



I. CARÉ

Faibles vitesses d'air : une nouvelle référence entre $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour l'étalonnage des anémomètres

Low air velocity: a new reference between $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ for calibration of anemometers

Isabelle CARÉ

CETIAT, Domaine scientifique de la Doua, 25 Avenue des Arts, 69603 VILLEURBANNE Cedex, France, isabelle.care@cetiat.fr.

Résumé

La vitesse d'air est une grandeur souvent utilisée pour définir des spécifications des processus industriels ou du confort thermique. Dans ces applications, la vitesse d'air est généralement inférieure à $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la température peut être différente de la température ambiante et la direction de l'écoulement peut être quelconque. Pour atteindre des incertitudes de mesure les plus faibles possibles, une incertitude d'étalonnage minimale ainsi qu'un étalonnage dans des conditions les plus proches possibles des conditions d'utilisations sont nécessaires. Pour répondre à ces besoins, le CETIAT a construit un nouveau banc d'étalonnage d'anémomètres. Son évaluation en termes de stabilité, d'homogénéité en humidité, champs de température et vitesse est présentée ainsi que la meilleure incertitude élargie associée.

MOTS CLÉS : ANÉMOMÈTRE, FAIBLE VITESSE D'AIR, SOUFFLERIE, ÉTALONNAGE, INCERTITUDE, ANÉMOMÉTRIE DOPPLER LASER.

Abstract

Air velocity is a quantity often used in specifications of industrial processes or buildings. In these applications, the velocity is generally below $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the air temperature can be different from ambient one and the air can flow in any direction whatever. Furthermore, to reach minimum uncertainty measurements, a minimum calibration uncertainty of the used anemometer is needed as well as a calibration as close as possible to measurements conditions. To answer these needs, CETIAT has built a new anemometer calibration test rig. Its evaluation is presented in terms of stability, homogeneity on humidity, temperature and velocity fields as well as calibration uncertainty.

KEY WORDS: ANEMOMETER, LOW AIR VELOCITY, WIND-TUNNEL, CALIBRATION, UNCERTAINTY, LASER DOPPLER VELOCIMETRY.

1. Introduction

Les normes internationales ou européennes telles que l'EN ISO 7730 [1], l'ASHRAE 55 [2] sont utilisées pour qualifier la qualité de l'air et le confort thermique à travers des paramètres qui font intervenir la vitesse d'air.

Une étude européenne [3] a montré que, dans le domaine des faibles vitesses ($0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), l'incertitude d'étalonnage maximale des anémomètres ne devrait pas être supérieure à $\pm 0,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour pouvoir être cohérent avec les limites de classe permettant de qualifier le confort.

D'autre part, les anémomètres sont étalonnés dans un écoulement horizontal, à température ambiante et sont généralement utilisés dans des conditions différentes de température, d'humidité et de direction d'écoulement. L'influence de ces conditions peut être non négligeable, particulièrement pour les anémomètres thermiques utilisés pour réaliser les mesures de vitesse nécessaires à la qualification du confort mais n'était pas quantifiable par manque de moyens permettant de faire varier ces différents paramètres.

Le CETIAT a donc décidé de développer un nouveau banc d'étalonnage d'anémomètres dans le domaine des faibles vitesses d'air. Ce banc permet de réaliser

l'étalonnage d'anémomètres thermiques pour des conditions de température, humidité relative et direction d'écoulement spécifiées.

2. Description du banc d'étalonnage

L'étalonnage d'un anémomètre est généralement réalisé par comparaison à un anémomètre de référence dans une soufflerie permettant de générer un écoulement d'air stable et homogène en vitesse. Le principe de cette méthode par comparaison est valable quel que soit le principe de fonctionnement de l'anémomètre.

Deux méthodes d'étalonnage existent selon la manière dont sont pris en compte les facteurs d'influence : La première méthode consiste à placer l'anémomètre à étalonner et l'anémomètre de référence dans l'écoulement au même point successivement et donc à relever les mesures à des instants différents. La seconde méthode, quant à elle, consiste à réaliser les mesures sur l'anémomètre de référence et l'anémomètre à étalonner au même instant alors que les deux instruments ne sont pas positionnés physiquement au même point. La méthode choisie sur notre banc est la seconde et nécessite donc la prise en compte de l'hétérogénéité du champ de vitesse dans la soufflerie.

Un banc d'étalonnage est donc composé d'un générateur de vitesse d'air caractérisé en homogénéité et stabilité et d'un anémomètre de référence.

Le nouveau banc développé par le CETIAT présente également ces deux éléments, qui sont décrits ci-après.

2.1. Concept de la soufflerie (le générateur de vitesse d'air)

Le concept général de la nouvelle soufflerie est présenté sur la figure 1.

La soufflerie est constituée d'un circuit principal sur lequel se trouve un ventilateur (destiné à générer l'écoulement), un échangeur de chaleur et un équipement pour assécher et humidifier l'air. La zone d'étalonnage est située sur un circuit secondaire, dérivation du circuit précédent. Ses dimensions ne la rendent utilisable que pour l'étalonnage d'anémomètres de petite taille, principalement de type anémomètres thermiques.

Des vannes permettent d'ajuster le débit dans le circuit secondaire et donc la vitesse d'air dans la zone d'étalonnage. Cette zone, dans laquelle est réalisé l'étalonnage, est repérée sur la figure 1 par la mention « section de mesure » et est de section carrée 250 mm × 250 mm. L'anémomètre Doppler Laser de référence est positionné dans la section de mesure en amont de l'instrument à étalonner. Les composantes

d'incertitude identifiées spécifiques au générateur de vitesse sont liées à la stabilité et à l'homogénéité du profil de vitesse dans la soufflerie ainsi qu'à l'influence de l'obstruction de l'anémomètre à étalonner sur ce même profil de vitesse.

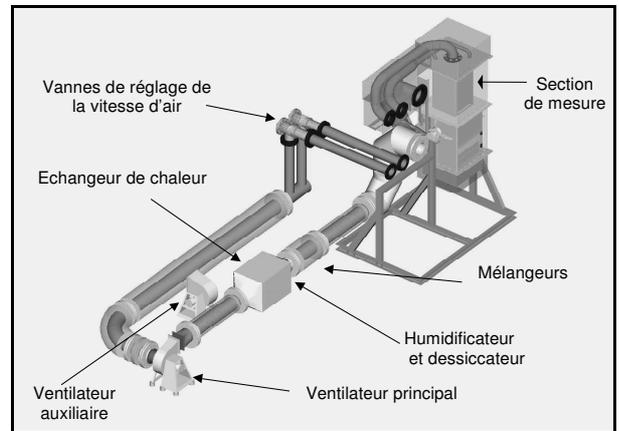


Fig. 1. – Schéma de principe de la soufflerie.

2.2. Principe de l'anémomètre de référence

La technique de mesure est basée sur la séparation d'un faisceau laser de longueur d'onde connue en deux faisceaux ne suivant pas le même chemin optique. Le croisement de ces deux faisceaux, du fait de l'interaction des champs électromagnétiques, conduit à la formation d'un réseau de franges régulièrement espacées. La distance entre les franges, notée i et appelée interfrange, est calculée à partir de la relation (1) :

$$i = \frac{\lambda}{2 \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (1)$$

où λ est la longueur d'onde des faisceaux laser et θ est l'angle d'incidence entre les deux faisceaux.

De petites particules, injectées dans la soufflerie, se déplacent à la même vitesse que l'écoulement d'air, par hypothèse. L'analyse de la lumière diffusée par ces particules lorsqu'elles traversent le volume de mesure formé par le croisement des deux faisceaux laser permet de déterminer leur vitesse. Celle-ci, que l'on assimilera à la vitesse de l'écoulement d'air est donnée par la relation (2) :

$$U = f_D \times i \quad (2)$$

où f_D est la fréquence Doppler.

Le schéma de principe de l'anémomètre Doppler Laser de référence est présenté sur la figure 2.

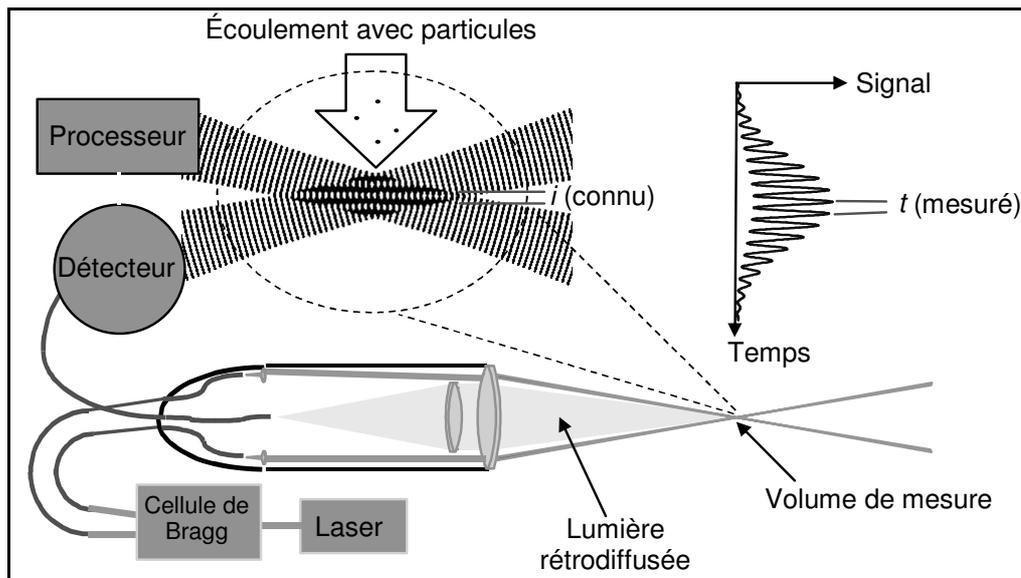


Fig. 2. – Schéma de principe de l'anémomètre Doppler Laser (d'après TSI).

Le raccordement de l'anémomètre Doppler Laser de référence au Système international d'unités est réalisé par un étalonnage en fréquence (par l'intermédiaire de la mesure de fréquence, f_D) et une détermination d'une longueur, l'interfrange i . Il existe deux méthodes principales pour déterminer ce paramètre i . Elles sont décrites dans [4]. Dans la première méthode, des particules sont placées sur la tranche d'un disque de diamètre connu. Le paramètre i peut être déterminé en comparant la vitesse linéaire de déplacement des particules à la vitesse mesurée par l'anémomètre Doppler Laser lorsque le volume de mesure est positionné sur la tranche du disque. Des données sur plusieurs centaines de mesures sur la gamme de $0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ montrent que l'anémomètre Doppler Laser est un instrument linéaire. Les composantes d'incertitude qui ont été identifiées sont : l'alignement du laser avec l'axe du disque, la mesure du diamètre du disque, la mesure de la vitesse de rotation du disque, la détermination de la fréquence Doppler par le logiciel de l'anémomètre Doppler Laser.

La seconde méthode est une méthode de mesure directe de l'angle d'incidence entre les faisceaux laser, θ , à l'aide d'un plateau tournant calibré au centre duquel un miroir est placé. Elle nécessite une connaissance précise de la longueur d'onde des faisceaux laser pour pouvoir calculer le paramètre interfrange, i , à partir de l'équation (1). Les composantes d'incertitude identifiées sont : l'alignement de la bissectrice de l'angle θ avec l'axe de rotation du plateau tournant, l'incertitude sur la mesure de l'angle par le plateau tournant.

Les auteurs ont montré que les deux méthodes sont équivalentes avec un écart de $0,0555 \%$ au maximum sur la détermination de l'interfrange i . Il est alors établi que l'anémomètre Doppler Laser peut être considéré comme un étalon primaire pour la vitesse basé sur une mesure de longueur et de temps.

3. Performances techniques

3.1. Humidité et température

Une caractérisation des performances thermiques de la nouvelle soufflerie a été réalisée. La figure 3 montre les performances attendues et effectivement atteintes en termes de gammes de température et d'humidité.

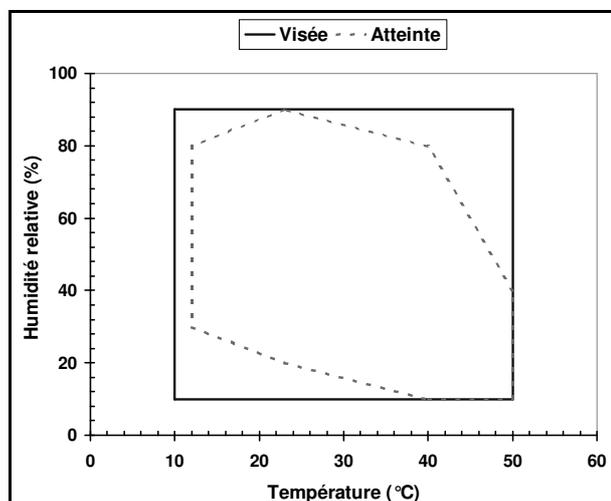


Fig. 3. – Performances en termes de gammes de température et d'humidité.

Pour différents couples température/humidité relative, les champs de température et d'humidité ont été caractérisés à l'intérieur de la zone d'étalonnage. Des sondes de température de type Pt-100 (13 sondes) ont été positionnées à l'intérieur de l'espace de mesure de manière à le caractériser complètement. Un hygromètre à point de rosée a également été positionné dans cet espace, permettant ainsi de remonter à l'humidité relative en chacune des positions des sondes de température.

Quelques caractérisations sont présentées sur les figures 4 et 5 où les abscisses représentent les positions des sondes de température dans l'espace de mesure. La figure 4 représente le champ de température et la figure 5 le champ d'humidité relative. Le trait continu horizontal représente la consigne en température ou humidité relative tandis que les traits pointillés délimitent l'écart maximal toléré par rapport à cette consigne. Pour chaque position dans l'espace de travail, la valeur mesurée est également indiquée ainsi que l'incertitude de mesure associée à cette valeur.

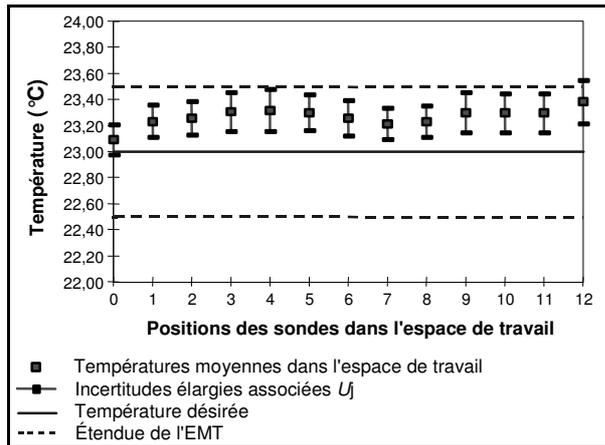


Fig. 4. – Champ de température dans la zone d'étalonnage ; pour une consigne de 23 °C en température et de 50 % en humidité relative.

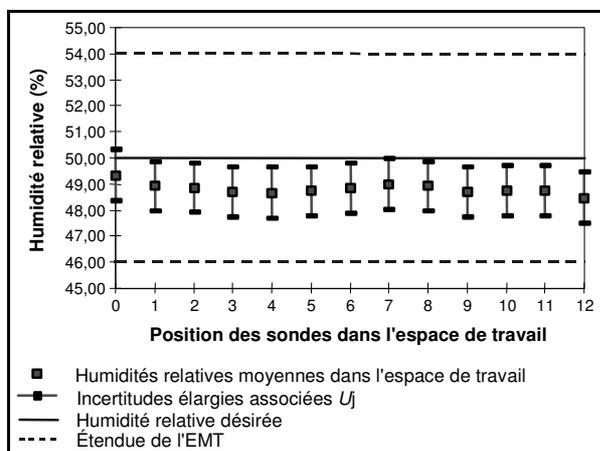


Fig. 5. – Champ d'humidité relative dans la zone d'étalonnage ; pour une consigne de 23 °C en température et de 50 % en humidité relative.

On observe un écart systématique entre la température de consigne et la température réelle dans la zone explorée. Cet écart peut s'expliquer par le fait que la sonde permettant la régulation en température se trouve dans la boucle d'essai mais pas physiquement dans l'espace de travail. Toutefois, les mesures relevées par toutes les sondes de température sont dans les spécifications recherchées de 23 °C ± 0,5 °C. D'autre part, dans cet

exemple, l'homogénéité du champ de température dans la zone d'étalonnage est meilleure que ± 0,2 °C.

On observe également un écart entre la consigne en humidité relative et la valeur réelle du à l'écart en température observé précédemment. Toutefois, les valeurs mesurées sont dans les spécifications recherchées de 50 % ± 4 %. De plus, l'homogénéité à l'intérieur de la zone d'étalonnage, dans cet exemple, est meilleure que ± 0,5 %.

D'une manière générale, des tests ont été réalisés à différentes consignes de température et d'humidité relative. A l'intérieur du domaine atteint de températures et d'humidités relatives, l'homogénéité des champs de température et d'humidité relative dans la zone d'étalonnage reste dans les spécifications visées initiales.

3.2. Stabilisation thermique

L'objectif était d'atteindre une stabilité thermique en moins de deux heures lors des changements de consignes de température et d'humidité relative. Les figures 6 et 7 montrent que les temps de stabilisation thermique sont satisfaisants lors de changement de consigne aussi bien en ce qui concerne la température que l'humidité relative.

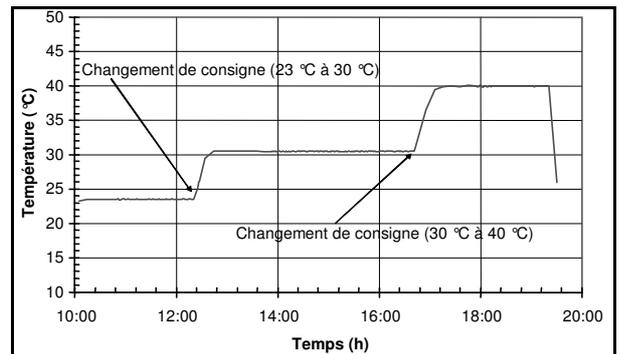


Fig. 6. – Visualisation du temps de stabilisation lors d'un changement de consigne en température.

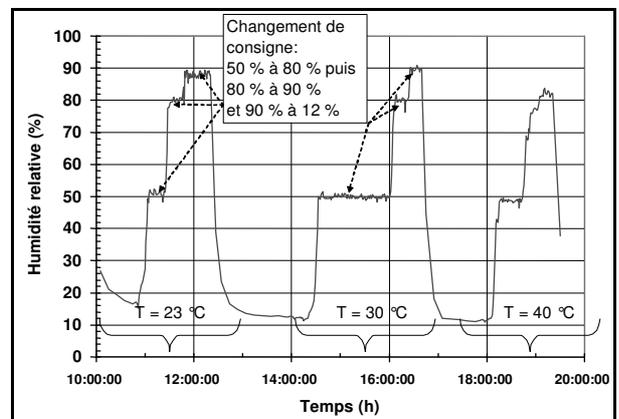


Fig. 7. – Visualisation du temps de stabilisation lors de changement de consigne en humidité relative.

3.3. Caractérisation des champs de vitesse

La vitesse dans la zone d'étalonnage est contrôlée par l'ajustement de vannes situées entre le circuit primaire et le circuit secondaire. La vitesse peut varier entre $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Des visualisations par PIV (*Particle Imaging Velocimetry*) ont été réalisées. Certaines d'entre elles sont présentées sur les figures 8 et 9 à titre indicatif.

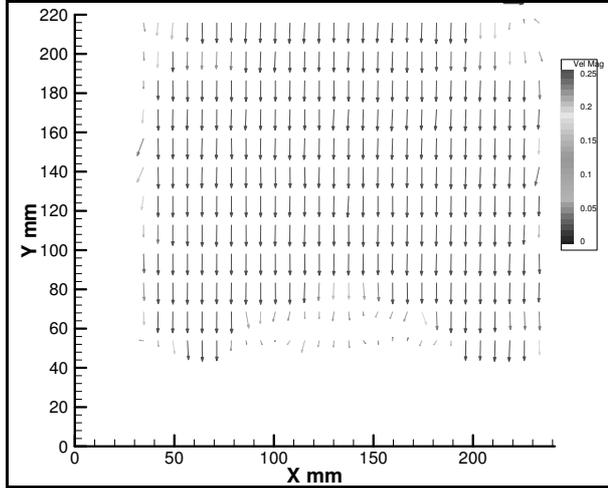


Fig. 8. – Visualisation du champ de vitesse dans un plan de la zone d'étalonnage pour une vitesse visée de $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

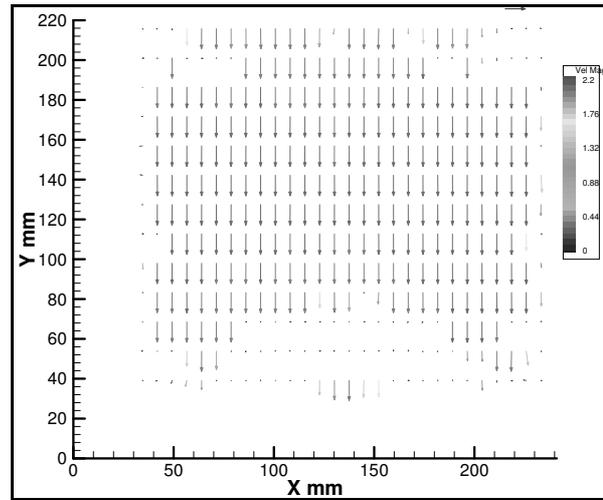


Fig. 9. – Visualisation du champ de vitesse dans un plan de la zone d'étalonnage pour une vitesse visée de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Dans la zone d'étalonnage, les vecteurs vitesse sont parallèles et de même amplitude sur toute l'étendue de vitesse. Ces premières visualisations permettent de présumer que le champ de vitesse est bien homogène.

Des mesures de vitesse plus précises ont également été réalisées par LDA (*Laser Doppler Anemometry*) entre $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à $10 \text{ }^\circ\text{C}$, $23 \text{ }^\circ\text{C}$ et $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Ces profils de vitesse dans l'espace de travail ont été réalisés en écoulement horizontal. Cette configuration d'écoulement est en effet la plus défavorable. En effet, lorsque la température est différente de la température ambiante, la convection naturelle engendrée par les gradients de température génère un écoulement vertical ascendant parasite. Ces mesures ont permis de quantifier l'homogénéité du champ de vitesse, composante prise en compte dans l'incertitude de mesure de vitesse du banc de référence.

Nous avons ensuite mesuré, à l'aide de l'anémomètre Doppler Laser, le profil de vitesse selon l'axe de la section de mesure afin d'estimer l'écart entre la vitesse mesurée par l'anémomètre de référence à son emplacement de travail et la vitesse à l'endroit où sont positionnés les anémomètres lors de leur étalonnage. Cet écart a été estimé sur toute la gamme de vitesse et à différentes températures. Les résultats à $23 \text{ }^\circ\text{C}$ sont présentés sur la figure 10.

A $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ou $50 \text{ }^\circ\text{C}$, l'écart $U - U_{ADL}$ est légèrement plus important mais le comportement est identique à celui présenté ici. L'écart estimé est pris en compte dans le bilan d'incertitude global du banc d'étalonnage.

4. Incertitude du banc d'étalonnage

Le banc d'étalonnage étant constitué d'un générateur (la soufflerie) et d'un anémomètre de référence (l'Anémomètre Doppler Laser), l'incertitude du banc d'étalonnage tient compte de ces deux éléments.

En ce qui concerne la soufflerie, sa caractérisation décrite précédemment a permis de quantifier son homogénéité spatiale et la stabilité temporelle de la vitesse.

En ce qui concerne l'anémomètre de référence, la vitesse est déterminée à partir de l'équation (2). L'incertitude sur la mesure de la vitesse de référence est donc directement liée à l'incertitude sur la mesure de fréquence et à celle sur la détermination de l'interfrange déjà évoquée.

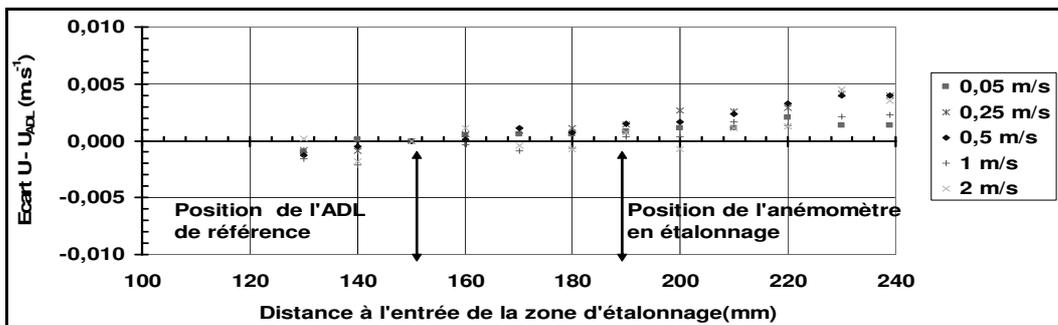


Fig. 10. – Profil de vitesse à $23 \text{ }^\circ\text{C}$ en écoulement horizontal.

Tableau 1
Bilan d'incertitude du banc de référence à 23 °C.

Paramètres	Incertitude type sur le paramètre		Distribution	Coefficient de sensibilité	Incertitude type (m·s ⁻¹)		Contribution (%)	
	0,05 m·s ⁻¹	2 m·s ⁻¹			0,05 m·s ⁻¹	2 m·s ⁻¹	0,05 m·s ⁻¹	2 m·s ⁻¹
Fréquence	2,5 Hz	43 Hz	Normale	V/f _D	9,4·10 ⁻⁶	1,6·10 ⁻⁴	0	0
Interfrange	0,014 μm		Normale	V/i	1,9·10 ⁻⁴	7,5·10 ⁻³	1,8	96,2
Homogénéité *	0,001 4 m·s ⁻¹		Rectangulaire	1	1,4·10 ⁻³		97,4	3,4
Stabilité **	1,26·10 ⁻⁴ m·s ⁻¹	4,74·10 ⁻⁴ m·s ⁻¹	Normale	1	1,3·10 ⁻⁴	4,7·10 ⁻⁴	0,8	0,4

(*) : Valeur maximale pour l'ensemble de l'étendue de mesure,

(**) : Vitesse moyenne calculée à partir de l'acquisition d'au moins mille valeurs de vitesse instantanée.

Ces différentes composantes d'incertitude sont évaluées sur les plages de vitesse et de température. Le tableau 1 présente, à titre d'exemple, la contribution des différentes composantes sur l'incertitude du banc d'étalonnage pour une température de 23 °C.

Le bilan présenté montre clairement qu'à basse vitesse (0,05 m·s⁻¹), la composante principale d'incertitude est liée à l'homogénéité du profil de vitesse dans l'espace de mesure, alors qu'à vitesse plus élevée (2 m·s⁻¹), c'est la détermination de l'interfrange, *i*, qui contribue majoritairement à l'incertitude globale du banc d'étalonnage.

La meilleure incertitude élargie globale est présentée sur la figure 11 en fonction de la vitesse et de la température.

L'objectif initial était d'atteindre une incertitude élargie globale inférieure à ± 0,02 m·s⁻¹ afin de permettre la caractérisation du confort thermique avec une exactitude suffisante. Cette spécification est atteinte sur toute la plage de vitesse et ce quelle que soit la configuration d'étalonnage.

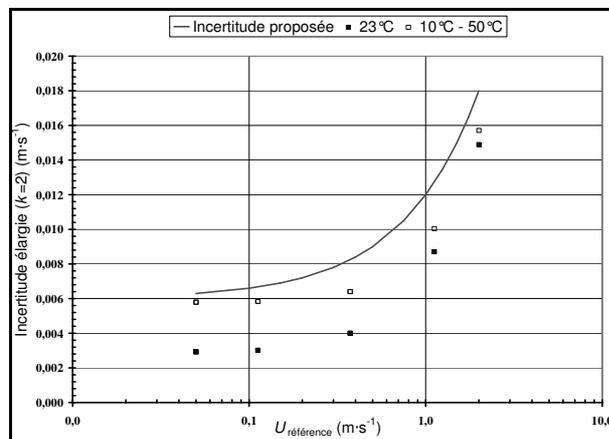


Fig. 11. – Meilleure incertitude élargie évaluée pour le nouveau banc d'étalonnage.

5. Conclusion

Un nouveau banc d'étalonnage d'anémomètres a été construit. L'objectif était de répondre au besoin industriel et de permettre l'étalonnage d'instruments dans différentes conditions de température, d'humidité relative et de direction d'écoulement. L'objectif était également

d'améliorer la référence dans le domaine de la vitesse d'air.

Les différentes caractérisations ont montré que les spécifications techniques attendues ont été atteintes aussi bien en termes de performances techniques (homogénéité, stabilité) qu'en termes d'incertitude. La seule limitation concerne le domaine température/humidité relative dans laquelle le banc peut fonctionner, comme le montre la figure 3.

Ce banc d'étalonnage est le seul connu à ce jour permettant de faire varier les différents paramètres vitesse, température, humidité relative et direction d'écoulement. Dès sa mise en service, il a donc été utilisé d'une part par des constructeurs d'anémomètres pour mieux connaître et maîtriser l'influence de ces paramètres environnementaux sur la réponse de leurs produits et d'autre part par les industriels pour étalonner leurs anémomètres dans les conditions d'utilisation afin de minimiser l'incertitude de mesure.

Remerciements

L'auteur remercie le LNE/DRST, la région Rhône Alpes, l'ATTITA ainsi que les constructeurs d'anémomètres AIRFLOW, E+E, TESTO et SWEMA pour leur participation financière.

Le CETIAT souhaite également remercier André CLOT et Yves LECOFFRE (Ylec Consultants) sans qui cette nouvelle soufflerie n'existerait pas.

Références

- [1] AFNOR, « Ergonomie des ambiances thermiques – Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local », NF EN ISO 7730, mars 2006.
- [2] ASHRAE, « Thermal environmental conditions for human occupancy », ASHRAE Standard 55, 1992.
- [3] MELIKOV A.K. et al., « Calibration and requirements for accuracy of thermal anemometers for indoor velocity measurements », EC project MAT1-CT93-0039, 1997.
- [4] BEAN V.E. et HALL J.M., « New primary standards for air speed measurement at NIST », NCSL Workshop & Symposium, 1999.