

Etude de l'Influence du Temps de Réponse de la Sonde d'Interférence en Mesures Simultanées par Thermo-Anémométrie à Fil et Film Chauds dans un Mélange Air/Hélium

Azeddine Soudani ¹, Saadi Bougoul ¹ et Jean-Luc Harion ²

¹Département de physique, Faculté des Sciences, Université de Batna Batna, Algérie

²Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels BP.53X 38041 Grenoble Cedex - France

Résumé – l'influence de la réponse dynamique de la sonde d'interférence est étudiée dans le cas des mesures simultanées des valeurs moyennes et fluctuantes de vitesse et de concentration dans un mélange air/hélium en écoulement turbulent. En effet, un critère de choix des instruments de mesure portant sur une meilleure réponse en fréquence, est primordial. On montre dans la présente étude que l'écartement des l'iso-concentrations est bien provoqué par la différence entre les réponses du fil et du film. En effet, les points situés loin de la courbe attendue correspondent principalement à un déficit en tension du film pendant la phase d'augmentation des tensions des deux éléments. Ceci est d'autre part confirmé par les spectres de tensions réalisés pour $y/\delta = 0,24$.

Abstract – the influence of the dynamic response of the interference probe is studied in the case of simultaneous measurements of the average and fluctuating values of velocity and concentration in a turbulent flow of an air/helium mixture. Indeed, a selection criterion of the measuring instruments relating to a better frequency response, is of primary importance. We show in the present study that the spacing of the concentration curves is well caused by the difference between the wire and the film response. Indeed, the points located far from the awaited curve mainly correspond to a deficit in tension of the film during the phase of increase in the tensions of the two elements. In addition this is confirmed by the spectra of tensions carried out for $y/\delta = 0,24$.

Mots clés: Fréquence – Réponse dynamique – Spectres de tensions – Inertie thermique – Mesures simultanées – Sonde d'interférence – Thermo-anémométrie – Fil – Film chauds – Mélange de gaz – Ecoulement turbulent – Densité variable.

1. INTRODUCTION

Les étalonnages statiques réalisés sur une sonde d'interférence donnent des résultats satisfaisants. Cependant, pour une étude en écoulement turbulent, il est essentiel de connaître les caractéristiques dynamiques et principalement le temps de réponse des éléments de la sonde. Un fil ou un film chaud n'est pas uniquement sensible à la vitesse de convection de l'écoulement ; sa réponse est également affectée principalement par la température ambiante et par les propriétés physiques de fluide. Ainsi, dans le cas qui nous intéresse, l'écoulement étant sensiblement isotherme, la tension délivrée par l'anémomètre associée au fil/film dépend à la fois de la vitesse et de la composition du mélange. En effet, pour mener à bien les mesures de vitesse et de concentration dans le mélange turbulent air/hélium, un des critères importants de choix des instruments de mesure porte sur une bonne réponse en fréquence. Ce critère conduit à porter le choix des instruments de mesure sur des techniques thermo-anémométriques, en utilisant une sonde d'interférence double à fil et film chauds.

L'objectif du présent article est d'analyser le fonctionnement et d'examiner les possibilités d'étendre le domaine d'emploi de ce type de sonde en étudiant l'influence du temps de réponse des éléments de la sonde sur les résultats de mesure obtenus.

2. PRINCIPE DE LA SONDE D'INTERFERENCE

La sonde d'interférence est constituée de deux éléments sensibles (un fil et un film) placés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre ainsi que par rapport à l'écoulement. Un schéma de la sonde DANTEC, inspirée des travaux de Way et Libby [7, 8], est présenté sur la figure 1. Son principe de fonctionnement (Fig. 1) repose sur l'influence exercée par le film chaud sur le fil placé en amont [6, 7, 8]. La faible distance entre les deux éléments sensibles ($\approx 25\mu m$) et la taille du film ($d_{film} \approx 70\mu m$) font que le fil se trouve dans son champ thermique. La puissance thermique échangée par convection entre le fil chaud et l'écoulement dépend de la température qui lui est imposée par l'anémomètre et du champ thermique dans lequel il est émergé. Ce dernier est directement lié à la température de surchauffe du film.

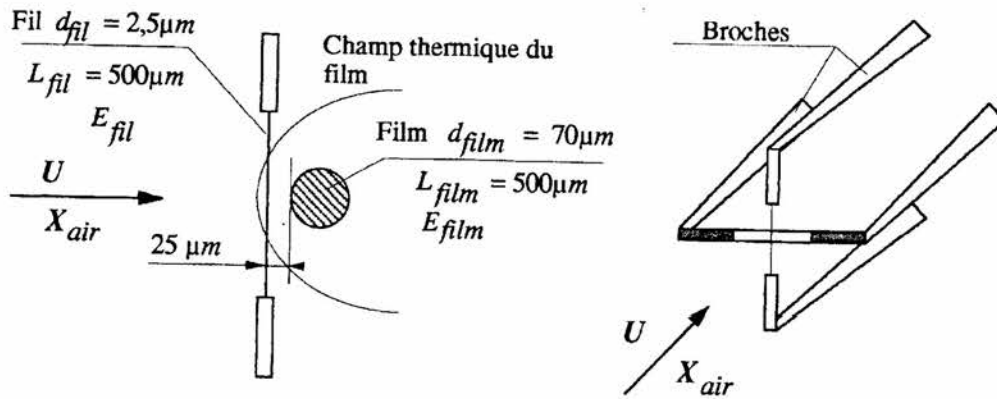


Fig. 1: Principe de la sonde d'interférence.

L'extension du champ thermique vers l'amont peut être caractérisée par une longueur typique ξ . En première approximation, cette longueur est déterminée par un équilibre entre la convection (vitesse U) et la diffusion longitudinale de chaleur dans le fluide (diffusivité thermique du mélange α). On a alors :

$$U \frac{\Delta T}{\xi} \sim \alpha \frac{\Delta T}{\xi^2} \quad \text{soit } \xi \sim \frac{\alpha}{U}$$

Le film, par sa proximité, influence donc la réponse du fil. Par contre, en raison de la faible taille du fil et de sa surchauffe modérée, celui-ci n'affecte pas la réponse du film. Ce principe de fonctionnement est celui initialement utilisé par Way et Libby [7, 8]. Cependant, comme nous allons le voir par la suite, les surchauffes appliquées aux deux éléments sensibles jouent un rôle très important dans le comportement de la sonde.

3. INFLUENCE DU TEMPS DE REPONSE DE LA SONDE D'INTERFERENCE

En mesures simultanées par thermo-anémométrie à fil et film chauds dans un mélange air/hélium, les aspects statiques de séparation vitesse/concentration n'assurent pas à seuls une bonne mesure. En effet, il est essentiel que la sonde ait un bon comportement dynamique ; c'est pourquoi nous allons, dans cet article, nous intéresser à cette caractéristique.

Les premières mesures réalisées en soufflerie ont mis en évidence une faible fluctuation apparente de densité induite par la sonde. La figure 2 présente les profils de fluctuations de densité obtenus pour les deux configurations de surchauffe, à $x = 1\text{ mm}$ en aval de l'injection dans des conditions expérimentales identiques à celles décrites sur la figure 3. Lorsque la

sonde est positionnée bien au-dessus de l'injection ($y/e \gg 1$), la fluctuation de densité mesurée vaut environ $\sqrt{\rho'^2}/\bar{\rho} \approx 2\%$ alors que la sonde est située dans une zone homogène de l'écoulement.

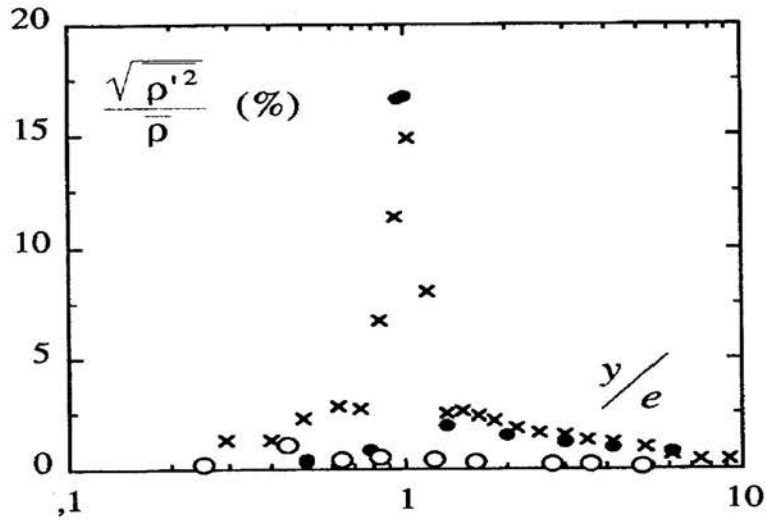


Fig. 2: Profils de fluctuations de densité mesurées par la sonde d'interférence à 1 mm en aval de l'injection d'hélium.
 x: $T_{\text{fil}} = 250\text{ °C}$, $T_{\text{film}} = 100\text{ °C}$, •: $T_{\text{fil}} = 75\text{ °C}$, $T_{\text{film}} = 175\text{ °C}$
 o: LaRue et Libby [2]

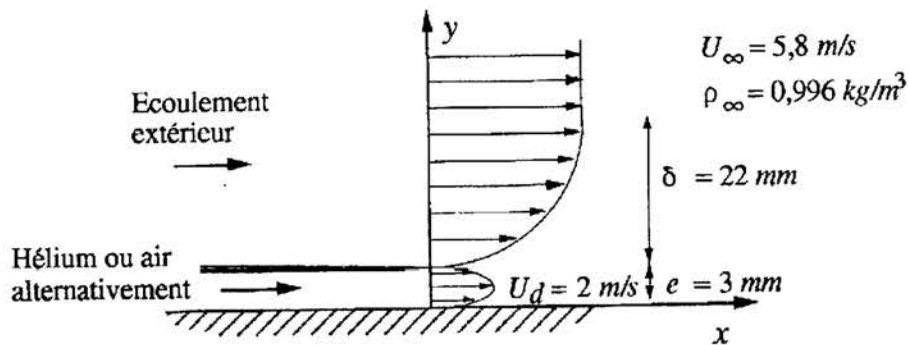


Fig. 3: Configuration et paramètres d'écoulement: Conditions expérimentales.

Cette fluctuation parasite est attribuée à la différence entre les temps de réponse du fil et du film. Pour vérifier cette affirmation, un profil a été réalisé sur la plaque supérieure, en amont de l'injection ($x = -10\text{ mm}$), pour $U_\infty = 11.6\text{ m/s}$ et $X_{\text{air}\infty} = 0.8$. Les profils de fluctuations de vitesse et de densité obtenus dans cette zone sont présentés sur la figure 4 (L'origine verticale est ici prise sur la plaque supérieure). Outre la présence d'une fluctuation de densité d'environ 2%, cette figure met en évidence l'influence des variations de vitesse sur la mesure de cette grandeur. Les profils relatifs aux fluctuations de vitesse et de densité ont, en effet, la même allure.

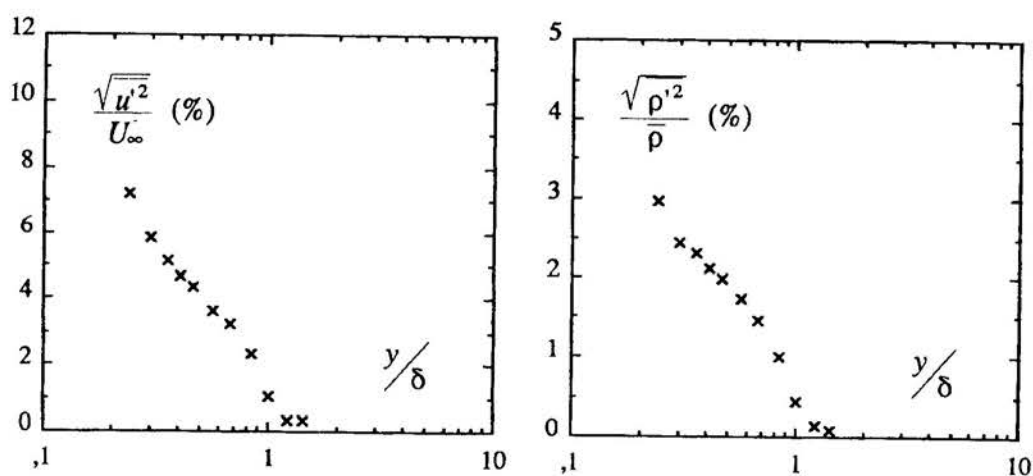


Fig. 4: Profil de fluctuations de vitesse et de densité mesurées par la sonde d'interférence à 10 mm en amont de l'injection d'hélium.
 $U_\infty = 11,6 \text{ m/s}$, $X_{air\infty} = 0,8$; $T_{fil} = 250^\circ\text{C}$, $T_{film} = 100^\circ\text{C}$

La figure 5 représente séparément les tensions du fil et du film en fonction du temps sur un intervalle de 12 ms représentatif des phénomènes observés, ainsi que leur retranscription dans le plan d'étalonnage (E_{fil} , E_{film}).

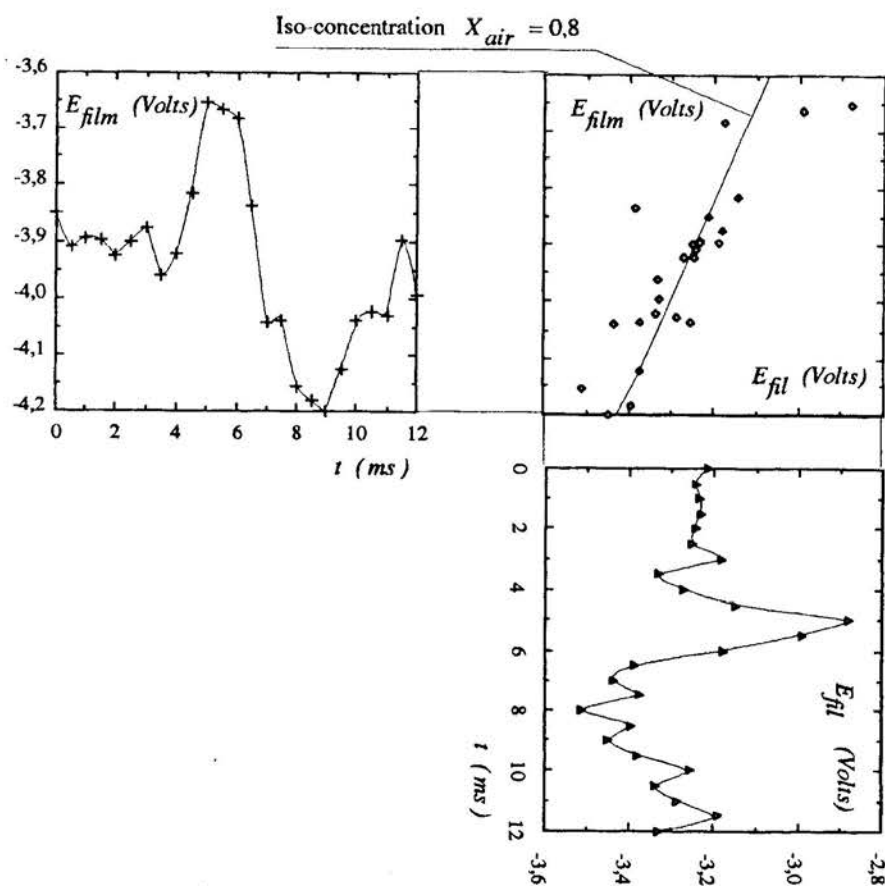


Fig. 5: Visualisation des signaux délivrés par le fil et le film.

$U_\infty = 11,6 \text{ m/s}$, $X_{air\infty} = 0,8$; $T_{fil} = 250^\circ\text{C}$, $T_{film} = 100^\circ\text{C}$

Cette figure montre la réponse des deux éléments sensibles à un événement (fluctuation importante de vitesse) d'une durée de l'ordre de 4 ms . Elle permet de constater que l'écartement de l'iso-concentration $X_{\text{air}} = 0,8$ est bien provoquée par la différence entre les réponses du fil et du film. En effet, les points situés loin de la courbe attendue correspondent principalement à un déficit en tension du film pendant la phase d'augmentation des tensions des deux éléments. Ceci est d'autre part confirmé par les spectres de tension réalisés pour $y/\delta = 0,24$ (Fig. 6). L'atténuation du signal du film rapportée à celle du fil débute à environ 100 Hz pour atteindre 5 dBR à 1000 Hz .

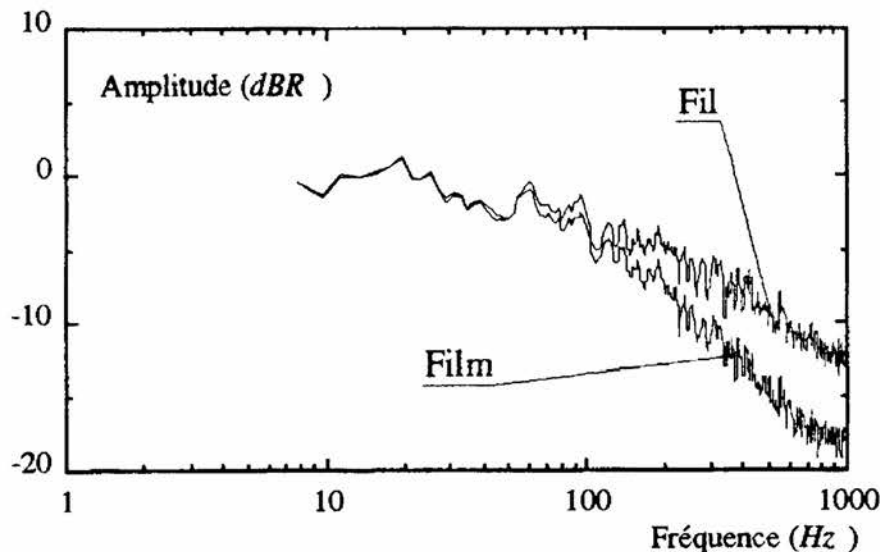


Fig. 6: Spectres de tension du fil et du film de la sonde d'interférence.
 $x = -10\text{ mm}$ (plaque supérieure), $y/\delta = 0,24$; $U_{\infty} = 11,6\text{ m/s}$,
 $X_{\text{air}\infty} = 0,8$; $T_{\text{fil}} = 250^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{film}} = 100^{\circ}\text{C}$

Le filtrage peut être dû principalement à trois phénomènes:

- L'inertie thermique du film
- La taille du film par rapport aux petites structures
- La géométrie particulière de la sonde (90° entre les deux éléments).

Tout d'abord, en ce qui concerne l'inertie thermique du film, son temps de réponse à un pic de tension (réglage dynamique des voies d'anémomètre AALAB) est de l'ordre de $0,1\text{ ms}$ et d'amplitude comparable à celle du fil. Cependant, l'application d'un pic de tension (et non d'un signal échelon) provoque une brusque variation de la température du film mais ne touche, par diffusion, qu'une faible épaisseur dans le barreau de quartz sur lequel est déposé le film. Ceci explique peut-être que son temps de réponse déterminé par l'application de pics de tension est comparable à celui du fil malgré un diamètre nettement plus important. Il est clair que cette détermination ne correspond pas vraiment au temps de réponse de la sonde à des fluctuations de l'écoulement. Cette cause de filtrage semble pouvoir être écartée pour les plus faibles fréquences, mais n'est cependant pas à exclure pour les plus élevées.

D'autre part, pour ce qui est de la taille du film, la réponse des deux éléments pour une structure de taille plus petite que le diamètre du film est schématisée sur la figure 7. Dans ce cas, la zone de survitesse n'influence pas globalement le film, sa réponse n'atteint donc pas ce qu'elle serait si celui-ci était soumis dans sa totalité à la même augmentation de vitesse. Ceci

pourrait également expliquer les différences observées entre les signaux présentés sur la figure 5. Cependant, un calcul d'ordre de grandeur de la taille des petites structures pour $U_\infty = 12 \text{ m/s}$ et une longueur caractéristique $\delta = 18 \text{ mm}$ donne $\eta\kappa = 90 \mu\text{m}$ dans l'air et $430 \mu\text{m}$ dans l'hélium.

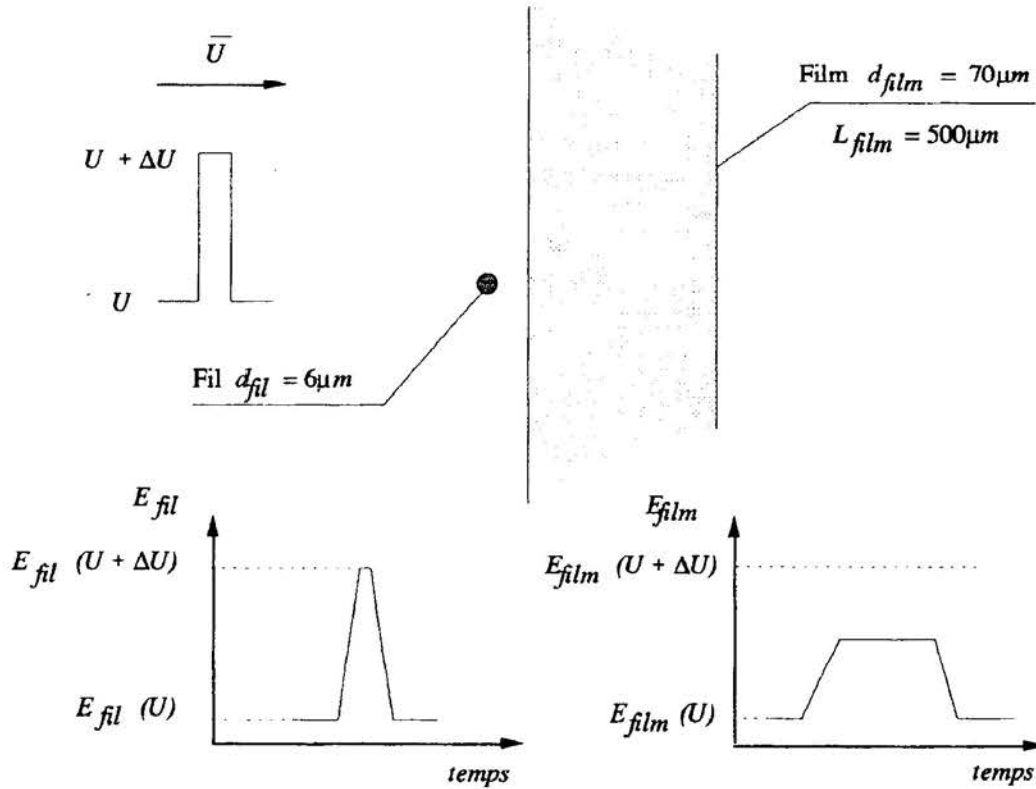


Fig. 7: Schéma de la réponse du fil et du film à une structure de taille plus petite que le diamètre du film.

Ce résultat ne valide pas l'hypothèse de structures nettement plus petites que le diamètre du film. De plus, les longueurs du fil et du film sont sensiblement les mêmes et restent, en unités pariétales, inférieures à 20. Enfin, pour le troisième point, il est important de noter que les mesures présentées ici ont été réalisées en plaçant les deux éléments horizontalement (fil) et verticalement (film) dans l'écoulement. Une rotation de 90° n'affecte en rien les résultats concernant les fluctuations de densité et de vitesse. Pour ce positionnement particulier, les deux éléments ne sont pas sensibles à la même vitesse effective. Pour l'élément horizontal, celle-ci est essentiellement liée aux composantes U et V ; tandis que pour le second, elle dépend principalement de U et W . Les allongements relativement faibles du fil et du film les rendent également sensibles à la troisième composante (qui leur est parallèle), mais l'influence de cette dernière est fortement atténuée. Dans une couche limite turbulente, par exemple pour une éjection ($u' < 0, v' > 0$), l'effet de la fluctuation v' sera inclus à la vitesse effective pour l'élément horizontal et fortement atténué pour l'élément vertical. Ceci peut aboutir au même type de signaux que ceux présentés sur la figure 5. L'éloignement de l'iso-concentration observé sur cette dernière figure pourrait ainsi être lié à la géométrie particulière de la sonde. Ceci expliquerait également la similitude entre les profils de fluctuation de vitesse et de densité (Fig. 4). La remarque précédente est en partie confirmée par le spectre de densité (Fig. 8 (a)) correspondant aux spectres de tensions du fil et du film présentés sur la figure 6. Il apparaît qu'une contribution importante de la fluctuation ρ' est mesurée pour des fréquences

allant d'environ 60 à 500 Hz, ce qui correspond approximativement aux plus grosses structures.

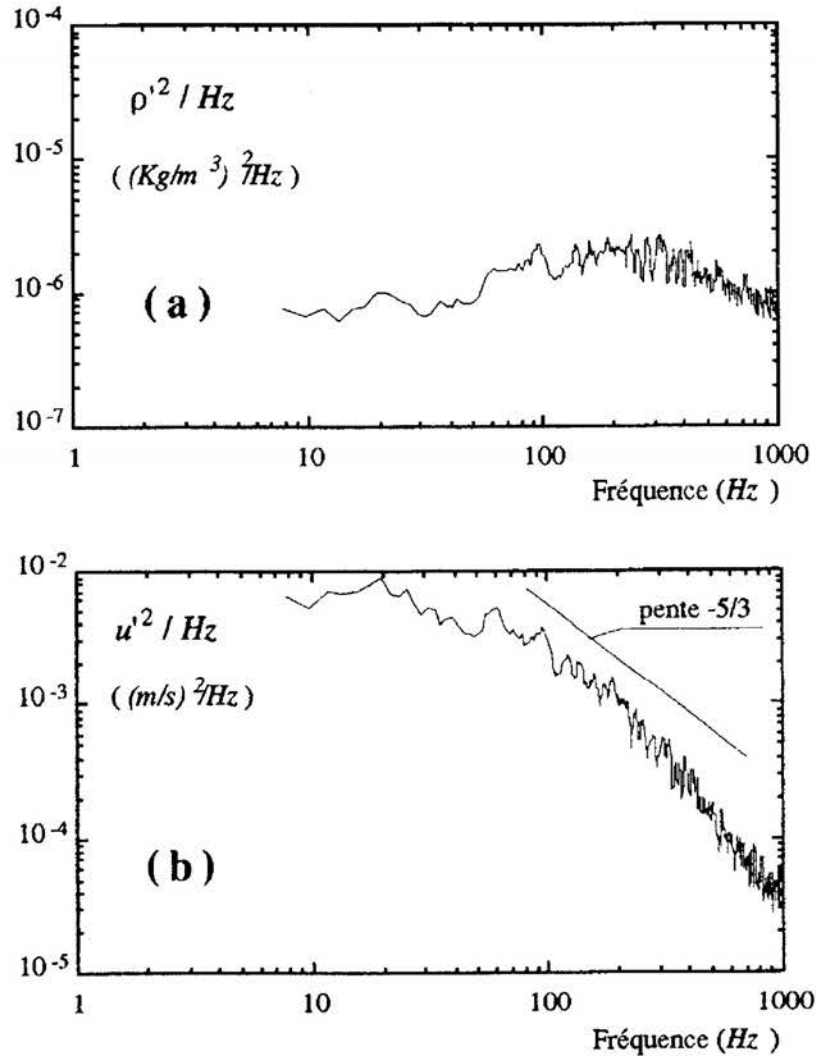


Fig. 8: Spectres de densité ((a)) et de vitesse ((b)) mesurés par la sonde d'interférence. $x = -10 \text{ mm}$ (plaque supérieure), $y/\delta = 0,24$;
 $U_\infty = 11,6 \text{ m/s}$, $X_{air\infty} = 0,8$; $T_{fil} = 250^\circ\text{C}$, $T_{film} = 100^\circ\text{C}$

Toutefois, une comparaison des spectres de densité et de vitesse montre une augmentation du rapport ρ'^2 / u'^2 avec la fréquence. Il n'est donc pas exclu que l'inertie thermique du film influence la fluctuation de densité mesurée pour les plus fortes fréquences. Le spectre de vitesse ne semble pas quant à lui être affecté de façon significative par ce biais. Pour ce qui est de la densité moyenne, l'erreur induite, estimée pour un profil à $x = -10 \text{ mm}$ en écoulement homogène, est inférieure à 2%.

4. CONCLUSION

En conclusion, les fluctuations de densité apparentes mesurées peuvent être attribuées:

- Pour les plus faibles fréquences, à l'angle entre les deux éléments sensibles qui entraîne une perception différente des fluctuations de vitesse du fil et du film. Ceci est lié aux

plus grosses structures de l'écoulement.

- Pour les plus fortes fréquences, à l'inertie thermique du film comparée à celle du fil.

Pour atténuer les effets de ces phénomènes, une première solution serait de diminuer l'angle entre le fil et le film ainsi que le diamètre de ce dernier (par exemple $25\mu\text{m}$). Ces modifications conduiraient à rendre les deux éléments sensibles à la même vitesse effective et à améliorer le comportement dynamique du film. Ces remarques conduisent à concevoir une sonde proche de celle utilisée par Sirivar et Warhaft [5] ainsi que par Pancharpakesan et Lumley [4] tout en gardant des diamètres différents pour les deux éléments. Cette dernière caractéristique est en effet importante car, comme nous l'avons montré, elle constitue le point essentiel pour une bonne séparation vitesse/concentration.

NOMENCLATURE

d :	Diamètre	E :	Tension délivrée par les anémomètres
k :	Conductivité thermique	L :	Longueur des éléments sensibles (fil/film)
T :	Température	U, u' :	Composante longitudinale de la vitesse
X :	Fraction molaire	μ :	Viscosité dynamique
ρ :	Masse volumique	ξ :	Longueur typique de diffusion amont
α :	Diffusivité thermique	δ :	Epaisseur de la couche limite pour $U = 0.99U_\infty$

Indices

$()_{fil}$:	Fil chaud	$()_\infty$:	Conditions ambiantes
$()_{film}$:	Film chaud		

REFERENCES

- [1] D. C. Collis and M. J. Williams, "Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers", *J. Fluid Mech.* 6 (1959) 357-384.
- [2] J. C. LaRue and P. A. Libby, "Measurements in the turbulent boundary layer with slot injection of helium", *Phys. Fluids* 20 (2) (1977) 192-202.
- [3] J. C. LaRue and P. A. Libby, "Further results related to the turbulent boundary layer with slot injection of helium" *Phys. Fluids*. 23(6) (1980) 1111-1118.
- [4] N. R. Panchapakesan and J. L. Lumley, "Turbulence measurements in axisymmetric jets of air and helium. Part 2. helium jets", *J. Fluid Mech.* 246 (1993) 225-247.
- [5] A. Sirivat and Z. Warhaft, "The mixing of passive helium and temperature fluctuations in grid turbulence", *J. Fluid Mech.* 120 (1982) 475-504.
- [6] R. A. Stanford and P. A. Libby, "Further applications of hot-wire anemometry to turbulence measurements in turbulent mixtures", *Phys. Fluids*. 17(7) (1974): 1353-1361.
- [7] J. Way, and P. A. Libby, "Hot wire probes for measuring velocity and concentration in helium-air mixtures", *A.L.A.A.J.* 8(5) (1970) 976-978.
- [8] J. Way, and P. A. Libby, "Application of hot wire anemometry and digital techniques to measurements in a turbulent jet", *A.L.A.A.J.* 9(8) (1971) 1567-1573.