certaines propriétés moléculaires deviennent particulièrement sensibles aux ondes mécaniques si leurs fréquences sont élevées, d'où l'intérêt accru des fréquences élevées et inaudibles.

2. *Analyse de l'absorption par les solides.*

Nous avons dit que dans les milieux isotropes, la propagation d'une onde harmonique ultrasonore de fréquence ν est accompagnée d'une extinction régulière. L'intensité I de l'onde décroît avec le chemin x selon une loi assez exactement exponentielle

$$I(x) = I_0 e^{-\frac{x}{L}} ;$$

L est une longueur appelée « longueur d'extinction ». Il revient au même de dire que la surpression se propage selon la loi

$$p(x,t) = p_0 e^{-\frac{x}{2L}} e^{i(\omega t - kx)}$$

où p_0 est l'amplitude de la pression oscillante à l'origine des axes, ω la pulsation, soit $2\pi\nu$ et k le nombre d'onde, c'est-à-dire $2\pi/\lambda$. 2L est la longueur sur laquelle l'amplitude de la pression a décru à 1/e de sa valeur initiale. L'inverse de cette longueur

$$\alpha = \frac{1}{2L}$$

est le cœfficient d'absorption de l'onde.

L'onde de vitesse adjointe à l'onde de pression suit une loi analogue avec le même amortissement mais, en plus, un déphasage

$$v\,(x,t) = v_0\, e^{-\frac{x}{2L}}\, e^{i(\omega t - kx + \varphi)}$$

Il en résulte que le quotient p/v devient complexe; on lui donne, par extension de la terminologie électrotechnique, le nom d'*impédance d'onde* et on le désigne par Z

$$Z = p/v = \frac{p_0}{v_0}\, e^{-i\varphi}$$

Un premier problème consiste à trouver la relation formelle pouvant exister entre la phase φ de cette impédance et le cœfficient d'absorption α. On remarque en effet que si le milieu est purement élastique toute onde mécanique est régie par une équation de d'Alembert du type

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{k^2}{\omega^2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = 0$$

où A peut représenter soit la pression, soit la vitesse. Cette équation admet comme intégrale l'onde vibratoire plane avec amortissement nul. Simultanément dans ce milieu l'impédance d'onde Z devient réelle. Ainsi φ et α s'annulent simultanément, ce qui implique une dépendance entre ces valeurs. On peut dire aussi que les propriétés dissipatives du milieu (viscosité, relaxation, plasticité, conduction thermique, etc,) sont responsables du déphasage φ et de l'absorption des ondes mécaniques, sonores et ultrasonores. Toutefois la dépendance cherchée entre ces deux grandeurs n'est pas indépendante du mécanisme de cette dissipation et la façon dont elles varient avec la fréquence de l'onde est aussi liée à ce mécanisme. Il en résulte que l'observation de cette loi de dispersion sera une source de renseignements sur les propriétés non-élastiques du milieu de propagation. Le but de cette première étude est de mettre en évidence ces diverses dépendances, tout au moins en première approximation.

Si l'on considère en premier lieu le cas simple d'un solide déformable élastique soumis à des efforts normaux parallèles à un axe (traction simple), il apparaît simultanément des déformations linéaires (allongement et contraction latérale) et des déformations angulaires. Mais aussi les sections obliques sont sollicitées par des efforts tangentiels. La loi de Hooke, c'est-à-dire une relation linéaire entre les efforts normaux et les allongements entraîne également une relation linéaire entre les déformations angulaires et les efforts tangentiels.

Par contre, dans un fluide visqueux, on peut, en première approximation admettre une proportionnalité entre les vitesses de déformation angulaire et ces mêmes efforts tangentiels. Il résulte de ces deux faits que dans un solide élastique et visqueux, il devra exister une dépendance de la forme

$$\tau = G\theta + \eta\dot{\theta} \qquad 1)$$

G est le module de glissement et η le cœfficient de viscosité.

Le corps plastique, lui, est caractérisé par le phénomène de *relaxation* au cours duquel, après avoir résisté élastiquement à une déformation, la matière se relâche et garde finalement, en l'absence d'effort, la déformation qui lui avait été imposée au début. La théorie de Maxwell revient à admettre une relation du type

$$G\dot{\theta} = \dot{\tau} + f\tau \qquad 2)$$

où f représente la facilité avec laquelle la matière perd graduellement ses propriétés élastiques.

On peut grouper ces divers comportements et considérer un solide déformable, simultanément élastique, visqueux et plastique dans lequel déformation et contrainte seraient liées par [1]

$$\dot{\tau} + f\tau = G\dot{\theta} + \eta\ddot{\theta} \qquad 3)$$

Si maintenant toutes les déformations et contraintes sont des fonctions sinusoïdales du temps, on pourra, *formellement*, exprimer les propriétés visqueuses et relaxatives du milieu au moyen d'un module de glissement complexe. En adjoignant encore à ces diverses quantités spécifiques du milieu le « nombre de Poisson » *m* qui exprime le quotient de la contraction latérale par l'allongement spécifique longitudinal, il va être possible,

[1] F. POPERT : Mechanische Eigenschaften quasi-elastischer isotroper Körper. Thèse, Zürich 1945, EPF.

dans le cas où des ondes planes longitudinales mécaniques sont transmises par le milieu, de lui attribuer un *module d'Young complexe*. Il en résultera alors corrélativement le cœfficient d'absorption et d'impédance d'onde complexe Z.

Ainsi, la propagation d'une onde harmonique plane mécanique longitudinale est influencée par la viscosité du milieu ainsi que par ses propriétés de relaxation. Et on peut espérer que l'étude expérimentale de la dispersion des paramètres de propagation (célérité et cœfficient d'extinction) fournira indirectement les valeurs des cœfficients de viscosité et de plasticité. C'est bien ce que l'expérience semble confirmer. Le détail des calculs et quelques résultats de mesure feront l'objet d'une note ultérieure.

Le 30 juin 1948.