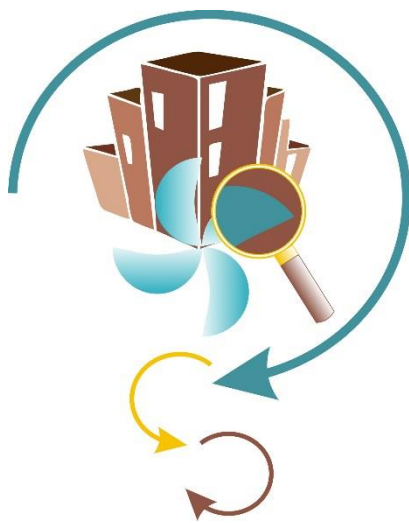




Projet PROMEVENT 2014-2017

Amélioration des Protocoles
de mesure des systèmes
de ventilation résidentiels

Rapport technique Évaluation des incertitudes de mesure de débit aux bouches



Septembre 2017



Ce document est extrait des travaux réalisés dans le cadre du projet PROMEVENT coordonné par le CEREMA. Les personnes ayant contribué à ce projet sont présentées ci-dessous :

Partenaires du projet :



Cerema - Direction Territoriale Centre-Est (Pilote du projet)

Adeline (Bailly) Mélois, Cédric Lentillon, Sylvain Berthault, Florian Sementa, Camille Patard, Pierre Planet, Sylvie Giraud, Pascal Pelte, Romuald Jobert, Elodie Rousseuw



CETIAT

Isabelle Caré, Laure Mouradian



ALLIE'AIR

Anne-Marie Bernard, Gabrielle Perez, Julien Boxberger, Samuel Evangelista



CETii

Gilles Frances



PBC

Pierre Barles



Effinergie

Sébastien Delmas, Angélique Sage

Avec la collaboration de :



ICEE

François-Rémi Carrié



PLEIAQ

Valérie Leprince

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Appel à Projets Recherche

"Vers des bâtiments responsables à horizon 2020"

Édition 2014

PROMEVENT

Amélioration des Protocoles de Mesures des systèmes de Ventilation résidentiels

Évaluation des incertitudes de mesure
de débit aux bouches

Rapport technique

Septembre 2017

Date	Version	Auteurs	Commentaires
11/16	V.1	Adeline Mélois (CEREMA) Élodie Rousseuw (CEREMA) Isabelle Caré (CETIAT) Rémi Carrié (ICEE)	Rédaction de la méthode d'évaluation et des résultats
09/2017	V. publique	Isabelle Téjou-LeToulouse (CEREMA) Adeline Mélois (CEREMA)	Anonymisation et finalisation de la version publique

Récapitulatif de l'étude

Projet :	Projet PROMEVENT
Objectif :	Évaluer les incertitudes mesures pour les mesures de débit aux bouches réalisées selon le protocole Promevent. Identifier une incertitude maximale autorisées et les exigences concernant la matériel de mesure pour respecter cette incertitude maximale.
Rédacteurs :	Mélois A., Rousseuw E., Caré I., Carrié R., I. Téjou-LeToulouse
Mots clés :	Ventilation – Mesure – Débit – Incertitude

Résumé

Les résultats des campagnes d'évaluation des protocoles existants ont mis en avant l'impact du choix de l'appareil de mesure sur l'incertitude du résultat dans le cadre d'une mesure de débit aux bouches de ventilation. Afin de définir une exigence pertinente, il était nécessaire de réaliser des mesures complémentaires en laboratoire afin d'évaluer l'incertitude de mesure pour les différents types d'appareil de mesure et les différents types de bouche. Ces mesures ainsi que la méthode détaillée d'évaluation des incertitudes sont présentées dans ce rapport. Elles ont permis de définir une exigence sur la précision des appareils de mesure qui se traduit en Erreur Maximale Tolérée [EMT] ainsi qu'une liste de configurations type d'appareil/type de bouche recommandée qui permettent de respecter une incertitude maximale globale de mesure de 15%.

Sommaire

Table des illustrations	6
Liste des tableaux	7
Avertissement	8
Introduction	9
1 Démarche	10
2 Méthode générale	11
3 Présentation des mesures complémentaires de débit aux bouches réalisées au CETIAT	12
3.1 Pseudo-étalonnage au débit de référence	12
3.2 Méthodologie	12
4 Evaluation de l'incertitude de l'erreur de la méthode de mesure $u_{Q,2}$	17
4.1 Principe de calcul de l'incertitude de la méthode	17
4.2 Résultats de la campagne de mesure pour le calcul de $u_{Q,2}$	17
4.3 Analyse des valeurs de l'incertitude de méthode $u_{Q,2}$	18
5 Evaluation de l'incertitude liée à la répétabilité $u_{Q,3}$	19
5.1 Principe de calcul de l'incertitude de répétabilité	19
5.2 Résultats de la campagne de mesure pour le calcul de $u_{Q,3}$	19
6 Evaluation de l'incertitude liée à la reproductibilité $u_{Q,4}$	21
6.1 Principe de calcul de l'incertitude de reproductibilité	21
6.2 Résultats de la campagne de mesure pour le calcul de $u_{Q,4}$	21
7 Synthèse des valeurs d'incertitudes évaluées	23
8 Evaluation de l'incertitude liée à l'erreur instrumentale $u_{Q,1}$	25
8.1 Méthode d'évaluation de l'Erreur Maximale Tolérée à imposer	25
8.2 Evaluation de la « part restante » pour l'EMT	25
8.3 Evaluation des EMT maximale par couple appareil / bouche	27
9 Evolution du protocole : exigences d'étalonnage des appareils de mesure de débit aux bouches	29

Table des illustrations

Figure 1 : Schéma des prises de mesures en laboratoire.....	12
Figure 2 : Bouches de soufflage analysées	13
Figure 3 : Incertitudes de la mesure de débit évaluées pour le cône + anémomètre thermique ponctuel.....	23
Figure 4 : Incertitudes de la mesure de débit évaluées pour le cône + anémomètre thermique quadrillé	23
Figure 5 : Incertitudes de la mesure de débit évaluées pour le tube de Pitot + cône à compensation	24
Figure 6 : Incertitudes de la mesure de débit évaluées pour le cône + anémomètre à hélice	24
Figure 7 : répartition des "parts" des différents types d'incertitude.....	26

Liste des tableaux

Tableau 1 : Organisation des mesures	13
Tableau 2 : Organisation des valeurs mesurées pour un couple Appareil / Bouche	13
Tableau 3 : Erreurs de mesure.....	14
Tableau 4 : Erreurs des mesures de débit, Grille fixe	14
Tableau 5 : Données des mesures de débit, Bouche à noyau omnidirectionnel.....	15
Tableau 6 : Données des mesures de débit, Bouche à ailettes orientables	15
Tableau 7 : Valeurs de $u_{Q,2}$, Grille fixe.....	17
Tableau 8 : Valeurs de $u_{Q,2}$, Bouche à noyau omnidirectionnel.....	17
Tableau 9 : Valeurs de $u_{Q,2}$, Bouche à ailettes orientables	18
Tableau 10 : Valeurs de $u_{Q,3}$, Grille fixe	19
Tableau 11 : Valeurs de $u_{Q,3}$, Bouche à noyau omnidirectionnel.....	20
Tableau 12 : Valeurs de $u_{Q,3}$, Bouche à ailettes orientables	20
Tableau 13 : Valeurs de $u_{Q,4}$, Grille fixe	21
Tableau 14 : Valeurs de $u_{Q,4}$, Bouche à noyau omnidirectionnel.....	21
Tableau 15 : Valeurs de $u_{Q,4}$, Bouche à ailettes orientables	22
Tableau 16 : Valeurs d'EMT pour la grille fixe	27
Tableau 17 : Valeurs d'EMT pour la bouche à noyau omnidirectionnelle.....	27
Tableau 18 : Valeurs d'EMT pour la bouche à ailettes orientables.....	27
Tableau 19 : Valeurs d'erreurs de différents appareils	28
Tableau 20 : Recommandations d'utilisation des technologies d'appareils de mesure de débit en fonction de la géométrie de bouche mesurée pour une incertitude globale de mesure de 15%	29

Avertissement

Copyright ©CEREMA

La reproduction et la diffusion de ce document dans son intégralité sous forme électronique ou papier sont libres. La reproduction et la diffusion de parties de ce document sont également libres sous réserve que la source soit clairement mentionnée sur les extraits.

Remerciements

Ce document constitue la valorisation d'un projet de recherche soutenu par l'ADEME et le MEDDE (DGALN/DHUP/QC). Ce projet fut coordonné par le Cerema dans le cadre de l'APR « Vers des bâtiments responsables à horizon 2020 ». Ce projet a été particulièrement soutenu par Pierre Deroubaix, chef de projet (ADEME), ainsi que Anne-Marie Soulier (MEDDE, DGALN DHUP).

Introduction

Lors de l'élaboration de la première version du protocole Promevent (version intermédiaire durant le projet), un premier travail sur les incertitudes de mesures a été réalisé. La méthodologie qui a été développée nécessitait des mesures complémentaires à celles réalisées pendant les campagnes d'évaluation des protocoles existants. Ces mesures complémentaires ont donc été réalisées dans un deuxième temps en laboratoire. Elles ont permis d'établir des exigences sur le matériel de mesure. La méthodologie appliquée, les résultats obtenus ainsi que les exigences proposées sont présentés dans ce rapport.

1 Démarche

Les mesures réalisées pendant les campagnes en laboratoire et in-situ ont permis d'analyser la précision des mesures, et notamment d'évaluer partiellement les incertitudes maximales de la mesure de débit aux bouches. Ces premiers résultats, ont mis en avant l'importance de définir des exigences concernant l'étalonnage des appareils de mesure.

Pour la mesure de pression aux bouches : les résultats des étalonnages des appareils et des mesures réalisées in-situ ont confirmé que les appareils utilisés actuellement et le protocole défini permettaient d'obtenir des résultats avec une incertitude satisfaisante. Les exigences concernant l'étalonnage de ces matériels, définies par le protocole Promevent, seront donc cohérentes avec les exigences du projet de norme PR NF E51-777.

Pour la mesure de débits aux bouches : les incertitudes maximales estimées mettent en avant l'importance de limiter l'incertitude due à l'appareil de mesure. Afin de définir une exigence pertinente, il était nécessaire de réaliser des mesures complémentaires en laboratoire afin d'évaluer l'incertitude de mesure pour les différents types d'appareil de mesure et les différents types de bouche. Ces mesures, présentées et analysées dans les chapitres 3 à 7 de ce rapport, ont permis de définir une exigence sur la précision des appareils de mesure qui se traduit en Erreur Maximale Tolérée [EMT] (explications au chapitre 8).

Pour la mesure de perméabilité à l'air des réseaux : des exigences d'étalonnage et d'exactitude sont définies dans le document normatif français FD E51-767. Ces exigences sont mises à jour dans le cadre de la révision (en cours) de ce document. Il a été décidé par le groupe d'experts sollicités pour cette révision qu'un groupe de travail dédié aux exigences d'étalonnage pour ces appareils de mesure soit créé à la suite de la publication de la nouvelle version du FD E51-767 (2017). Le protocole Promevent intègre donc aujourd'hui les exigences actuelles du FD E51-767, en attente des conclusions de ce groupe de travail.

2 Méthode générale

La méthode générale de calcul d'incertitude est la suivante :
La valeur que l'on cherche à mesurer est appelée le mesurande. On a alors la relation suivante :

$$\text{Valeur du mesurande} = \text{Valeur lue} + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 \quad \text{Eq 1}$$

Avec :

- Δ_1 = Erreur instrumentale
- Δ_2 = Erreur due à la méthode de mesure
- Δ_3 = Erreur due à la répétabilité de la méthode (*le même opérateur répète la mesure plusieurs fois avec le même appareil*)
- Δ_4 = Erreur due à la reproductibilité de la méthode (*la mesure est réalisée par différents opérateurs, avec le même appareil*)

On associe chaque erreur à une incertitude en débit, notées $u_{Q,1}$, $u_{Q,2}$, $u_{Q,3}$, et $u_{Q,4}$ de telle sorte que la somme quadratique de ces incertitudes soit égale à l'incertitude-type u_c due aux différentes erreurs.

$$u_c = \sqrt{u_{Q,1}^2 + u_{Q,2}^2 + u_{Q,3}^2 + u_{Q,4}^2} \quad \text{Eq 2}$$

L'incertitude-type u_c est exprimée avec une probabilité de couverture de 67%. La somme quadratique permet à l'incertitude u_c d'apparaître avec la même probabilité que chacune des incertitudes qui la composent.

On travaillera dans notre cas avec une probabilité de couverture de 95% pour l'incertitude totale, ce qui revient à écrire¹ :

$$U_c = 2 * u_c \quad \text{Eq 3}$$

Le résultat de la mesure pourra être donné sous la forme :

$$\text{Valeur du mesurande} = \text{Valeur lue} \pm U_c \quad \text{Eq 4}$$

L'objet de l'étude est d'évaluer l'incertitude du protocole de mesure de débit aux bouches Promevent à partir des résultats des mesures réalisées pendant les campagnes en laboratoire et in-situ.

On note $u_{Q,i}$ les incertitudes de mesure de débit.

3 Présentation des mesures complémentaires de débit aux bouches réalisées au CETIAT

A la suite de l'exploitation des premières campagnes et des premières évaluations des incertitudes de mesure de débit aux bouches, des mesures complémentaires en laboratoire ont été réalisées au CETIAT afin d'évaluer les incertitudes-types $u_{Q,2}$, $u_{Q,3}$ et $u_{Q,4}$ pour chaque technologie d'appareil de mesure et pour les principales géométries de bouche de soufflage.

3.1 Pseudo-étalonnage au débit de référence

Certains des appareils de mesure ont été étalonnés pour la première campagne sur la plage d'utilisation de l'appareil (de 15 m³/h à 550 m³/h suivant les appareils), et particulièrement à 30 m³/h. Le cône équipé d'un anémomètre à hélice (nouveau) n'avait pas été étalonné.

Afin d'obtenir la correction d'étalonnage la plus précise possible, un pseudo-étalonnage a été réalisé : une mesure de débit a été réalisée sans bouche, pour chacun des appareils de mesure, sur le banc d'essai à 30 m³/h. Cette première mesure sans bouche permet ainsi de corriger précisément les mesures suivantes, comme une correction d'étalonnage. La Figure 1 schématise les mesures réalisées en laboratoire : le pseudo-étalonnage, puis les mesures de débit aux bouches. On retrouve $q_{v \text{ réf}}$ le débit de référence mesuré par une sonde avant la bouche et $q_{v \text{ lu, corrigé}}$ le débit corrigé suite au pseudo-étalonnage.

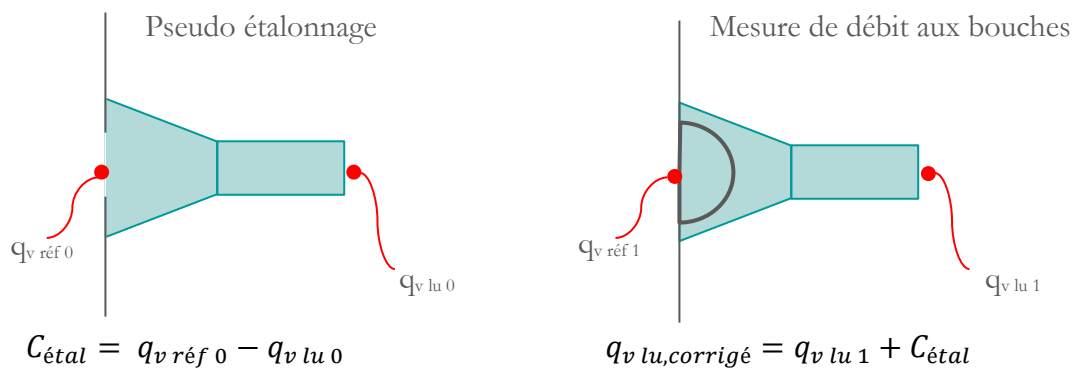


Figure 1 : Schéma des prises de mesures en laboratoire

3.2 Méthodologie

Pour évaluer ces trois incertitudes, le nombre de mesures minimales par couple type d'appareil de mesure / type de bouche est 9 (3 opérateurs réalisent chacun 3 mesures). Chacun des quatre partenaires impliqués dans les mesures in-situ ont participé à cette journée de mesures complémentaires. Le nombre de mesure par couple appareil/bouche a donc été augmenté à 12 (3 * 4 opérateurs).

Ces mesures ont été réalisées sur les trois géométries de bouche rencontrées in-situ (présentée en Figure 2) :

- une bouche de type grille fixe (a)

- une bouche à noyau omnidirectionnelle (b)
- une bouche à ailettes orientables (c)
-

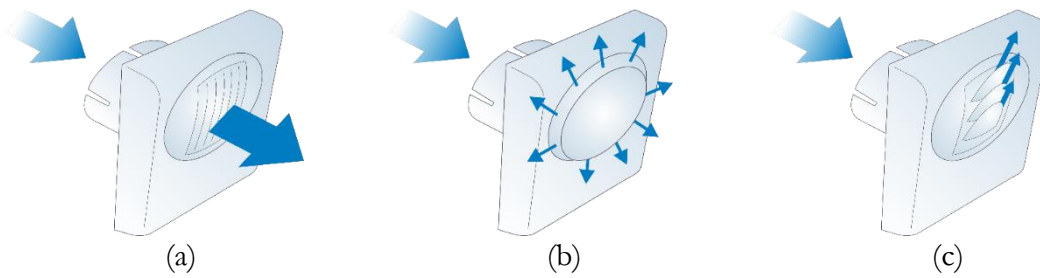


Figure 2 : Bouches de soufflage analysées

avec les 4 + 1 types d'appareil de mesure représentatifs des appareils utilisés en France :

- cône + anémomètre thermique ponctuel
- cône + anémomètre thermique quadrillé
- cône à compensation de pression
- cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)
- cône + anémomètre à hélice (avec rallonge).

Pour un même débit, ces différents cas représentent $12 \times 3 \times 5 = 180$ mesures. Ces mesures très nombreuses ont donc été réalisées au débit unique de 30 m³/h, qui est le débit de soufflage le plus représentatif des débits en logement.

Cette étude est réalisée uniquement en soufflage. En effet, les premières analyses de la tâche 3 ont mis en évidence que les incertitudes sont plus importantes en soufflage. L'exigence d'exactitude des appareils qui est définie à partir de ces incertitudes sera donc plus forte en soufflage (plus les incertitudes $u_{Q,2}$, $u_{Q,3}$ et $u_{Q,4}$ sont importantes, et moins « il reste de marge » pour l'incertitude instrumentale $u_{Q,1}$. L'exigence maximale sur $u_{Q,1}$ sera donc plus stricte en soufflage. Afin de simplifier le protocole, l'exigence en soufflage sera celle appliquée également en extraction : une exigence unique qui garantira une précision satisfaisante de toutes les mesures.

Les mesures réalisées lors de cette étude complémentaire sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Organisation des mesures

Appareil \ Bouche	Bouche 1	Bouche 2	Bouche 3
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	12 valeurs	12 valeurs	12 valeurs
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	12 valeurs	12 valeurs	12 valeurs
Tube de Pitot + cône à compensation	12 valeurs	12 valeurs	12 valeurs
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	12 valeurs	12 valeurs	12 valeurs
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	12 valeurs	12 valeurs	12 valeurs

Chaque lot de 12 valeurs caractérise la mesure de débit pour un type de bouche avec un type d'appareil de mesure en soufflage. On obtient donc pour chaque couple Appareil/Bouche les valeurs $q_{v lu, corrigé, ij}$ du débit mesuré n^o i par l'opérateur j , comme reportées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Organisation des valeurs mesurées pour un couple Appareil / Bouche

Opérateur 1	Opérateur 2	Opérateur 3	Opérateur 4
$q_{v lu, corrigé, 11}$	$q_{v lu, corrigé, 12}$	$q_{v lu, corrigé, 13}$	$q_{v lu, corrigé, 14}$
$q_{v lu, corrigé, 21}$	$q_{v lu, corrigé, 22}$	$q_{v lu, corrigé, 23}$	$q_{v lu, corrigé, 24}$

$q_{v lu, corrigé, 31}$	$q_{v lu, corrigé, 32}$	$q_{v lu, corrigé, 33}$	$q_{v lu, corrigé, 34}$
-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------

Le banc d'essai assure un débit stable à 2 m³/h : il ne délivre pas exactement le même débit d'une mesure à l'autre. Pour prendre en compte cet écart, l'analyse est réalisée à partir des erreurs de mesures, notées ϵ_{ij} , entre la valeur mesurée $q_{v lu, corrigé}$ et le débit de référence noté $q_{v réf}$.

$$\epsilon_{ij} = \frac{q_{v réf, ij} - q_{v lu, corrigé, ij}}{q_{v réf, ij}} \quad \text{Eq 5}$$

Pour chaque type de bouche, la matrice des erreurs présentée par le Tableau 3 est remplie.

Tableau 3 : Erreurs de mesure

Opérateur 1	Opérateur 2	Opérateur 3	Opérateur 4
ϵ_{11}	ϵ_{12}	ϵ_{13}	ϵ_{14}
ϵ_{21}	ϵ_{22}	ϵ_{23}	ϵ_{24}
ϵ_{31}	ϵ_{32}	ϵ_{33}	ϵ_{34}

Les Tableau 4, Tableau 5 et Tableau 6 présentent l'ensemble des erreurs calculées. Chaque tableau présente les résultats des mesures effectuées sur un type de bouche (grille fixe, bouche à noyau omnidirectionnel et bouche à ailettes orientables).

Tableau 4 : Erreurs des mesures de débit, Grille fixe

Grille fixe	Opérateur 1			Opérateur 2			Opérateur 3			Opérateur 4		
	$q_{v réf}$	q_v	ϵ	$q_{v réf}$	q_v	ϵ	$q_{v réf}$	q_v	ϵ	$q_{v réf}$	q_v	ϵ
Unité	m ³ /h	m ³ /h	%	m ³ /h	m ³ /h	%	m ³ /h	m ³ /h	%	m ³ /h	m ³ /h	%
Mesure 1												
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	31,0	31,9	3%	31,0	30,9	0%	30,9	32,9	7%	31,0	33,9	10%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	31,3	36,5	17%	31,0	38,0	23%	31,1	33,8	9%	31,0	36,7	18%
Cône à compensation de pression	31,1	31,0	0%	31,2	32,0	3%	31,0	30,0	3%	31,0	30,0	3%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	31,0	30,7	1%	30,9	30,7	1%	30,9	31,0	0%	30,9	30,9	0%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	30,9	30,9	0%	30,9	30,6	1%	31,1	30,9	1%	31,1	30,8	1%
Mesure 2												
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	31,0	31,9	3%	30,9	30,9	0%	30,9	32,9	7%	31,2	32,9	6%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	31,0	33,1	7%	31,0	35,9	16%	31,2	34,1	9%	31,0	32,4	5%
Cône à compensation de pression	30,9	30,0	3%	30,9	30,0	3%	31,0	30,0	3%	31,0	30,0	3%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	30,9	30,7	1%	30,9	30,7	1%	30,9	30,9	0%	31,0	30,9	0%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	30,9	30,7	1%	30,9	31,0	0%	30,9	30,9	0%	30,9	31,0	0%
Mesure 3												
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	31,0	31,9	3%	31,0	32,9	6%	31,0	33,9	9%	30,9	31,9	3%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	31,1	34,3	10%	31,0	33,9	9%	31,0	32,1	4%	31,0	34,2	10%
Cône à compensation de pression	30,9	30,0	3%	30,9	30,0	3%	30,9	30,0	3%	30,9	30,0	3%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	31,0	30,7	1%	31,0	31,0	0%	31,1	30,9	1%	31,0	30,8	1%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	30,9	30,8	0%	31,0	31,1	0%	30,9	31,3	1%	30,9	31,0	0%

Tableau 5 : Données des mesures de débit, Bouche à noyau omnidirectionnel

Bouche à noyau omnidirectionnel	Opérateur 1			Opérateur 2			Opérateur 3			Opérateur 4		
	Q _v réf	Q _v lu, corrigé	ε	Q _v réf	Q _v lu, corrigé	ε	Q _v réf	Q _v lu, corrigé	ε	Q _v réf	Q _v lu, corrigé	ε
Unité	m ³ /h	m ³ /h	%	m ³ /h	m ³ /h	%	m ³ /h	m ³ /h	%	m ³ /h	m ³ /h	%
Mesure 1												
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	30,2	33,9	12%	30,2	33,9	13%	30,2	35,9	19%	30,2	35,9	19%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	30,1	47,8	59%	30,1	44,3	47%	30,2	48,9	62%	30,1	46,4	54%
Cône à compensation de pression	30,2	33,0	9%	30,1	33,0	10%	30,0	33,0	10%	30,1	32,0	6%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	30,1	30,4	1%	30,2	30,7	2%	30,0	30,5	2%	30,1	31,7	5%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	30,0	29,7	1%	30,1	30,0	0%	29,9	30,0	0%	30,0	29,8	1%
Mesure 2												
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	30,3	34,9	16%	30,2	33,9	12%	30,2	36,9	22%	30,3	34,9	15%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	30,2	47,8	59%	30,1	44,0	46%	30,2	46,2	53%	30,2	47,8	59%
Cône à compensation de pression	30,1	32,0	6%	30,1	31,0	3%	30,1	33,0	10%	30,0	32,0	6%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	30,3	30,8	2%	30,1	31,7	5%	30,0	30,7	2%	30,1	30,9	3%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	30,0	27,8	7%	30,0	30,0	0%	30,0	30,0	0%	29,9	30,0	0%
Mesure 3												
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	30,4	35,9	18%	30,2	33,9	12%	30,2	35,9	19%	30,2	33,9	12%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	30,1	47,8	59%	30,1	45,7	52%	30,2	49,7	65%	30,1	46,7	55%
Cône à compensation de pression	30,1	33,0	10%	30,1	33,0	10%	30,1	33,0	10%	30,1	33,0	9%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	30,1	30,1	0%	30,2	30,2	0%	30,0	30,4	1%	30,1	31,7	5%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	30,0	29,9	0%	30,0	29,8	1%	29,9	30,0	0%	30,0	29,9	0%

Tableau 6 : Données des mesures de débit, Bouche à ailettes orientables

Bouche à ailettes orientables	Opérateur 1			Opérateur 2			Opérateur 3			Opérateur 4		
	Q _v réf	Q _v lu, corrigé	ε	Q _v réf	Q _v lu, corrigé	ε	Q _v réf	Q _v lu, corrigé	ε	Q _v réf	Q _v lu, corrigé	ε
Unité	m ³ /h	m ³ /h	%	m ³ /h	m ³ /h	%	m ³ /h	m ³ /h	%	m ³ /h	m ³ /h	%
Mesure 1												
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	29,3	22,9	22%	29,3	33,9	16%	29,4	39,9	36%	29,4	31,9	9%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	29,3	45,0	54%	29,3	40,4	38%	29,3	44,7	53%	29,4	42,8	46%
Cône à compensation de pression	31,1	30,0	4%	31,2	31,0	1%	31,2	31,0	1%	31,1	30,0	4%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	31,2	21,1	33%	31,3	22,4	29%	31,3	27,8	11%	31,2	20,7	34%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	31,0	31,9	3%	31,2	31,0	1%	31,1	31,1	0%	31,4	27,5	12%
Mesure 2												
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	29,3	26,9	8%	29,6	38,9	32%	29,7	42,9	45%	29,3	34,9	19%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	29,4	45,6	55%	29,4	40,6	38%	29,4	45,4	54%	29,6	43,1	46%
Cône à compensation de pression	31,1	30,0	4%	31,1	30,0	4%	31,2	30,0	4%	31,2	30,0	4%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	31,2	27,0	14%	31,2	21,3	32%	31,2	23,5	25%	31,2	21,2	32%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	31,1	32,1	3%	31,1	31,3	1%	31,2	30,8	1%	31,1	31,2	0%
Mesure 3												
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	29,4	26,9	8%	29,4	36,9	25%	29,4	39,9	36%	29,4	39,9	36%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	29,4	47,5	62%	29,4	39,6	35%	29,3	48,9	67%	29,4	46,5	58%
Cône à compensation de pression	31,1	30,0	4%	31,1	30,0	4%	31,1	29,0	7%	31,1	30,0	4%

Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	31,4	22,4	29%	31,2	20,9	33%	31,5	25,7	19%	31,2	21,2	32%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	31,0	31,6	2%	31,2	30,8	1%	31,1	31,2	0%	31,1	31,4	1%

4 Evaluation de l'incertitude de l'erreur de la méthode de mesure $u_{Q,2}$

4.1 Principe de calcul de l'incertitude de la méthode

On note $u_{Q,2}$ l'incertitude en débit (Q) due à la méthode de mesure. L'incertitude $u_{Q,2}$ prend en compte quatre paramètres : l'incertitude liée au principe de mesure, au centrage du cône de mesure, à l'étanchéité du cône de mesure et la rotation pour les anémomètres thermiques ponctuels.

$$u_{Q,2} = \sqrt{u^2_{Q,p} + u^2_{Q,centrage} + u^2_{Q,étanchéité} + u^2_{Q,rot}} \quad \text{Eq 6}$$

Le calcul de l'incertitude de mesure du protocole implique que les mesures soient réalisées strictement dans les conditions imposées par celui-ci : le cône de mesure est supposé correctement positionné autour de la bouche (centré et droit) et de manière étanche. Les trois dernières composante de l'équation Eq 6 sont donc égales à 0, d'où :

$$u_{Q,2} = u_{Q,p} \quad \text{Eq 7}$$

La campagne en laboratoire a permis d'obtenir 12 mesures pour chaque couple appareil / bouche. Il n'y a donc pas assez d'éléments pour déterminer correctement la loi de répartition des données. Dans ce cas, il est d'usage de se référer à une loi de distribution rectangulaire (la moins précise). On note \bar{M} la moyenne des erreurs ε_{ij} sur les 12 mesures d'un couple appareil/bouche, alors :

$$u_{Q,2} = u_{Q,p} = \frac{\text{moy}\left(\frac{q_{v \text{ réf},ij} - q_{v \text{ lu,corrigé},ij}}{q_{v \text{ réf},ij}}\right)}{\sqrt{3}} = \frac{\text{moy}(\varepsilon_{ij})}{\sqrt{3}} = \frac{\bar{M}}{\sqrt{3}} \quad \text{Eq 8}$$

4.2 Résultats de la campagne de mesure pour le calcul de $u_{Q,2}$

L'équation 8 a été appliquée à l'ensemble des erreurs des mesures précédemment calculées de $u_{Q,2}$. Les résultats de ces calculs sont présentés dans les Tableau 7, Tableau 8 et Tableau 9.

Tableau 7 : Valeurs de $u_{Q,2}$, Grille fixe

Grille fixe	moy(ε_{ij})	$u_{Q,2}$
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	5%	3%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	11%	7%
Cône à compensation de pression	3%	2%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	1%	0%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	1%	0%

Tableau 8 : Valeurs de $u_{Q,2}$, Bouche à noyau omnidirectionnel

Bouche à noyau omnidirectionnel	moy(ε_{ij})	$u_{Q,2}$
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	16%	9%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	56%	32%
Cône à compensation de pression	8%	5%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	2%	1%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	1%	1%

Tableau 9 : Valeurs de $u_{Q,2}$, Bouche à ailettes orientables

Bouche à ailettes orientables	moy(ϵ_{ij})	$u_{Q,2}$
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	24%	14%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	50%	29%
Cône à compensation de pression	3%	2%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	27%	15%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	2%	1%

4.3 Analyse des valeurs de l'incertitude de méthode $u_{Q,2}$

La norme NF EN 16211, qui définit les méthodes de mesurages de débit d'air dans les systèmes de ventilation, prévoit une incertitude de l'ordre de 5% lorsqu'on respecte son protocole de mesure. Ici la plupart des valeurs correspondent à cet ordre de grandeur, mais pour certains cas particuliers, on est très au-dessus des 5%. En effet, une valeur de $u_{Q,2}$ de 32% est obtenu pour le cône +anémomètre thermique quadrillé sur une bouche à noyau omnidirectionnel, 14% et 29% d'incertitude avec les cônes + anémomètres thermiques ponctuel et quadrillé sur la bouche à ailettes orientables et 15% d'incertitude avec le cône +anémomètre à hélice sans rallonge sur la bouche à ailettes orientables. L'incertitude de méthode dépend donc du type d'appareil de mesure et du type de bouche. Il est donc important de réaliser cette analyse pour chaque couple rencontré, car elle permettra de proposer des recommandations de choix de l'appareil de mesure en fonction de la bouche.

5 Evaluation de l'incertitude liée à la répétabilité $u_{Q,3}$

5.1 Principe de calcul de l'incertitude de répétabilité

*Condition de répétabilité (selon le VIM, 2.20) : condition de **mesurage** dans un ensemble de conditions qui comprennent la même **procédure de mesure**, les mêmes opérateurs, le même **système de mesure**, les mêmes conditions de fonctionnement et le même lieu, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires pendant une courte période de temps*

Une condition de mesurage n'est une condition de répétabilité que par rapport à un ensemble donné de conditions de répétabilité.

L'évaluation de l'incertitude due à la répétabilité nécessite de calculer les écarts entre les résultats de plusieurs mesures réalisées dans les mêmes conditions, avec le même appareil et par la même personne. Ici, comme le débit de référence peut varier de 2 m³/h, l'évaluation de l'incertitude est réalisée en comparant les erreurs ε_{ij} , et non pas directement les débits mesurés. L'écart-type des erreurs ε_{ij} est calculé pour chaque opérateur j selon l'équation 9.

$$\sigma_j = \sigma(\varepsilon_{1j}; \varepsilon_{2j}; \varepsilon_{3j}) \quad \text{Eq 9}$$

La répétabilité par couple Appareil/Bouche est alors estimée à partir de la moyenne des σ_j sur tous les opérateurs selon l'équation 10.

$$u_{Q,3} = \text{moy}(\sigma_1; \sigma_2; \sigma_3; \sigma_4) \quad \text{Eq 10}$$

L'incertitude liée à la répétabilité se calcule donc selon l'équation 11.

$$u_{Q,3} = \text{moy}_{j=\{1;4\}} \left(\sigma \left(\frac{q_{v \text{ réf},ij} - q_{v \text{ lu, corrigé},ij}}{q_{v \text{ réf},ij}} \right)_{i=\{1;3\}} \right) = \text{moy}_{j=\{1;4\}} \left(\sigma(\varepsilon_{ij})_{i=\{1;3\}} \right) \quad \text{Eq 11}$$

5.2 Résultats de la campagne de mesure pour le calcul de $u_{Q,3}$

Les mesures complémentaires réalisées en laboratoire permettent d'évaluer l'incertitude de répétabilité pour tous les couples appareil/bouche dans les mêmes conditions. Ces évaluations sont synthétisées dans les Tableau 10, Tableau 11 et Tableau 12.

Tableau 10 : Valeurs de $u_{Q,3}$, Grille fixe

Grille fixe	$\sigma(\varepsilon_{ij})_{i=\{1;3\}}$				$u_{Q,3}$
	Op 1	Op 2	Op 3	Op 4	
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	0%	4%	2%	3%	2%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	5%	7%	3%	7%	6%
Cône à compensation de pression	2%	0%	0%	0%	1%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	0%	0%	0%	0%	0%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	0%	0%	1%	0%	0%

Tableau 11 : Valeurs de $u_{0,3}$, Bouche à noyau omnidirectionnel

Bouche à noyau omnidirectionnel	$\sigma(\varepsilon_{ij})_{i=\{1;3\}}$				$u_{0,3}$
	Op 1	Op 2	Op 3	Op 4	
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	3%	0%	2%	3%	2%
Cône à compensation de pression	0%	3%	6%	2%	3%
Cône à compensation de pression	2%	4%	0%	2%	2%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	1%	3%	1%	1%	1%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	4%	0%	0%	0%	1%

Tableau 12 : Valeurs de $u_{0,3}$, Bouche à ailettes orientables

Bouche à ailettes orientables	$\sigma(\varepsilon_{ij})_{i=\{1;3\}}$				$u_{0,3}$
	Op 1	Op 2	Op 3	Op 4	
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	8%	8%	5%	14%	9%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	4%	2%	8%	7%	6%
Cône à compensation de pression	0%	2%	3%	0%	1%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	10%	2%	7%	1%	5%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	1%	0%	1%	7%	2%

Les incertitudes de répétabilité sont majoritairement comprises entre 1% et 3%. Elles sont plus importantes pour les situations suivantes :

- anémomètre thermique quadrillé sur grille fixe (6%)
- anémomètre thermique ponctuel sur la bouche à ailettes orientables (9%)
- anémomètre thermique quadrillé sur la bouche à ailettes orientables (5%)
- l'anémomètre à hélice sans rallonge sur la bouche à ailettes orientables (5%).

Les mesures réalisées sur la bouche à ailettes orientables présentent une incertitude liée à la répétabilité plus élevée que pour les autres bouches. Ceci est dû à l'orientation non symétrique du flux imposé par cette bouche au niveau de l'anémomètre.

6 Evaluation de l'incertitude liée à la reproductibilité $u_{Q,4}$

6.1 Principe de calcul de l'incertitude de reproductibilité

Condition de reproductibilité (selon le VIM, 2.24) : Condition de mesurage dans un ensemble de conditions qui comprennent des lieux, des opérateurs et des systèmes de mesure différents, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires. Les différents systèmes de mesure peuvent utiliser des procédures de mesure différentes.

Pour estimer les incertitudes liées à la reproductibilité (en faisant varier l'opérateur), la moyenne des trois erreurs des mesures est calculée pour chacun des quatre opérateurs. Prendre la moyenne permet d'éviter de reprendre en compte dans les calculs d'incertitude de reproductibilité des parts de répétitivité. L'incertitude $u_{Q,4}$ est évaluée comme l'écart-type de ces moyennes. Comme pour l'incertitude de répétabilité, la variation du débit de référence oblige à réaliser cette évaluation à partir des erreurs ε_{ij} et non directement à partir des débits mesurés. L'incertitude liée à la reproductibilité est donc évaluée selon l'équation 12.

$$u_{Q,4} = \sigma_{j=\{1;4\}}(\text{moy}_{i=\{1;3\}}\left(\frac{q_{v \text{ réf},ij} - q_{v \text{ lu,corrigé},ij}}{q_{v \text{ réf},ij}}\right)) = \sigma_{j=\{1;4\}}(\text{moy}_{i=\{1;3\}}(\varepsilon_{ij})) \quad \text{Eq 12}$$

6.2 Résultats de la campagne de mesure pour le calcul de $u_{Q,4}$

Les mesures complémentaires réalisées en laboratoire permettent d'évaluer l'incertitude de répétabilité pour tous les couples appareil/bouche dans les mêmes conditions. Ces évaluations sont synthétisées dans les Tableau 13, Tableau 14 et Tableau 15.

Tableau 13 : Valeurs de $u_{Q,4}$, Grille fixe

Grille fixe	$\text{moy}_{i=\{1;3\}}(\varepsilon_{ij})$				$u_{Q,4}$
	Op 1	Op 2	Op 3	Op 4	
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	3%	2%	8%	6%	3%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	11%	16%	7%	11%	4%
Cône à compensation de pression	2%	3%	3%	3%	1%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	1%	1%	0%	0%	0%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	0%	1%	1%	1%	0%

Tableau 14 : Valeurs de $u_{Q,4}$, Bouche à noyau omnidirectionnel

Bouche à noyau omnidirectionnel	$\text{moy}_{i=\{1;3\}}(\varepsilon_{ij})$				$u_{Q,4}$
	Op 1	Op 2	Op 3	Op 4	
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	15%	12%	20%	16%	3%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	59%	48%	60%	56%	5%
Cône à compensation de pression	8%	7%	10%	7%	1%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	1%	2%	2%	4%	2%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	3%	0%	0%	0%	1%

Tableau 15 : Valeurs de $u_{Q,4}$, Bouche à ailettes orientables

Bouche à ailettes orientables	$moy_{i=\{1;3\}}(\varepsilon_{ij})$				$u_{Q,4}$
	Op 1	Op 2	Op 3	Op 4	
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	13%	24%	39%	21%	11%
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	57%	37%	58%	50%	10%
Cône à compensation de pression	4%	3%	4%	4%	1%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	25%	31%	18%	33%	7%
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	3%	1%	1%	5%	2%

Les incertitudes liées à la reproductibilité du protocole sont généralement inférieures à 5%. Elles sont plus importantes pour les situations suivantes :

- anémomètre thermique ponctuel sur la bouche à ailettes orientables (11%)
- anémomètre thermique quadrillé sur la bouche à ailettes orientables (10%).

Les valeurs d'incertitudes les plus élevées sont évaluées avec l'anémomètre thermique quadrillé pour la mesure sur la bouche à noyau omnidirectionnel et avec les anémomètres thermiques ponctuel et quadrillé, ainsi que sur l'anémomètre à hélice sans rallonge, pour la mesure de la bouche à ailettes orientables.

7 Synthèse des valeurs d'incertitudes évaluées

Les

Figure 3, Figure 4, Figure 5 et Figure 6 représentent les valeurs des incertitudes $u_{Q,2}$, $u_{Q,3}$ et $u_{Q,4}$ pour les 3 types de bouches (en abscisse) pour chaque type d'appareil de mesure de débit. Pour chaque couple appareil / bouche, l'incertitude liée à la méthode $u_{Q,2}$ est repérée par un losange bleu, l'incertitude liée à la répétabilité de la mesure $u_{Q,3}$ est repérée par un carré marron et l'incertitude liée à la reproductibilité $u_{Q,4}$ est repérée par un triangle orange.

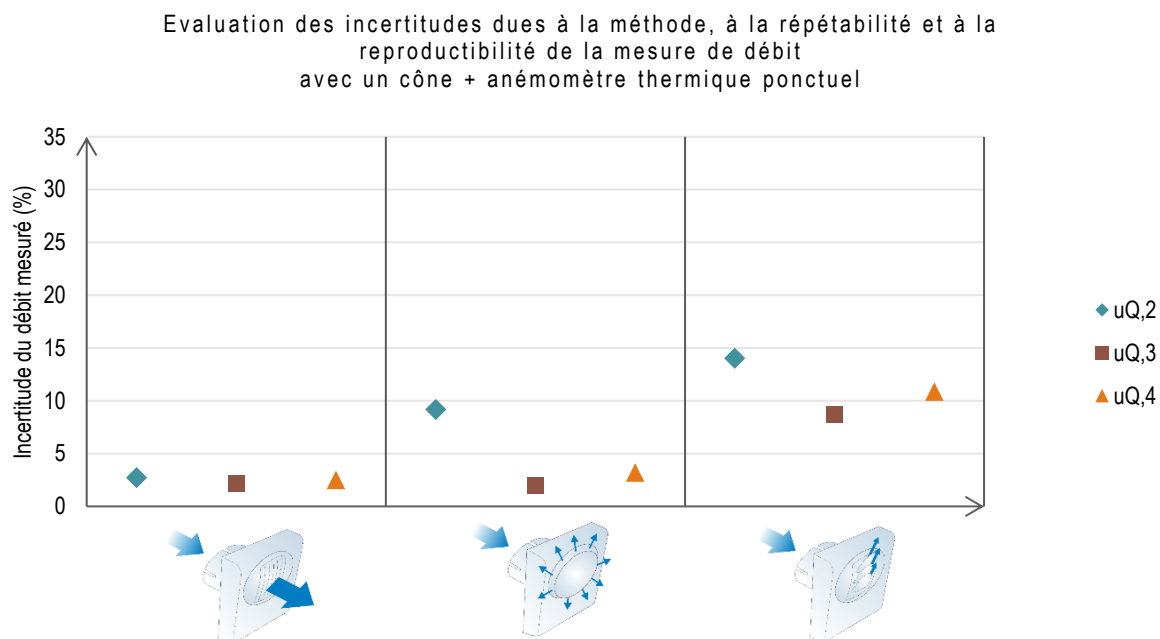


Figure 3 : Incertitudes de la mesure de débit évaluées pour le cône + anémomètre thermique ponctuel

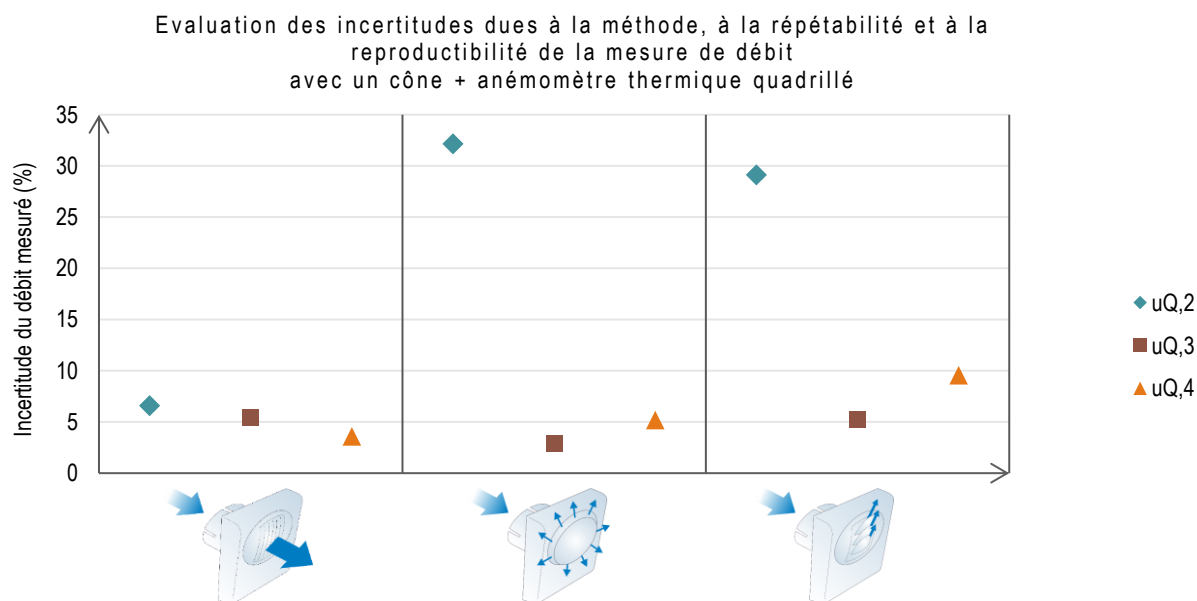


Figure 4 : Incertitudes de la mesure de débit évaluées pour le cône + anémomètre thermique quadrillé

Evaluation des incertitudes dues à la méthode, à la répétabilité et à la reproductibilité de la mesure de débit avec un Tube de pitot + cône à compensation

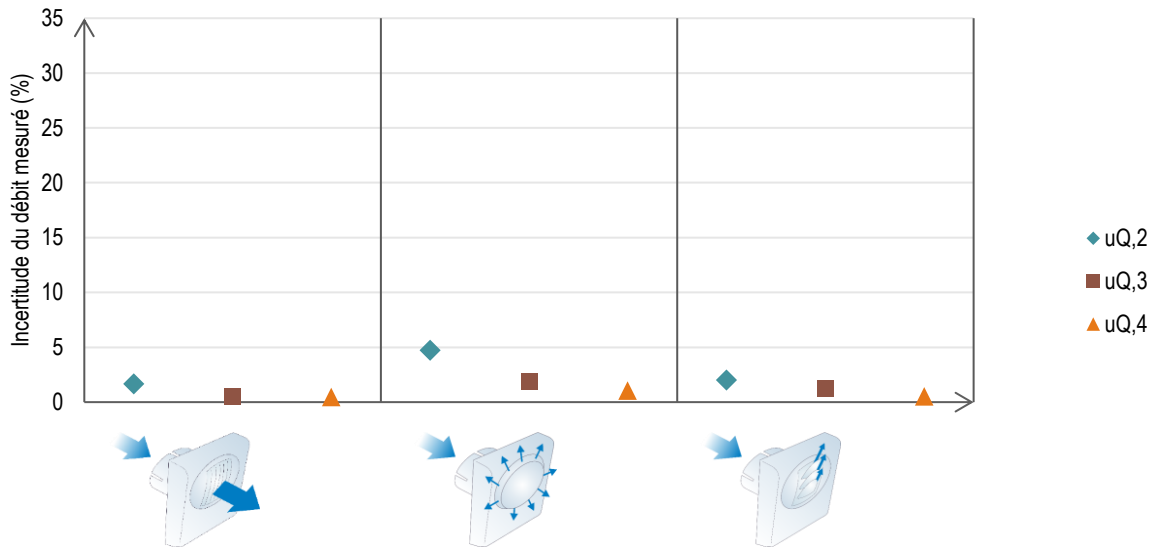


Figure 5 : Incertitudes de la mesure de débit évaluées pour le tube de Pitot + cône à compensation

Evaluation des incertitudes dues à la méthode, à la répétabilité et à la reproductibilité de la mesure de débit avec un cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)

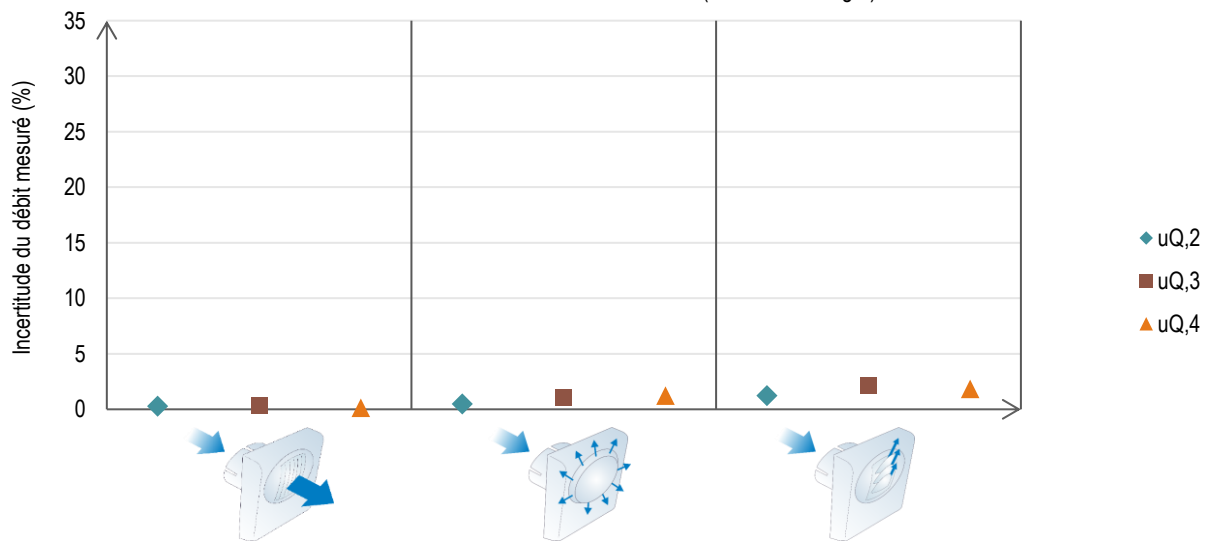


Figure 6 : Incertitudes de la mesure de débit évaluées pour le cône + anémomètre à hélice

Pour les anémomètres thermiques ponctuel et quadrillé ainsi que pour cône à compensation, c'est la méthode de mesure qui induit le plus d'incertitude. Dans le cas de l'anémomètre à hélice, aucune incertitude ne prédomine de manière significative sur les autres.

8 Evaluation de l'incertitude liée à l'erreur instrumentale

$u_{Q,1}$

8.1 Méthode d'évaluation de l'Erreur Maximale Tolérée à imposer

L'objectif de cette partie n'est pas de calculer une valeur de $u_{Q,1}$ suite aux mesures de laboratoire comme pour les incertitudes précédentes, mais de fixer une valeur d'EMT (erreur maximale tolérée) que l'appareil ne doit pas dépasser pour avoir une précision de mesure fixée. Par exemple, pour avoir une incertitude totale de mesure U_c inférieure à 15% du débit mesuré, il faut que l'appareil ait une erreur (donnée par le certificat d'étalonnage) inférieure à $EMT = [X]\%$ pour mesurer le type de bouche [Y]. L'objectif étant de valuer une unique EMT pour le protocole de mesure, sans faire de distinction entre les différents couples Appareil/Bouche.

Le rapport entre l'EMT et l'incertitude instrumentale est donnée par l'équation 13.

$$u_{Q,1} = \frac{EMT}{\sqrt{3}} \quad \text{Eq 13}$$

En injectant ce rapport dans le calcul de l'incertitude globale donnée précédemment (équations 2 et 3), on obtient une relation entre l'EMT et l'incertitude totale U_c donnée par l'équation 14.

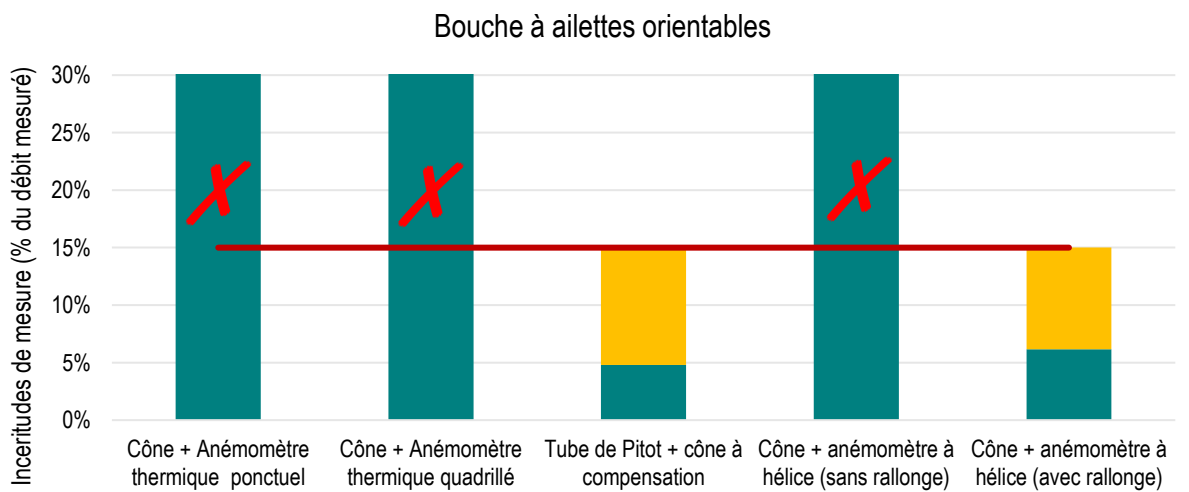
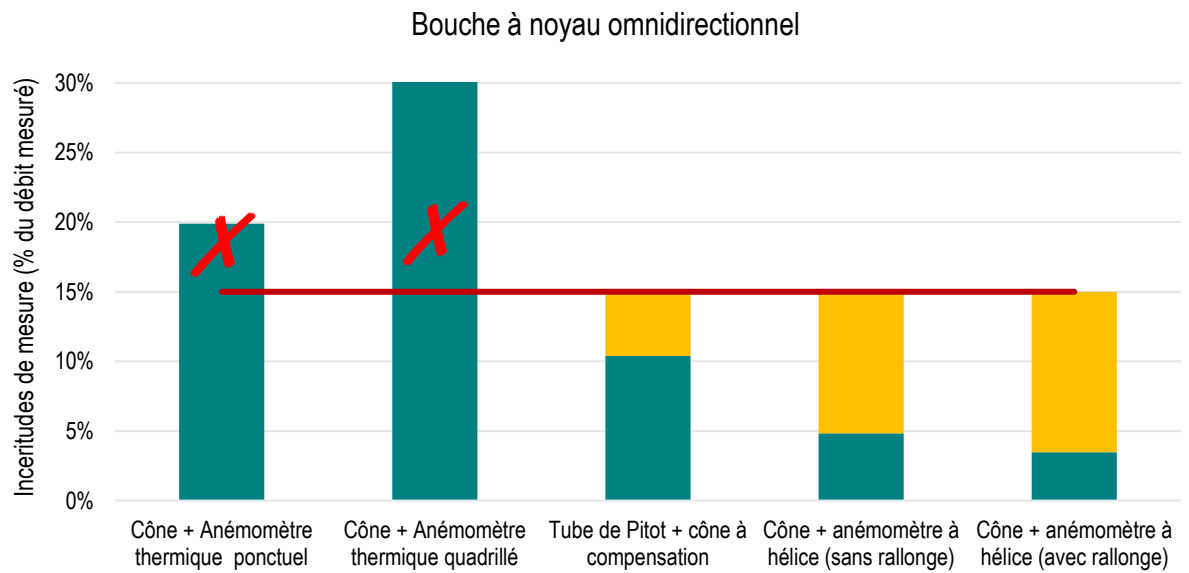
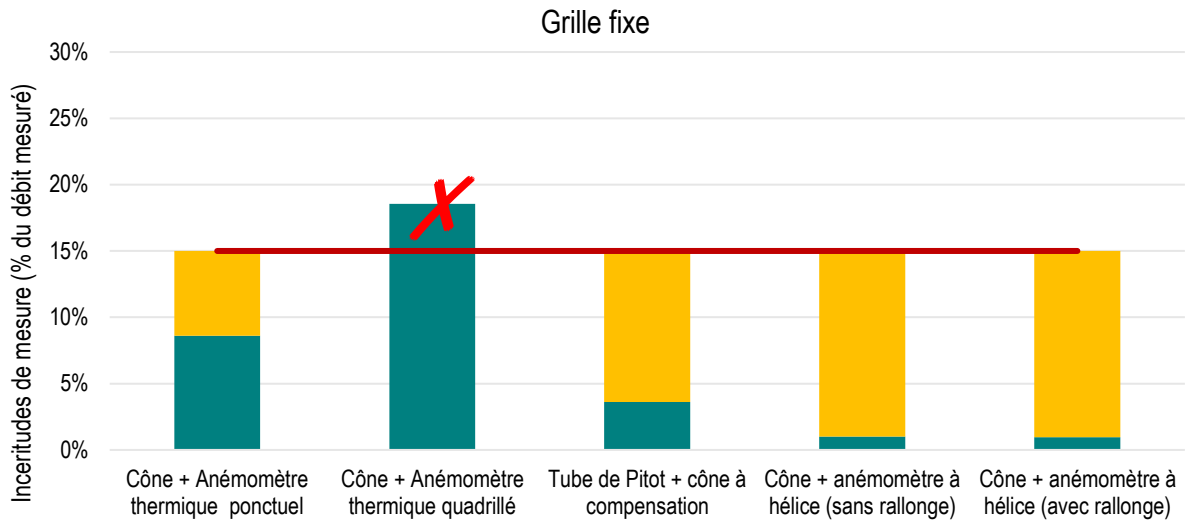
$$U_c = 2 * \left[\sqrt{u_{Q,2}^2 + u_{Q,3}^2 + u_{Q,4}^2 + \left(\frac{EMT}{\sqrt{3}}\right)^2} \right] \quad \text{Eq 14}$$

L'équation 15 permet donc d'évaluer la valeur de l'EMT maximale à imposer en fonction de la valeur maximale d'incertitude totale de la mesure.

$$EMT = \sqrt{3 * \left[\left(\frac{U_c}{2}\right)^2 - (u_{Q,2}^2 + u_{Q,3}^2 + u_{Q,4}^2) \right]} \quad \text{Eq 15}$$

8.2 Evaluation de la « part restante » pour l'EMT

Ce paragraphe synthétise pour chaque type d'appareil et chaque type de bouche les valeurs des composantes de l'incertitude liée aux erreurs de méthodes ($u_{Q,2}$), aux erreurs de répétabilité ($u_{Q,3}$) et aux erreurs de reproductibilité ($u_{Q,4}$). A partir d'une valeur de U_c donnée, on a donc une « part restante » disponible pour l'incertitude liée aux erreurs instrumentales, définie par l'équation 15. La Figure 7 représente donc schématiquement (en réalité, les incertitudes ne s'additionnent pas linéairement) avec la barre en bleu (foncé) la part « déjà prise » par $u_{Q,2}$, $u_{Q,3}$ et $u_{Q,4}$ et la barre en jaune (clair) la « part restante » disponible pour l'incertitude $u_{Q,1}$, pour une incertitude totale $U_c = 15\%$. Pour certaines barres (identifiées par des croix rouges), aucune part n'est disponible pour l'appareil de mesure car les composantes déjà évaluées dépassent le seuil des 15%.



- Part "disponible" pour les incertitudes instrumentales
- Part des incertitudes estimées en laboratoire (méthode, répétabilité, reproductibilité)
- incertitude totale max Uc

Figure 7 : répartition des "parts" des différents types d'incertitude

8.3 Evaluation des EMT maximale par couple appareil / bouche

L'équation 15 a été appliquée pour chaque couple appareil / bouche, pour 5 incertitudes totales cibles allant de 10% à 30%. Les Tableau 16, Tableau 17 et Tableau 18 donnent alors les valeurs des EMT maximales à imposer pour obtenir ces incertitudes totales cibles.

Tableau 16 : Valeurs d'EMT pour la grille fixe

Uc total (%)	10	15	20	25	30
Grille fixe	Valeurs d'EMT (%)				
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	4	11	16	20	25
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	X	X	6	15	20
Cône à compensation de pression	8	13	17	21	26
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	9	13	17	22	26
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	9	13	17	22	26

Tableau 17 : Valeurs d'EMT pour la bouche à noyau omnidirectionnelle

Uc total (%)	10	15	20	25	30
Bouche à noyau omnidirectionnel	Valeurs d'EMT (%)				
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	X	X	2	13	19
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	X	X	X	X	X
Cône à compensation de pression	X	9	15	20	24
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	8	12	17	21	26
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	8	13	17	21	26

Tableau 18 : Valeurs d'EMT pour la bouche à ailettes orientables

Uc total (%)	10	15	20	25	30
Bouche à ailettes orientables "fermée"	Valeurs d'EMT (%)				
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	X	X	X	X	X
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	X	X	X	X	X
Cône à compensation de pression	8	12	17	21	26
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	X	X	X	X	X
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	7	12	16	21	25

Pour obtenir une incertitude totale de mesure inférieure ou égale à 10%, l'EMT à imposer varie de 4% à 9% suivant les appareils de mesure. Imposer une EMT strictement inférieure à 10% semble une exigence trop stricte compte tenu des erreurs maximales relevées sur les certificats d'étalonnage des appareils étudiés. En effet, le Tableau 19 montre que 6 des 10 appareils de la campagne ne pourraient pas respecter une EMT de 9%.

Tableau 19 : Valeurs d'erreurs de différents appareils

Appareil	Erreur maximale en soufflage	Erreur maximale en extraction	Respecte EMT 10%	Respecte EMT 15%
Appareil 1	9,1%		V	V
Appareil 2	11,8%		X	V
Appareil 3	6,3%		V	V
Appareil 4	13,3%		X	V
Appareil 5	6,0%		V	V
Appareil 6	11,50%	5,2%	X (soufflage) V (extraction)	V
Appareil 7	4,60%	3,7%	V	V
Appareil 8	12,30%	6,83%	X (soufflage) V (extraction)	V
Appareil 9	5,00%	3,3%	V	V
Appareil 10	12,30%	15%	X	V

9 Evolution du protocole : exigences d'étalonnage des appareils de mesure de débit aux bouches

Afin de respecter une incertitude totale de 15%, les EMT évaluées varient de 9% à 13%. On propose d'imposer une EMT identique pour tous les appareils de mesure : une EMT de 10% permet d'assurer une incertitude globale de 15% pour tous les appareils de mesure, dans les configurations recommandées identifiées par le Tableau 20.

Tableau 20 : Recommandations d'utilisation des technologies d'appareils de mesure de débit en fonction de la géométrie de bouche mesurée pour une incertitude globale de mesure de 15%

Pour $U_c \leq 15\%$ du débit mesuré	Grille fixe	Bouche à noyau omnidirectionnel	Bouche à ailettes orientables
Cône + Anémomètre thermique ponctuel	EMT 10%	X	X
Cône + Anémomètre thermique quadrillé	X	X	X
Tube de Pitot + cône à compensation	EMT 10%	EMT 10%*	EMT 10%
Cône + anémomètre à hélice (sans rallonge)	EMT 10%	EMT 10%	X
Cône + anémomètre à hélice (avec rallonge)	EMT 10%	EMT 10%	EMT 10%

**Si un appareil a une erreur maximale exactement de 10%, l'incertitude totale du débit serait de 15,54% : en tenant compte des limites de notre analyse, il semble trop pénalisant d'éliminer cette configuration. Il sera donc accepté de justifier d'une incertitude totale maximale de 15% avec un appareil de mesure « Tube de Pitot + cône à compensation » respectant une EMT de 10%, utilisé pour mesurer un débit à une bouche à noyau omnidirectionnel.*

15% d'incertitude totale correspond à :

- $\pm 2.25 \text{ m}^3/\text{h}$ pour des débits mesurés de $15 \text{ m}^3/\text{h}$ (bouches WC par exemple)
- $\pm 4.5 \text{ m}^3/\text{h}$ pour des débits mesurés de $30 \text{ m}^3/\text{h}$ (bouches Salle de bain par exemple)

Notons tout de même que plusieurs appareils testés ne respecteraient pas cette exigence : il faudra donc que les opérateurs soient vigilants dans le choix de leur appareil de mesure.

Résumé

Les résultats des campagnes d'évaluation des protocoles existants ont mis en avant l'impact du choix de l'appareil de mesure sur l'incertitude du résultat dans le cadre d'une mesure de débit aux bouches de ventilation. Afin de définir une exigence pertinente, il était nécessaire de réaliser des mesures complémentaires en laboratoire afin d'évaluer l'incertitude de mesure pour les différents types d'appareil de mesure et les différents types de bouche. Ces mesures ainsi que la méthode détaillée d'évaluation des incertitudes sont présentées dans ce rapport. Elles ont permis de définir une exigence sur la précision des appareils de mesure qui se traduit en Erreur Maximale Tolérée [EMT] ainsi qu'une liste de configurations type d'appareil/type de bouche recommandée qui permettent de respecter une incertitude maximale globale de mesure de 15%.

Ces exigences sont intégrées au protocole Promevent et expliquées dans le guide d'accompagnement du protocole.



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Appel à Projets Recherche

"Vers des bâtiments responsables à horizon 2020"

Édition 2014