

# Propriétés physiques et applications médicales des ultrasons

P. QUANDIEU, L. PELLIEUX et P. BORREDON (\*)

(Manuscrit reçu le 3 décembre 1976)

## RÉSUMÉ

La première partie de cet exposé étudie les caractéristiques physiques des ultrasons : obtention, propagation, absorption, réflexion, et leurs propriétés : pression de radiation, cavitation, chaleur. Les techniques d'utilisations médicales sont ensuite exposées selon leur application diagnostique et thérapeutique, et selon leur mode de représentation en modulation d'amplitude et en modulation de brillance. La deuxième partie traite de la nocivité ou de l'innocuité des ultrasons en pratique industrielle et médicale.

## ABSTRACT

In the first part, some physical characteristics of ultrasonic vibration : production, propagation, absorption, reflexion, and properties such as radiation pressure, cavitation and heat production are considered. The procedures applied in the field of medicine are then examined according to the diagnostic uses and therapeutic applications of ultrasonic vibration ; their modes of representation by amplitude modulation or brilliance modulation are described. In the second part, the noxiousness or innocuity of ultrasonic vibrations are considered both in industrial applications and in medical practice.

## INTRODUCTION

Les ultrasons ne provoquent pas d'effets biologiques comme une hormone, une variation du taux d'électrolyse, l'inhalation d'un gaz, etc. C'est pourquoi, sous le vocable « d'effets », il faut, en fait, comprendre les *conséquences* des propriétés physiques et éventuellement physicochimiques des vibrations mécaniques dont les fréquences se situent très au-delà de la bande audible.

---

(\*) Centre de Recherches de Médecine aéronautique, Division de Physiologie acoustique et Biomécanique, 5 bis, Avenue de la Porte de Sèvres, 75731 Paris Cedex 15.

L'accroissement rapide du nombre d'appareils émetteurs d'ondes ultrasonores suffit à prouver l'intérêt du monde industriel et médical pour ces nouvelles techniques.

Le but de cet exposé est de faire apparaître la pluralité des problèmes posés par l'emploi des ultrasons. C'est pourquoi, dans une première partie, nous convions le lecteur à suivre un rappel succinct concernant la physique des vibrations mécaniques. Nous décrivons ensuite brièvement les techniques médicales d'emploi des ultra-sons. Enfin, nous montrons l'innocuité de ces ondes telles qu'elles sont employées dans l'industrie et ce qu'il faut, peut-être, en penser dans certaines utilisations médicales.

## A. CARACTÈRES PHYSIQUES DES ULTRASONS

### 1. DÉFINITIONS

Sous le terme d'oscillation mécanique, on définit le mouvement d'un système matériel autour d'une position moyenne [31].

L'oscillation (ou vibration) acoustique détermine le mouvement de la particule <sup>(1)</sup> d'un milieu élastique autour d'une position moyenne [31]. Le milieu élastique mis en mouvement peut être un gaz, un liquide ou un solide.

Lorsqu'il s'agit de l'espace aérien, une oscillation acoustique engendre un son quand sa fréquence se situe dans une gamme de 20 Hz à 20 kHz. En dessous, on parle d'infrasoun, au-dessus, il s'agit d'ultrason. Ces mots ont reçu une définition physiologique : le son étant une vibration acoustique capable d'éveiller une sensation auditive, l'ultrason étant une vibration acoustique de fréquence trop élevée pour éveiller une sensation auditive chez l'homme [33].

### 2. GÉNÉRATEURS A ULTRASONS

Les vibrations acoustiques sont engendrées par des sources diverses. La plus ancienne est un sifflet à cavité résonnante mis au point par GALTON en 1883. Actuellement, il existe deux grands procédés pour créer des oscillations mécaniques de très haute fréquence :

— le premier utilise les propriétés de piézo-électricité d'un monocristal de quartz ou de certaines céramiques;

— le second procédé exploite la magnétostriction (découverte par JOULES), due à la dilatation ou à la contraction d'un corps sous l'action d'un champ magnétique.

Ces deux types de générateurs (piezo-électrique et magnétostrictif) transforment de l'énergie électrique en vibrations mécaniques. Ils sont réversibles et peuvent délivrer de l'énergie électrique à partir d'oscillations méca-

(<sup>1</sup>) La particule est une portion du milieu, comprise dans un volume dont les dimensions sont assez petites pour que sa déformation puisse être considérée comme homogène.

niques qui leur sont appliquées. Dans cette seconde configuration, ils sont alors utilisés en détecteurs. Quoi qu'il en soit, l'application d'une excitation électrique détermine, dans le transducteur, des oscillations mécaniques lesquelles, après amplification, engendrent des vibrations acoustiques dans le milieu élastique environnant la source ultrasonore. Ces ondes que nous considérerons comme monofréquentielles, sont parfaitement définies par l'amplitude maximale et la période de la fonction sinusoidale représentative du mouvement.

A l'origine (caractéristique de la source), l'amplitude  $A$  de ce mouvement est uniquement fonction du temps

$$A = A_{\max} \sin(\omega t). \quad (1)$$

Chaque particule du milieu mise ainsi en mouvement acquiert une certaine énergie qu'elle transmet à la molécule voisine, créant une onde propagée.

### 3. PROPAGATION

L'étude théorique de la propagation d'un ébranlement ou d'un mouvement vibratoire est particulièrement simple si l'on suppose que le milieu matériel dans lequel il se propage est indéfini, homogène et isotrope. Lorsque le déplacement d'une particule se fait dans la direction de la propagation de l'onde, on dit que les mouvements sont longitudinaux; s'il lui est perpendiculaire, les mouvements sont transversaux.

Dans un fluide parfait, il n'y a aucune force pouvant s'opposer au glissement des différentes couches les unes sur les autres, il n'existe de ce fait que des mouvements longitudinaux. Ceci explique, en partie, une des caractéristiques très importante des vibrations ultrasonores, à savoir leur grande directivité dans les gaz et les liquides. Par contre, les solides qui résistent à des contraintes tangentielles possèdent, de ce fait, une élasticité transversale. La propagation des ultrasons en milieu solide se fait alors selon les deux directions. Dans les fluides réels, il existe des forces de viscosité qui s'opposent au glissement des couches les unes sur les autres. Mais ces forces produisent une dissipation d'énergie et les ondes transversales de viscosité sont rapidement amorties.

Alors que la vitesse du déplacement de l'onde (célérité  $v$ ) est fonction du milieu, la vitesse des particules dépend de la source, de leur éloignement par rapport à cette dernière et du temps. Ainsi, si l'on se place dans l'hypothèse simplificatrice d'une onde plane, le déplacement  $u$ , à l'instant  $t$ , d'une particule située à une distance  $x$  de la source,  $u(x, t)$  est représenté par l'équation aux dérivées partielles

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (2)$$

dont l'intégrale générale est

$$u = f\left(t - \frac{x}{v}\right) + g\left(t + \frac{x}{v}\right). \quad (3)$$

Les fonctions  $f$  et  $g$  sont déterminées par les conditions aux limites.

Cette équation aux dérivées partielles est l'équation de propagation des ondes planes. Toute fonction  $u(x, t)$  qui lui satisfait correspond à un état de mouvement possible du fluide. Elle donne, en fonction du temps  $t$ , la valeur du déplacement  $u$  de la particule d'abscisse  $x$ , et ses dérivées partielles donnent la vitesse de cette particule et la dilatation au point où elle se trouve <sup>(2)</sup>. C'est pourquoi un élément de volume d'un fluide à travers lequel se propage une onde vibratoire possède, du fait de la pression, une énergie potentielle, et du fait de la vitesse, une énergie cinétique. (On démontre que, en matière de vibrations mécaniques, l'énergie potentielle est égale à l'énergie cinétique et que cette énergie totale se propage avec la vitesse  $v$ ).

#### 4. ABSORPTION

Dans le cas d'une onde sphérique délivrée par une source ponctuelle, l'intensité  $I$  de cette énergie transmise par seconde et par unité de surface du front d'onde varie en raison inverse du carré de la distance à la source. Elle est absorbée par le milieu. L'équation qui permet de définir le coefficient  $\alpha$  d'absorption (ou d'atténuation) par centimètre selon un axe, s'écrit :

$$I = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (4)$$

$I$  s'exprimant, en général, en watts par centimètre carré.

L'intensité est une fonction exponentielle décroissante de l'espace.

Dans les liquides purs, l'absorption des ultrasons a une origine essentiellement moléculaire. Elle résulte de la relaxation d'équilibre entre les différents états énergétiques possibles des molécules de liquide, ces équilibres étant perturbés par le passage de l'onde. Ce mécanisme porte le nom de processus de relaxation.

Dans les fluides, et dans l'air en particulier, outre cette absorption moléculaire, on distingue l'absorption classique. Les frottements intérieurs (qui correspondent à la viscosité) sont également responsables de l'absorption d'énergie, transformée en chaleur. Les échanges calorifiques qui se font par conductibilité et par rayonnement entre les tranches réchauffées par la compression et les tranches refroidies par la détente, correspondent à une dissipation de l'énergie utilisable. Les forces de viscosité sont d'autant plus grandes que le gradient de vitesse est élevé. Les échanges de chaleur sont d'autant plus importants que le gradient de température est grand.

<sup>(2)</sup> Un élément fluide, qui occupe dans la position d'équilibre un certain volume, occupe à l'instant  $t$  un volume différent. C'est à cette variation de volume que correspond la variation de pression.

Enfin, pour une amplitude donnée, ces gradients sont d'autant plus grands que la fréquence est élevée.

L'absorption par viscosité et par conductibilité est proportionnelle au carré de la fréquence. On explique, ainsi, que dans l'audition d'un orchestre à distance, l'auditeur ne perçoit plus que les sons graves [7].

En milieu aérien, où l'absorption d'énergie est proportionnelle au carré de la fréquence, où, de plus, la densité d'énergie surfacique varie comme l'inverse du carré de la distance à la source (source ponctuelle), on comprend aisément que les ultrasons soient très amortis. Dans l'eau, par contre, les variations thermiques sont négligeables, la longueur d'onde pour une même fréquence est plus grande que dans l'air, en raison de la plus grande valeur de la vitesse et d'une faible viscosité cinématique. Les ondes ultrasonores, peu amorties, se propagent à grande distance. Peu employés par l'aviateur, les ultrasons le sont beaucoup par les marins.

## 5. LOI D'OHM, RÉFLEXION DES ULTRASONS

Les oscillations des particules du milieu, pendant la propagation d'une onde, forment, nous l'avons vu, des régions de compression et de dépression. La pression acoustique alternative  $p$ , en un point donné, est reliée à la vitesse de la particule dans le milieu par l'équation

$$p = \rho v \cdot \frac{du}{dt} \quad (5)$$

Le rapport de la pression à la vitesse de la particule en un point donné est alors égal au produit de la densité du milieu par la vitesse de l'onde; c'est une quantité constante pour un milieu. On appelle souvent cette équation *loi d'Ohm*, et le rapport de la pression à la vitesse de la particule est appelé *impédance acoustique*  $Z$ . Elle caractérise le milieu où se propagent les ondes mécaniques. A la frontière entre deux milieux différents, une onde est partiellement transmise et partiellement réfléchiée. Si la longueur d'onde de la vibration est petite vis-à-vis des dimensions du matériau réfléchissant, les lois géométriques de la réflexion des sons sont les mêmes que celles de l'optique. La perte d'énergie  $dI$  à l'interphase, due à la réflexion, est alors donnée par la relation

$$\frac{dI}{I} = 1 - \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (6)$$

dans laquelle  $Z_1$  et  $Z_2$  sont les impédances acoustiques des milieux 1 et 2. Si les impédances sont égales, la perte d'énergie due à la réflexion est nulle. Par contre, quand les impédances sont très différentes, le carré de la somme augmentant plus vite que le double du terme central (deux fois  $2 Z_1 Z_2$ ), la perte d'énergie augmente, et il se produit une réflexion d'autant plus importante que la différence des impédances acoustiques est importante.

Si une onde arrive sur l'interphase avec une incidence différente de la normale, l'onde transmise est réfractée. En raison des lois de propagation, lorsque la source se trouve dans un milieu solide, une onde incidente longitudinale sera réfléchiée et réfractée à la frontière pour donner, dans chacun des milieux, une onde longitudinale et une onde transversale. Cette propriété de réfraction est intéressante car, par un choix convenable de matériaux et de formes, on construit des lentilles acoustiques capables de focaliser un faisceau ultrasonore en un point choisi.

## 6. LES MICRO COURANTS ACOUSTIQUES

Cette caractéristique physique est la moins bien connue de celles consacrées à la propagation des ultrasons. Elle résulte de l'existence de la pression de radiation ultrasonore (composante continue de la pression exercée par l'onde propagée). PLANIOL [35] la définit comme la valeur moyenne de la surpression qui s'exerce sur une tranche déterminée du milieu où se propagent les ultrasons. Elle s'exerce toujours dans la même direction. Elle est unidirectionnelle, à la différence de la pression acoustique avec laquelle elle ne doit pas être confondue. La pression de radiation se manifeste par une force sur un obstacle rigide, mobile et réfléchissant. Expérimentalement, quand une source ultrasonore est placée dans l'eau, de telle manière que la direction du flux se fasse perpendiculairement à l'interphase eau-air, on voit apparaître, au-dessus du plan d'eau, un petit geyser dont on peut mesurer la force.

La variation de la pression de radiation dans le milieu irradié donne naissance à des courants acoustiques continus. On définit l'existence d'une couche limite acoustique qui, aux fréquences supérieures à un megahertz, a une épaisseur inférieure au micromètre. ZANA [44] rapporte que le gradient continu de vitesse associé aux microcourants acoustiques régnant dans cette couche limite, peut atteindre, pour un flux ultrasonore comparable à ceux débités par les appareils utilisés en médecine, une valeur suffisamment élevée pour causer la fragmentation de nucléoles ou la dégradation d'acides nucléiques.

## 7. LA CAVITATION

Ce terme rend compte de la formation, dans les liquides, de cavités produites par les ondes ultrasonores.

L'industrie, en utilisant des ultrasons de haute intensité, recherche délibérément le phénomène (nettoyage, dispersion, etc.). Les hydrauliciens, par contre, sont toujours à la recherche d'une solution permettant d'éviter l'apparition des cavités; les hélices de navires sont souvent détériorées par la cavitation (la rotation rapide des pales conduit à la formation de bulles qui donnent lieu, lors de leur disparition, à une érosion intense du métal).

Bien que ce phénomène soit fort complexe [16], on peut expliquer son origine liée aux ultrasons de la manière suivante [6] : lors de l'oscillation des éléments de matière, la pression, dans la région de dépression, est néga-

tive. Dans un milieu liquide, il peut se créer des cavités (à condition, bien sûr, que la valeur de la pression soit incompatible avec les forces de cohésion du liquide). De ce fait, il est possible de parler de trois types différents de cavités dans un liquide :

- cavité vide (si le milieu a été dégazé);
- bulles gazeuses;
- bulles contenant la vapeur du liquide.

Il est prouvé expérimentalement que, juste avant leur disparition, la pression interne de ces bulles peut atteindre plusieurs atmosphères, voire plusieurs milliers d'atmosphères. Dès lors, le milieu devient le siège de chocs très intenses responsables de la plupart des effets liés à la cavitation.

La durée de vie des cavités est courte, et uniquement déterminée par la fréquence de l'onde ultrasonore (puisque la dépression devient nulle dans un temps égal au quart de la période, soit  $1/4 \mu\text{s}$  à 1 MHz).

Interviennent aussi sur la formation des bulles, la viscosité du liquide et, probablement, la présence de certaines inhomogénéités fortement localisées dans un liquide pur, permettant la naissance des cavités au niveau de centres, dits centres de nucléation.

#### *Les effets thermiques*

Conséquence directe des lois de la thermodynamique, ils sont dus à la transformation calorifique d'une énergie acoustique. Il est presque intuitif que dans un volume du milieu où se propagent des ondes ultrasonores, l'élévation de chaleur est d'autant plus importante :

- que l'énergie de la source est élevée;
- que le faisceau est bien focalisé;
- que l'absorption du milieu de propagation est intense;
- que la conductibilité thermique de ce milieu est faible.

#### *Amorçage des réactions chimiques*

En technique industrielle d'utilisation des ondes acoustiques de haute fréquence et de forte intensité, les données expérimentales semblent montrer que les variations chimiques sont dues à la présence de cavitations dans le liquide. C'est ainsi qu'en présence d'une intensité et d'une fréquence non favorable à la formation de bulles, on n'observe aucune de ces réactions. Pour certains auteurs, la cavitation agirait par l'intermédiaire de l'augmentation locale soit de la pression, soit de la température. Pour d'autres, il convient de mettre en cause les décharges électriques résultant des différences de potentiels existant entre les parois des cavités. BROWN et GOODMAN [6] rapportent (toujours en pratique industrielle), LINDSTROM et LANN admettent qu'il y a d'abord décomposition de l'eau avec formation de  $\text{H}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Ces réactions fondamentales donnent alors naissance aux réactions d'oxydation, de réduction, de polymérisation, d'hydrolyse. (L'hydrolyse de solutions aqueuses d'halogénures alcalins, pour obtenir un ion halogénure, a été effectuée.)

### *Réactions physicochimiques*

L'accélération des réactions peut, également, s'expliquer simplement par le caractère plus homogène de la suspension des réactants dans la solution. Ainsi, l'hydrolyse des esters qui se produit normalement est considérablement accélérée par la présence d'ultrasons. Il ne s'agit donc pas d'un véritable phénomène de catalyse. Les rendements de tels procédés justifient la mise en service d'installations industrielles pour l'obtention de certains corps chimiques. Connaissant les caractères physiques des ondes ultrasonores, l'irradiation d'une solution dans laquelle les produits se présentent en phase gazeuse est particulièrement intéressante, puisque les vibrations acoustiques réalisent une dispersion ainsi qu'un dégazage favorable au déroulement de la réaction. En règle générale, on peut prévoir une amélioration du rendement de toutes les réactions dont les produits résultant se présentent sous forme de gaz. [Les réactions d'*alkylation* <sup>(3)</sup> sont accélérées sous irradiations ultrasonores et deviennent ainsi plus avantageuses.]

### *Précipitation et cristallisation*

L'effet de la cavitation est double : les noyaux de cavitation sont d'abord des endroits qui favorisent la précipitation de la substance, puis les cavités empêchent la formation de cristaux de grandes dimensions. La finesse des particules en suspension sera donc bonne et parfaitement calibrée. Un exemple de cette technique, qui touche de près le monde médical, est celui qui concerne la préparation industrielle de la cocaïne-pénicilline. Sa formation peut être obtenue par réaction d'un sel de cocaïne avec un sel de pénicilline. Mais alors, la cocaïne-pénicilline précipite dans le solvant et, cette précipitation s'effectuant sous les formes les plus variées, le contrôle des dimensions des diverses particules est très difficile. Les différences de taille donnent lieu aux difficultés qu'on imagine lors de l'usage du produit. Ces variations de taille disparaissent lorsque la précipitation s'effectue dans un champ ultrasonore. Les dimensions des cristaux sont très faibles et parfaitement contrôlées.

## B. UTILISATION MÉDICALE DES ULTRASONS

En raison de leur facilité d'emploi, de leur innocuité apparente, du grand avantage qu'ils ont de visualiser les tissus mous, les ultrasons ont trouvé leur place dans le monde médical.

M. MICHAELSON [27] rapporte les chiffres suivants : il existait 3 000 appareils de diagnostic en 1970, 10 000 en 1972, 175 000 en 1976. Les études de prospection du marché indiquent que 100 000 appareils de diathermie devront être construits en 1980.

---

<sup>(3)</sup> Les réactions d'*alkylation* mettent en jeu des hydrocarbures aromatiques et sont employées pour la réalisation industrielle des essences d'avion à haut indice d'octane.

Le tableau suivant fourni par HILL [24] donne les valeurs des principaux paramètres des ultra-sons utilisés dans les applications médicales courantes.

Paramètres	Échographie	Doppler	Thérapeutique
Fréquence (MHz)...	1— ~ 15	2—5	1—3
Puissance acc. moyenne (mW)...	0,3—21	19—24	25 000
Intensité (W, cm <sup>-2</sup> ) valeur de crête....	14—95	$3 \cdot 10^{-3}$ — $23 \cdot 10^{-3}$	0— ~ 25
Pression (bar) valeur de crête....	2—17	0,1—0,3	0— ~ 8,5
Durée (ms).....	1	Selon l'utilisateur	

A la lecture de ce tableau, on voit immédiatement, en raison de la valeur des puissances, que la thérapeutique utilise les oscillations acoustiques pour leur énergie donc pour la chaleur, tandis que pour les diagnostics, ce sont les autres propriétés physiques qui sont mises en cause.

### 1. L'UTILISATION EN THÉRAPEUTIQUE

Les indications concernent surtout la rhumatologie. "*Les phénomènes de friction et d'échauffement qui accompagnent le passage du faisceau dans les tissus, réalisent un véritable massage en profondeur et localisé qui accélère la circulation locale et les échanges cellulaires*", PLANIOL [35]. Les indications sont les stress, les douleurs rhumatismales, la lyse de formation fibreuse (maladie de DUPUYTREN). En pneumologie, on retrouve les mêmes indications (fibrose pleurale). La mise en œuvre de cette thérapeutique est contre-indiquée dans les maladies infectieuses et inflammatoires.

### 2. L'UTILISATION DIAGNOSTIQUE

C'est l'utilisation médicale la plus importante. Elle est à l'origine du développement considérable de l'appareillage ultrasonore qu'on enregistre actuellement. Elle utilise les propriétés de propagation et de réflexion des vibrations acoustiques : réflexion sur une cible fixe (échographie) ; réflexion sur une cible en mouvement (effet Doppler).

Dans les deux cas, il convient d'envoyer une onde sur un obstacle, et d'enregistrer l'onde réfléchi. Sur une structure fixe et médiane, il est possible de faire une comparaison de son caractère central en comparant le trajet parcouru de part et d'autre de la structure (cas de la faux du cerveau). Le signal est présenté en modulation d'amplitude, le parcours du spot est proportionnel au temps (échographie A) (fig. 1).

En échographie B, le signal électrique engendré par l'onde réfléchie, est appliqué à l'électrode de WEHNELT de l'oscilloscope. Le signal est alors présenté en modulation de brillance. Si, de plus, la source ultrasonore se

## ECHOGRAPHIE A.

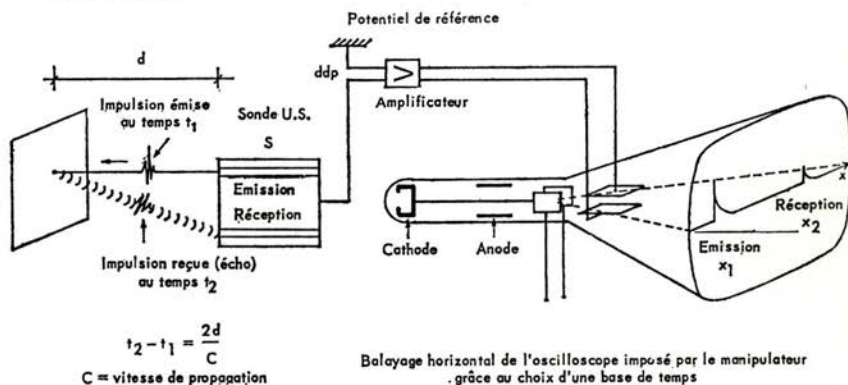


FIG. 1. — La tension délivrée par le signal ultrasonore entraîne une déviation verticale du spot puisqu'elle est appliquée aux bornes des plaques horizontales. L'amplitude du signal est d'autant plus importante que la d.d.p. (U.S.-référence) est élevée (modulation d'amplitude). La distance  $x_2 - x_1$  est fonction de  $d$  et de la vitesse de balayage (base de temps).

déplace, il est possible de réaliser une échographie B bidimensionnelle qui donne les contours de la structure visée (pour des valeurs adéquates de la vitesse de déplacement de la source et de la base de temps de l'oscilloscope) (fig. 2).

En modulation de brillance, source fixe, on obtient le mouvement de la structure examinée en fonction du temps (technique T. M., *time-motion*), le balayage de l'écran se fait alors dans le sens vertical (fig. 3).

L'effet Doppler est un phénomène bien connu dans le domaine des vibrations acoustiques de fréquence audible : vibration de fréquence des sons, lorsque les ondes se réfléchissent sur une cible en mouvement. Cet effet a une application diagnostique essentiellement axée sur la circulation du sang dans les vaisseaux (les éléments figurés du sang constituent la structure en mouvement). En fait, il ne s'agit pas, au sens strict, d'un effet physique des ultrasons, mais d'un cas particulier de réflexion des vibrations acoustiques.

### C. ULTRASONS ET SÉCURITÉ

On peut classer les ultrasons selon leur fréquence, leur énergie, et, d'une façon générale, selon les valeurs de l'un quelconque des paramètres physiques qui les caractérisent. Nous avons choisi une classification qui tient compte de l'utilisation en pratique industrielle et en technique hospitalière, lesquelles intéressent le médecin au titre de la prévention, ou du diagnostic et de la thérapeutique.

## I. UTILISATION INDUSTRIELLE DES ULTRASONS

Les professions qui emploient des générateurs d'ultrasons de haute intensité peuvent être exposées aux effets physiques des vibrations à transmission aérienne. Citons le nettoyage de tissus ou de pièces métalliques, le perçage de trous, la coupe de matériaux durs, la soudure ultra-sonique, le dégazage de liquide, le pilotage d'aéronefs, etc.

## ECHOGRAPHIE B.

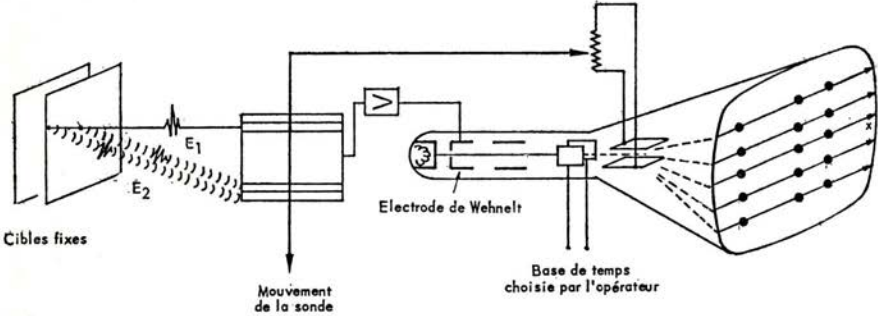


FIG. 2. — La base de temps (défilement horizontal du spot) est encore choisie par l'opérateur. La tension délivrée par le signal U.S. est appliquée à un « robinet » d'électrons (électrode de WEHNELT). En l'absence de tension, l'électrode de WEHNELT ne laisse passer aucun électron (écran opaque). Plus la tension s'élève, plus il laisse passer d'électrons, la brillance augmente (modulation de brillance). Comme il s'agit d'une impulsion, un écho entraîne un point dont la brillance est fonction de la force de l'écho. Si l'on déplace la ligne de balayage par un courant continu proportionnel au déplacement linéaire de la sonde (schématisé par un potentiomètre de recopie), on obtient une image bidimensionnelle.

## ECHOGRAPHIE TIME-MOTION (T.M.)

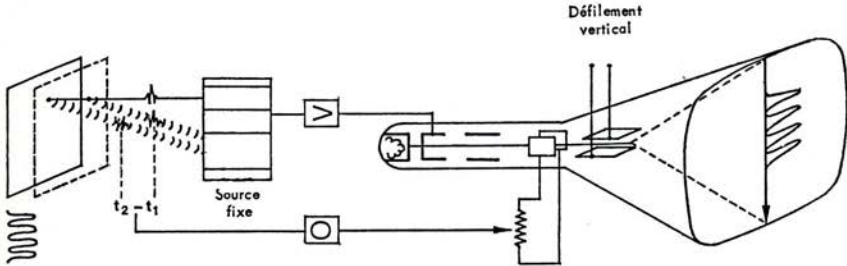


FIG. 3. — La force des échos commande toujours la brillance. Le défilement est vertical par l'application d'une base de temps choisie par l'opérateur sur les plaques horizontales. L'éloignement de la cible (proportionnel à une différence de temps et symbolisé après transformation par un potentiomètre) commande la tension des plaques verticales, donc le déplacement horizontal de spot, ce qui permet d'obtenir la relation déplacement vs temps de la cible (ex. déplacement de la valve mitrale).

Le problème pour le médecin spécialisé est, en première analyse, d'évaluer le risque pris par un sujet à son poste de travail<sup>(4)</sup>. Choisissons, par exemple, le nettoyage de métaux. Les pièces sont placées dans un bac soit métallique, soit en béton de forte section, rempli de liquide, dans lequel est également immergée la source ultrasonore de haute intensité génératrice de cavitation. Si l'on admet que l'énergie est intégralement transmise de la source au milieu liquide, on constate immédiatement que les vibrations subissent une perte d'énergie aux interphases liquide-béton, béton-air, air-vêtements, vêtements-homme. Seule, reste nocive la portion d'énergie vibratoire qui se propage dans l'ambiance proche de l'individu. Cette énergie est faible car les parois du bac de nettoyage se conduisent comme de véritables miroirs réfléchissant vers l'intérieur (à titre d'exemple, la perte d'énergie due à la réflexion de deux milieux acier-air est de 99,96 % [6]). Pour l'ouvrier, la véritable source d'ultrasons est la paroi externe du bac. Nous avons vu que :

— la densité d'énergie surfacique varie comme l'inverse du carré de la distance de la cible à la source;

— l'absorption (en milieu aérien) est proportionnelle au carré de la fréquence (pour engendrer la cavitation, il faut générer des ondes dont la fréquence se situe entre  $8 \cdot 10^5$  et  $10^6$  Hz).

Nous démontrerions aisément que le parcours des ultrasons au-delà du bac de nettoyage ne dépasse pas quelques centimètres. Enfin, s'il est nécessaire que l'ouvrier approche de son instrument de travail, les vêtements dont il est habituellement porteur constituent un obstacle définitif aux vibrations ultrasonores.

C'est pourquoi, nous pouvons considérer qu'un minimum de précautions, dans l'exemple que nous avons choisi, entraîne un maximum de sécurité en matière de vibration hyperfréquence. Soulignons, toutefois, que le rôle du médecin du travail n'est pas terminé, car les bulles de cavitation engendrent, lors de leur disparition, des claquements secs — lesquels, répétés un nombre incommensurable de fois, entraînent un bruit de fort niveau (supérieur à 100 dB) qui nécessite la mise en place et la surveillance de systèmes antibruit puisque l'oreille devient spécialement concernée. Le problème du bruit devient ainsi prédominant.

L'analyse de FOURIER pratiquée lors de la mise en marche de certains réacteurs montre la présence d'ultrasons à des niveaux non négligeables.

---

(4) Nous avons antérieurement souligné que la définition de l'ultrason est parfaitement satisfaisante pour le physicien qui étudie le signal à sa source, puisque les vibrations sonores ou ultrasonores sont des ondes de même nature strictement caractérisées par leur fréquence. Il existe une certaine ambiguïté pour le médecin qui étudie non pas la source, mais la cible (l'homme). La référence fréquentielle, si elle est restée nécessaire, devient insuffisante. Le terme d'ultra-sons semble intéresser un capteur biologique, l'oreille, qui est justement devenue physiologiquement inefficace. Mais ces mêmes vibrations, si elles sont appliquées à l'individu par apposition directe de la source sur la peau, peuvent entraîner des effets, qui, dans certaines conditions d'intensité et de durée, deviennent non négligeables. C'est pourquoi, il conviendrait, peut-être, d'accorder quelque valeur au terme générique d'ultracoustique utilisé en physique, qui ne se prévaut pas en matière de biologie d'une transmission aérienne ou solidienne préférentielle.

C'est à ces fréquences qu'ont été primitivement rapportées les céphalées, nausées, asthénie etc. dont se plaignaient les mécaniciens. En fait, les recherches pratiquées ont montré très rapidement que les symptômes devaient être reliés au bruit des réacteurs (140 dB) [26], d'autant plus qu'il s'agit d'ultrasons proches.

## 2. UTILISATION MÉDICALE DES ULTRASONS

Si nous pouvons conclure à l'innocuité habituelle des ultrasons en technique industrielle, il en va, peut-être, différemment en matière d'examen para-médicaux ou de thérapeutique.

Les désaccords qui se font jour actuellement [12-13, 17-19], montrent bien que tous les problèmes ne sont pas réglés. Ils ont l'avantage de poser les questions qui nécessitent de l'être. C'est un lieu commun de dire qu'il est loisible à chacun de passer outre à un certain nombre de précaution dans la mesure où l'on connaît, sinon exactement, du moins avec une bonne approximation, les dangers que l'on fait courir aux individus (*cf.* médicaments et maladies thérapeutiques, rayons X...).

Or, on reste perplexe sur le faible nombre d'études épidémiologiques dont les vibrations ultrasonores ont fait l'objet. ZANA [44], dans un excellent article consacré à la nocivité ultrasonore, rapporte les conclusions de travaux de HELLMAN *et al.*, portant sur 1 114 patientes irradiées à divers stades de la grossesse. Le taux d'anomalies fœtales est dans ce groupe de 2,7 p. cent alors que celui d'un groupe témoin atteint 4,8 p. cent. Il rapporte, également, les conclusions de l'étude de ZISKIN portant sur 121 000 examens qui conclut également à l'innocuité des ultrasons utilisés en diagnostic.

Dans l'utilisation médicale, la sonde est appliquée sur la peau par l'intermédiaire d'une pâte dont le rôle est celui d'un adaptateur d'impédance. Ainsi dans la formule (6),  $Z^1$  tend à devenir égal à  $Z^2$  et la perte d'énergie  $I$  tend à devenir nulle. De façon idéale, l'énergie du transducteur est intégralement transmise à la peau. Les ultrasons peuvent alors avoir des effets liés à :

— la fréquence, l'intensité (dont de la chaleur), la pression de radiation, la cavitation.

### *Effets liés à la fréquence*

Nous savons que les modalités d'insonation se font soit en mode transitoire bref (impulsion dont la fréquence de récurrence se situe aux environs de 1 kHz), soit en mode continu (vibration sinusoidale entretenue).

Les ondes pulsées sont essentiellement utilisées en diagnostic (échographie), l'autre mode est utilisé en thérapeutique. Il est donc possibles « d'injecter des doses » d'ultrasons identiques en faisant varier les termes de la relation *intensité*  $\times$  *durée*. Il ne semble pas que les travaux de recherches se développent dans cette direction.

Une recherche bibliographique (forcément incomplète), utilisant cependant dix paramètres et qui a porté sur les domaines industriel, biologique

et médical, nous a permis de découvrir peu de travaux du type « effet-doses » *in vivo* ou *in vitro* [21, 29, 34, 37, 40].

En ce qui concerne la fréquence, peu d'auteurs envisagent l'aspect strictement mécanique des vibrations ultrasonores. Il conviendrait, peut-être, de ne pas oublier ce caractère qui reste fondamental, et qui est sans nul doute le premier aspect de l'interaction ultrasons-tissus biologiques qui doit être étudié. Cette caractéristique permettrait d'expliquer, par un simple phénomène de résonance, les ruptures de molécules ou d'organites intracellulaires, pour peu que le facteur de qualité (coefficient multiplicateur) « à l'accord » soit suffisamment élevé.

Également mécaniques sont les ondes de RAYLEIGH, dont nous n'avons pas parlé, mais dont il suffit de savoir qu'il est possible de les obtenir dans certaines conditions par combinaison de déplacements longitudinaux et transversaux. Il s'agit d'ondes qui se propagent à la surface d'un solide sans y pénétrer. On peut alors imaginer que de telles ondes se déplaçant à l'apex de cellules sensorielles y détruisent, totalement et définitivement, les organites ciliaires par exemple.

Or, nous constatons que la plupart des observations cliniques, généralement très bien étudiées qui rendent compte de phénomènes anormaux après emploi d'ultrasons, ne donnent en contrepartie que très peu d'éléments concernant la valeur des paramètres physiques. Dans la plupart des cas, on se limite à l'ordre de grandeur de l'intensité. Il ne faut donc pas s'étonner si deux expériences pratiquées avec la même intensité mais avec des fréquences différentes ne donnent pas des résultats identiques. Nous ne prétendons pas que la fréquence soit le paramètre fondamental, mais il ne peut être négligé.

Il est possible que les valeurs de viscosité intracellulaire soient incompatibles avec la survenue de phénomène de résonance ou d'onde de RAYLEIGH, encore faut-il le prouver ! D'autre part, les preuves expérimentales doivent être spécialement étudiées pour recréer des conditions identiques à celles rencontrées *in vivo*. En particulier, il convient d'éviter la survenue de phénomènes d'interférence, d'onde stationnaire ou de battement, théoriquement réalisables, et qui sont susceptibles de créer des conditions expérimentales non représentatives de la réalité.

#### *Rôle de l'effet thermique*

L'effet thermique a fait l'objet de nombreux travaux, car les traitements ultrasons thérapeutiques sont souvent longs (plusieurs dizaines de minutes) à des niveaux de plusieurs watts par millimètre carré. C'est ainsi que l'on peut atteindre le seuil douloureux. L'effet est lié à la pénétration, sur plusieurs centimètres de tissus, d'un flux très directionnel qui est absorbé par tel ou tel type de cellules en raison des variations de l'impédance. Il y a une très grande sélectivité.

Dans le cas présent, il faut savoir que les lois de propagation que nous avons exposées ne s'appliquent plus tout à fait. Il ne s'agit plus d'une vibration mécanique simple se propageant dans un milieu infini, homogène et isotrope. Il s'agit d'un milieu complexe dans lequel (et c'est une loi très générale) les

modifications induites par le stress sont d'autant plus nombreuses et interactives qu'elles se produisent dans un milieu non homogène.

Exposons simplement que sur des cellules en suspension, la thermolyse est directement proportionnelle à l'élévation thermique. Sur le sujet vivant cette relation cesse d'être vraie, l'importance de la circulation joue un très grand rôle, en dispersant la chaleur.

Les ultrasons ont été utilisés comme un moyen réversible de stérilisation mâle [29]. Les chercheurs de l'« University of Missouri, Columbia School of Medicine » ont été capables d'obtenir un tel résultat. Mais il faut noter que les testicules des sujets sont immergés dans le liquide d'une coupe soumise aux ultrasons, pendant 15 min. Or, la température du liquide atteint 39°C. La baisse de la spermatogenèse est-elle le fait des vibrations ou de l'élévation thermique, dont on sait depuis longtemps qu'elle est néfaste au développement des cellules germinales ?

TIMERANS [40], par contre, observe chez l'animal un blocage de la métaphase des spermatocytes I, qui augmente avec la répétition du traitement aux ultrasons. Il utilise un appareil à faible intensité ( $25 \text{ mW/cm}^2$ ) qui n'est donc pas un générateur thermique.

Par contre, des études pratiquées sur le singe [25] semblent montrer que les ultrasons stimulent le système nerveux central à basse intensité et dépriment son activité quand les intensités sont plus élevées. Le même auteur montre que les seuils fonctionnels apparaissent bien avant les atteintes anatomiques.

Les phénomènes biologiques liés aux effets thermiques n'ont pas encore trouvé d'explication formelle. Beaucoup d'auteurs semblent attribuer à la chaleur la plus grande part des effets des ultrasons. Citons ROTT et SOLDNER [37] : *"The therapeutic effect of ultrasound, to judge by the results so far obtained, is attributable to the production of heat at the intensities used (up to  $4 \text{ W/cm}^2$ ). Neither previous experiments nor our own investigations have furnished any reliable proof of a biological effect of cellular massage independent of the increase in temperature"*.

#### *Effet de la pression de radiation*

Nous avons souligné que cette caractéristique a des effets biologiques très mal connus. Nous sommes, de nouveau, en présence d'une propriété mécanique des ultrasons et les remarques que nous avons faites à propos des pressions alternatives s'appliquent de la même façon à la pression continue. Il est théoriquement possible qu'une pression continue s'appliquant également à deux substances de viscosité différente entraîne un déplacement relatif de ces substances l'une par rapport à l'autre avec rupture possible au point de jonction. Cette hypothèse d'une action strictement mécanique est étayée par les résultats d'une expérience qui tendent à montrer que les molécules d'ADN en solution aqueuse peuvent être rompues en l'absence de cavitation [12]. Mais les auteurs, eux-mêmes, soulignent avec juste raison que les plus grandes précautions doivent être prises pour extrapoler de tels résultats aux cellules vivantes.

Un certain nombre d'images, rapportées par les histologistes, pourraient aussi être provoquées par la présence d'une composante continue de pression : fragmentation de nucléoles, dégradation d'acides nucléiques, dégradation de biopolymères, distribution régulière des mitochondries dans la cellule... mais la pathogénie de tels phénomènes reste encore très hypothétique. D'autres auteurs les rapportent aux microcourants acoustiques conséquences de l'existence de la pression de radiation.

### *Effets dus à la cavitation*

La rupture des cellules et l'homogénéisation d'un prélèvement cellulaire est couramment pratiquée en laboratoire grâce aux broyeurs à ultrason. Ce n'est évidemment pas le but recherché en médecine. Cependant, il semble que des résultats intéressants soient obtenus en chirurgie (destruction très localisée de certaines tumeurs).

Le problème, en utilisation médicale des vibrations ultrasonores, est de savoir à partir de quel niveau d'énergie et de quelle fréquence apparaissent les cavités.

Ce n'est pas la moindre valeur des travaux de H. GALPERIN-LEMAITRE et de son équipe d'avoir montré que les bulles peuvent apparaître pour des intensités aussi faibles que  $200 \text{ mW/cm}^2$  à des fréquences couramment utilisées en thérapeutique et en diagnostic. Or, à l'époque où l'on développe, certainement avec d'excellentes raisons, le monitoring du fœtus, il convient de s'assurer de l'innocuité des ultrasons. Certes, les intensités sont très faibles (de l'ordre de  $10 \text{ mW/cm}^2$ ) mais le temps d'application sur l'abdomen de la mère est en moyenne de 2 h [45]. Nous ne pouvons ainsi qu'être profondément d'accord avec FISCHMANN qui affirme : "*Il est très important en travaillant avec les ultrasons que toutes les variables soient spécifiées, et autant que possible contrôlées*" [18].

On peut, par exemple, penser que la mise en place d'une sonde sur l'aorte ascendante [2] pour obtenir la valeur du débit cardiaque en continu pendant 4 jours n'est pas forcément un geste anodin; là encore il s'agit d'une application particulière de l'effet Doppler, donc de l'utilisation d'un appareillage délivrant de faibles intensités. Ceci n'a évidemment pas échappé à la sagacité des auteurs, qui ont réalisé une étude préalable sur vingt animaux. Toutefois, on imagine aisément ce que deviendrait la paroi aortique, au contact des bulles de cavitation, en cas d'élévation anormale de l'énergie du faisceau émetteur, soit par erreur de manipulation, soit lors d'une panne des éléments de sécurité de l'appareil.

## CONCLUSIONS

Comme pour les rayons X, les bénéfices apportés par l'utilisation des vibrations ultrasonores l'emportent largement sur les inconvénients qu'ils peuvent engendrer, tout au moins dans l'emploi que l'on en a fait jusqu'à ce jour. Il faut être persuadé que cette technique n'a pas encore fourni le

maximum de ce que l'on peut en attendre. Un grand pas sera franchi le jour prochain où les industriels mettront à la disposition du médecin, les techniques d'holographie acoustique, des capteurs acoustico-optiques, les méthodes de couplage à sonde multiple...

Les quelques réflexions que nous avons formulées dans cette brève mise au point ne sont pas le reflet d'une attitude négativiste vis-à-vis de ces techniques. L'industrie va maintenant plus vite que les études en laboratoire. L'accroissement rapide du nombre d'appareils en milieu médical montre assez que l'intérêt des praticiens s'est le plus souvent limité au gain apporté par ces nouveaux examens, sans en étudier les incidences négatives éventuelles, incidences qui pourraient survenir dans l'emploi au long cours des ultrasons.

Nous pensons qu'il est presque certain que l'innocuité mécanique de ces vibrations sera prouvée. Toutefois, en matière de méthodologie, quel que soit le domaine où elle s'exerce, il convient de garder en mémoire cette phrase de DESCARTES : "Il faut admettre pour presque faux, ce qui n'est que vraisemblable".

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] ALAIS P., FINK M. Sonde multiple ultrasonore à focalisation et translation électronique. *Colloque international sur les capteurs biomédicaux*, UNESCO, Paris, 1975, 481-486.
- [2] ANGELL W. W., KNUTTI J. W., MEINDLE J. Débit cardiaque postopératoire par effet Doppler ultrasonore. *Colloque international sur les capteurs biomédicaux*. Paris, UNESCO, 1975, 257-258.
- [3] BORREDON P., SANTUCCI G. Le problème du bruit dans les Armées. *Médecine et Armée*, 1975, 3 (9), 733-738.
- [4] BOURNAT J. P., PERONNEAU P., BARBET A. Visualisation vasculaire ultrasonore transcutanée. Obtention des images en temps réel. *Colloque international sur les capteurs biomédicaux*. UNESCO, Paris, 1975, 157-162.
- [5] BRAEMAN J. Human lymphocyte chromosomes and ultrasonic cavitation. *Br. J. Radiol.*, 1974, 47, 158-161.
- [6] BROWN B., GOODMAN J. E. *Ultrasons de haute intensité. Applications industrielles*. Dunod, Paris, 1971.
- [7] BRUHAT G. *Mécanique*. Masson, Paris, 1967.
- [8] BRUN Ph., BRIDOUX E., TORGUET R., LERREDE A., BERALDO E., CANNET G. Capteurs ultrasonores en physiologie et physiopathologie cardiaque. *Colloque international sur les capteurs biomédicaux*. UNESCO, Paris, 1975, 253-254.
- [9] BRUNEEL C., TORGUET R., BRIDOUX E. Capteurs biomédicaux acoustico-optiques. *Colloque international sur les capteurs biomédicaux*. UNESCO, Paris, 1975, 487-492.
- [10] BUGARD. *Analyse de spectres ultrasonores en vue de l'étude des effets physiologiques des ultrasons*, Laboratoire central des armes navales, L.C.A.N. n° 1759, 1951.
- [11] CAVALLARO A., LAFORTI R., MERLO U. Analyse de signaux provenant d'un fluxmètre Doppler pour la détermination de la distribution de la vitesse du sang dans les artères. *Colloque international sur les capteurs biomédicaux*. UNESCO, Paris, 1975, 295-296.
- [12] COAKLEY W. T., DUNN F. Ultrasound and DNA. *Lancet*, 1975, 2, 7943, 1037-1038.
- [13] COAKLEY W. T., GOULD R. K. Human lymphocyte chromosomes and ultrasonic cavitation. *Br. J. Radiol.*, 1974, 47, 158-161.

- [14] Fascicule de Documentation. *Acoustique : atténuation du son dans l'air*. Norme française AFNOR NF S 30.009, 1972.
- [15] FLAMENT J. M. Caractéristiques des sondes à ultrasons dans le domaine non destructif biomédical. *Colloque international sur les capteurs biomédicaux*. UNESCO, Paris, 1975, 539-540.
- [16] FOISSEY C. Étude élémentaire de la cavitation. *Cours de l'École nationale supérieure de Techniques avancées*, Dépt. Thermodynamique-machines, 1976.
- [17] GALPERIN-LEMAITRE H., GUSTOT P., LEVI S. Ultrasound and marrow cells chromosomes. *Lancet*, 1973, 2, 7827, 505-506.
- [18] GALPERIN-LEMAITRE H., KIRSCHVOLDERS M., LEVI S. Ultrasound and mammalian D.N.A. *Lancet*, 1975, 2, 7936, 662.
- [19] GALPERIN-LEMAITRE H., LEVI S. Ultrasound and safety. *Lancet*, 1976, 1, 7952, 197-198.
- [20] GAULARD M. L. Les capteurs ultrasonores, applications à l'holographie acoustique. *Colloque international sur les capteurs biomédicaux*. UNESCO, Paris, 1975, 537-538.
- [21] GUILLAUD C., MONJARET J. L. *Détection de bulles dans le sang par sonde péri-vasculaire*, Lyon, I.N.S.A., Laboratoire d'Optique corpusculaire et d'ultrasons, 1975, 28.
- [22] GUILLERM R., MASUREL. *Détection ultrasonore par effet Doppler de bulles intravasculaires lors de la décompression après exposition hyperbare du porc, premiers résultats*. Rapport 161/CERTSM/1973, 19.
- [23] GUISET J. Détection ultrasonore des calculs rénaux en per-opératoire. *Colloque international sur les capteurs biomédicaux*. UNESCO, Paris, 1975, 541-542.
- [24] HILL B. A. *Biological effects of ultrasound*. Rapport A.G.A.R.D. LS-78, 1975, 0, 1-4.
- [25] HU J. H., ULRICH W. D. Effects of low intensity ultrasound on the central nervous system of primates. *Aviat. Space Environ. Med.*, 1976, 47 (6), 640-643.
- [26] KOPCZYNSKI H. D. Airborne blood pressure measurement using ultrasonic. *Aerospace Med.*, 1974, 45 (11), 1307-1307.
- [27] MICHAELSON M. *Biologic and pathophysiologic effects of exposure to microwave or ultrasonic energy. An overview*. Rapport A.G.A.R.D. LS-78, 1975, 1, 1-2.
- [28] MONJARET J. L., GUILLERM R., MASUREL G. Détecteur ultrasonore à effet Doppler de bulles circulant dans les vaisseaux sanguins. *Colloque international sur les capteurs biomédicaux*. UNESCO, Paris, 1975, 93-98.
- [29] MOSTAFO S. F. Ultrasound exposure decreases sperm production in men, animals. *J.A.M.A.*, 1976, 235 (22), 2375-2376.
- [30] NARBUT N. P. Experimental stimulating of a cataract by means of focussed ultrasound (summary). *Vest. Oftalmol.*, 1974, 2, 47-50.
- [31] Norme française homologuée. Vocabulaire de l'acoustique. *Définitions générales*. Norme française AFNOR, NF S 30.101, 1973.
- [32] Norme française homologuée. Vocabulaire de l'acoustique. *Systèmes de transmission et de propagation du son et des vibrations*. Norme française AFNOR NF S 30.102, 1973.
- [33] Norme française homologuée. Vocabulaire de l'acoustique *Acoustique physiologique et psycho acoustique*. Norme française AFNOR NF S 30.105, 1975.
- [34] PESEGOVA G. I. Effects of ultrasounds of different intensity upon the vessels of the pulmonary blood circulation circuit (summary). *Arch. Anat. Hist. Embry.*, 1974, 4, 75-81.
- [35] PLANIOL Th. Ultrasons, propriétés et actions. In : *Biophysique* (GREMY F., LETERRIER F., Eds), Flammarion, Paris, 1971, 1.

- [36] POURCELOT L., BERSON M., POTTIER J. M., PLANIOL Th. Visualisation instantanée des organes par capteur à ultrasons. *Colloque international sur les capteurs biomédicaux*. UNESCO, Paris, 1975, 151-156.
- [37] ROTT H. D. The effect of ultrasound on human chromosomes *in vitro*. *Humangenetik*, 1973, **20**, 103-112.
- [38] SCHUBART W. G. Transducteur ultrasonore distal de débit pour la mesure du volume de l'éjection cardiaque. *Colloque international sur les capteurs biomédicaux*. UNESCO, Paris, 1975, 289-294.
- [39] SMYTHE G. E., MACRAE D. J. Doppler ultrasound and foetal hazard. *Lancet*, 1975, **2**, 7925, 134.
- [40] TIMERANS L., GEREBTZOFF M. A. Aspect morphologique de l'effet d'ultrasons à faible intensité au niveau des organes génitaux de la souris mâle. *C.R. Soc. Biol.*, 1973, **167** (10), 1485-1487.
- [41] WELLS. *Ultrasound, physical aspects*. Rapport A.G.A.R.D.-LS-78, 1975, **3**, 1-7.
- [42] WESLEY D. U. Ultrasound dosage for non-therapeutic use on human beings. Extrapolations from a literature survey. *Biomed. Eng.*, 1974, **21** (1), 48-51.
- [43] WORRELL R., HIXSON E. L. Stimulation nerveuse non traumatique par champ électrique et acoustique combinés. *Colloque international sur les capteurs biomédicaux*. UNESCO, Paris, 1975, 377-382.
- [44] ZANA R. Phénomènes associés à la propagation des ultrasons dans les systèmes biologiques. *Nocivité U.S. Biomed*, 1974, **20** (4), 273-280.
- [45] ZIEDONIS J. G. Conception des capteurs ultrasonores pour des applications au diagnostic médical. *Colloque international sur les capteurs biomédicaux*. UNESCO, Paris, 1975, 431-434.