

MODULATIONS D'AMPLITUDE ET DE PHASE D'UNE ONDE ACOUSTIQUE APRÈS TRAVERSÉE D'UN JET TURBULENT

par Ph. BLANC-BENON et D. JUVÉ (*)

RÉSUMÉ

On présente des résultats expérimentaux concernant les fluctuations d'amplitude et de phase d'une onde acoustique monochromatique ayant traversé un volume de turbulence dont les caractéristiques sont bien maîtrisées. L'allure des densités spectrales énergétiques et des densités de probabilité est comparée aux prédictions théoriques.

SUMMARY

Measurements of amplitude and phase fluctuations of a monochromatic acoustic wave propagating through a large turbulent jet are presented for well defined experimental conditions. Power spectral densities and probability distributions are compared with theoretical results.

INTRODUCTION

Des mesures *in situ* (Escudié *et al.* [1]) ont montré que lors de la propagation d'ondes acoustiques de fréquences inférieures à 1 ou 2 kHz sur des distances de quelques centaines de mètres, des fluctuations très importantes de niveau, de l'ordre de 10 dB, pouvaient être enregistrées, suivant les conditions météorologiques.

(*) Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Aéroacoustique, (Laboratoire associé au C.N.R.S.), École centrale de Lyon, 69130 Écully.

L'étude que nous avons entreprise a pour but d'isoler le rôle de la turbulence cinématique, et de préciser son importance, dans des conditions de laboratoire parfaitement contrôlées et restant significatives de la réalité.

1. CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Afin d'obtenir des ordres de grandeurs des rapports λ/l et λ/x (λ , longueur d'onde; l , échelle de corrélation de la turbulence; x , distance traversée) comparables à ceux rencontrés en propagation atmosphérique, nous utilisons un faisceau ultrasonore monochromatique dont la fréquence peut varier entre 20 et 100 kHz. Il est dirigé perpendiculairement à la direction de la vitesse moyenne d'un jet turbulent pleinement développé débouchant dans une chambre anéchoïque. Les principales caractéristiques de l'écoulement sont les suivantes :

- vitesse moyenne U variable entre 4,9 et 11 m/s;
- valeur efficace des fluctuations turbulentes σ_u variable entre 1 et 2,5 m/s;
- échelle de corrélation 6,5 cm et distance traversée $x=1$ m.

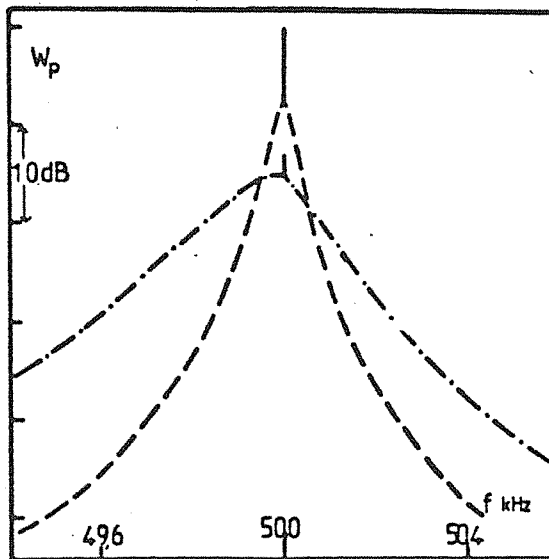


Fig. 1. — Spectres du signal de pression. $f_0=50$ kHz; --- $u=4,9$ m/s;
- - - $u=11$ m/s.

Enfin le nombre de Reynolds turbulent relativement élevé (voisin de 500) conduit à un spectre des fluctuations de vitesse possédant une zone inertielle nettement marquée (loi en $k^{-5/3}$ de Kolmogorov).

Le signal de pression acoustique recueilli après traversée du volume turbulent est à bande étroite et présente de fortes modulations d'amplitude et de phase. Sur la figure 1 on a reporté deux densités spectrales $W_p(f)$ caractéristiques obtenues pour une fréquence d'émission f_0 de 50 kHz et deux valeurs de la vitesse moyenne. On note la décroissance très rapide de la raie initiale, pouvant aller jusqu'à l'extinction complète, au profit d'un spectre continu dont la largeur (à -10 dB) varie de quelques dizaines de Hertz à 1 kHz dans nos expériences.

Le signal de pression peut être représenté sous l'une des deux formes suivantes :

$$p(t) = E(t) \exp(i 2 \pi f_0 t);$$

$$p(t) = A(t) \exp(i S(t)) \exp(i 2 \pi f_0 t),$$

où E , A et S sont des fonctions du temps lentement variables par rapport à $\exp(i 2 \pi f_0 t)$. On dispose alors de deux descriptions complémentaires de la distorsion de l'onde initiale, en termes des moments du champ E ou en termes d'amplitude et phase A et S . Nous donnons ici des résultats obtenus suivant la seconde approche en un point de l'axe du faisceau. Nous référant à la méthode de Rytov [2], nous nous intéressons plus précisément aux fluctuations de l'iconale

$$\psi - \psi_0 = \ln A/A_0 + i(S - S_0),$$

où l'indice 0 caractérise les valeurs de référence relevées en l'absence de turbulence. Le signal étant hétérodyné autour de 5 kHz, le log amplitude $\chi = \ln A/A_0$ est obtenu classiquement par redressement et filtrage passe-bas à 3 kHz. La phase non limitée à l'intervalle $(-\pi, +\pi)$ est quant à elle déterminée par traitement informatique en comparant les passages à zéro de $p(t)$ et d'une sinusoïde de référence.

2. PRINCIPAUX RÉSULTATS

Nous donnons ici des résultats concernant l'allure spectrale des fluctuations d'amplitude et de phase, ainsi que leurs densités de probabilité.

2.1. Densités spectrales de puissance

La figure 2 montre deux densités spectrales $W_x(f)$ obtenues pour les deux vitesses extrêmes 4,9 et 11 m/s. On constate la présence de deux asymptotes : l'une horizontale en basses fréquences, l'autre de pente $-8/3$ en hautes

fréquences. Ces asymptotes correspondent aux prévisions théoriques fondées sur la méthode de Rytov (Ishimaru [3]) bien que nous soyons dans un régime de fluctuations relativement importantes. L'influence de la vitesse moyenne se traduit essentiellement par un décalage en bloc du spectre, ce qui est conforme à l'hypothèse de Taylor d'une turbulence gelée et défilant devant l'observateur avec une vitesse U . Les différences de forme en hautes fréquences proviennent de la variation avec U de l'étendue de la zone inertielle.

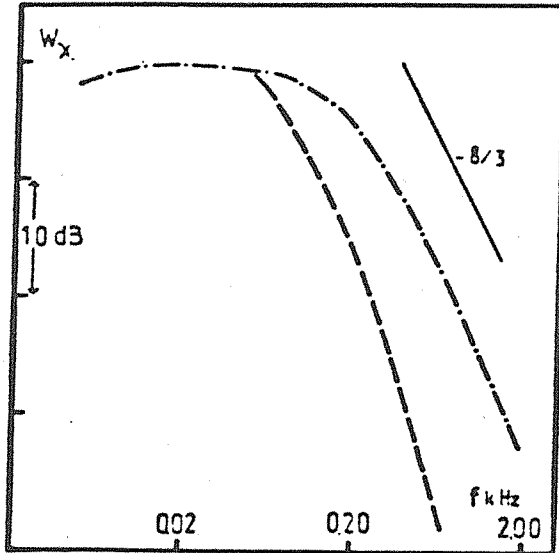


Fig. 2. — Spectres des fluctuations du log amplitude x . $f_0 = 50$ kHz;
 --- $u = 4,9$ m/s; - . - $u = 11$ m/s.

La figure 3 montre que les mêmes asymptotes sont présentes pour les fluctuations de phase. Remarquons toutefois que la théorie [3] ne prévoit pas correctement le comportement de la phase en basses fréquences, car les échelles turbulentes responsables de ces fluctuations n'appartiennent plus à la zone inertielle du spectre. En effet celles-ci sont de l'ordre de l'échelle externe de la turbulence, tandis qu'elles sont de l'ordre du rayon de la première zone de Fresnel $\sqrt{\lambda x}$ pour les fluctuations d'amplitude.

2.2. Densités de probabilité

En ce qui concerne la phase, les premières mesures que nous avons effectuées semblent montrer que celle-ci suit une loi normale dès que la raie

initiale est suffisamment atténuée. A 50 kHz et 4,9 m/s on obtient par exemple un coefficient de dissymétrie inférieur à 0,1 et un coefficient d'aplatissement voisin de 2,9 pour un écart-type σ_s de 60° ; ces mesures doivent cependant être considérées comme préliminaires.

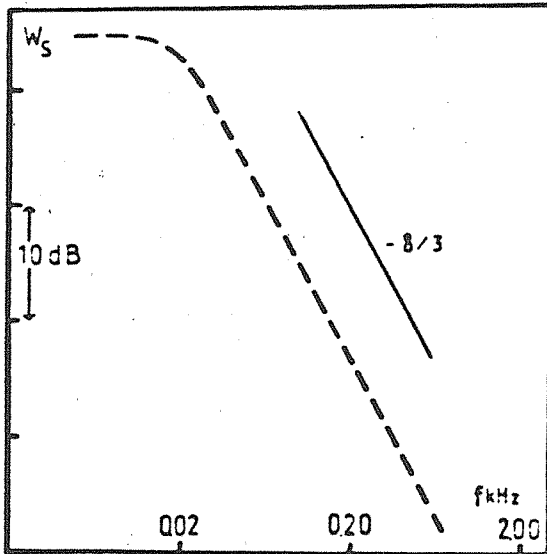


Fig. 3. — Spectre des fluctuations de phase S. $f_0 = 50$ kHz, $u = 4,9$ m/s.

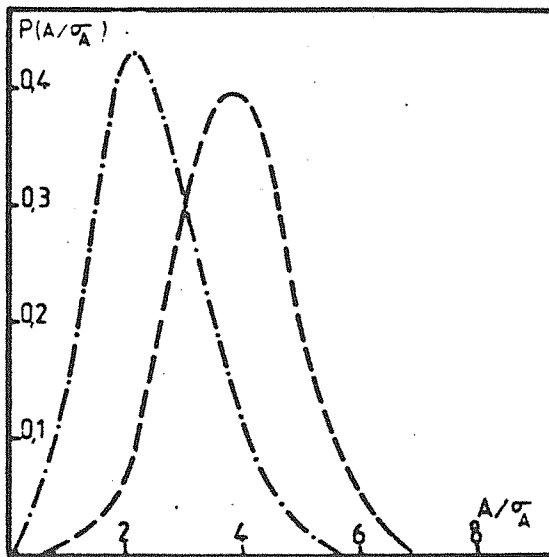


Fig. 4. — Densités de probabilité de l'amplitude A. $f_0 = 50$ kHz;
 - - - $u = 4,9$ m/s; - · - $u = 11$ m/s.

Pour ce qui est de l'amplitude, la figure 4 donne deux distributions typiques $P(A)$. Pour la valeur la plus faible de la vitesse la courbe paraît sensiblement gaussienne; avec l'augmentation du taux de turbulence la valeur moyenne de l'amplitude A décroît au profit des fluctuations tandis que la densité de probabilité se dissymétrise nettement. L'examen détaillé des divers cas montre que les lois proposées classiquement, loi de Rice-Nakagami ou loi log-normale (Strohbehn *et al.* [4]) ne conviennent pas dans nos essais. Des premières études sur les composantes basses fréquences en phase et en quadrature du signal de pression indiquant que celles-ci sont gaussiennes et décorréélées, mais d'écart-types distincts, ce qui conduirait à une loi de Beckmann [5] pour l'amplitude.

CONCLUSION

L'intérêt des mesures présentées réside dans le fait que les conditions de propagation sont bien maîtrisées et sont représentatives de l'influence de la turbulence lors de la propagation d'ondes sonores dans l'atmosphère sur des distances de plusieurs centaines de mètres. Les résultats obtenus doivent être considérés comme encore préliminaires notamment en ce qui concerne les fluctuations de phase. Des mesures plus extensives devraient permettre d'évaluer la validité de diverses approches théoriques et d'effectuer des extrapolations au cas de l'atmosphère.

REMERCIEMENTS

Ce travail bénéficie du soutien du Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie, Mission des Études et de la Recherche sous le contrat n° 78-02-067 de l'opération Propagation du Bruit.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. ESCUDIE, J. LARCHER et P. NINGRE, État des recherches sur la propagation aléatoire du son dans l'atmosphère, *Revue d'Acoustique*, vol. 12, n° 51, p. 224-227, 1979.
- [2] Y. N. BARABANENKOV, Y. A. KRAVTSOV, S. M. RYTOV et V. I. TATARSKII, Status of the theory of propagation of waves in a randomly inhomogeneous medium, *Soviet Physics Acoustics*, vol. 13, n° 5, p. 551-575, 1971.

- [3] A. ISHIMARU, *Wave propagation and scattering in random media*, vol. 2, Academic Press, New York, 1978.
- [4] J. W. STROHBEHN, T. WANG et J. P. SPECK, On the probability distribution of line of sight fluctuations of optical signals, *Radio Science*, Vol. 10, n° 1, p. 59-70, 1975.
- [5] P. BECKMANN et A. SPIZZICHINO, *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*, Pergamon Press, New York, 1963.