

Etude de l'Influence des Surchauffes Appliquées en Mesures Simultanées par Thermo - Anémométrie à Fil et Film Chauds dans un Mélange Air/ Hélium

Azeddine Soudani¹, Saadi Bougoul¹ et Jean-Luc Harion²

¹Département de physique, Faculté des Sciences, Université de Batna Rue Chadid Mohamed El Hadi Boukhrouf, Batna, Algérie

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

Abstract – *In the present study a thermo anemometric interference probe of a hot wire and a hot film is proposed for simultaneous measurements of velocity and concentration in a turbulent flow of an air/helium mixture. In addition to the average values, the turbulent fluctuations and their correlations represent essential quantities to understand and try to model the transfer mechanisms. A judicious choice of the instruments is critical for a well measurement of these quantities. The first selection criterion of the measuring instruments is related to a better frequency response. A second significant criterion is related to the size of the probes which must be most reduced as possible in order to limit the disturbances brought to the flow. With these two considerations a third is added, rather of a practical nature, which consists of a good choice of the overheating applied to the probe elements. In the present case, the wire, upstream element, is heated definitely more than the downstream film. For this configuration of overheating, the concentrations curves are clearly dissociated lines. This operating mode makes it possible in particular to extend the velocity range accessible to measurements for mixtures going of the air to helium pure.*

Résumé – *Une sonde d'interférence thermo-anémométrique à fil et film chaud est proposée, dans la présente étude, pour des mesures simultanées de vitesse et de concentration d'un mélange air/hélium en écoulement turbulent. Outre les valeurs moyennes, les fluctuations turbulentes ainsi que leurs corrélations représentent des grandeurs essentielles pour comprendre et tenter de modéliser les mécanismes de transfert. Un choix judicieux des instruments est critique pour une bonne mesure de ces grandeurs. Le premier critère de choix des instruments de mesure porte donc sur une meilleure réponse en fréquence. Un second critère important est lié à la taille des sondes qui doit être la plus réduite possible de façon à limiter les perturbations apportées à l'écoulement. A ces deux considérations s'ajoute une troisième, plutôt d'ordre pratique, qui consiste en un bon choix des surchauffes appliquées aux éléments de la sonde. Dans le présent cas, le fil, élément amont, est nettement plus chauffé que le film aval. Pour cette configuration de surchauffes, les iso-concentrations sont des droites clairement dissociées. Ce mode de fonctionnement permet d'étendre notamment la gamme de vitesses accessibles aux mesures pour des mélanges allant de l'air à l'hélium purs.*

Mots clés: Thermo-anémométrie, - Fil - film chauds - Mélange de gaz - Interférence thermique - Ecoulement turbulent.

1. INTRODUCTION

L'étude d'un mélange de gaz en mouvement nécessite une instrumentation spécifique pour déterminer la composition et la vitesse de l'écoulement. En fluide homogène, la thermo-anémométrie présente de nombreux avantages (faible coût, souplesse d'utilisation, bonne réponse dynamique) et a connu des développements théoriques et pratiques importants [1-4]. Way et Libby [5] ont mis en œuvre ces principes pour concevoir une sonde destinée à des mesures dans des mélanges air/hélium. Les sondes utilisées par ces auteurs mettent en jeu l'interférence thermique entre les éléments chauffés, sensibles simultanément à la vitesse et la concentration de l'écoulement incident. Par un choix judicieux de la géométrie et des surchauffes appliquées, Way et Libby [5] ont montré qu'il est possible de séparer l'influence

de ces deux grandeurs physiques dans la réponse des éléments de la sonde. Ce principe a été repris par Sirivat et Warhaft[1] ainsi que par Panchapakesan et Lumley [6] avec des géométries différentes.

Ces sondes d'interférence ont été employées pour étudier diverses configurations d'écoulements (couches limites, jets), mais leur principe même de fonctionnement rend leur utilisation délicate du fait de la gamme restreinte de vitesses et concentration qu'il est possible d'explorer.

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 des surchauffes appliquées aux éléments de la sonde, en faisant varier la température des éléments chauffés et en particulier en inversant l'importance des surchauffes entre les éléments amont et aval.

2. PRINCIPE DE L'EXPERIENCE

Nos expériences ont pour objectif de contribuer à l'étude de la structure fine de la turbulence pariétale en présence de variations importantes de densité, en analysant l'effet de ces différences de densité sur les changements qui peuvent arriver dans la structure des grandes échelles et sur les mécanismes du mouvement du fluide, en analysant les données expérimentales qu'on a obtenues dans une soufflerie à recirculation.

Le principe de l'expérience consiste à injecter tangentiellement à la paroi dans une couche limite turbulente un gaz de densité différente de celle de l'écoulement externe à travers une fente d'épaisseur $e = 3 \text{ mm}$ formée entre deux plaques (Fig. 1-a). Un tel procédé permet d'engendrer une différence de densité importante. En effet, le développement du jet pariétal est schématiquement constitué de deux zones (Fig. 1-b):

- Une première zone, où la couche limite développée sur la plaque supérieure rencontre l'écoulement de Poiseuille formé dans la fente d'injection. Ceci donne naissance à une couche de mélange se développant jusqu'à atteindre la plaque inférieure. Cette région est caractérisée par une très forte agitation due à d'importantes fluctuations de densité.
- Une deuxième zone pour un régime final où le profil de vitesse se rapproche de celui d'une couche limite turbulente standard, mais combiné à un gradient normal de densité.

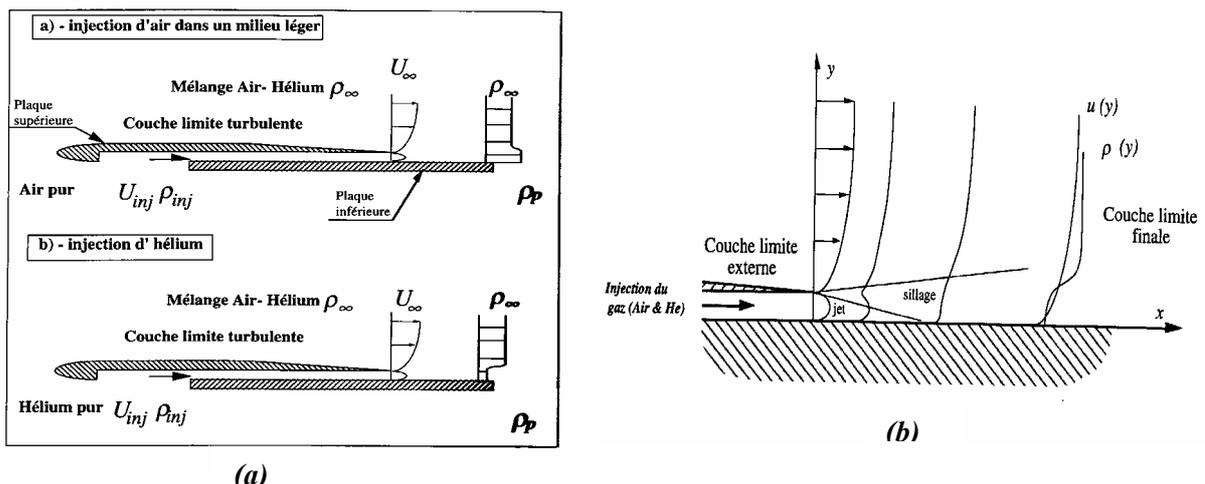


Fig. 1: (a) :Principe de l'expérience, (b) :Schématisation du développement du jet pariétal

Les essais ont été effectués dans une soufflerie, où règne la pression atmosphérique, en injectant alternativement de l'air ($\rho_{air} = 1,293 \text{ Kg} / \text{m}^3$) et de l'hélium ($\rho_{He} = 0,1785 \text{ Kg} / \text{m}^3$) dans un mélange à densité constante. Les mesures ont été réalisées par une sonde d'interférence développée et expérimentée initialement par Way et Libby [5,7]. Elle est

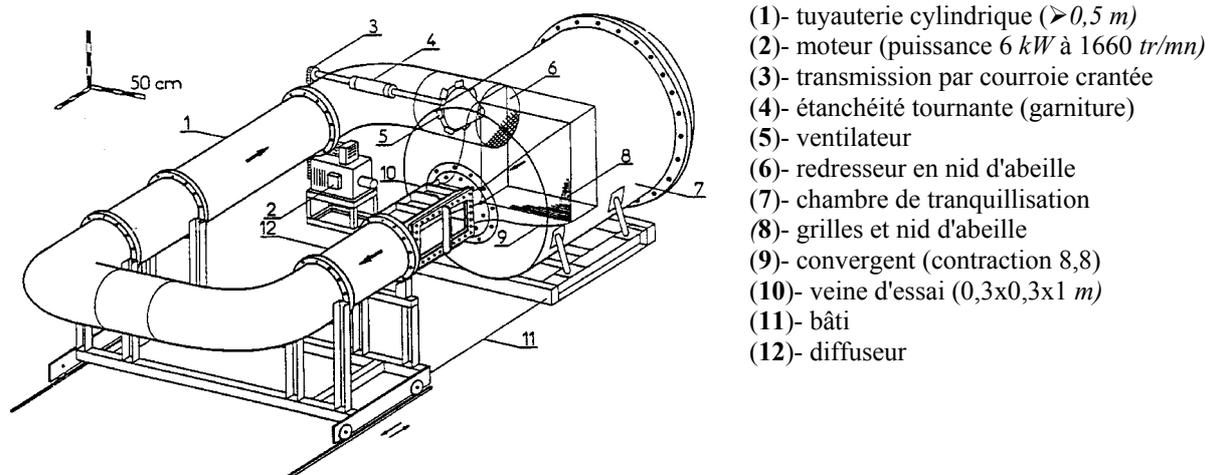
constituée de deux éléments sensibles (un fil et un film chauds) placés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre ainsi que par rapport à l'écoulement. Son principe de fonctionnement repose sur l'influence thermique exercée par le film chaud sur le fil situé en amont. La faible distance entre les deux éléments sensibles ($\sim 25 \mu m$) et la taille du film ($d_{film} = 70 \mu m$) font que le fil se trouve dans le champ thermique du film. Dans nos travaux, la sonde d'interférence a été utilisée avec l'élément amont, chauffé plus que l'élément aval, car il a été montré que cette configuration donnait lieu à un réseau d'étalonnage mieux conditionné qu'avec la disposition inverse des surchauffes utilisées par Way et Libby [5,7].

L'étalonnage est réalisé en faisant varier la vitesse de 0,5 à 15 m/s pour chaque concentration du mélange air-hélium (allant de l'air pur, $X_{air} = 1$, à l'hélium pur, $X_{air} = 0$). Chaque couple (U , X_{air}) correspond à un couple de tensions (E_{film} , E_{fil}) lu sur l'anémomètre.

3. DESCRIPTION DE LA SOUFFLERIE

La conception de cet équipement a été assurée par le Bureau d'Etudes du Laboratoire des Ecoulements Géophysique et Industriels de Grenoble. Il s'agit d'une soufflerie pressurisable à recirculation. Son ossature est fabriquée à partir d'éléments de chaudronnerie en acier, mécano-soudés. Elle occupe une emprise au sol de 5 X 3 m et un volume interne de 6 m³. Sa masse totale est d'environ 3 tonnes. Elle comprend (figure 2):

-Une tuyauterie cylindrique (1) (diamètre intérieur 0,5 m, épaisseur 5 mm).



- (1)- tuyauterie cylindrique ($\geq 0,5 m$)
- (2)- moteur (puissance 6 kW à 1660 tr/mn)
- (3)- transmission par courroie crantée
- (4)- étanchéité tournante (garniture)
- (5)- ventilateur
- (6)- redresseur en nid d'abeille
- (7)- chambre de tranquillisation
- (8)- grilles et nid d'abeille
- (9)- convergent (contraction 8,8)
- (10)- veine d'essai (0,3x0,3x1 m)
- (11)- bâti
- (12)- diffuseur

Fig. 2 : Schéma général de la soufflerie.

-Un réservoir de tranquillisation (9) ($\varnothing 1,5 \times 2 m$) dans lequel sont logés des grilles (au nombre de 7; maille 0,65 à 1,3 mm), un nid d'abeille (8) ainsi qu'un convergent à section carrée (rapport de contraction 8). Une telle disposition permet d'alléger la construction du convergent, car ce dernier n'est alors pas soumis à des différentiels de pression importants, même en cas de pressurisation de l'installation.

-Une veine d'essai à section carrée (10) (0,3 x 0,3 m, longueur 1 m) pouvant être retournée afin de modifier l'orientation par rapport à la gravité. Les parois latérales de cette veine, étaient initialement faites de deux hublots transparents en plexiglas de dimensions 0,73 x 0,3 m, et d'une épaisseur de 60 mm. Ce dispositif était prévu pour des visualisations strioscopiques. Un des deux hublots a été remplacé par une installation d'étalonnage escamotable. Le plafond de cette veine présente une pente de 9 mm/m afin de compenser l'épaississement des couches limites.

- Un divergent (12) assurant le passage d'une section carrée à une section circulaire.
- Une roue de ventilateur à 7 pales, suivie d'un redresseur en nid d'abeille (6), assure circulation du fluide. Elle est entraînée par une courroie crantée (3), accouplée à un moteur externe à courant continu de 6 kW , dont la vitesse de rotation est réglable de 50 à 1660 trlmn . Cette configuration impose une traversée de paroi à l'arbre de transmission, qui est rendue étanche par interposition de garnitures en céramique (4). Celles-ci nécessitent un circuit de lubrification refroidi par eau.

La pression interne de la soufflerie est régulée par un déverseur (système proche d'un détendeur) placé sur la vidange de l'installation. L'ensemble de la soufflerie repose sur des bâtis mécano-soudés (11), dont l'un supportant la boucle de retour, est mobile et guidé au sol par des rails. Ce dernier simplifie considérablement les interventions sur les équipements internes.

4. EQUIPEMENT DE LA VEINE D'ESSAI

Le dispositif utilisé pour l'étude des effets de différence de densité sur les propriétés d'une couche limite turbulente se compose de deux éléments réalisés en duralumin (figure 3) :

- Une plaque supérieure sur laquelle se développe la couche limite initiale. Sa longueur totale est de 577 mm . Elle est fixe, et présente:

- Un bord d'attaque à section elliptique (Fig. 3), près duquel sont collées des rugosités destinées à provoquer la transition turbulente.
- Un bord de fuite effilé qui permet l'introduction et la répartition du gaz injecté dans la fente d'injection (formée entre cette plaque et une plaque inférieure).

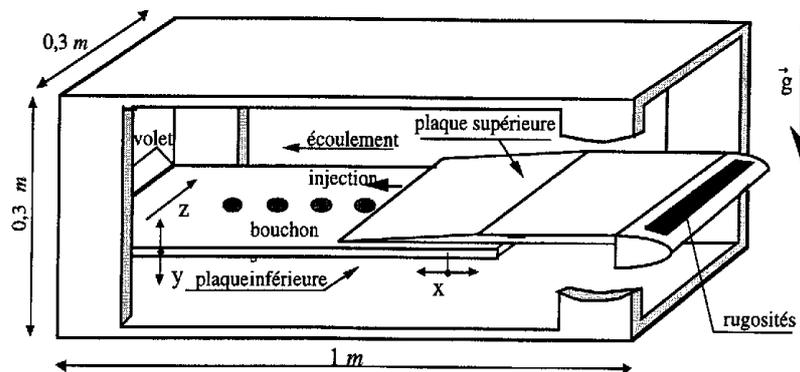


Fig. 3: Schéma de la veine d'essai.

- Une plaque inférieure mobile dans les directions verticales (axe y) et longitudinales (axe x). Le premier déplacement est de faible amplitude ($\sim 30\text{ mm}$) et permet le réglage de l'épaisseur de la fente d'injection. Il est réalisé manuellement, au moyen de deux vérins à vis. Le deuxième mouvement permet le positionnement des sondes pariétales par rapport au point d'injection. Le déplacement est assuré par un moteur pas à pas, associé à un système vis écrou, embarqué sur une course maximale de 160 mm . Ces deux plaques constituent un canal d'environ $170 \times 300\text{ mm}$. Dans la direction transversale (axe z), un espace de 0.5 mm est conservé entre les plaques et les hublots afin d'éliminer les effets de coin en maintenant une légère surpression entre les écoulements supérieur et inférieur. Cette différence de pression est produite par un volet placé à l'aval de la partie mobile. L'étanchéité latérale de la fente d'injection, est assurée par un système constitué de deux baquettes de Plexiglas ($5 \times 3\text{ mm}$) d'une longueur d'environ 200 mm collées à la plaque supérieure. Ce système assure, d'une manière précise, le maintien d'une épaisseur fixe e . Un bras porte-sonde permet d'explorer la

majeure partie du volume situé au dessus des plaques. Il possède un déplacement motorisé selon les trois directions. Les guidages sont assurés par douilles à billes. Les moteurs, sont placés dans le diffuseur, afin de limiter la perturbation apportée à l'écoulement. Une attention particulière a été donnée au déplacement vertical. Les douilles à billes ont été allongées de manière à obtenir un déplacement le plus précis possible. La position longitudinale est repérée par une règle tracée sur la plaque inférieure. Les positions verticale et transversale sont données par des règles numériques connectées à un afficheur externe. Les positions longitudinale et verticale des sondes sont repérées par rapport au bord de fuite de la plaque supérieure. Tous les mouvements sont commandés de l'extérieur, sans dépressuriser l'installation.

5. 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 [5, 7], est présenté sur la figure 1. Son principe de fonctionnement (Fig. 4) 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.

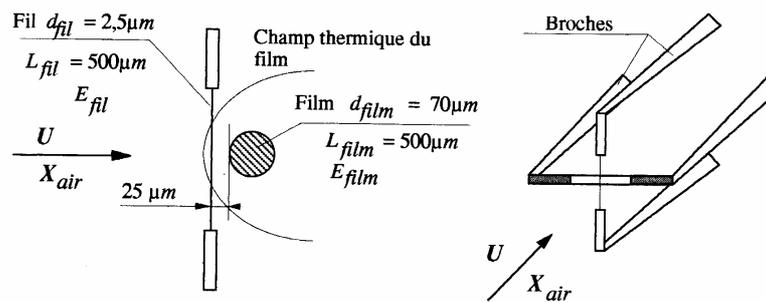


Fig. 4: Principe de la sonde d'interférence.

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. 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 :

$$U \frac{\Delta T}{\xi} \sim \alpha \frac{\Delta T}{\xi^2} \text{ soit } \xi \sim \frac{\alpha}{U} \quad (1)$$

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 [5, 7]. 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.

6. INFLUENCE DES SURCHAUFFES APPLIQUEES

6.1. Cas où le film est fortement chauffé

Le premier essai a été réalisé en se basant sur les températures d'éléments sensibles

utilisées par Stanford et Libby [8] dans des conditions similaires, c'est à dire pour une forte surchauffe du film. L'étalonnage est effectué pour six mélanges air-hélium différents allant de l'air pur ($X_{air} = 1$) à l'hélium pur ($X_{air} = 0$). Les vitesses varient de 0,5 à 15 m/s. Le résultat obtenu est présenté sur la figure 5. Pour une iso-concentration donnée, les réponses du fil E_{fil} et du film E_{film} sont des fonctions croissantes de la vitesse; de sorte que, pour un symbole donné, le point le plus à gauche et le plus bas sur le diagramme correspond à une vitesse de 0,5 m/s et celui le plus à droite et le plus haut à 15m/s. Les vitesses des points intermédiaires sont données par le tableau à droite du diagramme. Sur ce premier réseau, on remarque deux zones critiques. La première se produit pour de fortes vitesses et des mélanges à très forte teneur en air, où on constate un écrasement des courbes d'étalonnage ($X_{air} = 1$ et 0,8; partie droite du diagramme). Dans ces conditions, la vitesse étant importante et la diffusivité de l'air faible, la longueur typique définie par l'équation (1) devient très petite. La sonde tend alors à se comporter comme deux fils chauds distincts. La seconde zone critique est observée pour de faibles vitesses et des mélanges à très forte teneur en hélium ($X_{air} = 0$; 0,2 et 0,4; partie gauche du diagramme). Dans ce cas, la longueur ξ est grande. Le fil est alors fortement chauffé par le champ thermique du film, sa réponse devient très faible et indépendante de U et de X . Manifestement, ces deux régions ne peuvent être explorées avec la sonde utilisée dans les conditions de surchauffes correspondantes. Pour atténuer le dernier phénomène, un second étalonnage a été réalisé en diminuant la température du film et en augmentant celle du fil. Les vitesses maximales pour les premières mesures envisagées dans la soufflerie n'excédant pas 6 m/s, l'étalonnage a été limité en vitesse à 9 m/s. Cet essai a été réalisé pour des températures $T_{fil} = 150^\circ C$ et $T_{film} = 200^\circ C$ (Fig. 6). Cette configuration de surchauffes améliore nettement la dissociation pour les mélanges à forte teneur en hélium. Par contre, il est clair qu'elle accentue le resserrement du réseau pour l'air et les fortes vitesses. Cette zone, pour ce jeu de surchauffes, se rapproche très fortement du cas de deux fils séparés. Un compromis a été obtenu pour les températures $T_{fil} = 100^\circ C$ et $T_{film} = 200^\circ C$ (Fig. 7). Dans ce cas, toutes les courbes iso-concentrations sont clairement distinctes. Le réseau est alors exploitable et les mesures deviennent envisageables dans la gamme de vitesses couverte par l'étalonnage. Cependant, on peut remarquer que celle-ci reste limitée à des vitesses comprises entre 0,5 et ≈ 6 m/s alors que l'étude envisagée prévoit de couvrir une gamme étendue de nombre de Reynolds dans la couche limite. Il serait donc important que la séparation vitesse/concentration reste possible pour une gamme de vitesses plus large. Les résultats présentés jusque là ne portent que sur des couples de surchauffes pour lesquels le film (élément placé en aval) est porté à une température nettement supérieure à celle du fil (élément amont). A notre connaissance, tous les travaux nécessitant l'emploi de ce type de sonde [1-8] ont été réalisés en utilisant ce type de fonctionnement. Nous avons pu nous rendre compte que cette configuration présentait un certain nombre d'inconvénients:

- Même pour le jeu de surchauffes le plus favorable, les courbes iso-concentration ne sont pas parfaitement séparées, en particulier pour les écoulements d'air à forte vitesse. La réduction du réseau d'étalonnage peut alors s'avérer délicate.
- Le réseau d'étalonnage, à températures de fil et de film fixées, est extrêmement sensible à la distance séparant les deux éléments. Une réparation de la sonde s'est traduite par une déformation prononcée du réseau et il est permis de penser que l'ajustement de cette distance n'a pu être réalisé de manière parfaite. Après réparation, pour les mêmes surchauffes que celles utilisées pour l'étalonnage présenté sur la figure 7, l'influence du film a fortement diminué. Le réseau obtenu (non représenté) est alors très écrasé et se rapproche de celui de la figure 6.
- La réponse du fil amont dépendant du champ thermique imposé par l'élément aval,

l'inertie thermique de cette région de fluide est relativement importante et limite la réponse en fréquence du fil.

Cette dernière limitation a été également notée par Sirivat et Warhaft [1] ainsi que par Panchapakesan et Lumley [6]. Pour y remédier, ces auteurs ont apporté des modifications à la géométrie de la sonde: l'élément aval est cette fois un fil de diamètre comparable à celui du fil amont ($d_{fil\ aval} = 5\ \mu m$ et $d_{fil\ amont} = 3\ \mu m$) et la distance entre les deux éléments est ramenée à environ $5\ \mu m$. L'angle entre les deux éléments sensibles n'est plus, comme pour la sonde initiale de Way et Libby [5, 6] de 90° mais de 10° ce qui augmente la région d'interaction thermique, les fils restant toujours situés dans un plan perpendiculaire à la vitesse U . D'autre part, les surchauffes utilisées par Sirivat et Warhaft [1] sont de 1,2 pour le fil amont et 1,6 pour l'aval ($T_{amont} \approx 70^\circ C$, $T_{aval} \approx 400^\circ C$). L'emploi d'un élément de diamètre plus petit à l'aval permet d'éviter la détérioration de la réponse dynamique du fil amont. La température amont reste cependant très inférieure à celle de l'élément aval. En ce qui concerne les domaines d'étalonnage et de mesure en vitesse et concentration, le tableau 1 synthétise les données de tous les auteurs qui, à notre connaissance, ont utilisé ce type d'instrumentation dans des mélanges air/hélium. Ces domaines sont visualisés dans un plan (U, c) sur la figure 8. Cette figure suggère deux remarques. Tout d'abord, les seules mesures effectuées dans des mélanges allant de l'air pur à l'hélium pur ont été réalisées par LaRue et Libby [3, 4] dans une configuration d'écoulement proche de celle de la présente étude. La gamme de vitesse n'excède cependant pas 5,5 m/s, même si l'étalonnage est étendu jusqu'à 10 m/s. D'autre part, les autres travaux ne présentent des résultats que pour des mélanges dont la fraction massique d'hélium reste inférieure à 0,3. Un point commun entre tous ces travaux est l'utilisation de la sonde d'interférence suivant le principe de fonctionnement décrit précédemment, en appliquant une forte surchauffe au film aval.

6.2. Cas où le fil est fortement chauffé

Une amélioration du fonctionnement de la sonde a été apportée en inversant l'importance des surchauffes. L'élément amont (fil) est cette fois plus chauffé que le film. Les températures sont fixées à $T_{fil} = 250^\circ C$ et $T_{film} = 100^\circ C$. L'étalonnage est effectué dans les mêmes conditions que les précédents pour des vitesses variant de 0,5 à 13 m/s. Le réseau obtenu est présenté sur la figure 6. On remarquera l'inversion complète des courbes iso-concentration pour l'air pur et l'hélium pur dans le réseau par rapport au jeu de surchauffes précédent (Fig. 7). L'évolution de E_{film} en fonction de E_{fil} est linéaire pour tous les mélanges. Les droites obtenues sont clairement dissociées pour toutes les iso-concentrations et cette propriété est conservée même pour de fortes vitesses ce qui ouvre des perspectives de mesures à des vitesses plus élevées que celles atteintes jusqu'à présent.

Pour tenter de comprendre la linéarité observée sur la figure précédente (Fig. 9), nous avons réalisé un calcul simulant un étalonnage dans les mêmes conditions d'écoulement. Dans les résultats présentés ci-dessous, l'hypothèse de départ est qu'il n'y a aucune influence thermique entre le fil et le film.

Pour le fil et le film, sans interactions, la puissance thermique dissipée est donnée par:

$$\phi_i = \frac{E_i^2}{R_i} = Nu_i \pi k L_i (T_i - T_\infty), \text{ avec } i = \begin{cases} fil \\ film \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{où : } Nu_i = f(Re_i) \text{ et } Re_i = \frac{\rho U d_i}{\mu}$$

Re_i étant calculé à la température moyenne \bar{T}_i .

Les calculs sont réalisés pour des mélanges allant de l'air pur à l'hélium pur et des vitesses

variant de 0,5 à 13 m/s. Les tensions du fil et du film sont données par la relation (2), à partir des résistances obtenues expérimentalement.

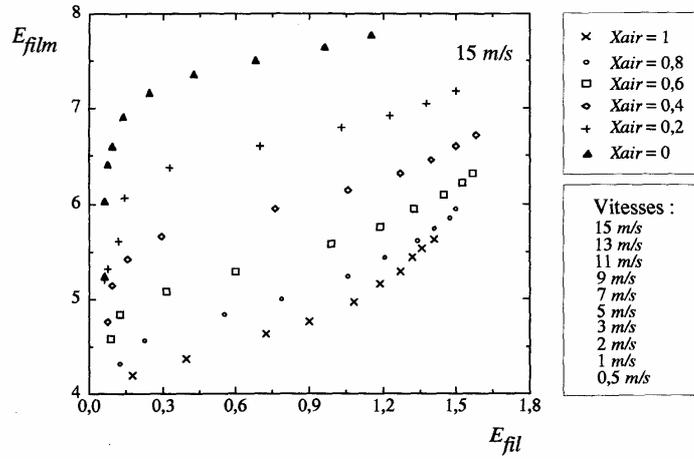


Fig. 5: Réseau d'étalonnage de la sonde d'interférence.

$$T_{fil} = 75^{\circ}\text{C} \text{ et } T_{film} = 300^{\circ}\text{C}$$

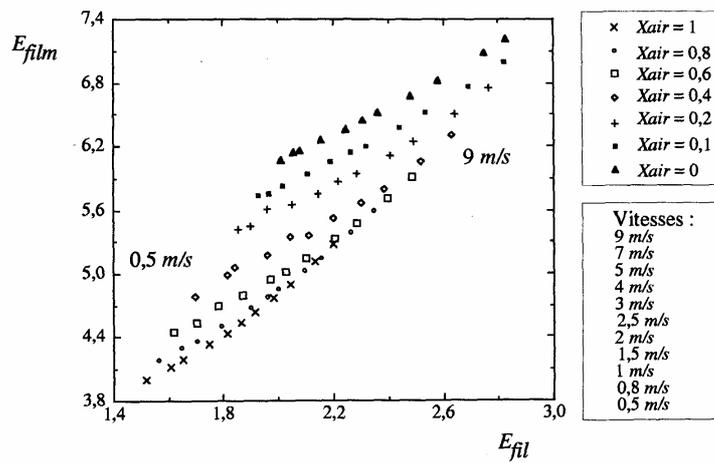


Fig. 6: Réseau d'étalonnage de la sonde d'interférence.

$$T_{fil} = 150^{\circ}\text{C} \text{ et } T_{film} = 200^{\circ}\text{C}$$

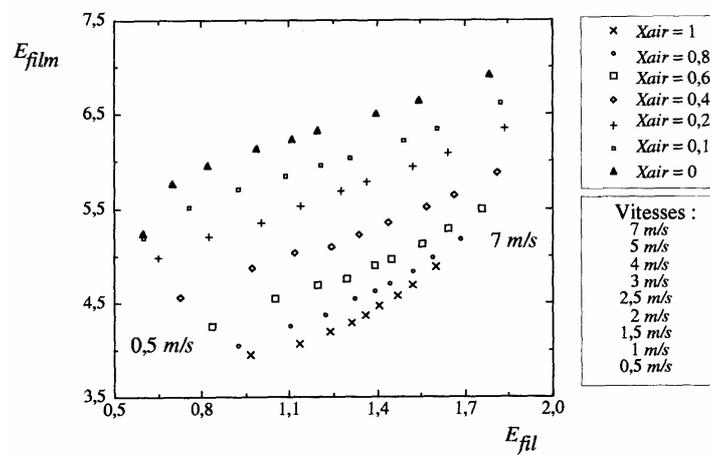


Fig. 7: Réseau d'étalonnage de la sonde d'interférence.

$$T_{fil} = 100^{\circ}\text{C} \text{ et } T_{film} = 200^{\circ}\text{C}$$

Le premier cas envisagé est celui où le nombre de Nusselt est donné par la relation de Collis et Williams [2]:

$$Nu_i = (0.24 + 0.56 Re_i^{0.45}) \left(\frac{T_\infty}{T_i} \right)^{-0.17} \quad \text{avec } 0,02 \leq Re_i \leq 44 \quad (3)$$

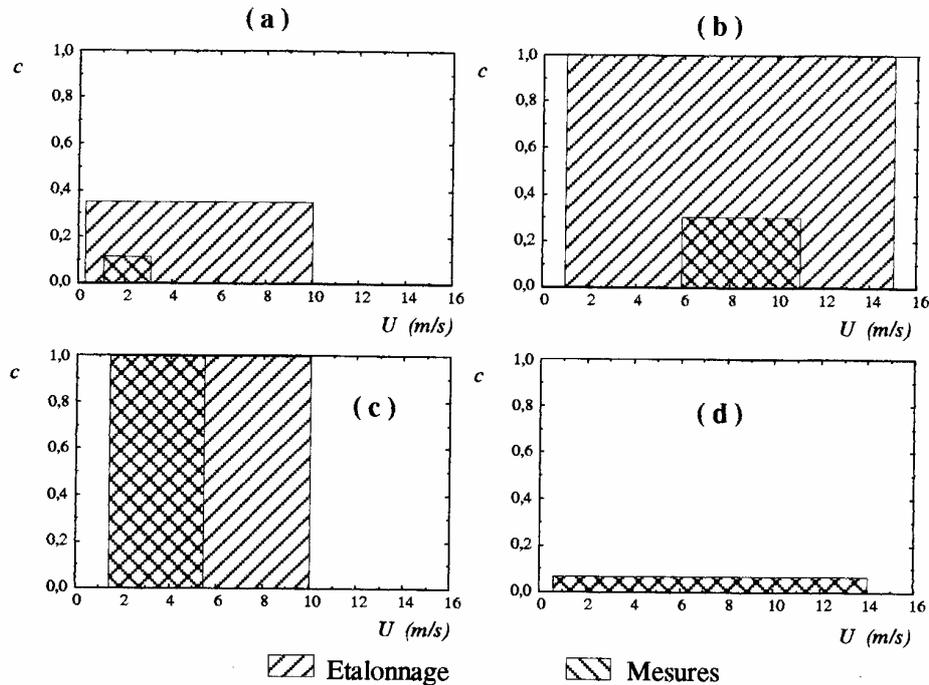


Fig. 8: Revue bibliographique des conditions d'utilisation (étalonnage et mesures) de la sonde d'interférence. (a): Way et Libby [7]; (b) : Stanford et Libby [8] ; (c) : Larue et Libby[3] ; (d) : Panchapakesan et Lumley [6].

Tableau 1 : Récapitulatif des mesures thermo-anémométriques réalisées dans des mélanges air/hélium.

Auteurs	Sonde utilisée	Etalonnage	Mesures
Way et Libby 1970 [5]	Fil $\phi 2,5 \mu m$, $100^\circ C$ Film $\phi 25 \mu m$, $275^\circ C$	$0,25 \leq U(m/s) \leq 6$ $0 \leq c \leq 0,35$	
Way et Libby 1971 [7]	Fil $\phi 2,5 \mu m$, $100^\circ C$, $l/d = 150$ Film $\phi 25 \mu m$, $300^\circ C$, $l/d = 10$ Distance fil/film : $25 \mu m$	$0,25 \leq U(m/s) \leq 10$ $0 \leq c \leq 0,35$	$1,5 \leq U(m/s) \leq 2,5$ $0 \leq c \leq 0,1$
Stanford et Libby 1974 [8]	Fil $\phi 2,5 \mu m$, $85^\circ C$, $l/d = 200$ Film $\phi 25 \mu m$, $305^\circ C$, $l/d = 10$ 2 ^{ème} Film à $60^\circ \phi 25 \mu m$, $210^\circ C$	$1 \leq U(m/s) \leq 15$ $0 \leq c \leq 1$ $-30^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$	$6 \leq U(m/s) \leq 11$ $0 \leq c \leq 0,3$
Larue et Libby 1977 [3]	45° entre les deux films	$1,5 \leq U(m/s) \leq 10$ $0 \leq c \leq 1$ $-45^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$	$1,5 \leq U(m/s) \leq 5,5$ $0 \leq c \leq 1$ $ \varphi \leq 30^\circ$
Sirivat et Warhafi 1982 [1]	Fil amont : $3 \mu m$, $a_S = 1,2$; $l/d = 100$ Fil aval : $5 \mu m$, $a_S = 1,6$; $l/d = 200$ Distance amont/aval : $5 \mu m$	$2 \leq U(m/s) \leq 8$ $0 \leq c \leq 0,015$	$2 \leq U(m/s) \leq 8$ $0 \leq c \leq 0,015$
Panchapakesan et Lumley 1993 [6].	Fil amont : $3 \mu m$, $a_S = 1,6$; $l/d \approx 100$ Fil aval : $9 \mu m$, $a_S = 1,8$; $l/d \approx 100$ Distance amont/aval : $5 \mu m$	$0,8 \leq U(m/s) \leq 14$ $0 \leq c \leq 0,06$ $-42^\circ \leq \varphi \leq 42^\circ$	$0,8 \leq U(m/s) \leq 14$ $0 \leq c \leq 0,06$ $-42^\circ \leq \varphi \leq 42^\circ$

Pour des températures de fil et de film fixées respectivement à $T_{fil} = 250^\circ C$ et, Re_i varie entre 0,028 et 2,9 pour le fil et entre 0,5 et 48 pour le film. La relation (3) est donc tout à fait applicable.

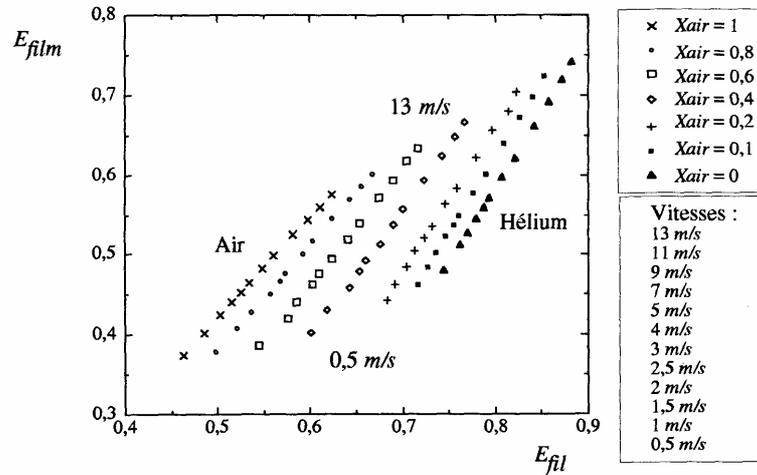


Fig. 9: Réseau d'étalonnage de la sonde d'interférence jusqu'à $T_{fil} = 250^\circ C$ et $T_{film} = 100^\circ C$ - $d_{fil} = 2,5 \mu m$ et $d_{film} = 70 \mu m$.

La figure 10 présente les résultats obtenus en considérant un fil de $2,5 \mu m$ de diamètre et en fixant celui du film à 70 et $2,5 \mu m$. Pour des diamètres très différents, les iso-concentrations sont des droites distinctes (Fig. 10-a), alors que pour deux diamètres identiques, elles sont regroupées et indissociables (Fig. 10-b). Ce dernier cas est à rapprocher des essais réalisés pour un même fil à des surchauffes différentes pour lequel le résultat obtenu était également une droite et ne permettait pas la séparation entre les mélanges. La différence entre les deux diamètres des éléments sensibles semble donc être déterminante dans la séparation possible entre la vitesse et la concentration. On peut retrouver ce résultat analytiquement en écrivant le nombre de Nusselt sous la forme classique. L'élimination de la vitesse dans les relations (2) écrites pour le fil et le film donne l'équation des iso-concentrations suivante:

$$E_{film}^2 = \frac{R_{film} (T_{film} - T_\infty) L_{film}}{R_{fil} (T_{fil} - T_\infty) L_{fil}} \left(\frac{d_{film}}{d_{fil}} \right)^{0,45} E_{fil}^2 + aR_{film} \pi k (X_{air}) L_{film} (T_{film} - T_\infty) \left(1 - \left(\frac{d_{film}}{d_{fil}} \right)^{0,45} \right) \quad (4)$$

Cette relation montre que, dans le plan (E_{fil}^2, E_{film}^2) , les iso-concentrations sont des droites parallèles dont l'ordonnée à l'origine dépend, par l'intermédiaire de la conductivité thermique, de la fraction molaire X_{air} (Fig. 10-c et d). Les variations relatives de tensions restant faibles pour un réseau d'étalonnage donné, on vérifie que cette propriété est quasiment conservée dans le plan (E_{fil}, E_{film}) . Pour un aspect pratique, la représentation dans le plan des tensions simples a été maintenue dans toute la suite. Si, le dernier terme s'annule et toutes les droites sont confondues. On retrouve alors le comportement d'un fil simple. Par contre, Si les diamètres sont très différents, les iso-concentrations sont nettement distinctes et la séparation vitesse/concentration ne dépend plus de la vitesse. Dans le calcul précédent, le transfert de chaleur adimensionnel défini par la relation (3) ne tient pas compte d'un phénomène

supplémentaire d'accommodation thermique. Elle ne prend pas non plus en considération la modification du champ des vitesses à proximité du fil due à la présence très proche du film. C'est pourquoi, le même calcul a été effectué en se basant cette fois sur les nombres de Nusselt obtenus expérimentalement lorsqu'un seul des deux éléments est surchauffé. Le résultat est présenté sur la figure 11. Comme précédemment, les iso-concentrations sont regroupées sur des droites clairement distinctes. Ce calcul tend donc à montrer que pour l'étalonnage présenté sur la figure 9, l'interférence entre le fil et le film ne modifie que très peu l'allure du réseau d'étalonnage. Elle ne joue qu'un rôle secondaire par rapport à celui de la différence des diamètres. Outre l'influence de la géométrie, l'importance des surchauffes appliquées a également été testée. Le calcul est réalisé, à partir des nombres de Nusselt expérimentaux, pour un fil et un film de $2,5 \mu m$ et $70 \mu m$ de diamètres respectifs chauffés à des températures allant de 100 à.. Les résultats montrent qu'à géométrie donnée, les surchauffes influencent peu la forme du réseau d'étalonnage. Une visualisation globale des réseaux obtenus pour cinq configurations de surchauffes est présentée sur la figure 12. Le jeu de surchauffes qui semble cependant le plus à même de favoriser la séparation vitesse/concentration est celui pour lequel les iso-concentrations sont le plus clairement distinctes, il est donné par $T_{fil} = 250^\circ C$ et $T_{film} = 100^\circ C$.

6.3. Comparaison des deux types de surchauffes

A partir des résultats expérimentaux présentés dans les deux paragraphes précédents, les tendances caractérisant l'influence des surchauffes sont résumées sur la figure 13. Le calcul développé montre que le sillage thermique du fil (élément amont), lorsque celui-ci est fortement chauffé, sur le film (aval) se traduit par une courbure des iso-concentrations (Fig. 13-1b). Ceci est confirmé par l'étalonnage expérimental présenté sur la figure 14, où l'influence du fil sur le film est plus importante puisque le diamètre du premier est cette fois de $6 \mu m$ (la figure 11 représente $-E_{fil}$ et $-E_{film}$ car l'anémomètre AALAB utilisé pour cet étalonnage délivre des tensions négatives et décroissantes). Cette courbure augmente l'écart entre les iso-concentrations et accentue la dissociation « naturelle » obtenue sans interférence, par la différence entre les diamètres. Par contre, lorsque le champ thermique aval modifie la réponse amont, le réseau d'étalonnage est alors totalement inversé (Fig. 13-c). Le comportement de la sonde est alors forcé dans le sens contraire de la séparation sans interférence. Ce type de comportement est celui observé sur les figures 6, 7 et 8. L'interférence entre les deux éléments est, dans ce cas, tout à fait primordiale pour permettre la dissociation air/hélium. Un aspect pratique important de l'influence des surchauffes concerne la dérive des réseaux d'étalonnages. On observe, en effet, une dérive au cours du temps des résultats d'étalonnage due aux variations de température ambiante et au vieillissement de la sonde. La figure 15 visualise les dérives observées, après un jour d'essai, pour les étalonnages présentés sur les figures 14 et 16 ; c'est à dire pour les deux types de surchauffes testées. Pour le cas où le film est fortement surchauffé (Fig. 15-a), le décalage des points d'étalonnage dépend à la fois de la vitesse et de la concentration. Dans l'hélium pur, la dérive obtenue à $4 m/s$ est environ deux fois plus importante que celle à. La correction à appliquer au réseau pour le recalibrer sur les nouveaux points s'avère donc délicate. Dans le cas où une forte surchauffe est appliquée à l'élément amont (Fig. 15 (b)), on constate que la dérive ne dépend quasiment pas de la vitesse, mais principalement de la concentration, et ce, pour tous les mélanges. L'étalonnage peut alors être recalé de façon précise en imposant simplement une correction de E_{fil} et E_{film} par iso-concentration. Cette configuration de surchauffe permet donc une correction plus précise, ce qui évite un ré-étalonnage complet trop fréquent de la sonde.

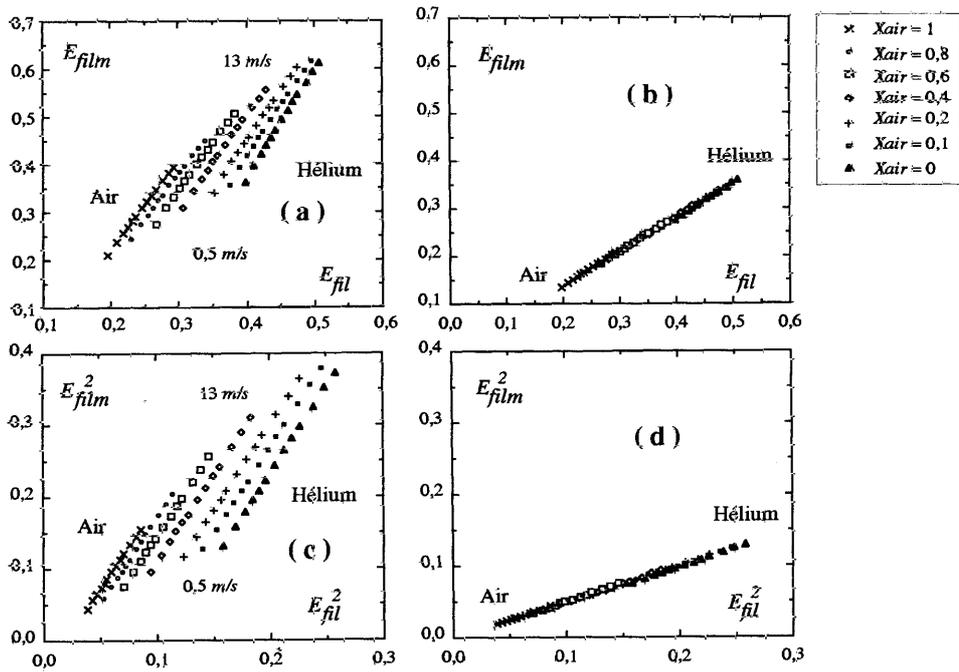


Fig. 10: Evolution du réseau d'étalonnage avec le diamètre du film calculée à partir de la relation $Nu_i(Re_i)$ donnée par Collis et Williams [2]. $T_{fil} = 250^\circ\text{C}$ et $T_{film} = 100^\circ\text{C}$

(a) et (c) : $d_{fil} = 2,5 \mu\text{m}$, $d_{film} = 70 \mu\text{m}$, $d_{film} / d_{fil} = 28$;

(b) et (d) : $d_{fil} = 2,5 \mu\text{m}$, $d_{film} = 2,5 \mu\text{m}$, $d_{film} / d_{fil} = 1$

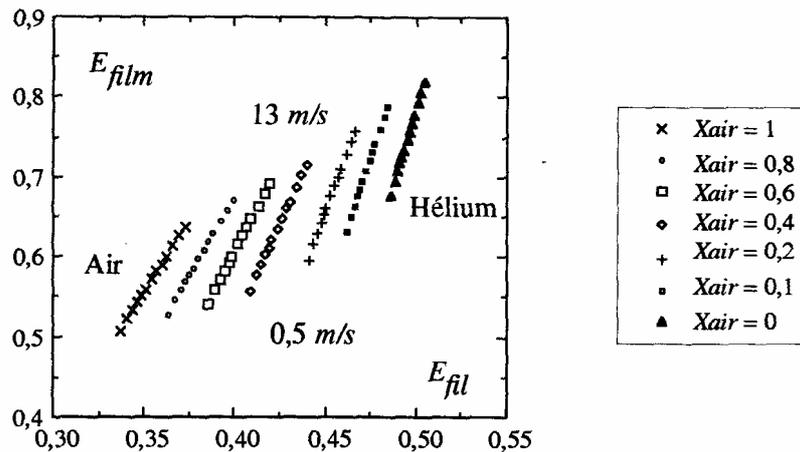


Fig. 11: Réseau d'étalonnage calculé à partir des relations $Nu_i(Re_i)$ expérimentales $T_{fil} = 250^\circ\text{C}$, $T_{film} = 100^\circ\text{C}$ et $d_{fil} = 2,5 \mu\text{m}$, $d_{film} = 70 \mu\text{m}$.

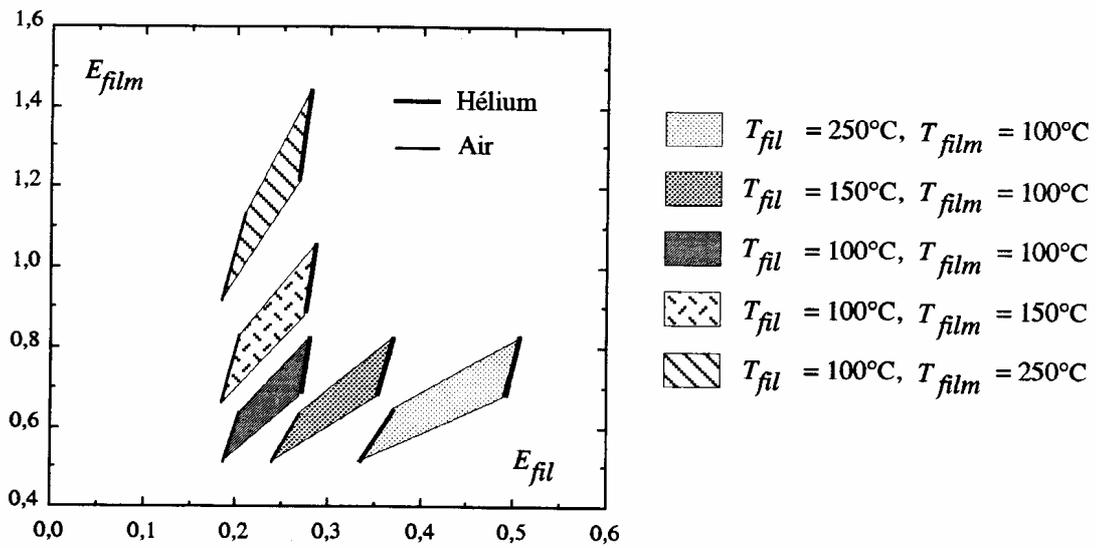


Fig. 12: Evolution de la forme du réseau d'étalonnage avec les surchauffes appliquées au fil et au film ($d_{fil} = 2,5 \mu m$, $d_{film} = 70 \mu m$).

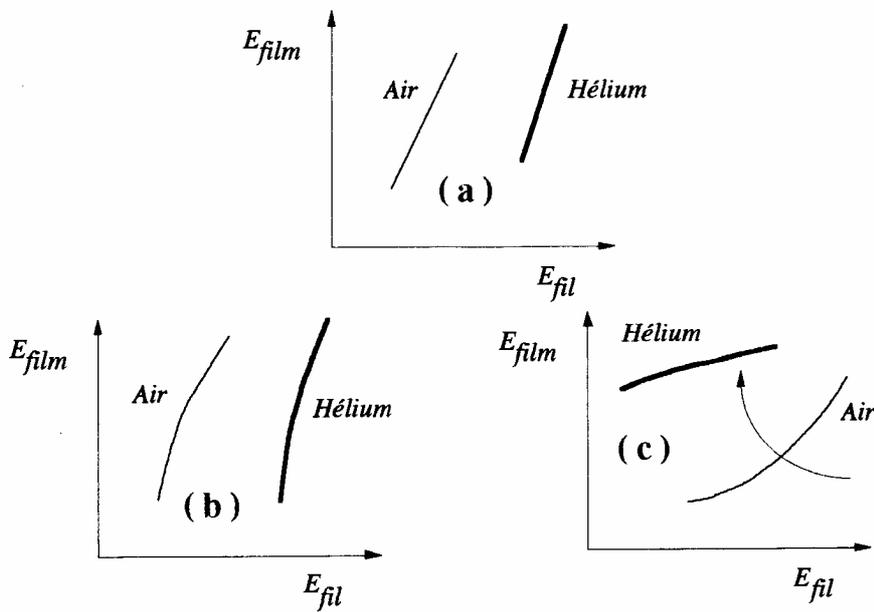


Fig. 13: Influence des surchauffes sur l'allure du réseau d'étalonnage de la sonde d'interférence
 (a) : Sans interférence (b) : Avec influence du sillage thermique de l'élément amont
 (c): Avec influence du champ thermique de l'élément aval sur l'élément amont

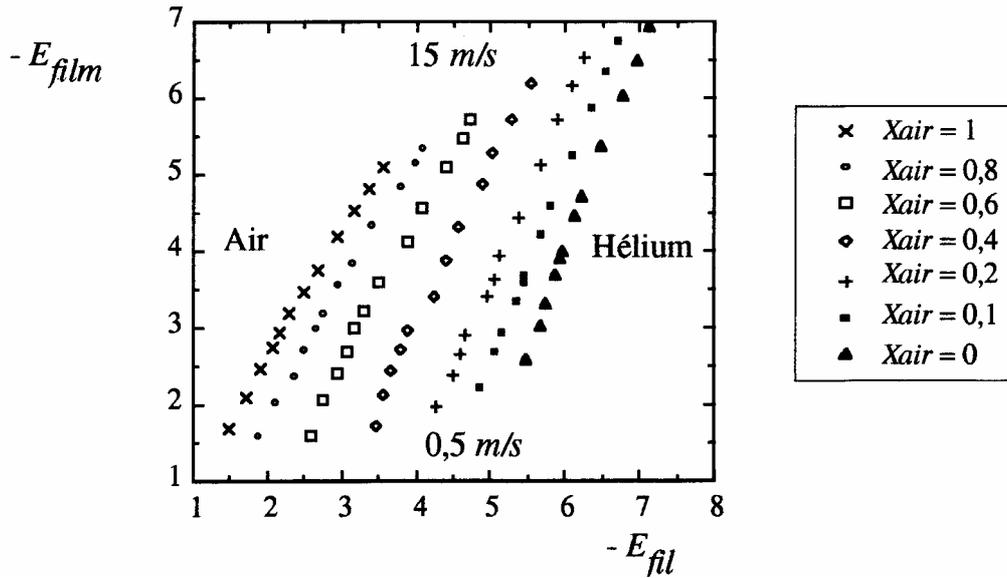


Fig. 14 : Réseau d'étalonnage de la sonde d'interférence jusqu'à $T_{fil} = 250^\circ\text{C}$ et $T_{film} = 100^\circ\text{C}$. $d_{fil} = 6 \mu\text{m}$ et $d_{film} = 70 \mu\text{m}$.

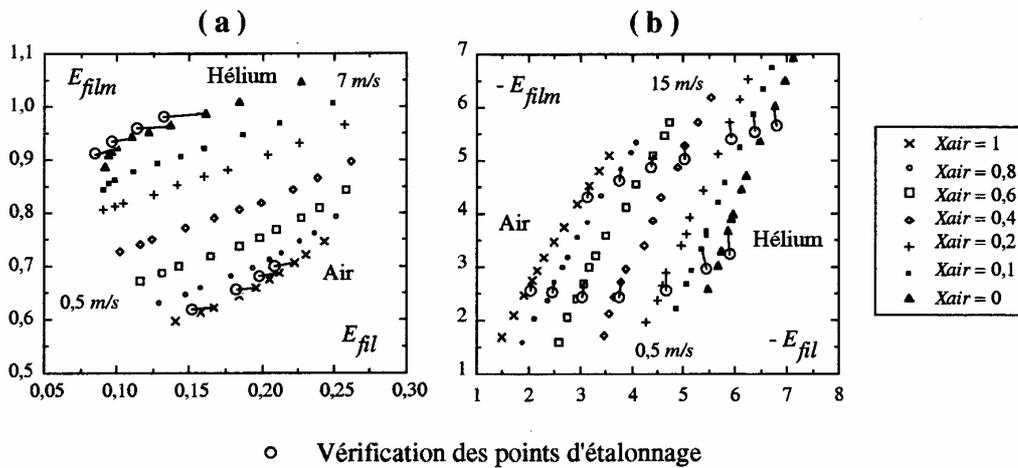
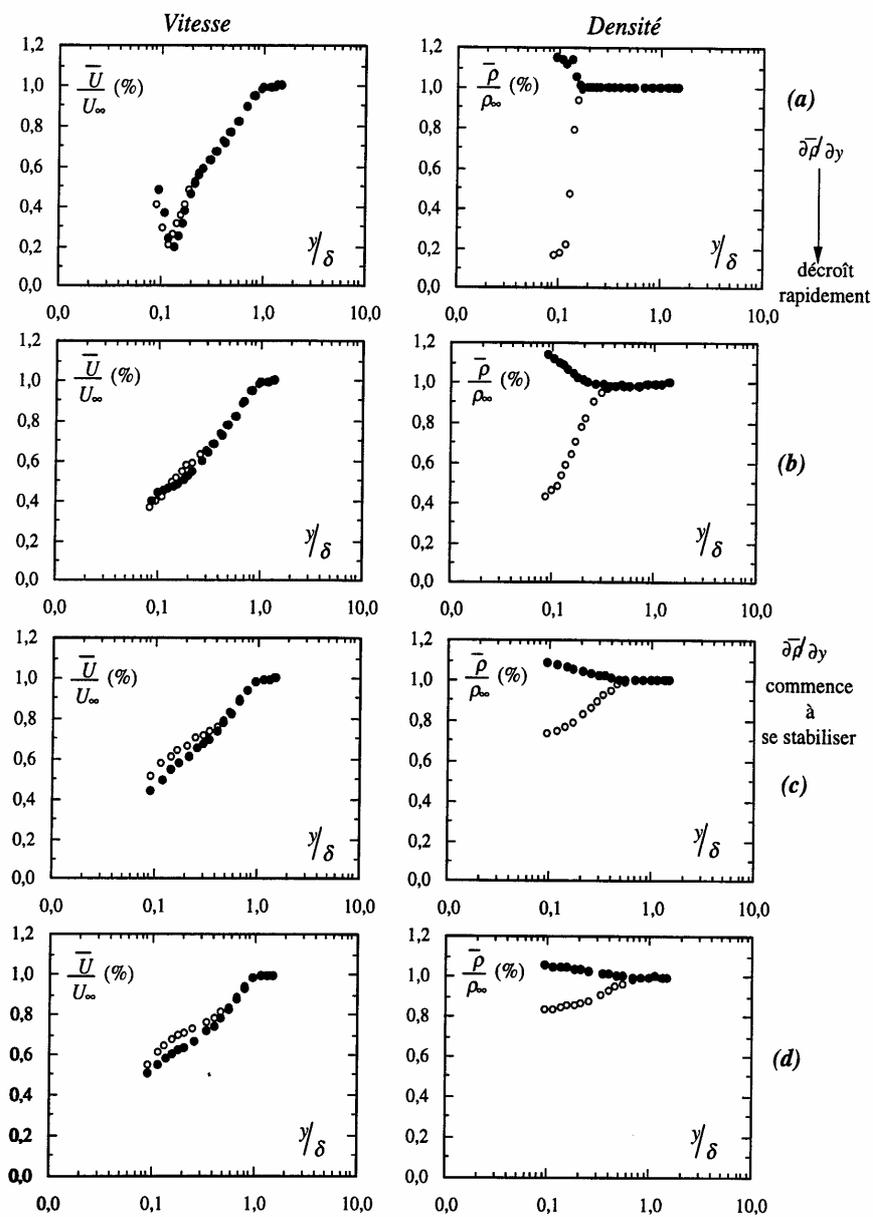
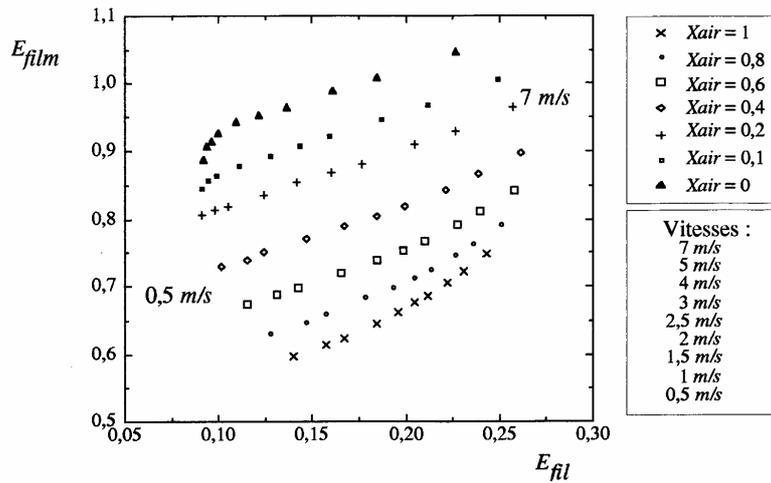


Fig. 15: Dérives des réseaux d'étalonnage pour les deux types de configuration de surchauffes :
(a): $T_{fil} = 75^\circ\text{C}$, $T_{film} = 175^\circ\text{C}$ (b): $T_{fil} = 250^\circ\text{C}$ et $T_{film} = 100^\circ\text{C}$.

7. QUELQUES MESURES OBTENUES AVEC LA MEILLEURE CONFIGURATION DE SURCHAUFFE

7.1. Champs moyens

Les mesures des champs moyens de vitesse et de densité ainsi que le frottement pariétal ont montré que le développement du jet pariétal est régi principalement par le rapport entre la vitesse débitante d'injection du gaz dans la fente et celle de l'écoulement externe ($U_d/U_\infty = 0,35$). De plus, le développement du jet pariétal est plus rapide dans le cas d'une injection d'hélium que dans le cas d'une injection d'air. Ceci s'explique: pour une injection d'hélium, la région de transition est relativement plus courte ($x/e \approx 17$) que celle correspondant à une injection d'air ($x/e \approx 25$), ce qui provoque une chute importante du frottement pariétal moyen dans cette région. Les principaux résultats obtenus sont présentés sur les figures 17.



7.2. Champs fluctuants

Les profils des fluctuations de vitesse et de densité présentés dans la figure 18 montrent que, dans la région proche de la paroi, l'intensité turbulente est renforcée par l'injection

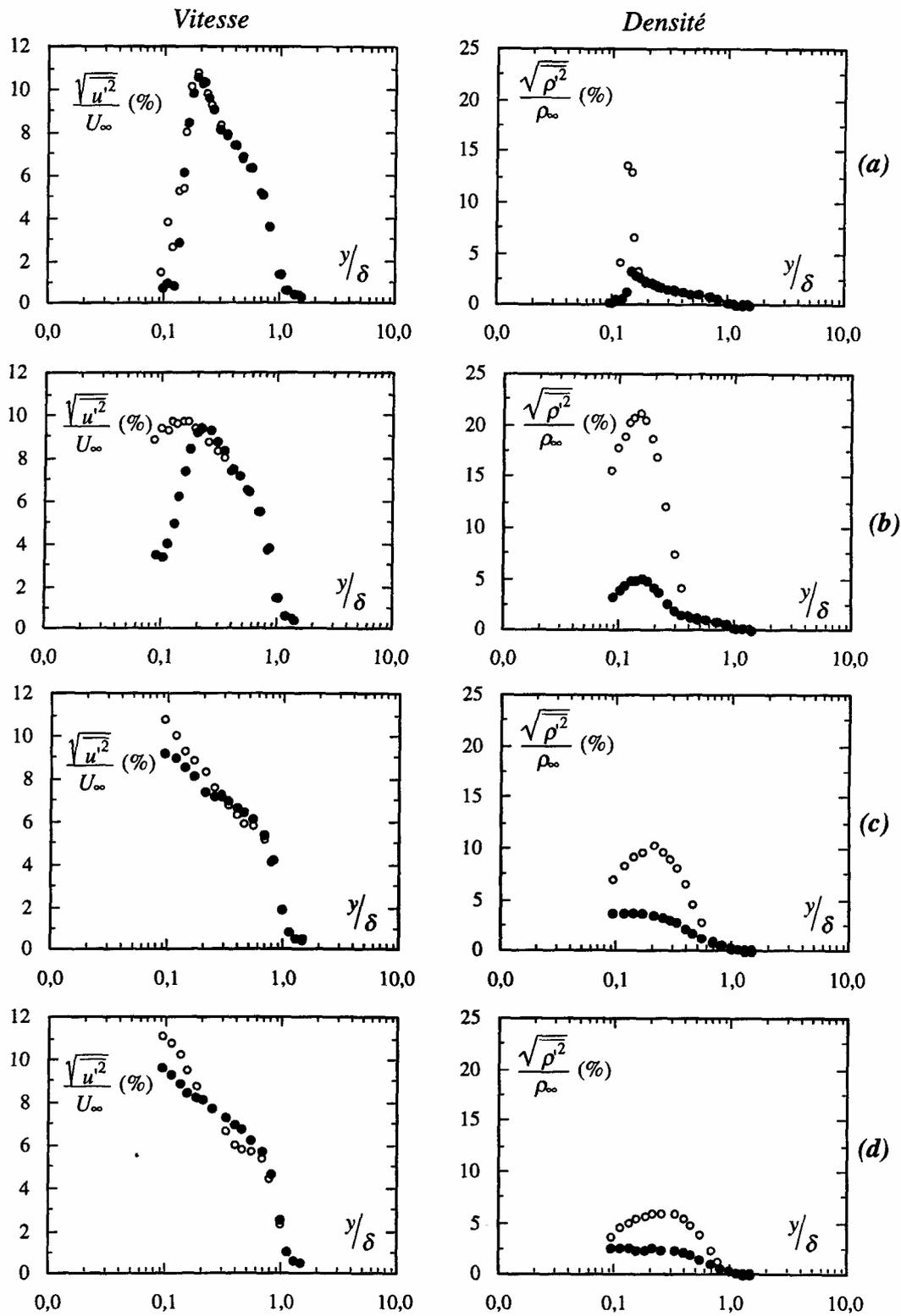


Fig. 18: Profils des fluctuations de vitesse et de densité ($U_\infty=5,8$ m/s) : (a) $x/e = 0,3$;
 (b) $x/e = 8,3$; (c) $x/e=25$; (d) $x/e=50$. \circ : Injection d'hélium, \bullet : Injection d'air

l'hélium. Le niveau de fluctuation de la vitesse, pour $y/\delta < 0,2$, croît beaucoup plus vite pendant le développement de l'écoulement pour une injection d'hélium que pour l'injection d'air.

8. CONCLUSION

Une sonde thermo-anémométrique constituée d'un fil amont de faible diamètre ($d_{fil} = 2,5 \mu m$) fortement chauffé ($T_{fil} = 250^\circ C$) et d'un film aval de diamètre plus important ($d_{film} = 70 \mu m$) porté à une température plus faible ($T_{film} = 100^\circ C$) présente un domaine d'utilisation étendu pour les mesures de vitesse et concentration. Nous avons montré que l'essentiel du principe de fonctionnement repose sur une grande différence entre les diamètres ($d_{film}/d_{fil} = 28$) des deux éléments sensibles. Pour cette combinaison de surchauffe, l'interférence thermique n'est plus prépondérante, ce qui autorise des mesures à des vitesses bien plus élevées ($15 m/s$, Fig. 14) que dans le mode d'utilisation initial ($T_{fil} = 75^\circ C$ et $T_{film} = 175^\circ C$) pour des mélanges allant de l'air à l'hélium purs où les valeurs des vitesses mesurées n'excèdent pas.

NOMENCLATURE

a_s :	Coefficient de surchauffe d'un fil/film	ρ :	Masse volumique
c :	Fraction massique d'hélium	R :	Résistance électrique
E :	Tension délivrée par les anémomètres (Volts)	T :	Température ($^\circ C$)
L :	Longueur des éléments sensibles (fil/film)	Nombre adimensionnels	
\overline{T}_i :	Température moyenne ($\overline{T}_i = (T_{fil} + T_\infty)/2$)	Nu :	Nombre de Nusselt
U, u' :	Composante longitudinale de la vitesse (m/s)	Re :	Nombre de Reynolds
ξ :	Longueur typique de diffusion amont	Indices	
d :	Diamètre	$()_{fil}$:	Fil chaud
k :	Conductivité thermique	$()_{film}$:	Film chaud
X :	Fraction molaire	$()_\infty$:	Conditions ambiantes
α :	Diffusivité thermique		
μ :	Viscosité dynamique		

REFERENCE

- [1] A. Sirivat and Z. Warhaft, "The mixing of passive helium and temperature fluctuations in grid turbulence", *J. Fluid Mech.* 120 (1982) 475-504.
- [2] D. C. Collis and M. J. Williams, "Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers", *J. Fluid Mech.* 6 (1959) 357-384.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] J. Way and P. A. Libby, "Hot wire probes for measuring velocity and concentration in helium-air mixtures", *A. L. A. J.*, 8(5) (1970) 976-978.
- [6] 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
- [7] J. Way, and P. A. Libby, "Application of hot wire anemometry and digital techniques to measurements in a turbulent jet", *A. L. A. J.*, 9(8) (1971) 1567-1573.

- [8] 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.