

## Réduction des Etalonnages Multiples en Mesures Simultanées dans une Couche Limite Turbulente d'un Mélange Air-Hélium

A. Soudani<sup>1</sup>, S. Bougoul<sup>1</sup> et J. L. Harion<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département de physique, Faculté des Sciences, Université de Batna  
Rue Chahid Mohamed El Hadi Boukhrouf, Batna, Algérie

<sup>2</sup>Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, BP.53X 38041 Grenoble Cedex - France

**Résumé** – Les mesures simultanées par thermo-anémométrie de plusieurs grandeurs physiques d'un fluide en écoulement turbulent, nécessite l'emploi d'autant de sondes qu'il y a de variables. Un étalonnage est préalable à toute utilisation de ces capteurs pour des mesures. Cet étalonnage est fondé sur des lois d'ajustement, réalisées généralement par des méthodes classiques d'interpolation linéaire, des régressions polynomiales, des fonctions splines ou encore par des réseaux de neurones artificiels. Il permet d'établir le lien univoque entre les sorties de ces capteurs, données sous forme de tensions, et les paramètres physiques de l'écoulement à mesurer. Suivant la forme du réseau d'étalonnage obtenue, la précision de ces méthodes peut être extrêmement sensible aux degrés des polynômes d'ajustement et peut présenter ainsi des erreurs importantes d'interpolation. Il est donc nécessaire de tester systématiquement les paramètres d'ajustement pour chaque application. On montre à travers cette étude que, les méthodes de génération de grilles cartésiennes et de dépouillement de mesures, utilisant des régressions polynomiales et des interpolations linéaires, sont beaucoup moins précises que celles utilisant les fonctions splines et les réseaux de neurones artificiels. Les résultats obtenus montrent aussi que l'utilisation d'une surchauffe plus forte pour l'élément amont que l'élément aval de la sonde apporte, en général, une meilleure précision lors de la génération des grilles

**Abstract** – Simultaneous measurements by thermo-anemometry of several physical quantities of a fluid in turbulent flow, requires the use of as many probes than there are variables. A calibration is preliminary to any use of these sensors for measurements. This calibration is founded the of adjustment laws, generally carried out by traditional methods of linear interpolation, polynomial regressions, spline functions or by artificial neural networks. It makes it possible to establish the univocal bond between the outputs of these sensors, given in the form of tensions, and the physical parameters of the flow to be measured. According to the obtained form of the calibration network, the precision of these methods can be extremely sensitive to the degrees of the adjustment polynomials and can thus present significant errors of interpolation. It is thus necessary to test systematically the parameters of adjustment for each application. We show through this study that, the methods of generation of Cartesian grids and data reduction of measurements, using polynomial regressions and linear interpolations, are much less precise than those using the spline functions and artificial neural networks. The results obtained show that the use of a stronger overheating for the upstream element than the downstream element of the probe brings, in general, a better precision during the of the grids generation.

**Mots clés:** Etalonnage – Mesures simultanées – Sonde d'interférence – Capteur – Régressions polynomiales – Fonctions splines – Réseaux de neurones artificiels – Thermo-anémométrie – Fil-film chauds – Mélange de gaz – Ecoulement turbulent – Densité variable

### 1. INTRODUCTION

Dans la présente étude, on a utilisé une sonde d'interférence double à fil et film chauds (Fig. 1), pour effectuer des mesures simultanées de vitesse et de concentration dans un mélange air – hélium en écoulement turbulent de couche limite. La réalisation de mesures passe par un étalonnage des éléments de la sonde d'interférence. L'étalonnage d'un capteur multiple est réalisé en fixant un des paramètre de l'écoulement, et en faisant varier les autres.

On obtient, ainsi, un réseau d'étalonnage. Le passage du réseau d'étalonnage au dépouillement des mesures se fait par des lois d'ajustement définies par des régression polynomiale, des fonctions splines ou encore par des réseaux de neurones artificiels.

Avant de passer de l'étalonnage au dépouillement des mesures, une étape importante consiste à rendre utilisable le réseau d'étalonnage. Pour cela, on utilise une technique de génération de grille cartésienne. Cette technique a été utilisée avec succès par Stanford, Way et Libby [11, 12] dans des mélange air – hélium ainsi que par Lueptow et al. [7] pour des écoulements homogènes. En partant du réseau de tensions  $(E_{fil}, E_{film})$  obtenu en fixant pour chaque point la vitesse et la composition du fluide (par exemple Fig. 9), on forme une grille cartésienne régulière [11] ou non [12] aux nœuds de laquelle  $U$  et  $X$  sont calculés en fonction de  $E_{fil}$  et  $E_{film}$ . Ces valeurs sont alors stockées sous forme de tableaux. Lors du dépouillement des mesures, la conversion des tensions en grandeurs physiques est réalisée par interpolation linéaire, bilinéaire [7] ou quadratique [11, 12] à partir des nœuds de la grille situés au voisinage du point de mesure.

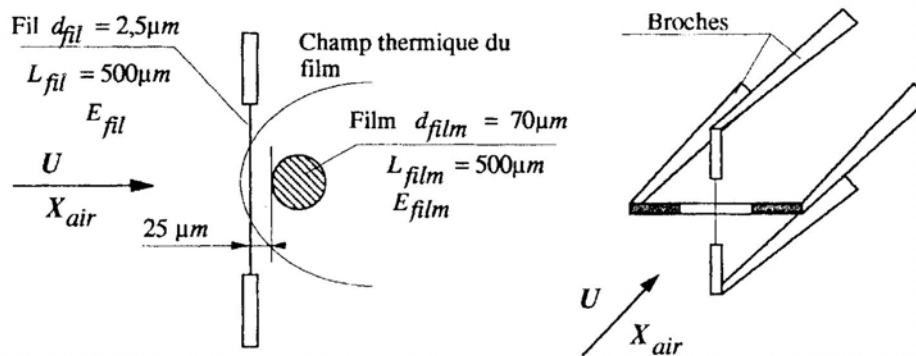


Fig. 1: Principe de la sonde d'interférence.

La précision de cette méthode dépend de plusieurs facteurs. Tout d'abord, la forme des surfaces  $U(E_{fil}, E_{film})$  et  $X(E_{fil}, E_{film})$  qui est essentiellement liée aux deux surchauffes appliquées aux éléments sensibles. Plus le réseau d'étalonnage est resserré, plus les gradients de vitesse et de concentration par rapport aux tensions sont élevés, ce qui amplifie les erreurs. Ensuite, la précision est liée au pas du maillage de la grille (LUEPTOW & al. [7] utilisent une grille  $40 \times 40$ ). Pour la présente étude, les grilles ont pour dimension  $200 \times 200$ . Enfin, une part très importante de la précision des résultats est liée à l'algorithme utilisé pour la génération de ces grilles. C'est pourquoi un important travail a été réalisé sur ce point. Quatre différentes méthodes ont été testées. Elles seront tout d'abord présentées et ensuite comparées entre elles sur des dépouillements de mesures réalisées en soufflerie.

### 1.1. Principe de l'expérience

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. 2-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. 2-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.

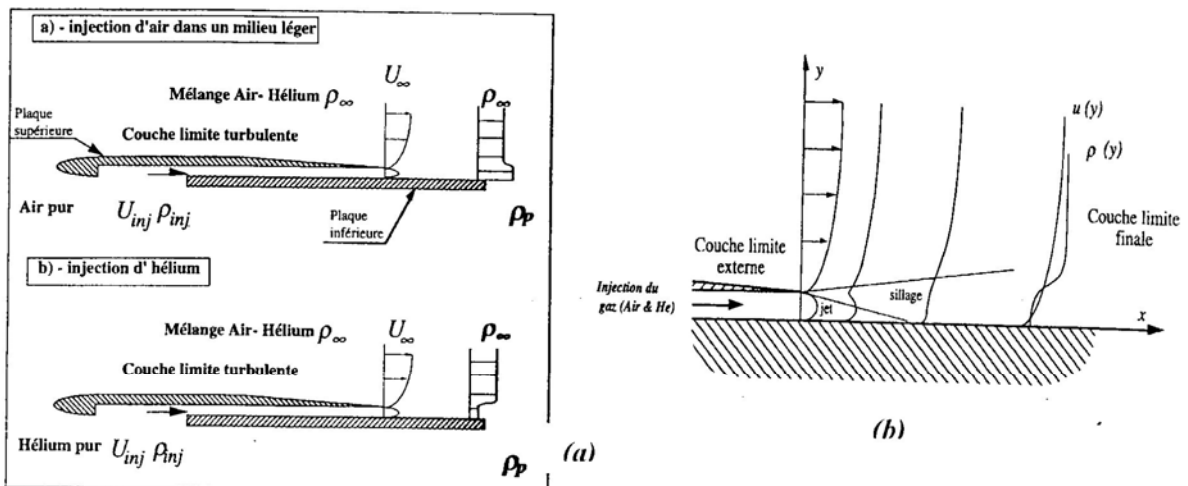


Fig. 2: (a): Principe de l'expérience, (b): Schématisation du développement du jet pariétal

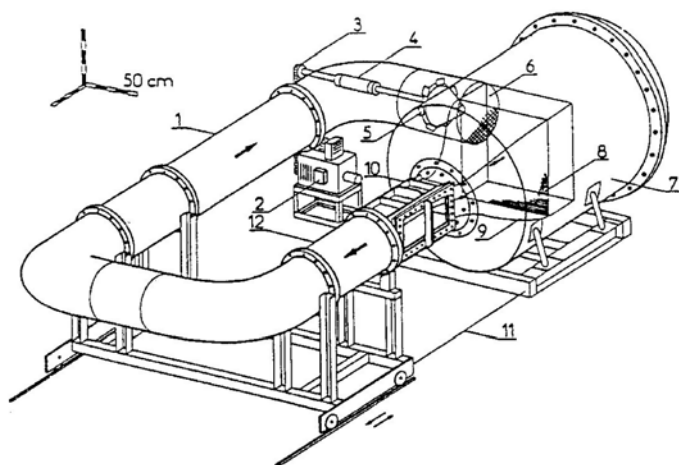
Les essais ont été effectués dans une soufflerie, où règne la pression atmosphérique, en injectant alternativement de l'air ( $\rho_{air} = 1,293 \text{ Kg/m}^3$ ) et de l'hélium ( $\rho_{He} = 0,1785 \text{ Kg/m}^3$ ) dans un mélange à densité constante. Les mesures ont été réalisées par une sonde d'interférence développée et expérimentée initialement par Way et Libby (1970, 1971). 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 ( $\sim 25 \mu\text{m}$ ) et la taille du film ( $d_{film} = 70 \mu\text{m}$ ) 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 (1970, 1971).

L'étalonnage est réalisé en faisant varier la vitesse de 0,5 à 7 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.

## 1.2. 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  $5 \times 3 \text{ m}$  et un volume interne de  $6 \text{ m}^3$ . Sa masse totale est d'environ 3 tonnes. Elle comprend (Fig. 3):

- Une tuyauterie cylindrique (1) (diamètre intérieur  $0,5\text{ m}$ , épaisseur  $5\text{ mm}$ ).
- -Un réservoir de tranquillisation (9) ( $\varnothing 1,5 \times 2\text{ m}$ ) dans lequel sont logés des grilles (au nombre de 7; maille  $0,65$  à  $1,3\text{ mm}$ ), 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) ( $0,3 \times 0,3\text{ m}$ , longueur  $1\text{ m}$ ) 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  $0,73 \times 0,3\text{ m}$ , et d'une épaisseur de  $60\text{ mm}$ . 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  $9\text{ mm/m}$  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  $6\text{ kW}$ , dont la vitesse de rotation est réglable de  $50$  à  $1660\text{ tr/mn}$ . 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.



- (1)- tuyauterie cylindrique ( $\varnothing 0,5\text{ m}$ )
- (2)- moteur (puissance  $6\text{ kW}$  à  $1660\text{ tr/mn}$ )
- (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 ( $0,3 \times 0,3 \times 1\text{ m}$ )
- (11)- bâti
- (12)- diffuseur

Fig. 3: Schéma général de la soufflerie.

La pression interne de la soufflerie est réglée 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.

## 2. REGRESSIONS POLYNOMIALES SUCCESSIVES

### 2.1. Cas où le film est fortement surchauffé

Cette méthode débute par un lissage des données d'étalonnage. Pour cela on ajuste au sens des moindres carrés les points  $E_{fil}(X)$  et  $E_{film}(X)$  pour  $U = Cte$  par des polynômes de quatrième degré. L'étape suivante consiste à calculer les ajustements polynomiaux de  $E_{film}(E_{fil})$  et  $U(E_{fil})$  (degré 2 et 4 respectivement) pour chaque valeur de la fraction molaire

$X$  (phase A, Fig. 4). On peut alors discrétiser l'intervalle  $[(E_{fil})_{min}, (E_{fil})_{max}]$  en fonction du pas de grille souhaité (dans la présente étude le pas est pris comme  $((E_{fil})_{min} - (E_{fil})_{max})/199$ ) et recalculer  $E_{film}$  et  $U$  pour chaque point.

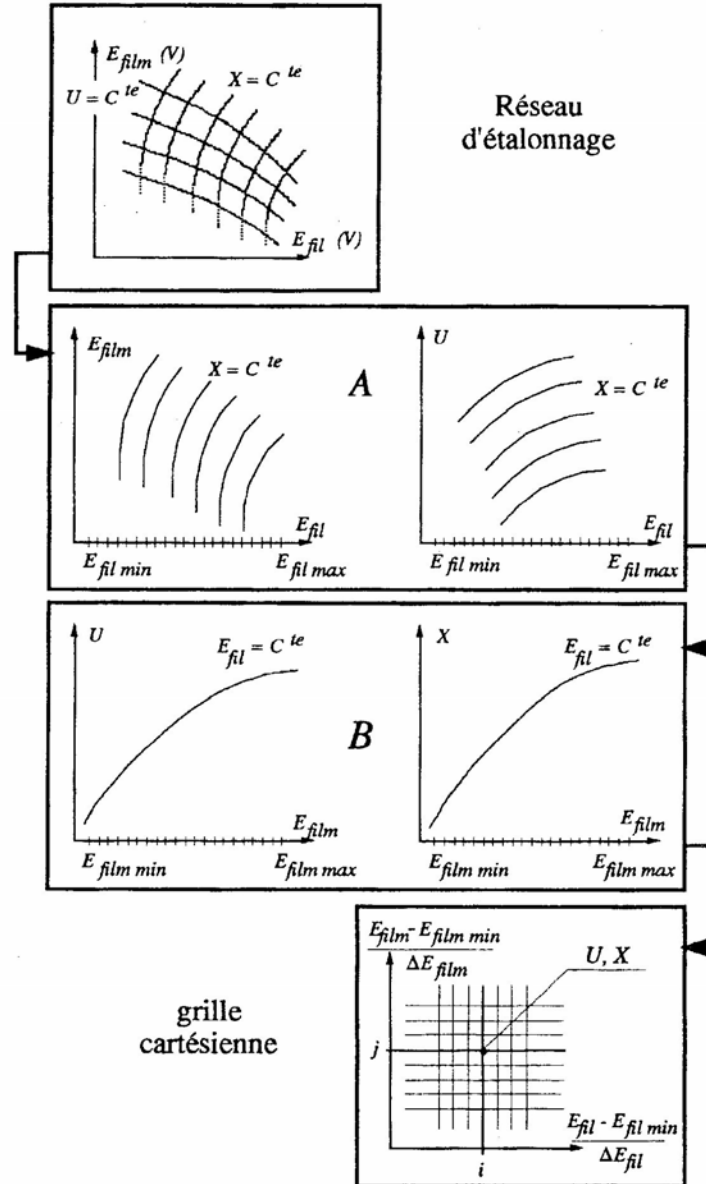


Fig. 4: Construction par régressions polynomiales d'une grille cartésienne à partir du réseau d'étalonnage d'une sonde double.

Cette opération permet, pour chaque valeur de  $E_{fil}$ , d'ajuster  $X(E_{film})$  et  $U(E_{film})$  par des polynômes de second degré (phase B figure 4). En discrétisant alors l'intervalle  $[(E_{film})_{min}, (E_{film})_{max}]$  et en recalculant pour chaque point  $X(E_{film})$  et  $U(E_{film})$ , on connaît pour 40000 couples  $(E_{fil}, E_{film})$  les valeurs de  $U$  et  $X$  qui leur sont associées. On a ainsi formé deux tableaux en  $U$  et  $X$  de dimension  $200 \times 200$  dont on limite la zone de validité par les conditions respectives  $U_{min} \leq U \leq U_{max}$  et  $X_{min} \leq X \leq X_{max}$ . Les mesures sont alors

dépouillées par interpolations linéaires portant sur les trois points des tableaux les plus proches de  $(E_{fil}, E_{film})_{mesuré}$ .

Une des principales causes d'erreurs dans cette méthode de génération de grille est liée au choix des degrés des polynômes d'ajustement. Ceux-ci ont été définis par essais successifs en se basant sur les écarts entre les points d'étalonnage initiaux et ceux recalculés à partir des paires  $(E_{fil}, E_{film})_{étalonnage}$ .

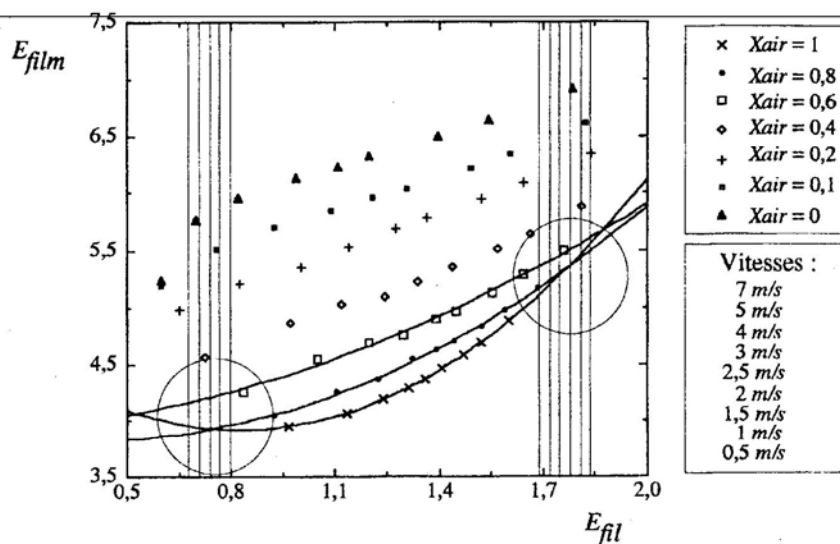


Fig. 5: Extrapolations nécessaires dans la méthode de génération de grille cartésienne par régressions polynomiales.

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

Une autre cause d'erreur est liée au passage des ajustements  $E_{film}(E_{fil})$  pour  $X = Cte$  à ceux  $X(E_{film})$  pour  $E_{fil} = Cte$  (phase B, Fig. 4) qui nécessite l'utilisation des valeurs extrapolées dans certaines zones (Fig. 5). Ceci peut fausser localement de façon notable les résultats. Il est clair que les erreurs possibles sont alors inhérentes à la forme du réseau d'étalonnage et donc aux surchauffes appliquées au film et au fil. Pour tester la précision de la méthode de réduction d'étalonnage, nous avons calculé les vitesses et les concentrations à partir des couples de tensions  $(E_{fil}, E_{film})_{étalonnage}$  en utilisant la grille ainsi générée. Les valeurs obtenues sont comparées aux valeurs réelles fixées comme conditions d'étalonnage en calculant, sur l'ensemble des points, un écart relatif moyen de vitesse  $\Delta U/U_{moy}$  et un écart moyen de fraction molaire  $\Delta X$ . La méthode de régressions polynomiales donne les écarts suivant :  $\Delta U/U_{moy} \cong 8\%$  et  $\Delta X \cong 0,013$ .

## 2.2. Cas où le fil est fortement surchauffé

Dans ce cas, on utilise la même démarche en y apportant deux modifications. Tout d'abord, les ajustements polynomiaux faits dans la phase A (Fig. 4) ne sont plus calculés pour les iso-concentrations mais pour les courbes iso-vitesses. Ensuite, une transformation linéaire dans le plan  $(E_{fil}, E_{film})$  convertit le réseau d'étalonnage réel dont la forme peut être grossièrement être assimilée à un losange en un domaine beaucoup plus proche d'un rectangle qui est plus favorable à ce type d'algorithme [8]. Cette transformation est réalisée en écrivant les coordonnées des points d'étalonnage dans la base donnée par les deux vecteurs  $\overline{P_1P_2}$  et

$\overrightarrow{P_1 P_3}$  (Fig. 6). Le réseau ainsi obtenu est présenté sur la figure 6 (b). Il est également possible d'effectuer ce type de transformation à partir des vecteurs  $\overrightarrow{P_1 P_2}$  et  $\overrightarrow{P_1 P_3}$  (Fig. 6 (a)), l'algorithme est alors en tous point identique à celui présenté pour la première configuration de surchauffes.

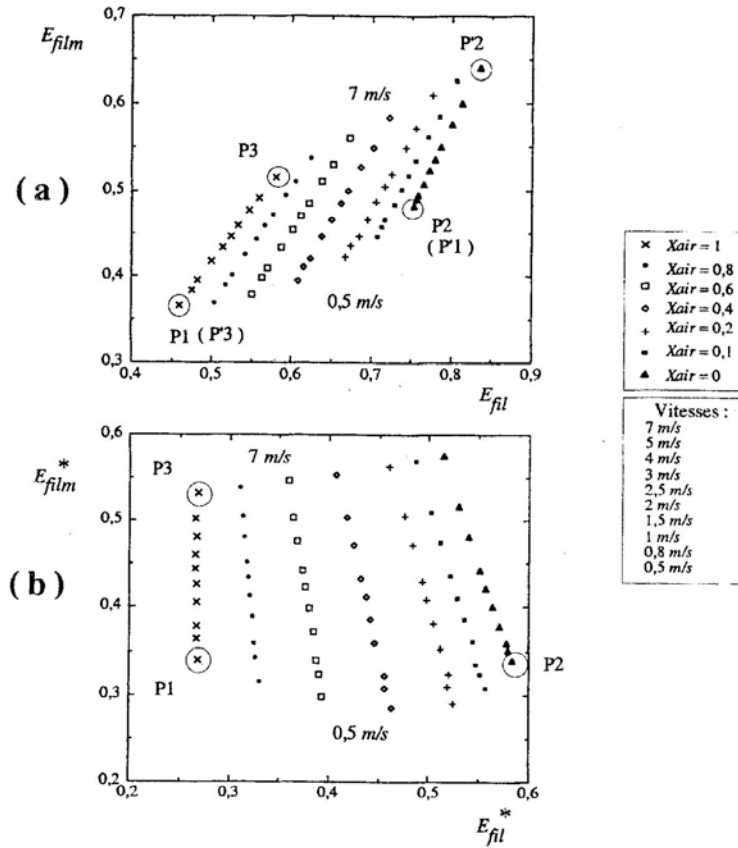


Fig. 6: Réseau d'étalonnage de la sonde d'interférence  
 $T_{fil} = 250^\circ C$  et  $T_{film} = 100^\circ C$  ; (a): Tensions brutes  
 (b) : Après transformation linéaire dans le plan  $(E_{fil}^*, E_{film}^*)$

Par cette méthode, on obtient un écart relatif moyen de vitesse  $\Delta U / U_{moy} \cong 3,4\%$  et un écart de fraction molaire  $\Delta X \cong 0,0059$  ce qui représente un résultat nettement meilleur que le précédent.

### 3. FONCTIONS SPLINES

La génération de grilles cartésiennes en  $U$  et  $X$  est réalisée en suivant le même algorithme (phase A et B figure 4) que pour les régressions polynomiales. Les polynômes sont remplacés par des fonctions d'interpolation splines cubiques. Pour une variable discrète  $y_i = y(x_i)$ ,  $i = \overline{1, N}$ , l'interpolation sur l'intervalle  $[x_i, x_{i+1}]$  est effectué par [9] :

$$y = Ay_i + By_{i+1} + Cy_i'' + Dy_{i+1}''$$

avec

$$A \equiv \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} \quad B \equiv \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}$$

$$C \equiv \frac{1}{6}(A^3 - A)(x_{i+1} - x_i)^2 \quad D \equiv \frac{1}{6}(B^3 - B)(x_{i+1} - x_i)^2$$

L'interpolation produite tient donc à la fois compte des données discrètes initiales et des courbures. Sur les bords ( $i = 1$  et  $N$ ), les dérivées seconds sont fixées à 0 (c'est le cas d'une fonction spline naturelle).

Les écarts moyens  $\Delta U / U_{moy}$  et  $\Delta X$  obtenus à l'aide de ces fonctions pour des surchauffes fixées à  $T_{fil} = 75^\circ C$  et  $T_{film} = 175^\circ C$  (Fig. 9) sont très faibles : 0,27% et 0,0009 respectivement. Les interpolations par fonctions splines donnent donc des résultats bien meilleurs que celles utilisant des polynômes.

#### 4. INTERPOLATION LINEAIRE

Pour générer la grille d'étalonnage, on commence par discrétiser les intervalles  $[(E_{film})_{min}, (E_{film})_{max}]$  et  $[(E_{fil})_{min}, (E_{fil})_{max}]$ . Pour chaque couple de tensions  $M(E_{fil}, E_{film})$ , on cherche alors les trois points d'étalonnage les plus proches ( $M_1, M_2, M_3$ ) pour lesquels les valeurs de  $U$  et  $X$  sont connues. En effet, la vitesse et la concentration en  $M$  sont données par la relation :  $(\overrightarrow{M_1M_2} \wedge \overrightarrow{M_1M_3}) \cdot \overrightarrow{M_1M} = 0$  c'est à dire en déterminant  $U(M)$  et  $X(M)$  telles que  $M$  appartienne au plan passant par  $M_1, M_2, M_3$  (Fig. 7). Cet algorithme présente l'avantage de s'affranchir des causes d'erreurs rencontrées en utilisant des régressions polynomiales. Les écarts moyens calculés précédemment à partir des données d'étalonnage sont extrêmement faibles ( $\Delta U / U_{moy} \leq 0,05\%$  et  $\Delta X \approx 0,00005$ ). Ils sont dus au fait que les points d'étalonnage ne correspondent pas nécessairement à un nœud de la grille. Cette méthode est donc très précise mais peut cependant, comme nous le verrons au paragraphe suivant, générer des erreurs d'une autre nature.

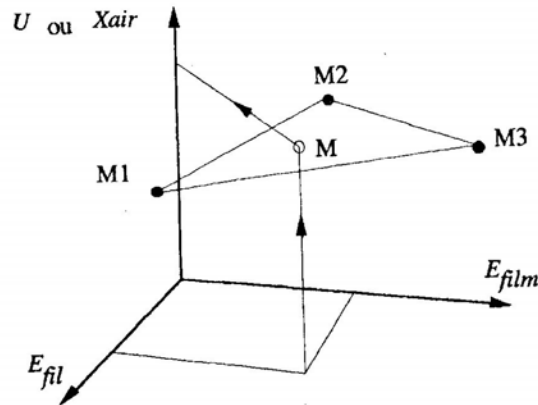


Fig. 7: Construction de la grille cartésienne par interpolation linéaire.

#### 5. RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

En terme de théorie des systèmes, il s'agit de déterminer la fonction de transfert, généralement non linéaire, entre les entrées (tensions des capteurs) et les sorties (paramètre physique) ou encore le meilleur « acheminement » qui les relie. Une procédure non classique consisterai à doter le système en question d'autant de paramètres nécessaire à l'obtention de la réponse. Une méthode « plus intelligente » ferait que cet ajustement s'établisse avec un



minimum d'intervention en laissant les paramètres interagir librement. Ces arguments font appel à des procédures de l'intelligence artificielle, en particulier aux réseaux de neurones dans lesquelles des « cellules » indépendantes reçoivent l'information de leurs parrains agissant en contre partie sur eux et l'ensemble s'adaptant au fur et à mesure.

Le principe d'un réseau de neurones artificiels est basé sur l'interconnexions des éléments de traitements (neurones) [10]. Son fonctionnement est caractérisé par une fonction d'activation dite de transfert, souvent de type sigmoïde :  $f(z) = 1/(1 + e^{-z})$  (Fig. 8).

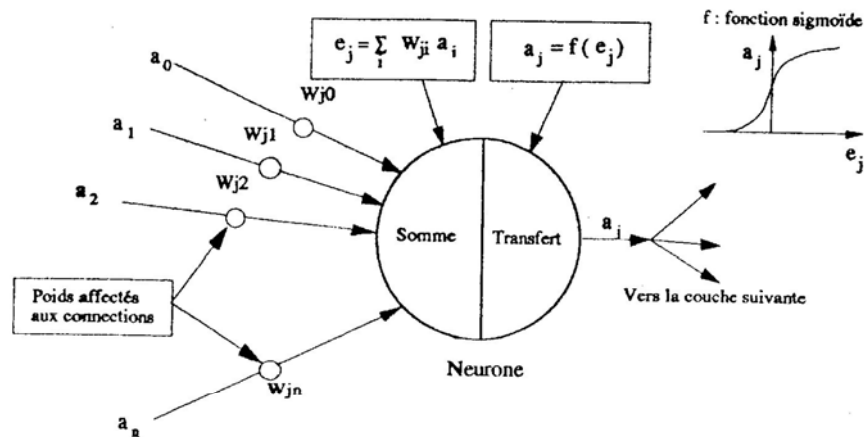


Fig. 8: Principe de calcul d'un neurone

Son entrée est constituée de la somme des sorties des neurones qui y sont reliés par des « poids » affectés aux connexions. Sa sortie, calculée par la fonction de transfert, constitue alors une composante de l'entrée de tous les neurones auxquels il est connecté. Cet élément de traitement est inséré dans une structure générale (réseau) qui est organisée de la façon suivante (Fig. 9) :

- Une couche d'entrée à laquelle on impose les données. Dans le cas présent, les entrées sont constituées des tensions  $E_{ji}$  et  $E_{jlm}$  adimensionnalisées (normalisées) et réparties sur plusieurs neurones par un codage semi distribué [6].
- Une couche de sortie qui fournit les résultats du réseau ( $U$  et  $X$  adimensionnalisées (normalisées) entre 0,2 et 0,8).
- Une ou plusieurs couches cachées dont le rôle est d'ajuster au mieux les sorties en fonction des entrées.

L'architecture du réseau étant définie, son utilisation est précédée d'une phase d'apprentissage [1]. L'apprentissage est nécessaire pour adapter le réseau à l'environnement auquel il est confronté. Le type d'apprentissage utilisé pour cette application est dit « supervisé » : la sortie souhaitée est connue pour un certain nombre de points fixés comme consigne (points d'étalonnage). L'adaptation du réseau porte sur l'ajustement des poids des connexions  $W_{ji}$  (poids de la connexion entre le  $i^{\text{ème}}$  neurone de la couche  $I$  et le  $j^{\text{ème}}$  neurone de la couche  $J$  : Fig. 9). L'apprentissage est basé sur l'écart entre les sorties obtenues et souhaitées, l'ajustement se fait par rétro-propagation de l'erreur, en utilisant la méthode de la descente du gradient (la règle delta) [1].

Les écarts moyens  $\Delta U / U_{\text{moy}}$  et  $\Delta X$  obtenus par les réseaux de neurones sont très faibles et le dépouillement des mesures est automatique (i. e. on aura pas besoin de réaliser des interpolations entre les points du réseau d'étalonnage).

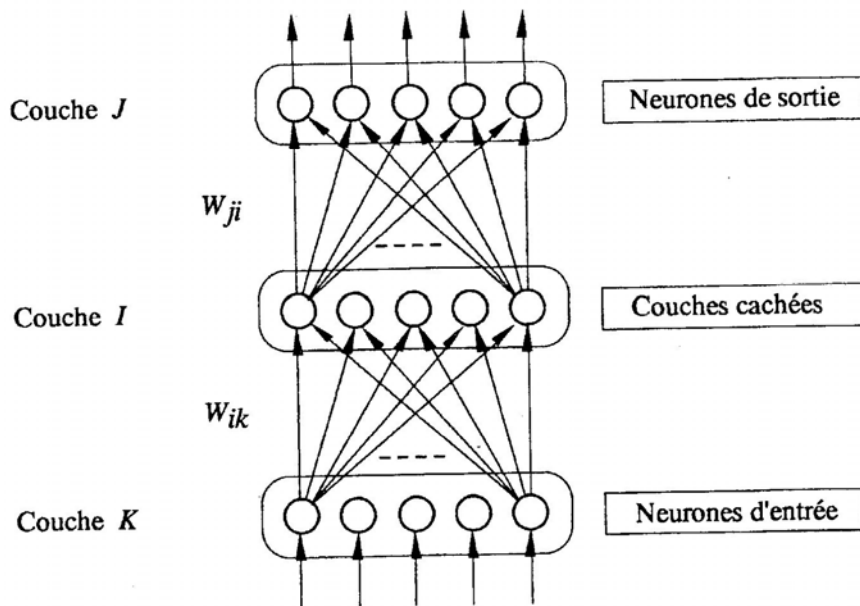


Fig. 9: Schéma de l'architecture d'un réseau de neurone.

Cette méthode est donc bien adaptée au cas de la sonde double expérimentée dans cette étude. Elle représente de plus l'énorme avantage de pouvoir être facilement étendue au cas des mesures simultanées de trois grandeurs ( $u, v, \rho$ ) par une sonde triple à film et deux fils (Fig. 10), simplement en ajoutant une tension à l'entrée et une grandeur physique à la sortie ( $E_{film2}$  et  $v$  respectivement).

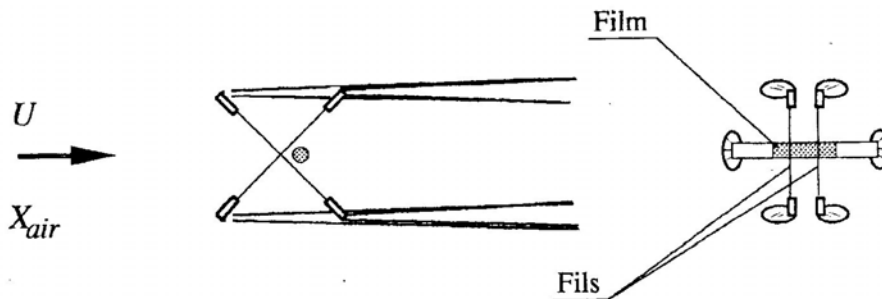


Fig. 10: Schéma de la géométrie d'une sonde triple.

## 6. COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTES METHODES

Une première comparaison est possible à partir des écarts relatifs moyens de vitesse  $\Delta U / U_{moy}$  et des écarts de fraction molaire  $\Delta X$  présentés pour chacune des méthodes exposées précédemment. Une idée plus précise et plus complète des erreurs induites par les différents algorithmes est fournie par le calcul des écart-types en vitesse et fraction molaire. Ce calcul a été réalisé pour les quatre méthodes à partir des étalonnages obtenus pour les surchauffes fixées à  $T_{fil} = 75^{\circ}C$ ,  $T_{film} = 175^{\circ}C$  (Fig. 11) et  $T_{fil} = 250^{\circ}C$ ,  $T_{film} = 100^{\circ}C$  (Fig. 6 (a) et (b)). Les écart-types obtenus sont résumés en Tableau 1. Une visualisation des dispersions est présentée sur la figure 12 pour le premier couple de surchauffes. Deux résultats apparaissent clairement à la lecture du Tableau 1 :

- La méthode des régressions polynomiales successives est nettement moins précise que les autres méthodes testées pour la génération d'une grille cartésienne dans le

cas de la sonde d'interférence. Ceci est confirmé par la figure 12 où la dispersion autour de la première bissectrice est beaucoup plus importante pour le premier algorithme que pour les autres, en particulier pour les vitesses les plus faibles.

- L'utilisation d'une surchauffe plus forte pour l'élément amont que l'élément aval apporte, en général, une meilleure précision lors de la génération des grilles.

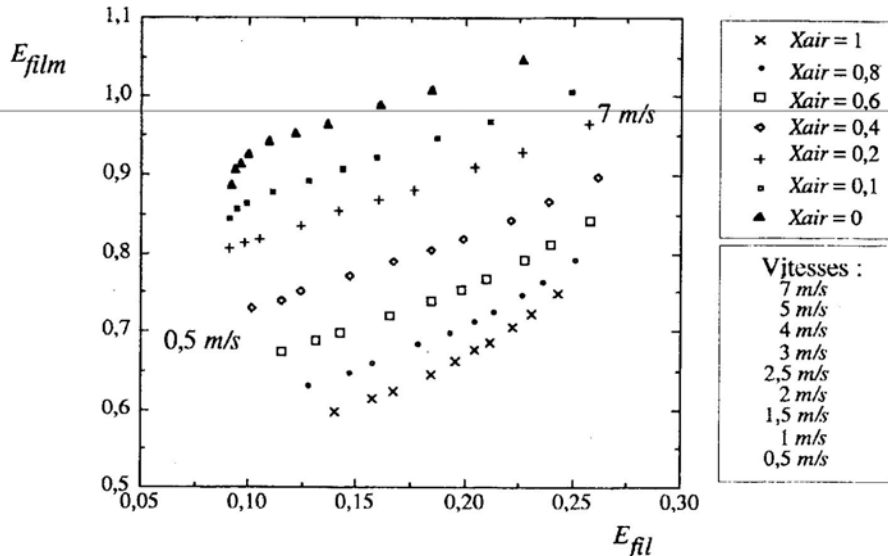


Fig. 11: Réseau d'étalonnage de la sonde d'interférence.  $T_{fil} = 75^\circ C$  et  $T_{film} = 175^\circ C$

**Tableau 1:** Ecart-types en vitesse et en fraction molaire pour les quatre méthodes de génération de grille appliquées à deux réseaux d'étalonnage de la sonde d'interférence.

Surchauffes appliquées	Algorithme utilisé	$\sigma_{U_i}$ (cm/s)	$\sigma_X$
$T_{fil} = 75^\circ C$ et $T_{film} = 175^\circ C$ Fig. 9	Régressions polynomiales	15,5	0,0153
	Fonctions splines	0,95	0,0005
	Interpolation linéaire	0,28	0,0003
	Réseaux neuronaux	0,16	0,0002
$T_{fil} = 250^\circ C$ et $T_{film} = 100^\circ C$ étalonnage « conditionné » Fig. 4 (a)	Régressions polynomiales	5,90	0,0065
	Fonctions splines	1,08	0,0009
	Interpolation linéaire	0,55	0,0004
	Réseaux neuronaux	0,08	0,0001

Ces algorithmes ont ensuite été testés par le dépouillement des mesures réalisées dans une configuration de couche limite turbulente avec injection pariétale tangentielle d'air ou d'hélium dans un écoulement à faible teneur en hélium. Les conditions d'écoulement (Fig. 13) sont les suivant :

Vitesse extérieure :  $U_\infty = 5,8 \text{ m/s}$

Densité extérieure :  $\rho_\infty = 1,0 \text{ Kg/m}^3$  ( $X_{air_\infty} = 0,8$ )

Vitesse débitante d'injection :  $U_d = 2 \text{ m/s}$

Epaisseur de la fente d'injection :  $e = 3 \text{ mm}$

Epaisseur de la couche limite au bord de fuite :  $\delta = 22 \text{ mm}$

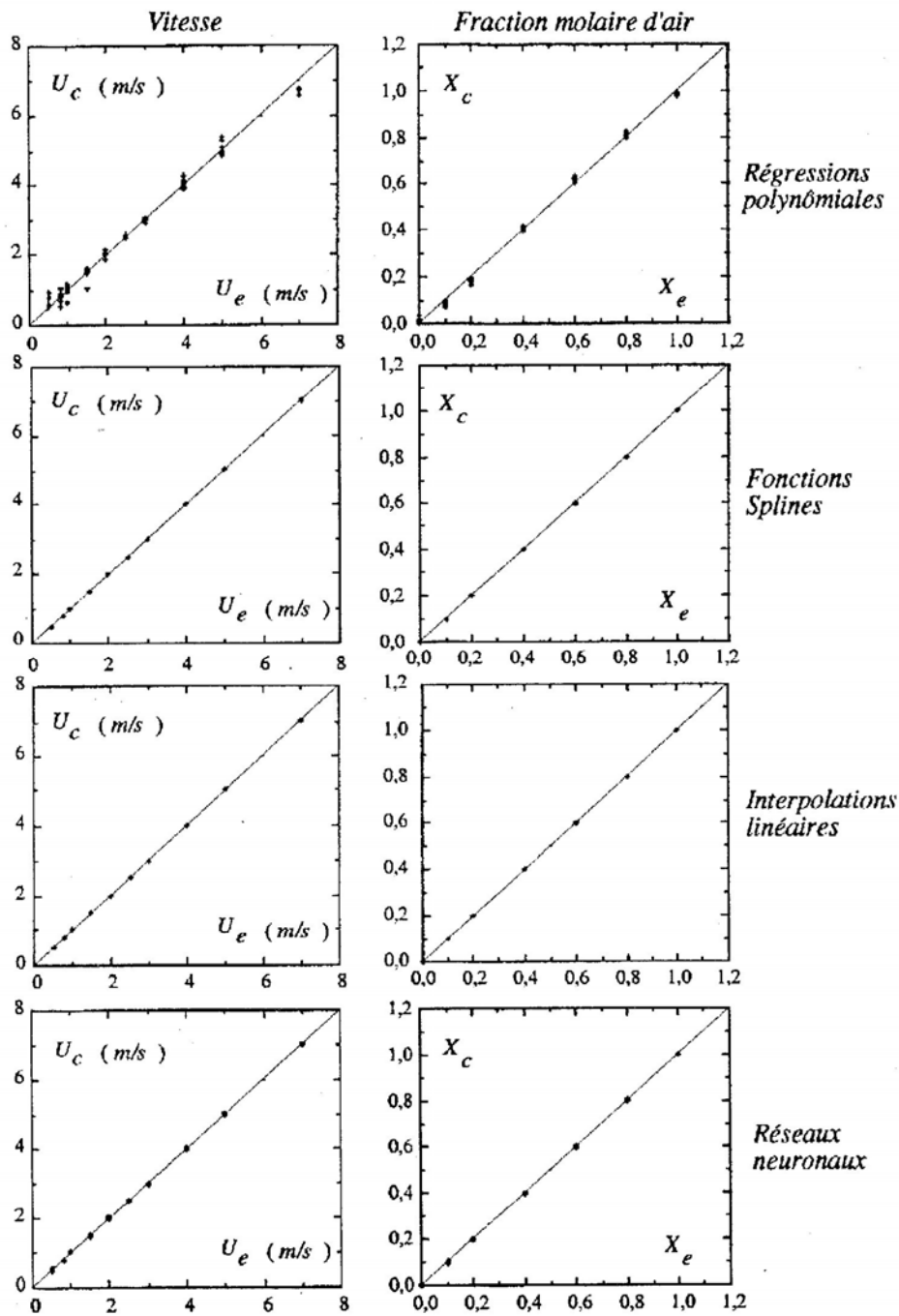


Fig. 12: Ecarts induits par les quatre algorithmes de génération de grille appliqués à un réseau d'étalonnage de la sonde d'interférence.  $U_e, X_e$  : Conditions d'étalonnage,  $U_c, X_c$  : Vitesses et fractions molaires recalculées à partir de  $(E_{fil}, E_{film})$  et de la grille cartésienne d'étalonnage.  $T_{fil} = 75^\circ C$  et  $T_{film} = 175^\circ C$

Les surchauffes utilisées pour la sonde d'interférence sont  $T_{fil} = 75^\circ C$  et  $T_{film} = 175^\circ C$  (Fig. 11). Les mesures de fraction molaire d'air sont faites simultanément par une sonde aspirante externe placée à la même distance  $y$  de la paroi que la sonde d'interférence.

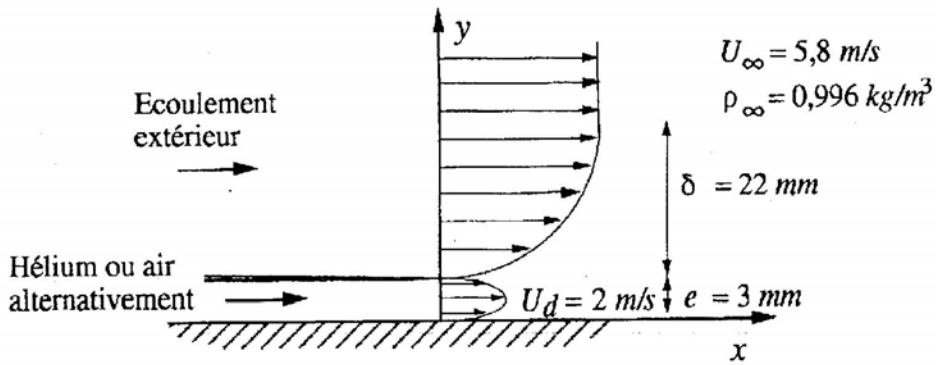


Fig. 13: Configuration et paramètres d'écoulement.

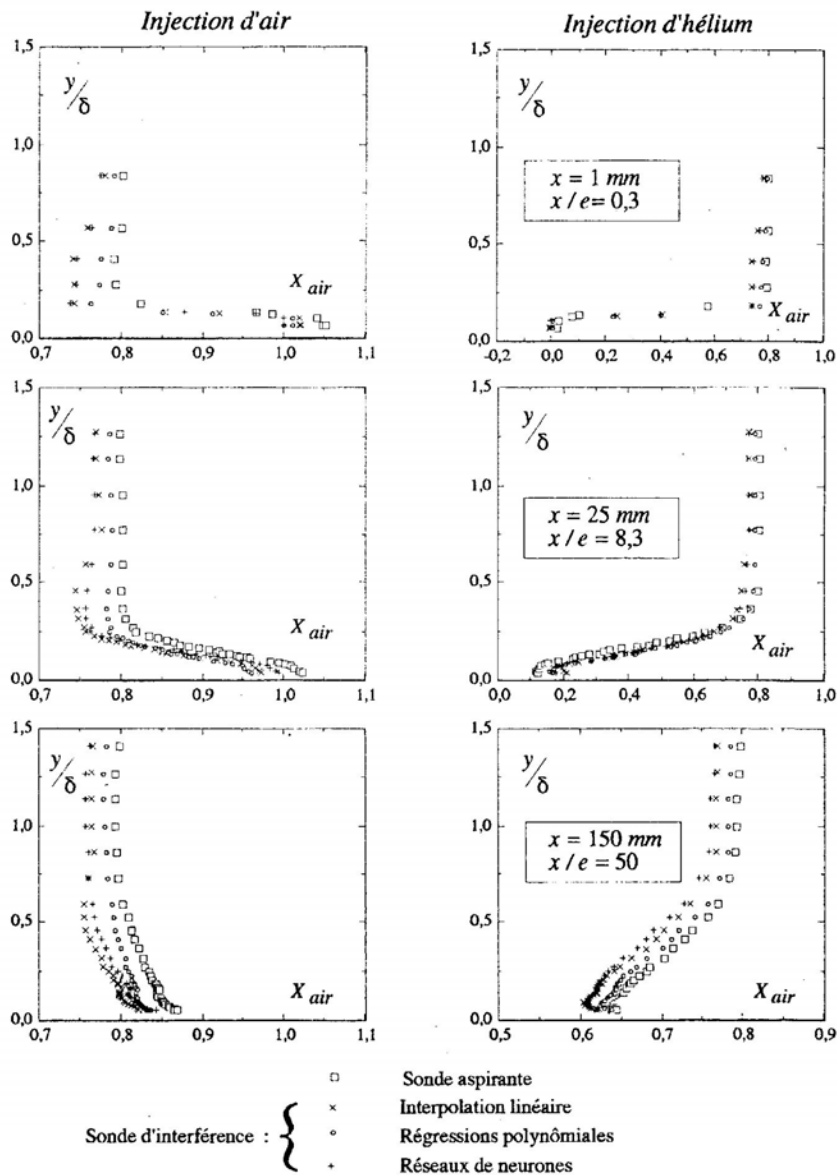


Fig. 14: Comparaison des profils de fraction molaire d'air  $X_{air}$ .

La figure 14 présente les profils de fraction molaire moyenne obtenus dans trois sections successives. Par souci de lisibilité, cette figure ainsi que les deux suivantes, ne présente que

les dépouillements réalisés par régressions polynomiales, interpolations linéaires et réseaux neuronaux. Les fonctions splines fournissent en tout point des résultats similaires à ceux obtenus par les réseaux de neurones.

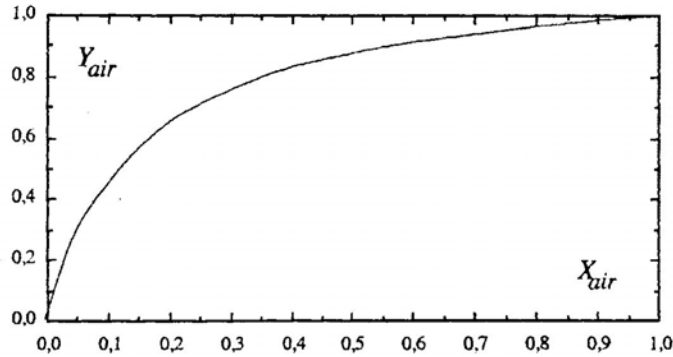


Fig. 15: Relation entre fractions molaire  $X$  et massique  $Y$  pour un mélange air/hélium.

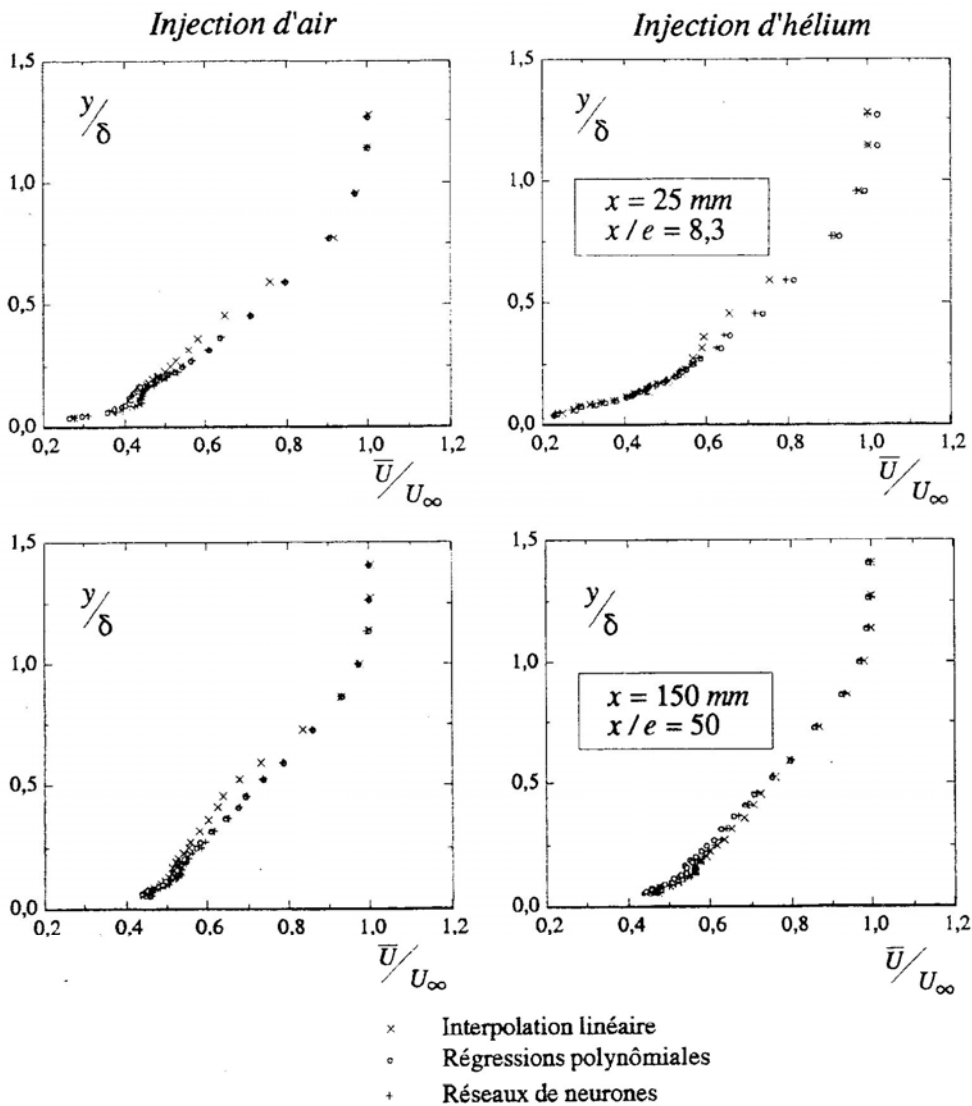


Fig. 16: Comparaison des profils de vitesse moyenne  $\bar{U}/U_\infty$ .

On peut constater un bon accord entre les résultats obtenus par les deux capteurs de mesure ainsi qu'entre les méthodes de traitement des données. Les écarts maximums relevés sont de l'ordre de 0,05 ce qui, pour  $(X_{air})_{moyen} \approx 0,8$  correspond à des écarts de fraction massique de l'ordre de 1% (l'évolution de la fraction massique en fonction de  $X_{air}$  est non linéaire (Fig. 15)). Il est important de noter que ces écarts englobent également les erreurs apportées par la sonde aspirante. Ces dernières peuvent être non négligeables. En effet, pour une injection d'air, en  $x = 1 \text{ mm}$ , près de la paroi, la sonde aspirante donne  $X_{air} = 1,05$ . Seule la sonde d'interférence, associée à la résolution par réseaux neuronaux, donne  $X_{air} = 1$ . En ce qui concerne les vitesses, les profils de vitesse moyenne  $\bar{U}/U_{\infty}$  et fluctuations de vitesse longitudinale  $\sqrt{u'^2}/U_{\infty}$  sont présentés sur la figure 16 et 17 respectivement. Pour l'algorithme d'interpolation linéaire, l'observation de ces figures met en évidence d'une part, une légère sous-estimation de la vitesse moyenne autour de  $y/\delta \approx 0,5$  (Fig. 16) et d'autre part, une très nette surévaluation des fluctuations autour de  $y/\delta \approx 0,6$  (Fig. 17).

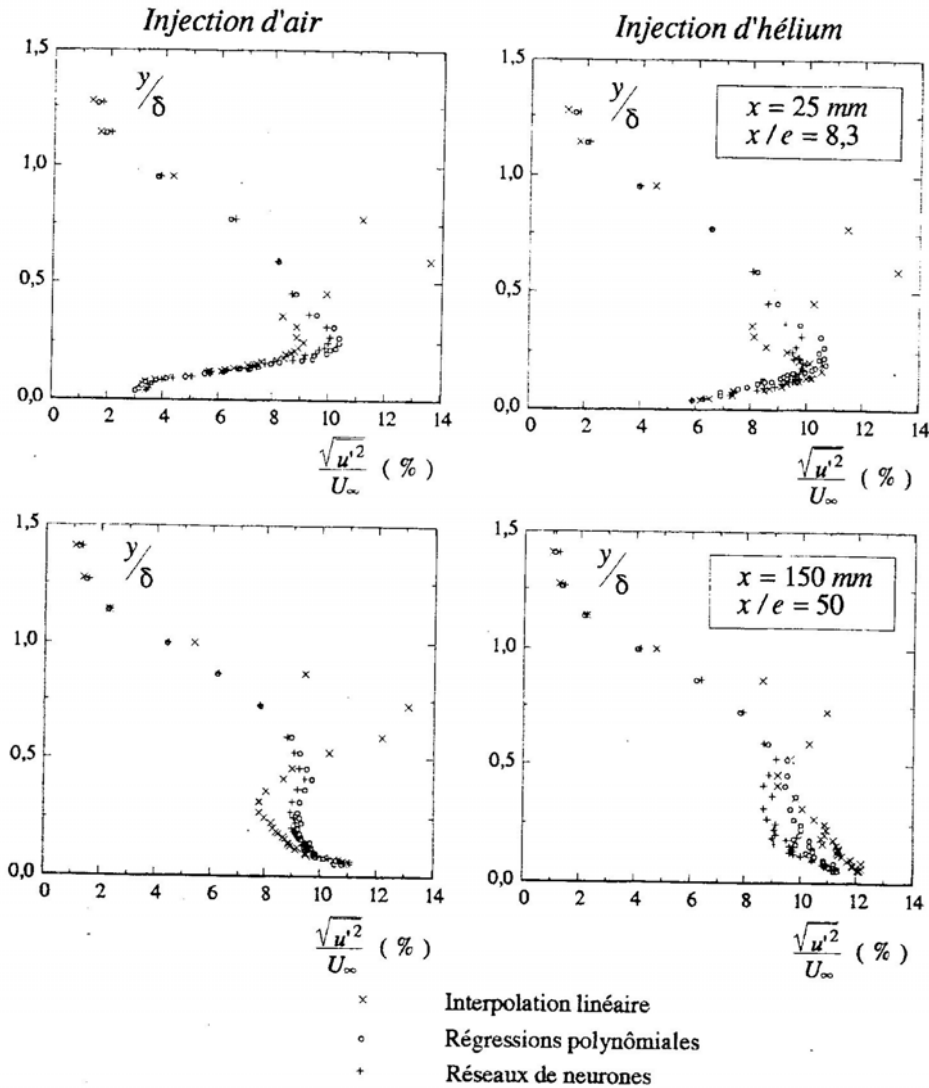


Fig. 17: Comparaison des profils de fluctuations de vitesse  $\sqrt{u'^2}/U_{\infty}$ .

Afin de comprendre l'origine de ces erreurs, une représentation d'une partie de la grille générée par cette méthode est donnée sur la figure 18. On peut constater sur cette figure qu'il existe des discontinuités dans la détermination de la vitesse. Pour des tensions moyennes proches d'un de ces sauts de vitesse, les fluctuations sont artificiellement amplifiées. Ces discontinuités proviennent de la forme du réseau d'étalonnage et du fait que les trois points choisis pour le calcul sont les points les plus proches. A partir de ce dernier critère, certains nœuds de la grille sont générés non pas par interpolation mais par extrapolation (Fig. 19).

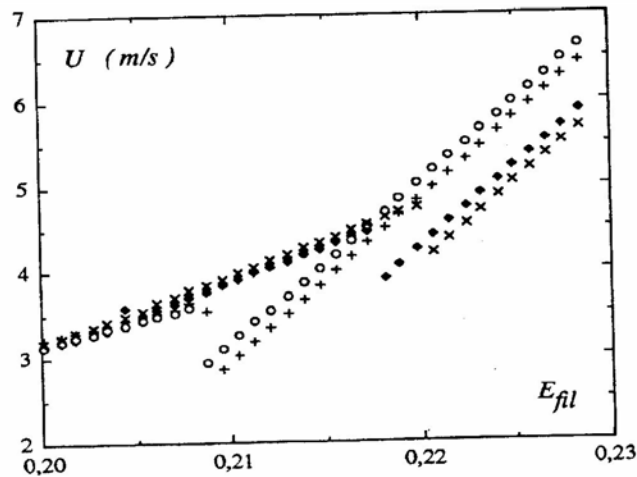


Fig. 18: Visualisation d'une partie de la grille des vitesses obtenue par Interpolation linéaire ( $U$  en fonction de  $E_{fil}$  à  $E_{film} = Cte$ ).

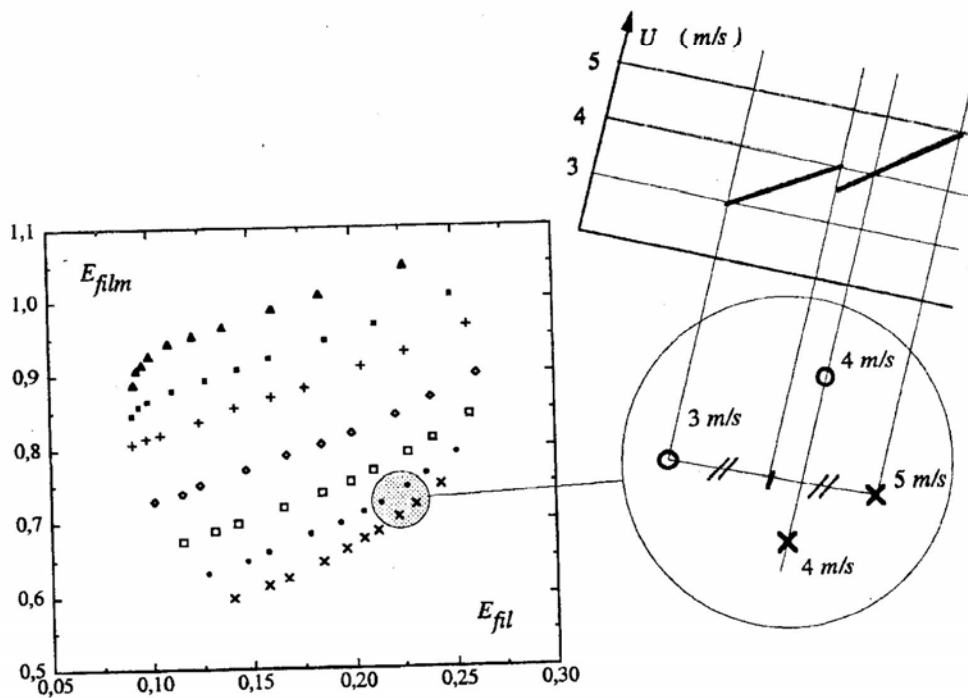


Fig. 19: Justification des sauts de vitesses observés lors de la génération d'une grille par interpolation linéaire.



## 7. CONCLUSION

En conclusion, les méthodes de génération de grilles cartésiennes et de dépouillement de mesures, utilisant des régressions polynomiales et des interpolations linéaires, sont beaucoup moins précises que celles utilisant les fonctions splines et les réseaux de neurones artificiels. Ceci est confirmé par la figure 12 où la dispersion autour de la première bissectrice est beaucoup plus importante pour les premiers algorithmes que pour les deux dernières méthodes, surtout pour les vitesses les plus faibles. Les résultats obtenus montrent aussi que l'utilisation d'une surchauffe plus forte pour l'élément amont que l'élément aval apporte, en général, une meilleure précision lors de la génération des grilles (Table 1).

En particulier, la méthode des réseaux de neurones est plus précise que celles testées dans la présente étude. Elle présente deux avantages importants. Le premier est la simplicité de mise en œuvre et le caractère automatique du calcul. En effet, une fois le réseau défini, il s'adapte lui-même à l'étalonnage auquel il est confronté. Le second avantage est la généralisation facile aux mesures simultanées de plus de deux grandeurs. Ceci est extrêmement intéressant, pour des mesures de vorticité ou des mesures triples ( $u, v, \rho$ ) dans des mélanges air-hélium. La conversion tension/grandeurs physiques est alors simultanée contrairement aux méthodes classiques (méthodes polynomiales et fonctions splines) utilisées jusque-là, ce qui devrait encore augmenter la précision des réseaux neuronaux par rapport aux autres méthodes. Cependant, une mesure triple est souvent beaucoup plus problématique, en utilisant ces méthodes classiques. Le dépouillement se fait alors sur deux composantes ajustées à partir d'un couple de tensions, la troisième n'étant définie qu'en second lieu et paramétrée par rapport à l'une des deux précédentes. Cette démarche réduit assez sensiblement la précision de calcul. Ces méthodes utilisant des lois d'ajustement imposent une grande vigilance pour les mesures doubles et ne sont que très difficilement transposables pour des mesures simultanées de plus nombreuses variables d'un écoulement. De plus, la méthode de dépouillement des réseaux neuronaux reste envisageable et facile à mettre en œuvre à partir des étalonnages de tout capteur, même sans connaître son comportement physique de façon précise.

## NOMENCLATURE

$T$ :	Température ( $^{\circ}C$ )	$E$ :	Tension délivrée par les anémomètres ( <i>Volts</i> )
$X$ :	Fraction molaire	$U, u'$ :	Composante longitudinale de la vitesse ( <i>m/s</i> )
$\delta$ :	Epaisseur de la couche limite pour $U = 0,99U_{\infty}$ ( <i>mm</i> )		

### Indices

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

## REFERENCES

- [1] P. Bourret, J. Reggia, et M. Samuelides, "Réseaux neuronaux, une approche connexionniste de l'intelligence artificielle". Teknea, Toulouse, France, 1992.
- [2] K. Hornik, M. Stinchcombe et H. White, "Multilayer feedforward networks are universal approximators". Neural Networks 2(1989) 359-366.
- [3] J. C. LaRue et P. A. Libby, "Further results related to the turbulent boundary layer with slot injection of helium". Phys. Fluids 23(6) (1980) 1111-1118.
- [4] J. C. LaRue, et P. A. Libby, "Measurements in the turbulent boundary layer with slot injection of helium", Phys. Fluids 20, (2)(1977) 192-202.

- [5] R. P. Lippman, "An introduction to computing with neural nets". IEEE ASSP Magazine, 1987.
- [6] V. Lorquet, *Apprentissage et représentation dans les réseaux neuronaux*, " Etude d'un codage semi-distribué adaptatif pour les réseaux multicouches". Thèse de doctorat, ENST France, 1992.
- [7] R. M. Lueptow, K. S. Breuer et J. H. Haritonidis, "Computer aided calibration of x-probes using a look-up table". Experiments in fluids 6(1988) 115-118.
- [8] N. R. Panchapakesan et J. L. Lumpley, "Turbulence measurements in axisymmetric jets of air and helium. Part 2. helium jets". J. Fluid Mech. 246 (1993) 225-247.
- [9] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling et B. P. Flannery, "Numerical Recipes in Fortran, the Art of scientific computing". Cambridge University Press, second edition, 1992.
- [10] A. Soudani, "Application des réseaux neuronaux aux mesures simultanées des quantités d'un écoulement turbulent". Thèse de doctorat. ENSPG France, 1996.
- [11] R. A. Stanford et P.A. Libby, "Further applications of hot-wire anemometry to turbulence measurements in turbulent mixtures". Phys. Fluids, 17(7) (1974)1353-1361.
- [12] J. Way, et 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.
- [13] J. Way, et 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.