

Mesurages de débit sur un ventilateur



Sommaire

1. Remarques liminaires	2
2. Préparation des mesurages	3
3. Type de sonde de mesure	4
4. Choix de la position de la section de mesurage de débit	6
5. Choix du nombre de points de mesurage	7
6. Calcul de la vitesse	8
7. Précision du mesurage	9
8. Schéma de montage des équipements et mesurages avec tube Pitot	10
9. Paramètres correctifs	13
10. Quelques difficultés et erreurs fréquentes	13
Annexe 1 – Théorie du différentiel de pression	14
Annexe 2 – Correction de la pression sur les courbes caractéristiques	15
Annexe 3 – Mesure de vitesse proche d'un coude	17

1. Remarques liminaires

La procédure présentée ici est une aide à la conduite des mesurages de débit sur un ventilateur avec un tube de Pitot.

Ce document n'est pas un descriptif exhaustif des différentes techniques de mesurage de débit sur un ventilateur.

2. Préparation des mesurages

Préparer une campagne de mesurages passe d'abord par l'étude et l'analyse approfondie du système ou installation dans lequel est intégré l'entraînement électrique à mesurer (approche système). Une fois le périmètre bien défini, le ventilateur identifié, il faut encore préciser :

Thèmes	Tâches
Périmètre d'analyse, système et préparation théorique	– Définir la période de mesurage (début et durée, fréquence d'échantillonnage), afin de couvrir toutes les situations.
Préparation pratique (responsable mesurages)	– Etablir les positions des piquages pour les prises de pression – Déterminer si l'installation doit être arrêtée. (Par exemple, si la température de l'air est élevée et dangereuse pour l'intervenant – on notera que cette procédure ne porte pas sur le mesurage de gaz toxiques ou explosifs.) – Préparer la synchronisation des horloges et des fréquences d'échantillonnage pour les équipements de mesurage du prestataire de mesurage et de l'exploitant (si tel est le cas)
Préparation pratique (exploitant)	– Préparer et adapter les installations en vue de l'insertion des différents capteurs (piquage sur manomètre ou sur purge pour les pompes, percement des gaines et insertion de tétons pour les ventilateurs).

3. Type de sonde de mesure

Différents types de sondes peuvent être utilisées. Une liste non-exhaustive est présentée ci-dessous.

3.1 Tube de Pitot

Le schéma de principe d'un tube de Pitot est présenté comme ci-dessous :

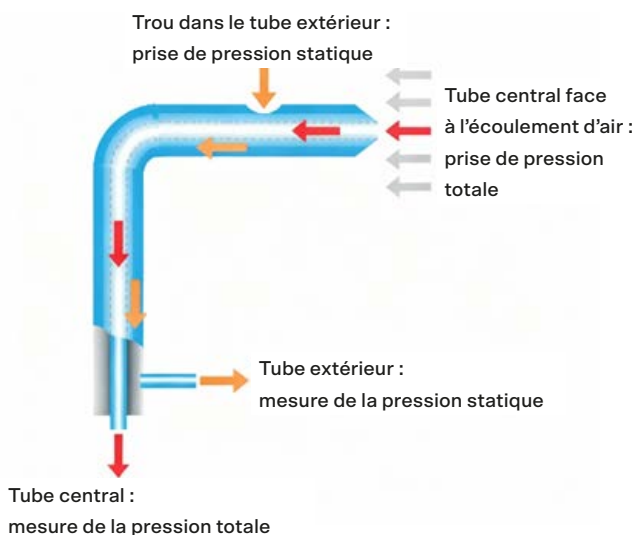


Fig. 1: Schéma de principe d'un tube de Pitot de type L

Le mesurage de débit aéraulique par tube de Pitot (ou Prandtl) consiste à déterminer la pression dynamique sur le tube et à calculer la vitesse d'écoulement du fluide selon la formule :

$$P_d = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \quad \text{oder} \quad v = \sqrt{\frac{2 \times P_d}{\rho}}$$

Les grandeurs mesurées sur le tube de Pitot sont la pression totale et la pression statique du fluide. Ces deux grandeurs permettent le calcul de la pression dynamique selon la relation suivante :

$$P_T = P_d + P_s$$

Le tube de Pitot constitue le système le plus précis pour des vitesses d'air supérieures à 3 m/s.

3.2 Anémomètre à fil chaud

L'anémomètre à fil chaud calcule la vitesse de l'air à partir de la différence de température du fil (résistance) qui est refroidi par le flux d'air. Il permet de mesurer de très faibles vitesses (entre 0.2 et 3 m/s)



Fig. 2: Anémomètre à fil chaud et détail de la sonde.

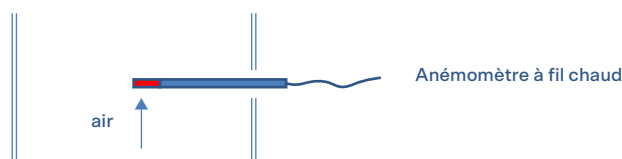


Fig. 3: Schéma de principe d'un anémomètre à fil chaud.

3.3 Anémomètre à hélices

Présenté sous plusieurs formes (hélice faisant corps ou pas avec l'appareil de mesure, avec un cône, avec tige pour mesures à distance), l'anémomètre à hélice est utilisé pour des vitesses d'air supérieures à 1 m/s.



Fig. 4: Anémomètre à hélice

4. Choix de la position de la section de mesurage de débit

La section de mesurage choisie doit être située dans un alignement droit, perpendiculaire à l'axe de la conduite. Cette section doit être située dans une zone où les vitesses mesurées se situent dans la gamme normale d'utilisation de l'appareillage employé.

La section de mesurage doit être suffisamment éloignée de toute dissymétrie, rotation ou turbulence. Cette zone de mesure est si possible prise avec une longueur amont du capteur de mesure supérieure à 10 diamètres et une longueur aval supérieure à 5 diamètres. Dans le cas où la longueur droite est insuffisante, positionner la section de mesure entre 80 et 90% de cette longueur disponible.

5. Choix du nombre de points de mesure

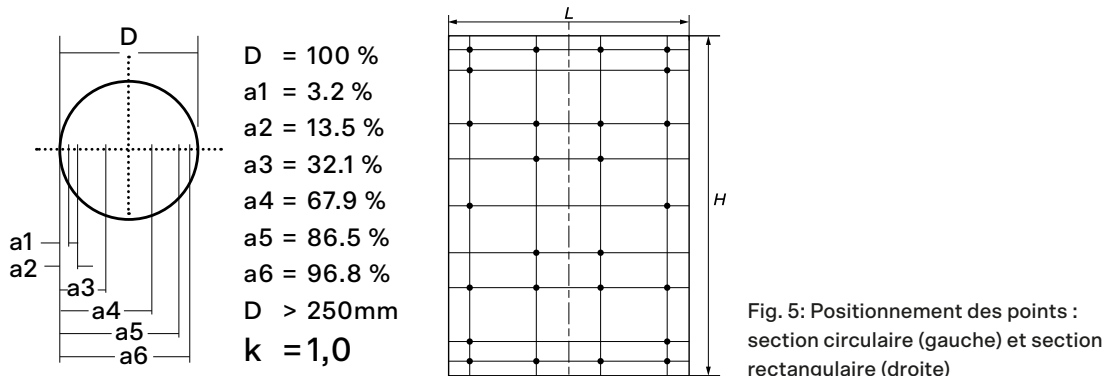
Le nombre de points de mesure devra être suffisant pour connaître la répartition des vitesses de façon satisfaisante.

Sections circulaires :

Le nombre de points de mesures sera au minimum de 6, repartis symétriquement le long du diamètre de la section de mesure, c'est-à-dire une seule direction de mesure (Fig. 5). En complément, une mesure au centre de la conduite est souhaitable pour vérifier la forme du profil des vitesses.

Dans le cas d'une mesure proche d'une perturbation, une seule direction de mesure n'est pas suffisante (voir Annexe 3). Dans ce cas, les mêmes mesures seront répétées sur au minimum 4 directions pour la même section de mesure. L'angle entre chaque direction sera le même et il y aura au moins 2 directions perpendiculaires entre elles.

Sections rectangulaires :



y/H	$x/L=0.092$	$x/L=0.3675$	$x/L=0.6325$	$x/L=0.908$
0.034	2	3	3	2
0.092	2			2
0.250	5	3	3	5
0.3675		6	6	
0.5	6			6
0.632		6	6	
0.750	5	3	3	5
0.908	2			2
0.966	2	3	3	2

Tab. 2: Position des points de mesure et facteurs de pondération (k_i) des débits en section rectangulaire.

6. Calcul de la vitesse

Durant l'ensemble de la mesure la répartition des vitesses dans la section de mesure doit rester stable et ne pas subir d'éventuelles variations de débit pendant l'ensemble de la mesure.

Pour le calcul de la vitesse, il faudra mesurer la pression différentielle existante entre les prises de pression totale et statique du tube de Pitot placé sur les différents points de mesure. En complément, il sera nécessaire de déterminer la masse volumique du fluide dans les conditions de mesure.

$$\rho = \rho_0 \times \frac{273.15}{273.15 + T} \times \frac{P + P_{atm}}{P_{atm}}$$

Avec :

P : Pression totale (statique + dynamique)

P_{atm} : Pression atmosphérique

T : température (°C)

$\rho_0 = 1.293 \text{ kg/m}^3$ (densité de l'air à $T=0^\circ\text{C}$ et $P_{atm}=1\text{bar}$)

Il est ensuite possible de calculer la vitesse locale de l'écoulement à chaque point de mesure selon l'équation suivante :

$$V = \alpha * \sqrt{\frac{2 * P_{dynamique}}{\rho}}$$

La vitesse débitante moyenne de l'écoulement sera calculée à partir d'une méthode arithmétique et selon le type de section :

- Section circulaire : la vitesse débitante moyenne est donnée par la moyenne arithmétique des vitesses locales.
- Section rectangulaire : la vitesse débitante est donnée par :

$$U = \frac{\sum k_i \times v_i}{\sum k_i}$$

Avec :

U : vitesse débitante moyenne

v_i : vitesse mesurée à la position i

k_i : facteur de pondération pour la position i

$\sum k_i = 96$

Enfin, le débit volumique (en m^3/s) sera égal au produit de l'aire de la section (en m^2) par la vitesse débitante moyenne (m/s).

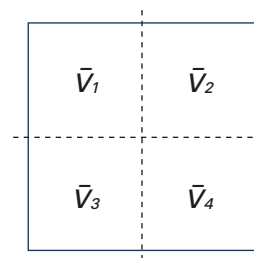
7. Précision du mesurage

La précision de la mesure sera principalement influencée par la mesure des dimensions de la section de mesurage, le calcul de la vitesse débitante, la forme du profil des vitesses et le nombre de points de mesure. L'erreur-limite de cette méthode permet d'atteindre **une précision de mesure à $\pm 2\%$** .

L'irrégularité du profil d'écoulement se calcul par la différence maximale entre la vitesse de tous les points de mesure et les vitesses moyennes dans les quarts de la section :

$$U = \frac{\bar{V}_{max} - \bar{V}_{min}}{2 \times \bar{V}_{tot}} \times 100 [\%]$$

Avec



Pour obtenir une incertitude inférieure à 10%, le nombre de points de mesure doit au moins correspondre à celui de l'incertitude. Pour obtenir moins de 5% d'incertitude, compter le double de points de mesure.

8. Schéma de montage des équipements et mesurages avec tube Pitot

La mesure de débit avec des tubes de Pitot permet aussi de déterminer la pression du ventilateur. Ainsi, le ventilateur peut être caractérisé complètement et sa puissance aérodynamique déterminée.

Le tube de Pitot est de préférence placé à l'aspiration du ventilateur (à l'aspiration, l'écoulement du fluide est usuellement moins perturbé qu'au refoulement)

Les différents types de montage permettant cette caractérisation du débit et de la pression sont présentés ci-dessous.

8.1 Principe de mesure avec sections d'aspiration et de refoulement identiques

Le schéma ci-dessous montre comment un tube de Pitot et un piquage de pression au refoulement permet de caractériser complètement un ventilateur dont les sections à l'aspiration et au refoulement sont identiques.

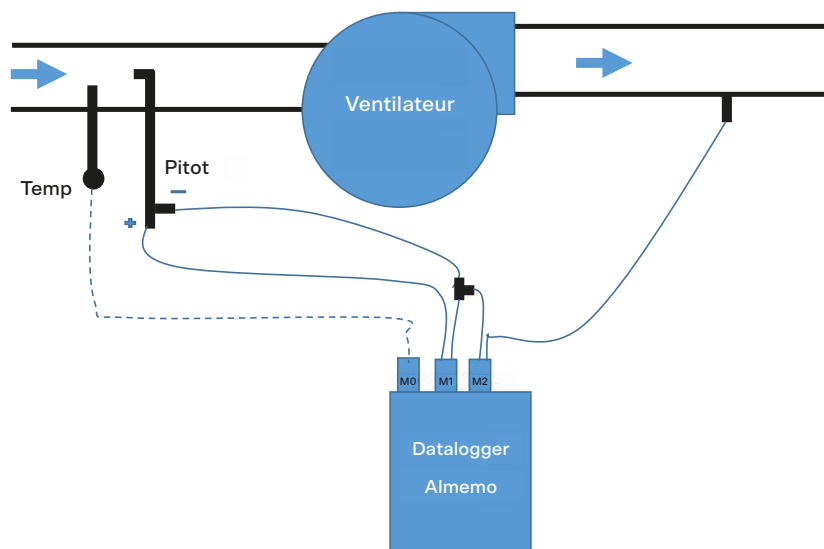


Fig. 6: Utilisation du tube de Pitot (débit et différentiel de pression), sections identiques – exemple d'un datalogger Almemo.

Les termes de pression dynamiques sont identiques et s'annulent dans la formule de différentiel de pression totale (voir Annexe 1). Uniquement subsistent les termes de pression statiques. La configuration ci-dessus enregistre les pressions statiques à l'as-

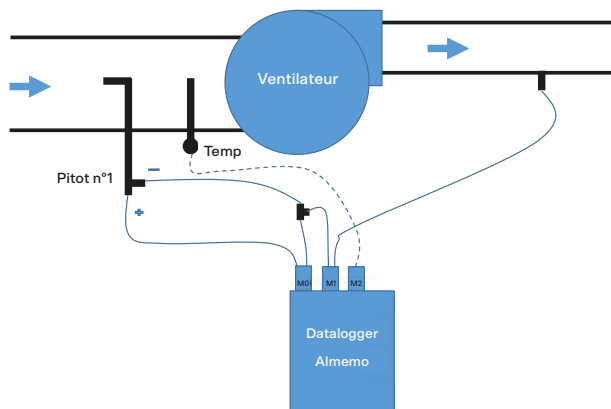
piration (une des sorties du Pitot) et au refoulement (capteur de pression dédié) ainsi que la vitesse de l'air (tube placée dans la position où la vitesse est la moyenne du profil de vitesse de la section). Le débit est alors le produit de la section par la vitesse.

Le calcul de la puissance aéraulique du ventilateur est le produit de la différence de pressions statiques du ventilateur et de son débit :

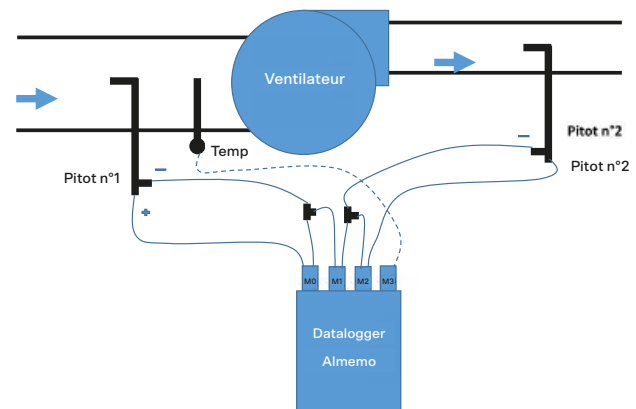
$$P_{aér} = \Delta p_{st} * Q_v$$

8.2 Principe de mesurage avec des sections d'aspiration et de refoulement différentes

Lorsque les sections à l'aspiration et au refoulement sont différentes, les termes de pressions dynamiques ne s'annulent plus dans la formule de différentiel de pression (voir annexe 1). On doit alors les conserver dans le calcul.



Mesurage avec un tube de Pitot



Mesurage avec deux tubes de Pitot

Fig 4 Mesurage avec tube de Pitot dans sections différentes (s1, s2).

Deux méthodes de mesurage sont possibles :

Mesure avec un tube de Pitot :

Grandeurs disponibles lors de la mesure : vitesse d'écoulement à l'aspiration (v_1), pression dynamique à l'aspiration (p_{dyn1}), différentiel pression statique (Δp_{stat}) entre l'aspiration et le refoulement.

Grandeurs à calculer : pression dynamique au refoulement (p_{dyn2}), calculée à partir de la vitesse d'écoulement à l'aspiration

$$Qv = Q_{v1} = Q_{v2} = s_1 v_1 = s_2 v_2 \rightarrow p_{dyn2} = \frac{1}{2} \rho v_2^2 = \frac{1}{2} \rho [(s_1/s_2) v_1]^2$$

Le différentiel de pression totale peut alors être calculé comme suit :

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{stat} + \Delta p_{dyn} = \Delta p_{stat} + (p_{dyn2} - p_{dyn1})$$

Mesure avec deux tubes de Pitot :

la différence des pertes de charges totales est déterminée directement à partir des pertes statiques et dynamiques mesurées par les tubes de Pitot.

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{stat} + \Delta p_{dyn} = (p_{stat2} - p_{stat1}) + (p_{dyn2} - p_{dyn1})$$

Le calcul de la puissance aéraulique du ventilateur est le produit de la différence des pertes totales du ventilateur et de son débit :

$$P_{aér} = \Delta p_{tot} * Qv$$

Note : Si les valeurs de pression sont mesurées à une température différente de celle pour laquelle la courbe caractéristique du ventilateur a été établie (20°C), il est nécessaire de les corriger (voir Annexe 2) afin de pouvoir reporter ces valeurs sur la courbe caractéristique.

9. Paramètres correctifs

9.1 Correction de la mesure de vitesse selon le type de tube de Pitot

Pour rappel :
$$V = \alpha * \sqrt{\frac{2 * P_{dynamique}}{\rho}}$$

ρ : rho (est fonction de la température et pression du fluide)

α : Facteur du tube de Pitot

- Tube de Pitot en L : $\alpha=1$
- Tube de Pitot droit : $\alpha=0,67$

10. Quelques difficultés et erreurs fréquentes

Cette section recense quelques exemples de difficultés et d'erreurs classiques auxquelles on peut être confronté lors des mesurages de débit sur un ventilateur.

Difficultés ou erreurs	Anticipation ou mesure corrective
Valeurs de vitesse erronées	Trouver un emplacement libre de perturbations (modifications brusques de section, des coudes, etc.)
Profil de vitesses peu symétrique	- Dans le cas d'un tube de Pitot, rester aligné avec le flux d'air (10° d'écart maximum) - Dans le cas d'un anémomètre à fil chaud, veiller à placer le fil perpendiculaire au flux d'air.
Tube de Pitot bouché	Inspecter le tube de Pitot avant son utilisation et nettoyer si nécessaire
Point de mesurage peu profond	Prioriser le mesurage avec tube de Pitot (éviter l'anémomètre à fil chaud). Toutefois, un mesurage proche de l'orifice d'insertion de la sonde ne sera pas précis

Annexe 1

Théorie du différentiel de pression

On définit un ventilateur et les pressions de la façon suivante :

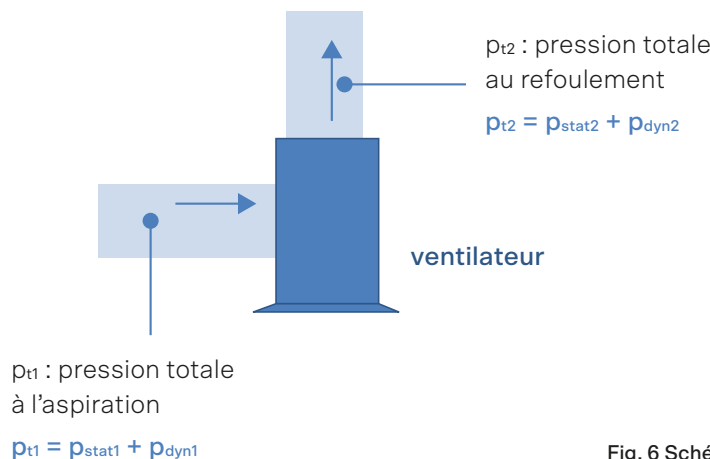


Fig. 6 Schéma du ventilateur

Un ventilateur produit une augmentation de la pression totale.
Cette augmentation se calcule ainsi :

$$\Delta p_t = p_{t2} - p_{t1} = (p_{stat2} + p_{dyn2}) - (p_{stat1} + p_{dyn1}) = (p_{stat2} - p_{stat1}) + (p_{dyn2} - p_{dyn1}) = \Delta p_{stat} + \Delta p_{dyn}$$

Deux cas peuvent se donner :

a) Sections des conduites identiques à l'aspiration et au refoulement

La vitesse de l'air demeure inchangée. La pression dynamique est inchangée : le différentiel de pression dynamique s'annule ($p_{dyn2} = p_{dyn1}$).

Le différentiel de pression totale correspond donc au différentiel des pressions statiques :

$$\Delta p_t = (p_{stat2} - p_{stat1})$$

Avec normalement une valeur négative pour p_{stat1} et une valeur positive pour p_{stat2} par rapport à une pression de référence (par exemple p_{atm}).

On peut donc considérer directement les valeurs mesurées des pressions statiques pour le calcul du différentiel de pression totale (Δp_t), qui sera ensuite utilisé pour le calcul de la puissance aéraulique.

b) Sections des conduites différentes à l'aspiration et au refoulement

La vitesse de l'air est différente. La pression dynamique n'est donc pas constante et il est nécessaire de travailler avec le différentiel de pression totale.

$$\Delta p_t = \Delta p_{stat} + \Delta p_{dyn} = (p_{stat2} - p_{stat1}) + (p_{dyn2} - p_{dyn1})$$

Annexe 2

Correction de la pression sur les courbes caractéristiques

Si les valeurs de pression sont mesurées à une température différente de celle pour laquelle la courbe caractéristique du ventilateur a été établie (20°C), il est nécessaire de les corriger afin de pouvoir reporter ces valeurs sur la courbe.

Il est nécessaire de calculer les masses volumiques de l'air à l'aspiration et au refoulement. Pour cela faire, il faut connaître la température de l'air à ces deux positions ainsi que la pression atmosphérique.

En ce qui concerne la température, il est possible d'estimer de façon approximative l'augmentation de température provoquée par le ventilateur. Si on considère par exemple des valeurs mesurées de Δp_t de 3600 Pa, et un rendement du ventilateur de l'ordre de 50%, on atteint alors un ΔT de l'ordre de 6°C¹ ce qui est peu important.

Suivant le même exemple, les masses volumiques de l'air ont les expressions suivantes :

$$\rho_1 = (p_{\text{atm}} - p_{\text{stat1}}) / R \cdot (273.15 + T_1).$$

$$\rho_2 = (p_{\text{atm}} + p_{\text{stat2}}) / R \cdot (273.15 + T_2).$$

Hypothèses :

$$p_{\text{atm}} = 100\,000 \text{ Pa} ; R = 287 \text{ J/kg K}$$

Pour une situation avec un air de procédé d'une température relativement élevée (210°C), on a par exemple :

$$T_1 = 210^\circ\text{C}, T_2 = 216^\circ\text{C} (\Delta T \text{ de } 6^\circ\text{C} \text{ issue du ventilateur})$$

Ainsi, lorsque nous mesurons directement le Δp_t au travers des prises de p_{stat2} et p_{stat1} et que l'on a une valeur relevée de Δp_{tmes} de 3600 Pa, nous considérons par hypothèse que p_{stat1} vaut -1800 Pa et p_{stat2} vaut +1800 Pa. On a alors les valeurs de masses volumiques à l'aspiration et au refoulement :

$$\text{À l'aspiration : } \rho_1 = (100\,000 - 1800) / (287 \cdot (273,15 + 210)) = 0.708$$

$$\text{Au refoulement : } \rho_2 = (100\,000 + 1800) / (287 \cdot (273,15 + 216)) = 0.725$$

Note : Ces valeurs sont approximatives. Les fournisseurs indiquent que le changement de densité n'est pas significatif au-dessous d'un Δp_t de 2500 Pa.

On détermine sur cette base les grandeurs rapportées à 20°C, via le rapport des densités :

Au refoulement, $p_{\text{stat}2}$ à 20°C serait :

$$p_{\text{stat}2-20} = p_{\text{stat}2-\text{mes}} \cdot 1,205/0,725 = 1800 \cdot 1,205/0,725 = 2991 \text{ Pa}$$

À l'aspiration, $p_{\text{stat}1}$ à 20°C serait :

$$p_{\text{stat}1-20} = p_{\text{stat}1-\text{mes}} \cdot 1,205/0,708 = -1800 \cdot 1,205/0,708 = -3063 \text{ Pa}$$

Le différentiel de pression à 20°C serait donc :

$$\Delta_{\text{pt-20}} = 2991 - (-3063) = 6054 \text{ Pa}$$

On voit que la correction de pression est donc très importante dans ce cas (6054 Pa à 20°C contre 3600 Pa mesurés à 210 °C). Par contre, la part associée au différentiel de température entre l'aspiration et le refoulement reste très modeste (2.5%). Dans ce sens, pour un ventilateur usuel (rendement de 70%), la prise en compte de l'échauffement provoqué par le ventilateur ne fait sens qu'à partir d'un différentiel de pression totale de l'ordre de 3000 Pa.

En conclusion, la température réelle de l'air doit être prise en compte pour un report sur les courbes caractéristiques (établies pour une température de 20°C).

Annexe 3

Mesure de vitesse proche d'un coude

Cette annexe présente un cas d'exemple où le profil de vitesses à l'intérieur d'une conduite de section circulaire a dû être mesuré à proximité d'un coude. La longueur minimale de $5D$ (voir chapitre 4) en aval du point de mesure ne pouvant pas être respectée, la perturbation (coude) se trouve à une distance approximative de $1.5D$.

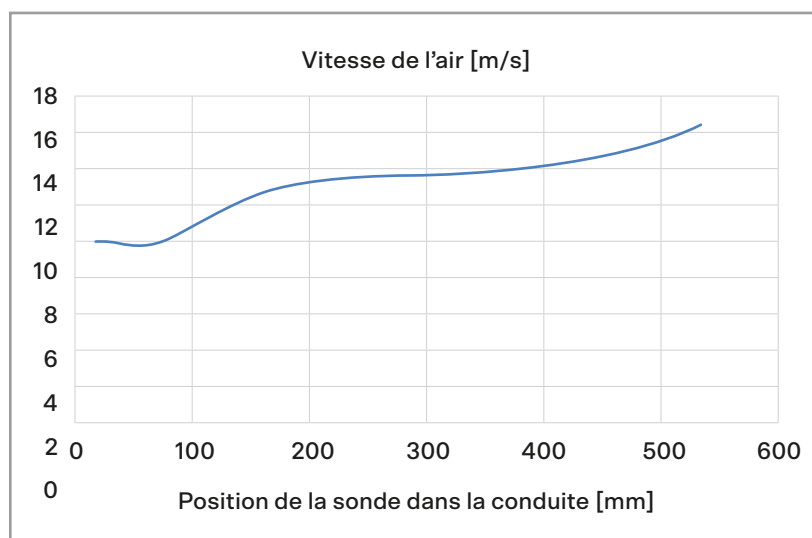
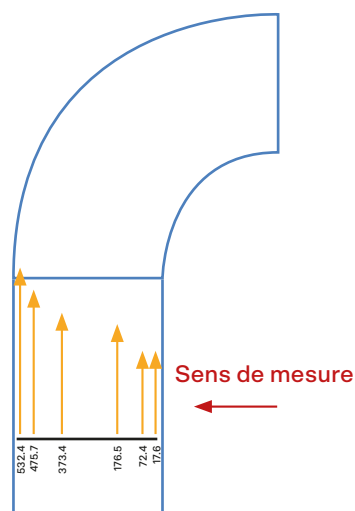


Fig. 7: Profil de vitesses.

Comme l'on peut observer sur la Fig. 7, la vitesse de l'air est plus élevée à l'angle extérieur du coude (position de la sonde la plus éloignée). Le résultat est un profil de vitesses asymétrique où les facteurs de pondération ($k_i = 1$) ne sont pas forcément adaptés. Une faible erreur est donc introduite dans le calcul de la vitesse débitante moyenne.

Dans ce cas, les mêmes mesures devraient être répétées sur au minimum 4 directions pour la même section de mesure. L'angle entre chaque direction doit être le même et il doit y avoir au moins 2 directions perpendiculaires entre elles.

La vitesse débitante est la moyenne arithmétique de toutes les vitesses à chaque position, ce qui permet d'atténuer l'effet de la perturbation sur la valeur résultante.