

DIXIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 20 au 24 MAI 1985

PROPAGATION ACOUSTIQUE DANS UN MILIEU DIPHASIQUE EAU-BULLES D'AIR
APPLICATION A LA CARACTERISATION D'UN MILIEU DIPHASIQUE PAR VOIE
ACOUSTIQUE.

J. LEANDRE, C. GAZANHES

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (CNRS), BP71, 13277 Marseille cedex 9

RESUME

La propagation sonore et ultrasonore en milieu liquide est considérablement modifiée par la présence de bulles de gaz. Dans ce travail, on s'intéresse aux variations (en fonction de la fréquence) de la vitesse de phase et de l'amortissement d'une onde acoustique qui se propage dans un milieu diphasique eau-bulles de gaz.

Le dispositif expérimental génère des milieux diphasiques à taux de vide variables de 0 à 10^{-4} pour des populations de bulles de rayon moyen inférieur à $60 \mu\text{m}$.

L'étude du milieu par voie acoustique dans la gamme de fréquences 15kHz à 500 kHz permet de couvrir entièrement le spectre de résonance des bulles.

Dans ces conditions on montre qu'il est possible de détecter par voie acoustique la présence de bulles dans un liquide et de déterminer le taux de gaz dans ce liquide.

On voit l'importance fondamentale d'une telle caractérisation dans de nombreux domaines de la technologie et de l'industrie. Energie nucléaire, forages pétroliers, navigation maritime, plongée profonde, industries chimiques, etc...

SUMMARY

The presence of gas bubbles in water has appreciable effects on the propagation of sound or ultrasound waves through the medium.

This paper presents theoretical and experimental results showing the behaviour of the phase velocity and the absorption in bubbly water as a function of frequency. The experimental bubble generator gives bubble media with bubble volume ratio ranging from 0 to 10^{-4} and bubble mean radius below $60 \mu\text{m}$. The range of acoustical frequencies from 15 kHz to 500 kHz is sufficiently wide to include all of the bubble resonance spectrum.

The acoustical propagation is a means for detecting the presence of gas bubbles in liquids.

One can see the fundamental importance of a such characterisation in numerous economic domains like nuclear energy, offshore drilling operations, ocean navigation; deep-diving, chemical industry,...

*Cette étude a été soutenue par la DRET (groupe III),
dans le cadre des conventions n° 81-296 et n° 83-1067.*



PROPAGATION ACOUSTIQUE DANS UN MILIEU DIPHASIQUE EAU-BULLES D'AIR.
 APPLICATION A LA CARACTERISATION D'UN MILIEU DIPHASIQUE PAR VOIE ACOUSTIQUE.

1. INTRODUCTION. - On a constaté depuis longtemps que la présence de bulles de gaz dans un liquide modifie le processus de propagation des ondes acoustiques. Ces modifications qui portent surtout sur les variations de la vitesse de phase et de l'atténuation de l'amplitude peuvent devenir très importantes au voisinage de la fréquence de résonance des bulles. L'acoustique est donc le moyen idéal pour détecter la présence de bulles dans des liquides opaques à la lumière. Elle permet également, à partir d'une mesure de vitesse de phase en basse fréquence, de déterminer le taux de gaz dans un liquide.

Si Mallock /1/ en 1911 et Bragg /2/ en 1920 on signalé pour la première fois des anomalies de propagation des ondes acoustiques en milieu diphasique liquide-bulles de gaz, c'est Minnaert /3/ qui en 1933 donne une expression reliant la fréquence de résonance à la taille des bulles.

Mais c'est surtout pendant la seconde guerre mondiale que de nombreuses études ont été menées tant aux USA qu'en Allemagne. Plus tard, des travaux théoriques importants ont été faits ; en particulier par Devin /4/. En France, l'on trouve les travaux de Gilles /5/ et surtout l'étude très complète, tant du point de vue théorique qu'expérimental de P. Arzéliès /6/ complétée par les travaux de C. Gazanhes et J. Léandre /7/.

2. PROPAGATION EN MILIEU DIPHASIQUE. -

2.1 RAPPELS THEORIQUES

Lorsqu'on considère une onde acoustique qui se propage à travers un nuage de diffuseurs répartis aléatoirement dans un volume et que l'on fait certaines hypothèses (taille des diffuseurs très inférieure à la distance qui les sépare, diffuseurs de même nature et isotropes) on montre que dans ces conditions la partie cohérente de la moyenne d'ensemble du champ acoustique au point r est solution de l'équation d'onde de Helmholtz.

$$(1) \quad \nabla^2 \langle \psi_r \rangle + k^2 \langle \psi_r \rangle = 0$$

avec la constante de propagation

$$(2) \quad k^2 = k_0^2 + 4\pi G(r)$$

La vitesse de propagation dépend alors des propriétés des diffuseurs, de leur répartition et de l'espace r par l'intermédiaire de la fonction :

$$(3) \quad G(r) = \int \frac{a n(a)}{(\omega_0/\omega)^2 - 1 - i\delta} da$$

G(r) étant complexe il en sera de même pour k. La vitesse de phase C_φ et le coefficient d'amortissement α de l'onde progressive qui se propage sont donnés par :

$$(4) \quad \frac{1}{C_\phi} = \frac{1}{\omega} \operatorname{Re} \{k\}$$

$$(5) \quad \alpha = - \operatorname{Im} \{k\}$$

Les calculs numériques de C_φ et α sont menés à partir de la relation /2/ qui s'écrit encore :

$$(6) \quad k^2 = k_0^2 + 4\pi \int \frac{a n(a)}{(\omega_0/\omega)^2 - 1 - i\delta} da$$

Si l'on assimile le milieu diphasique à un milieu homogène, ce qui est légitime puisque a << λ, que l'on mesure la vitesse de phase en basse fréquence (ω << ω₀) et que l'on définit le paramètre de base appelé "taux de vide" comme étant :

$$/7/ \quad \tau = \frac{\text{Volume total de gaz contenu dans les bulles}}{\text{Volume total du milieu diphasique considéré}}$$

la vitesse de phase basse fréquence et le taux de vide sont reliés par l'expression :

$$/8/ \quad \tau = \frac{(k_{l.res.} a)^2}{3} \left(\frac{C_l^2}{C_\phi^2} - 1 \right)$$

avec

$$/9/ \quad k_{l.res.} a = \frac{1}{C_l} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{P_l}}$$

PROPAGATION ACOUSTIQUE DANS UN MILIEU DIPHASIQUE EAU-BULLES D'AIR.
APPLICATION A LA CARACTERISATION D'UN MILIEU DIPHASIQUE PAR VOIE ACOUSTIQUE.

qui est une constante si la température ne varie pas.

Les symboles et notations utilisées représentent :

C_l = Célérité dans le liquide sans bulles,

a = rayon de la bulle

$\gamma = C_p/C_v = 1,4$

P_0 = pression hydrostatique

ρ_l = masse volumique du liquide,

δ = terme d'amortissement,

$n(a)$ = distribution de probabilité des rayons.

Pour un taux de vide faible la vitesse de phase devient :

$$(10) \quad C_\varphi = C_l \left[1 - \frac{2\pi}{k_l^2} \int \frac{(\omega_0^2/\omega^2 - 1) a n(a)}{(\omega_0^2/\omega^2 - 1)^2 + \delta} da \right]$$

2.2 TECHNIQUES EXPERIMENTALES

2.2.1 Réalisation du milieu diphasique

L'étude du milieu diphasique a été faite sur un banc de mesure représenté sur la Figure 1.

Le milieu diphasique est obtenu à l'aide d'un générateur industriel de microbulles. Il fonctionne par détente d'une eau saturée à travers une tuyère qui provoque la formation de fines bulles d'air. Ces bulles sont injectées dans la cuve de mesure. La densité de bulles est modifiée au moyen d'une vanne dont on peut régler l'ouverture en fait le taux de vide. On n'injecte alors dans la cuve qu'une certaine fraction de la population fournie par le générateur ; l'autre fraction est recyclée après élimination des bulles par co-alescence puis gravité dans un décanteur. Ce dispositif donne des milieux diphasiques à taux de vide variables de 0 à 10⁻⁴ pour des populations de bulles de rayon moyen inférieur à 60 μ m.

La mise en oeuvre de tuyères de détente de différentes dimensions, réalisées en plexiglass (figure 2), nous a permis de montrer qu'il n'est pas possible de déplacer la valeur moyenne des rayons de bulles de la population générée dans la cuve en agissant ; sur la pression de l'eau saturée d'air en amont de la tuyère de détente, sur les caractéristiques de cette dernière (nature, forme et dimensions internes). Cela est démontré par les étalonnages du milieu diphasique que nous avons effectués pour 10 pressions différentes allant de 5,9 à 3,1 bars et que donne le tableau I.

2.2.2 Etalonnage du milieu

Disposant d'une certaine population de bulles il est maintenant nécessaire d'en connaître ses principaux paramètres : nombre de bulles par mètre cube, rayon moyen, écart-type. C'est le but de la technique que nous avons mise au point. Ce n'est pas une technique "in situ" car elle consiste à prélever une certaine quantité de milieu dans la zone où seront faites les mesures acoustiques. Pour effectuer les prélèvements on plonge dans le milieu une jauge de profondeur sur laquelle est fixée une éprouvette cylindrique ouverte à ses deux extrémités. On obture ensuite rapidement et simultanément le haut et le bas de l'éprouvette par des plaques de verre, puis on retire l'éprouvette du milieu. Après avoir attendu l'ascension de toutes les bulles et leur immobilisation sur la plaque supérieure on prend un cliché de celle-ci. La Figure 3 montre le tirage avec un grossissement de 50 d'un cliché d'étalonnage. Dans ces conditions une bulle d'un diamètre de 1mm a un rayon réel de 10 μ m. L'analyse granulométrique des clichés photographiques s'effectue automatiquement grâce à une caméra vidéo Thomson-CSF équipée de son moniteur (256x256 pixels) couplée à un calculateur MINC 11/23. Le programme d'analyse que nous avons mis au point permet de mesurer le rayon de chaque bulle, de les ranger en classes de 7 μ m, de tracer l'histogramme des tailles, de calculer le rayon moyen, l'écart-type, le taux de vide et le nombre de bulles par unité et par classe. La figure 4 propose un exemple de résultat ainsi obtenu.

2.2.3 Description analytique du milieu

Du fait du caractère sélectif des phénomènes acoustiques il est exclu d'effectuer les calculs numériques des expressions (5) et (6) sur la base des histogrammes de tailles. Il est alors indispensable de décrire le milieu par une expression analytique, courbe de distribution des tailles ajustée à l'histogramme expérimental. La distribution Gamma

$$(11) \quad n(a) = N_0 a^A e^{-Ba}$$

est bien adaptée pour représenter une population de bulles de gaz dans un liquide. Dans certains cas le test du χ^2 permet même une adaptation très précise. La courbe en trait continu de la Figure 4 est un exemple d'adaptation de l'histogramme expérimental par la distribution Gamma du type de celle de la relation 11.



PROPAGATION ACOUSTIQUE DANS UN MILIEU DIPHASIQUE EAU-BULLES D'AIR.
APPLICATION A LA CARACTERISATION D'UN MILIEU DIPHASIQUE PAR VOIE ACOUSTIQUE.

La détermination des coefficients N_0 , A et B n'est pas immédiate, elle fait intervenir deux points judicieusement choisis sur l'histogramme. Il reste ensuite à corriger N_0 pour obtenir un étalonnage de la répartition par unité de volume.

Le tableau II donne les principales caractéristiques des milieux diphasiques obtenus pour des angles d'ouvertures de vanne croissants.

Le tableau III donne les valeurs des constantes N_0 , A, B et N_0 corrigées correspondant à ces différentes ouvertures.

2.3 MODELISATION DU MILIEU

2.3.1 Mesures expérimentales

Ces mesures portent essentiellement sur l'atténuation et la vitesse de propagation des ondes acoustiques se propageant dans le milieu diphasique. La gamme de fréquences choisies 15 kHz à 400 kHz couvre la zone de fréquences de résonance des bulles. Les mesures sont du type transmission avec déplacement du récepteur. Un train d'ondes ultrasonores traverse le milieu pour être reçu par un récepteur placé en face de l'émetteur.

2.3.1.1 Résultats obtenus

Pour deux points d'étalonnage du milieu diphasique correspondant, dans les deux cas, à un taux de vide faible nous avons mesuré la vitesse de phase et l'atténuation. Les courbes des figures 4 à 8 illustrent les résultats de nos mesures. Sur chacune de ces figures nous avons également tracé les courbes calculées à partir des relations /4/, /5/ et /6/ dans lesquelles nous avons porté les données numériques de la courbe de distribution Gamma qui ajuste l'histogramme expérimental.

La mesure de vitesse de propagation à 15kHz permet de remonter au taux de vide par application des relations /8/ et /9/. Pour obtenir une bonne concordance entre ce taux de vide et celui calculé à partir des résultats de l'étalonnage photographique du milieu on applique un facteur de réduction à ce dernier. On justifie cette correction en supposant que les bulles grossissent pendant l'intervalle de temps qui sépare le prélèvement d'un échantillon du milieu de sa prise de vue. Une réduction de 1/5 du rayon des bulles conduit à un bon accord entre la théorie et l'expérience (Figure 9).

3. CONCLUSION La théorie de la diffusion multiple permet de décrire l'influence de la présence de bulles sur la propagation d'un onde acoustique dans un milieu diphasique. Les résultats expérimentaux concordent bien avec le modèle théorique.

BIBLIOGRAPHIE

- /1/ Mallock, A., The damping of sound by frothy liquids. Proc.Roy.Soc.(London) A 84 (1911), 301.
- /2/ Bragg,W.The world of sound. G.Bell and Sons Ltd, London 1920.
- /3/ Minnaert, M.On musical air bubbles and the sound of running water. Phil. Mag. XVI (7th series)1933
- /4/ Devin, C, Survey of thermal, radiation and viscous damping of pulsating air bubbles in water. J.Acoust.Soc.Amer. 31 (1959) 1654
- /5/ Gilles, M.A.,Synthèse bibliographique sur les propriétés acoustiques des bulles et leur influence sur la propagation en milieu marin. 7ème Colloque GRETSI, Nice 1979
- /6/ Arzeliès,P. Acoustique des bulles. Contribution à l'étude de la propagation en milieu diphasique eau-bulles de gaz. Problèmes Inverse : identification de paramètres décrivant le milieu. Thèse de Docteur IngénieurUniversité Aix-Marseille II - Faculté de Luminy 1981.
- /7/ Gazanhes,C., Arzeliès,P., et Léandre,J., Propagation acoustique dans un milieu diphasique eau-bulles d'air. Application à la caractérisation d'un milieu diphasique par voie acoustique. ACUSTICA 55 (1984), 113.

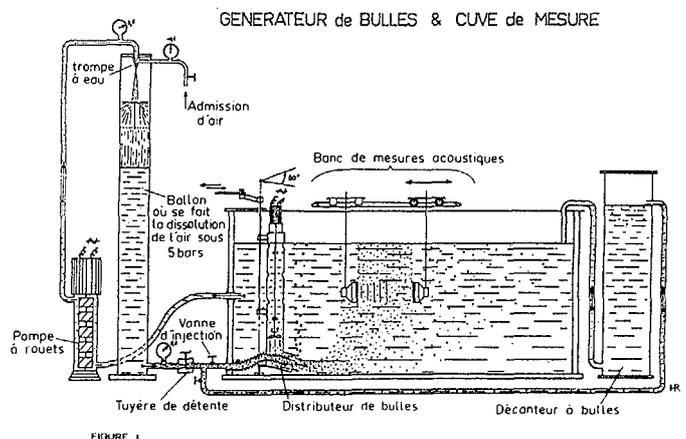


FIGURE 1

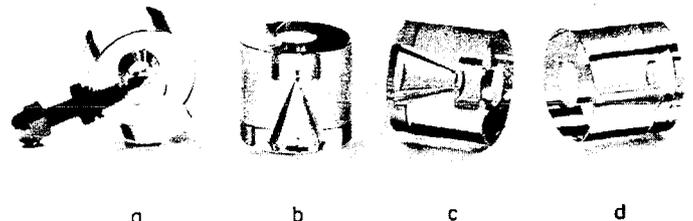


FIGURE 2.- Tuyères de détente

- Photo a) Reproduction en plexiglass de la tuyère en acier inoxydable, avec pointe de réglage, utilisée jusqu'à présent ;
- Photo b) Tuyère en plexiglass à diamètre de la section de sortie du Venturi plus faible ;
- Photo c) Tuyère en plexiglass à diamètre de la section de sortie du venturi plus forte ;
- Photo d) Raccord en plexiglass à section constante pour essais sans tuyère.

PROPAGATION ACOUSTIQUE DANS UN MILIEU DIPHASIQUE EAU-BULLES D'AIR
APPLICATION A LA CARACTERISATION D'UN MILIEU DIPHASIQUE PAR VOIE ACOUSTIQUE

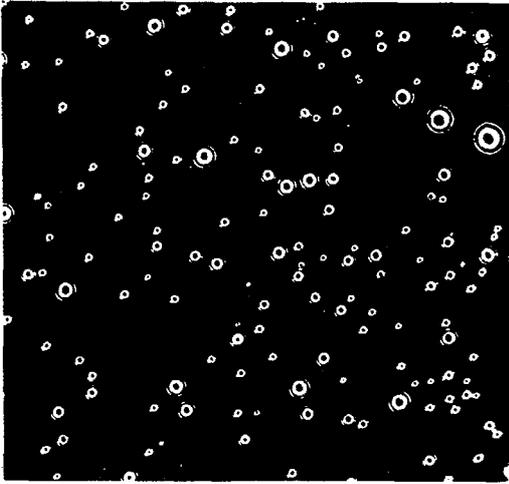


Figure 3. Exemple d'échantillon de population de bulles

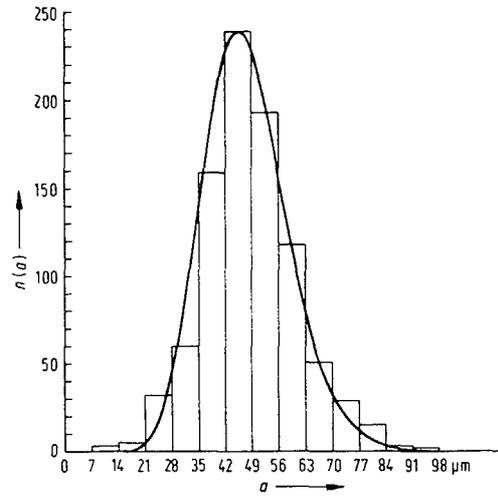


Figure 4. Analyse granulométrique d'une population de bulles - Histogramme de tailles et adaptation à une distribution GAMMA

Pression en amont de la tuyère P en bar	angle d'ouverture de la vanne d'injection des bulles θ en degrés	température de l'eau C°	Caractéristiques de l'histogramme de tailles des bulles mesurées et taux de vide du milieu diphasique			
			rayon moyen des bulles \bar{a} μm	écart-type σ μm	nombre de bulles $10^6/\text{m}^3$	taux de vide τ 10^{-5}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
5,90	97,5	18,5	44,13	13,14	110,02	5,04
5,75	90	18,5	46,33	12,92	82,27	4,26
5,67	80	18,5	43,40	11,53	50,59	2,11
5,50	70	18	38,99	13,68	138,55	4,78
4,90	60	19	45,60	10,54	55,51	2,57
4,60	75	19,5	43,42	12,54	82,93	3,59
4,30	80	19	39,13	11,81	88,83	2,87
4,00	90	19	41,50	11,65	109,03	4,07
3,67	90	19,5	43,37	11,22	87,11	3,58
3,10	105	19,2	42,47	11,48	102,86	4,06

Tableau I

Résultats d'étalonnage du milieu diphasique pour 10 pressions

Tableau III
Paramètres de la loi d'adaptation à une distribution Gamma des histogrammes de tailles de bulles.

Angle d'ouverture de la vanne d'injection des bulles θ degrés	Paramètres de la loi Gamma adaptée à des histogrammes de 18 intervalles de classes de tailles de bulles			N_0^* corrigé pour une adaptation par unité de volume ¹
	N_0	A	B	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
60	$1,286 \cdot 10^{-5}$	24,49	4,66	12
75	$2,694 \cdot 10^{-1}$	13,025	2,86	190
90	$7,945 \cdot 10^{-3}$	15,18	2,89	700
120	$5,641 \cdot 10^{-1}$	11,71	2,57	750
150	$2,625 \cdot 10^{-1}$	11,80	2,51	1200
180	11,71	7,86	2,04	117 000
210	28,09	6,04	1,57	240 000
240	85,84	4,635	1,47	208 000
4 tours	352,59	5,20	4,95	17 200 000

¹ La valeur de N_0 corrigé pour une adaptation par unité de volume correspond à des tailles de bulles comprises entre 0 et 200 μm . Cette valeur dépend du pas d'échantillonnage, donc des intervalles des classes qui en résultent sur la courbe de distribution. Les valeurs données dans la colonne 5 correspondent à 1000 intervalles.

Tableau II
Résultats d'étalonnage du milieu diphasique pour 6 angles d'ouverture de vanne.

Angle d'ouverture de la vanne d'injection des bulles θ degrés	Caractéristiques de l'histogramme de tailles des bulles mesurées et taux de vide du milieu diphasique				Application du facteur de correction $F = 4/5$ au rayon moyen des bulles		Vitesse de phase des ondes acoustiques BF 15 kHz c m/s	Taux de vide calculé à partir de c τ_c 10^{-5}
	rayon moyen des bulles \bar{a} μm	écart-type σ μm	nombre de bulles $10^6/\text{m}^3$	taux de vide τ 10^{-5}	rayon moyen corrigé \bar{a}_c μm	taux de vide corrigé τ_c 10^{-5}		
(1)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
60	56,2	11	29	2,42	41,76	1,24	1372	1
90	53,26	16,53	63	5,22	42,61	2,67	1249	2,5
120	49,18	14,77	107	4,88	39,34	2,5	1300	1,9
150	50,2	17,25	115	8,39	40,16	4,29	1105	5,2
180	45,43	17,91	249	14,9	36,34	7,63	985	8,15
210	41,79	19,53	445	23,3	33,43	11,9	880	11,8



PROPAGATION ACOUSTIQUE DANS UN MILIEU DIPHASIQUE EAU-BULLES D'AIR
 APPLICATION A LA CARACTERISATION D'UN MILIEU DIPHASIQUE PAR VOIE ACOUSTIQUE.

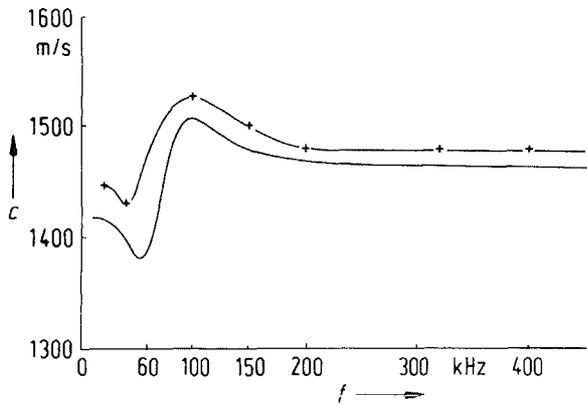


Figure 5 - Courbes de variations de la vitesse de phase C en fonction de la fréquence pour un taux de vide = $1,24 \cdot 10^{-5}$

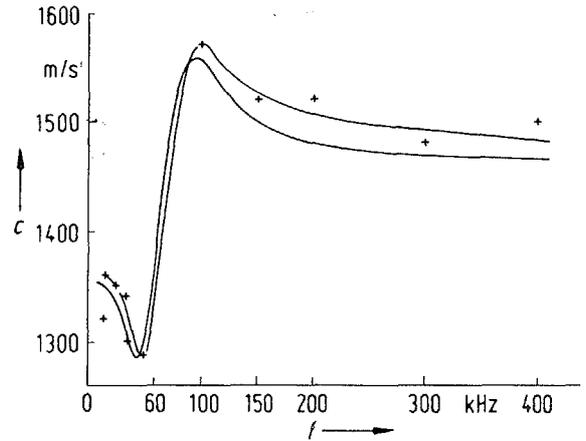


Figure 6 - Courbes de variations de la vitesse de phase C en fonction de la fréquence pour un taux de vide = $2,67 \cdot 10^{-5}$

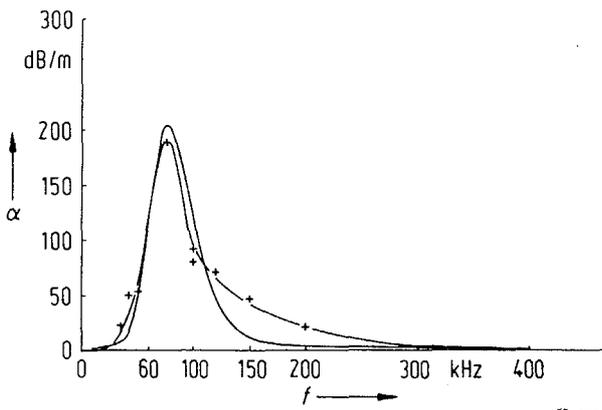


Figure 7 - Courbes d'atténuation en fonction de la fréquence pour un taux de vide = $1,24 \cdot 10^{-5}$

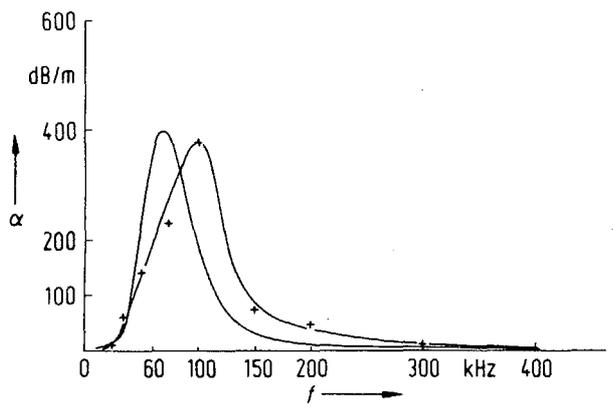


Figure 8 - Courbes d'atténuation en fonction de la fréquence pour un taux de vide = $2,67 \cdot 10^{-5}$

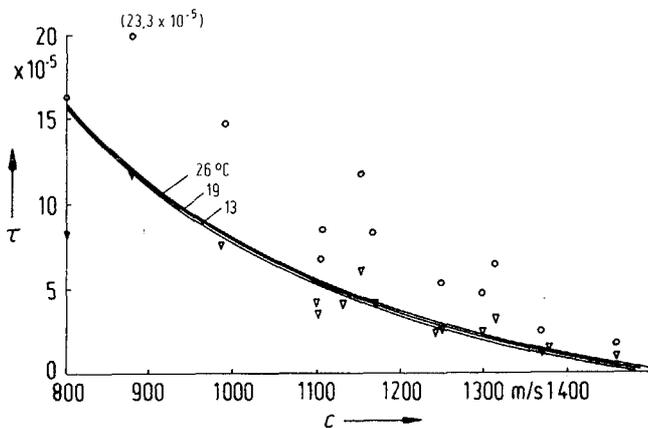


Figure 9 - Courbes de variations du taux de vide en fonction de la vitesse de propagation BF
 (ooo) taux de vide de l'échantillon
 (VVV) taux de vide corrigé