



INCERTITUDES DE MESURE

PromevenTertiaire T3

Novembre 2022

ADEME – APPEL A PROJETS RECHERCHE

Vers des bâtiments responsables à horizon 2020

Incertitudes de mesure

Récapitulatif de l'étude

Projet :	Projet PromevenTertiaire
Tâche :	Tâche 3 : Incertitudes des mesures
Partenaires :	Responsable de la tâche / sous-tâche : CETIAT Techniques :
Objectifs :	Déterminer les adaptations du protocole afin de réduire la dispersion des mesures observée pendant la campagne in-situ Définir les recommandations sur l'EMT minimum, son calcul et la méthodologie d'étalonnage des matériels
Rédacteur :	Isabelle CARE, Laure MOURADIAN, Hervé MILER, Camille LEFEBVRE
Mots clés :	Incertitudes, EMT, Simulations, débit d'air, vitesses d'air

Date	Version	Auteurs	Commentaires
09/2022	1.0	CETIAT	
11/2022	1.1	CETIAT	Mise à jour charte graphique et analyse des simulations
22/2022	1.2	CETIAT	Correction des distances de mesures pour la norme ISO 3966

Liste des destinataires

Contact	Adresse	Nombre
Etienne Marx	ADEME, Centre de Valbonne, Sophia Antipolis 06560 Valbonne	1

Résumé

Tâche 3 : Incertitudes des mesures

L'évaluation des différentes composantes des incertitudes de mesure a été réalisée pour les différentes mesures employées dans le cadre de ce projet et les typologies d'installations rencontrées. Les essais et tests réalisés viennent compléter les conclusions du projet Promevent résidentiel.

L'évaluation des performances des appareils en conditions réelles s'est déroulée en deux parties :

- En laboratoire, plusieurs appareils de mesure de débit ont été testés sur des bancs d'essai équipés de terminaux de diffusion d'air ;
- En simulation CFD, pour estimer l'impact de la présence de singularités (de type coude, registre, té, etc.) proches de la section de mesure, sur les différentes méthodes d'exploration de champs de vitesse en conduit.

Les résultats de ces mesures, ainsi que les étalonnages réalisés sur les appareils de mesures utilisés par les partenaires du projet pour les campagnes de mesure sur site permettent ainsi de proposer des recommandations sur les EMT des appareils de mesure.

Sommaire

1 Introduction	5
2 Mesures au terminal	6
2.1 Démarche	6
2.2 Description des essais réalisés	7
2.2.1 Appareils testés	7
2.2.2 Mesures de débit au niveau de diffuseurs en laboratoire	7
2.3 Résultats	9
2.3.1 Étalonnage des instruments de mesure	9
2.3.2 Évaluation de l'incertitude de mesure liée à la typologie du diffuseur	10
2.3.3 Synthèse	13
3 Mesures de débit en conduit	15
3.1 Démarche	15
3.2 Simulations en conduit cylindrique	16
3.2.1 Configurations de simulation	16
3.2.2 Les méthodes de mesure simulées	18
3.2.2.1 Méthode selon NF EN 12599 : 2012	18
3.2.2.2 Méthode selon NF EN 16211 : 2015	19
3.2.2.3 Méthode selon la Norme NF ISO 3966 : 2021	20
3.2.3 Résultats des simulations	20
3.2.3.1 Régime établi	21
3.2.3.2 Coude 90° en amont du plan de mesure	21
3.2.3.3 2 coudes 90° espacés d'une longueur de 2D, en amont du plan de mesure	22
3.2.3.4 2 coudes 90° non espacés, en amont du plan de mesure	22
3.2.3.5 Té 90° en réunion de courant, en amont du plan de mesure	23
3.2.3.6 Té 90° en séparation de courant, en amont du plan de mesure	23
3.2.3.7 Registre fin angle 0°, en amont du plan de mesure	24
3.2.3.8 Registre fin angle 45°, en amont du plan de mesure	24
3.2.3.9 Registre épais angle 0°, en amont du plan de mesure	25
3.2.3.10 Registre épais angle 45° en amont du plan de mesure	25
3.2.4 Conclusion des simulations CFD sur conduit cylindrique	26
3.2.4.1 Synthèse des résultats	26
3.2.4.2 Analyse en fonction de la norme considérée	27
3.3 Simulations en conduit rectangulaire	31
3.3.1 Configurations de simulation	31
3.3.2 Les méthodes de mesure simulées	32
3.3.2.1 Méthode selon la norme NF EN 12599 : 2012	32

3.3.2.1	Méthode selon la norme NF EN 16211 : 2015	33
3.3.2.2	Méthode selon la norme NF ISO 3966 :2021	35
3.3.3	Résultats des simulations	35
3.3.3.1	Régime établi	36
3.3.3.2	Coude 90° sur le grand côté, en amont du plan de mesure	36
3.3.3.3	Coude 90° sur le petit côté, en amont du plan de mesure	37
3.3.3.4	Té 90° sur le grand côté en réunion de courant, en amont du plan de mesure	37
3.3.3.5	Té 90° sur le petit côté en réunion de courant, en amont du plan de mesure	38
3.3.3.6	Registre angle 0°, en amont du plan de mesure	38
3.3.3.7	Registre angle 30°, en amont du plan de mesure	39
3.3.3.8	Registre angle 45°, en amont du plan de mesure	39
3.3.4	Conclusion des simulations CFD sur conduit rectangulaire	40
3.3.4.1	Synthèse des résultats	40
3.3.4.2	Analyse en fonction de la norme considérée	41
3.4	Conclusions sur les mesures de débit en conduit	44
4	Conclusion	46
5	Références bibliographiques	47

Table des illustrations

Figure 1 : Diffuseurs utilisés pour les mesures en laboratoire.....	8
Figure 2 : Erreurs de justesse des instruments évalués en mode Extraction et Insufflation	10
Figure 3 : Erreur de méthode pour les différents débitmètres et la grille d'extraction	11
Figure 4 : Erreur de méthode pour les différents débitmètres et le diffuseur circulaire	11
Figure 5 : Erreur de méthode pour les différents débitmètres et le diffuseur à 4 directions	12
Figure 6 : Erreur de méthode pour les différents débitmètres et le diffuseur à flux turbulent...	12
Figure 7 : Orientation des diamètres de mesure en fonction de l'axe des singularités - Extrait de EN 16211	17
Figure 8 : Positionnement des points de mesure sur un diamètre - Extrait de NF EN 12599 ..	18
Figure 9 : Positions des points de mesure pour un diamètre de 315 mm – Extrait de NF EN 16211	19
Figure 10 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées dans le cas d'un régime établi.....	21
Figure 11 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un coude à 90° en amont du plan de mesure	21
Figure 12 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas de deux coudes à 90° espacés d'une longueur de 2D en amont du plan de mesure.....	22
Figure 13 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas de 2 coudes à 90° non espacés en amont du plan de mesure	22
Figure 14 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un Té en réunion de courant en amont du plan de mesure	23
Figure 15 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un Té en séparation de courant en amont du plan de mesure..	23
Figure 16 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un registre fin angle 0° en amont du plan de mesure	24
Figure 17 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un registre fin angle 0° en amont du plan de mesure	24
Figure 18 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un registre épais angle 0° en amont du plan de mesure.....	25
Figure 19 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un registre épais angle 45° en amont du plan de mesure.....	25
Figure 20 : Incertitude totale attendue en fonction du nombre de points de mesure et de la distance relative du plan de mesurage à une perturbation– extrait de NF EN 12599.....	27
Figure 21 : Incertitudes-type de méthode indiquées dans la norme EN 16211 :2015 dans le respect des exigences liées aux conditions de mesure	30
Figure 22 : Division d'une section droite de mesure en surfaces égales – extrait de NF EN 12599.....	32
Figure 23 : Positions des points de mesure selon NF EN 12599 considérées dans la simulation.....	33
Figure 24 : Répartition des points de mesure pour les conduits rectangulaires selon la plus grande longueur L_2 et la plus petite L_1 – extrait de NF EN 16211	34
Figure 25 : Positions des points de mesure selon NF EN 16211 utilisées dans la simulation .	34
Figure 26 : Répartition des points de mesure selon la norme NF ISO 3966.....	35
Figure 27 : Positions des points de mesure selon NF ISO 3966 utilisées dans la simulation ...	35
Figure 28 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées dans le cas d'un régime établi.....	36
Figure 29 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un coude à 90° sur le grand côté en amont du plan de mesure	36
Figure 30 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un coude à 90° sur le petit côté en amont du plan de mesure ..	37
Figure 31 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un Té 90° sur le grand côté en réunion de courant en amont du plan de mesure	37

Figure 32 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un Té 90° sur le petit côté en réunion de courant en amont du plan de mesure	38
Figure 33 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un registre angle 0° en amont du plan de mesure	38
Figure 34 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un registre angle 30° en amont du plan de mesure	39
Figure 35 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un registre angle 45° en amont du plan de mesure	39
Figure 36 : Incertitude totale attendue en fonction du nombre de points de mesure et de la distance relative du plan de mesurage à une perturbation– extrait de NF EN 12599	41
Figure 37 : Incertitudes-type de méthode indiquées dans la norme EN 16211 : 2015 dans le respect des exigences liées aux conditions de mesure	43
Tableau 1 : Recommandations de Promevent résidentiel pour l'utilisation des technologies d'appareils de mesure de débit en fonction de la géométrie de bouche mesurée pour une incertitude totale de mesure de 15% [1].....	6
Tableau 2 : Instruments de mesure de débit testés	7
Tableau 3 : Erreur de méthode maximale pour les différents couples instrument de mesure/diffuseur sur l'étendue de débit considérée (100 à 1000 m ³ /h pour l'extraction et 100 à 500 m ³ /h pour l'insufflation)	13
Tableau 4 : Valeurs de l'incertitude totale de mesure du débit en fonction de l'EMT instrument choisie	14
Tableau 5 : Position des points de mesure sur chaque rayon (distance à la paroi, en mm) pour un conduit cylindrique de 315 mm de diamètre	19
Tableau 6 : Positionnement des points de mesure de vitesses ponctuelles sur chaque rayon – Extrait de NF ISO 3966 (2021)	20
Tableau 7 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 1,6D de la singularité amont (toutes singularités confondues).....	26
Tableau 8 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 2,5D de la singularité amont (toutes singularités confondues).....	26
Tableau 9 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 5D de la singularité amont (toutes singularités confondues).....	26
Tableau 10 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 10D de la singularité amont (toutes singularités confondues).....	27
Tableau 11 : Comparaison des simulations numériques à l'incertitude de méthode indiquée dans la norme EN 12599.....	29
Tableau 12 : Comparaison des simulations numériques à l'incertitude de méthode indiquée dans la norme EN 16211 : 2015.....	30
Tableau 13 : Configurations de répartition des points de mesures considérées	32
Tableau 14 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 1,6D de la singularité amont (toutes singularités confondues).....	40
Tableau 15 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 2,5D de la singularité amont (toutes singularités confondues).....	40
Tableau 16 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 5D de la singularité amont (toutes singularités confondues).....	40
Tableau 17 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 10D de la singularité amont (toutes singularités confondues).....	40
Tableau 18 : Comparaison des simulations numériques à l'incertitude de méthode indiquée dans la norme EN 12599.....	42
Tableau 19 : Comparaison des simulations numériques à l'incertitude de méthode indiquée dans la norme EN 16211 : 2015.....	43

1 Introduction

L'objectif du projet est d'améliorer les méthodes existantes en proposant la rédaction d'un protocole de diagnostic des installations de ventilation mécanique dans le secteur tertiaire, assurant une fiabilité suffisante et une faisabilité technique et financière adaptée.

Afin d'atteindre cet objectif, l'évaluation des incertitudes de mesure est identifiée comme une des tâches du projet (Tâche 3). En effet, évaluer l'incertitude de mesure liée au matériel de mesure utilisé et aux typologies d'installations rencontrées permettra d'envisager des recommandations sur les appareils de mesure à utiliser et les méthodes de mesure à privilégier.

On s'intéresse ici aux méthodes de mesure au terminal et en conduit. Dans une première partie consacrée aux mesures au terminal, l'objectif de cette tâche est de définir l'EMT des instruments de mesure du débit afin de maintenir l'incertitude de mesure globale à une valeur inférieure à 15% de la valeur du débit mesuré. Dans une seconde partie, pour les mesures en conduit, l'objectif est, pour différentes configurations, d'évaluer l'incertitude de mesure liée à la méthode de mesure de débit en conduit pour des typologies d'installation communément rencontrées sur des sites du secteur tertiaire : conduit cylindrique ou rectangulaire avec une singularité à l'amont du plan de mesure.

2 Mesures au terminal

2.1 Démarche

La démarche développée ici est identique à celle présentée lors du projet Promevent résidentiel [1]. L'incertitude de mesure totale est évaluée en combinant (somme quadratique) l'incertitude due à l'instrument de mesure et celle due à la méthode de mesure.

Pour les mesures aux bouches, il a été défini dans le cadre du projet Promevent résidentiel [1] que pour atteindre une **incertitude de mesure totale de 15%** de la valeur du débit, il était nécessaire que l'EMT¹ de l'instrument de mesure utilisée ne devait pas dépasser 10% de la valeur de ce débit.

D'autre part, l'utilisation de certaines technologies d'instrument de mesure pour certaines typologies de bouches ne permettait pas de s'appuyer sur une simple vérification de l'EMT car elle ne permettait pas de respecter l'incertitude de mesure globale de 15% de la valeur du débit. Le tableau ci-dessous, issu du protocole ventilation RE2020 [5], rappelle les recommandations d'utilisation autorisées :

Tableau 1 : Recommandations de Promevent résidentiel reprises dans le protocole RE2020 pour l'utilisation des technologies d'appareils de mesure de débit en fonction de la géométrie de bouche mesurée pour une incertitude totale de mesure de 15% [5]

Appareillage de mesure	Schéma*	Utilisation				
		Extraction		Soufflage		
		Tout type de bouche		Bouche à grille fixe sans déviation du flux d'air	Bouche à sortie omnidirectionnelle	Bouche avec ailettes orientables à forte déviation du flux d'air
Cône avec anémomètre thermique ponctuel		✓	✓	EVD	EVD	EVD
Cône avec réseau d'anémomètre thermique en quadrillage		✓	✓	✓	✓	EVD
Cône avec mesure de pression en croix et compensation		✓	✓	✓	✓	✓
Cône avec anémomètre à moulinet		✓	✓	✓	✓	EVD
Cône avec anémomètre à moulinet déporté		✓	✓	✓	✓	✓
Autres types d'appareils		EVD	EVD	EVD	EVD	EVD

Légende :
 ✓ : Situations qui permettent d'assurer une incertitude totale de la mesure < 15% si l'appareil de mesure respecte une EMT ciblée définie dans les tableaux de l'Annexe D du protocole RE2020
 EVD : Situations qui requièrent une évaluation détaillée pour pouvoir justifier d'une incertitude totale de la mesure < 15%
 * : la partie en bleu sur les figures indique l'emplacement où la mesure est effectuée

Dans les bâtiments tertiaires, pour les bouches de même typologie que celles utilisées dans le résidentiel, les résultats obtenus dans [1] et présentés ci-dessus peuvent être repris en l'état.

Dans les bâtiments tertiaires, on peut toutefois trouver des diffuseurs de plus grande dimension et pour lesquels les technologies des instruments de mesure sont également différentes de celles évaluées dans le projet Promevent Résidentiel. On s'attache ici à compléter les évaluations réalisées dans le projet dédié au résidentiel pour ces configurations complémentaires.

2.2 Description des essais réalisés

2.2.1 Appareils testés

Les essais complémentaires sont réalisés pour des instruments de mesure de type « balomètres » utilisés par les mesureurs partenaires du projet ayant réalisé les mesures sur site.

Ces instruments de mesure sont constitués d'une hotte permettant de collecter le flux d'air sur la totalité du diffuseur et de l'amener au niveau de l'élément de mesure.

Trois instruments de mesure ont été sélectionnés, dont les caractéristiques sont synthétisées dans le Tableau 2.

Les performances de deux balomètres de même type, utilisant le principe d'une mesure de pression différentielle pour déterminer le débit, ont été évalués entre 100 et 1000 m³/h.

- Pour l'un d'entre eux, dénommé BALO1 dans la suite du document, un dispositif de redressement du flux d'air permanent est présent à l'intérieur de la hotte
- Pour le second, dénommé BALO2, ce dispositif est amovible et des essais ont été réalisés avec et sans ce dispositif

Un 3^{ème} instrument de mesure, dénommé BALO3, utilisant le même principe pour la mesure du débit mais disposant d'un ventilateur compensateur de pression a également été évalué. L'étendue de mesure de ce dernier instrument est limitée à 500 m³/h.

Tableau 2 : Instruments de mesure de débit testés

Instrument de mesure	Principe de mesure	Dispositif redresseur de flux	Débits testés
BALO1	Mesure de pression différentielle	Inclus	100 – 1000 m ³ /h
BALO2	Mesure de pression différentielle	Amovible	100 – 1000 m ³ /h
BALO3	Mesure de pression différentielle avec ventilateur de compensation		100 – 500 m ³ /h

Dans un 1^{er} temps, les instruments de mesure ont été étalonnés en mode insufflation et en mode extraction. Ces étalonnages ont été réalisés sur un banc d'étalonnage pour lequel l'incertitude sur le débit de référence est de 1% de la valeur du débit. Ce banc permet de réaliser des étalonnages sous accréditation COFRAC² en respectant le sens d'apposition des appareils en insufflation et en extraction.

2.2.2 Mesures de débit au niveau de diffuseurs en laboratoire

Les instruments ont été utilisés pour mesurer le débit au niveau de diffuseurs en extraction et en insufflation. La mesure du débit est comparée à celle du banc d'essai

² L'utilisation du banc utilisée dans le cadre de ces essais est couverte par l'accréditation COFRAC du CETIAT en débitmétrie gazeuse (accréditation N°2-1124)

permettant de mesurer le débit de référence réel et sur lequel a été raccordé le diffuseur. Le banc d'essai utilisé est le même que celui ayant permis de réaliser les étalonnages des instruments de mesure.

Les diffuseurs étudiés de taille approximative 600 mm × 600 mm représentent les différentes typologies d'écoulement susceptibles d'être rencontrées et sont présentés en Figure 1 :

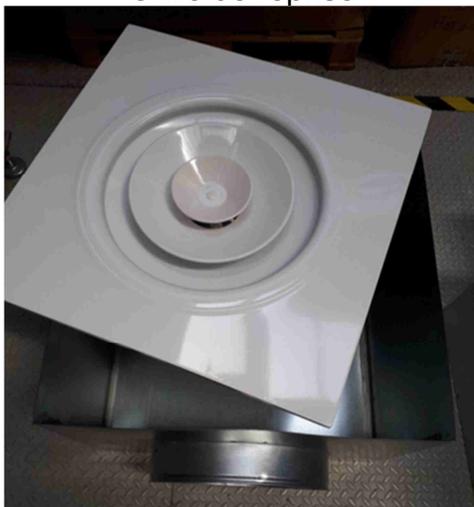
- Une grille de reprise, pour des débits d'extraction jusqu'à 1000 m³/h
- Un diffuseur à 4 directions, pour des débits d'insufflation jusqu'à 500 m³/h
- Un diffuseur circulaire, pour des débits d'insufflation jusqu'à 500 m³/h
- Un diffuseur à flux turbulent, pour des débits d'insufflation jusqu'à 500 m³/h



Grille de reprise



Diffuseur 4 directions



Diffuseur circulaire



Diffuseur à flux turbulent

Figure 1 : Diffuseurs utilisés pour les mesures en laboratoire

2.3 Résultats

2.3.1 Étalonnage des instruments de mesure

Un certificat d'étalonnage a été établi pour chacun des instruments de mesure présentant les résultats en mode extraction et insufflation.

L'**erreur de justesse** obtenue est comparée à l'exigence du projet de révision de la norme prEN 16211 (2022) [2], actuellement à l'enquête pour les instruments indiquant directement un débit. Cette exigence est au moment de la rédaction de ce rapport de **5 m³/h + 3,6% de la valeur du débit** mais peut être soumise à modification, en fonction du traitement des commentaires reçus lors de l'enquête.

La spécification constructeur pour les deux balomètres passifs BALO 1 et BALO2, (i.e. sans ventilateur de compensation) est de 12 m³/h + 3% de la valeur du débit. Celle pour le débitmètre avec système de compensation BALO3 est de 3% de la valeur de débit pour des débits supérieurs à 3 m³/h.

Dans la mesure où l'exigence du projet de norme propose une erreur maximale tolérée plus faible que celle garantie par le constructeur dans sa spécification pour 2 des 3 balomètres testés, on peut s'interroger sur la pertinence de cette exigence et la capacité des instruments de mesure disponibles sur le marché à la respecter.

La Figure 2 présente de manière indifférenciée, pour les 3 instruments testés, l'erreur de justesse obtenue en extraction et en insufflation ainsi que l'exigence sur l'erreur de justesse proposée par le projet de norme (EMT 16211) et la spécification constructeur des deux balomètres passifs (EMT constructeur). Pour l'un d'entre eux, à 100 m³/h, l'erreur obtenue est supérieure à l'EMT du projet de norme tout en restant inférieure à la spécification constructeur des instruments passifs sans ventilateur. Pour un autre, en mode extraction, pour les plus forts débits, l'erreur de justesse devient supérieure à l'EMT du projet de norme et à la spécification constructeur.

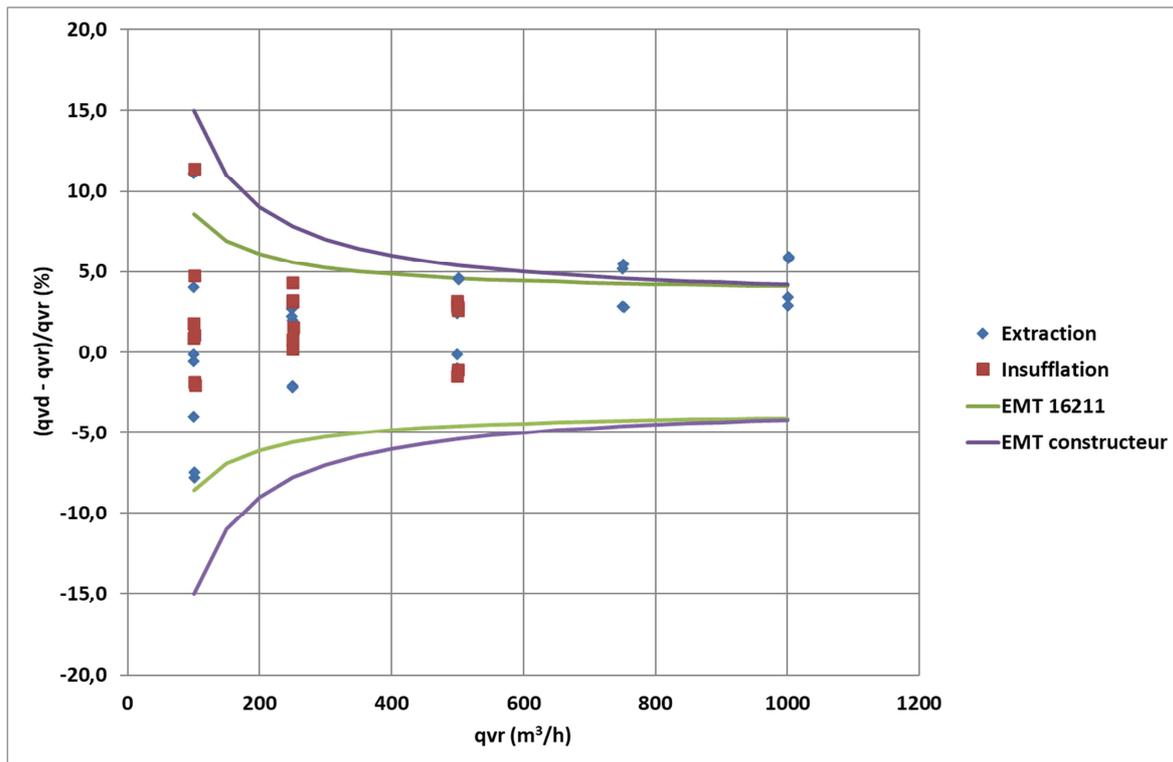


Figure 2 : Erreurs de justesse des instruments évalués en mode Extraction et Insufflation

Dans la suite de ce rapport et de l'analyse, les 2 EMT pour les instruments de mesure sont considérées :

- EMT 16211 = $5 \text{ m}^3/\text{h} + 3,6\%$ de la valeur du débit
- EMT constructeur = $12 \text{ m}^3/\text{h} + 3\%$ de la valeur du débit

2.3.2 Évaluation de l'incertitude de mesure liée à la typologie du diffuseur

Les mesures avec les différents balomètres étant réalisées en présence d'un diffuseur, **le résultat est corrigé de l'erreur de justesse** évaluée lors de l'étalonnage des instruments de mesure.

L'erreur résiduelle de mesure calculée comme la différence relative entre le débit affiché par l'instrument (corrigé de l'erreur observée lors de l'étalonnage) et le débit de référence mesuré par le banc d'essai est alors directement liée à l'influence de la nature de l'écoulement perturbé généré par le diffuseur sur l'instrument de mesure et constitue **l'incertitude de mesure liée à la méthode**.

Les Figure 3, Figure 4, Figure 5 et Figure 6 présentent cette erreur résiduelle pour les différents types de diffuseur.

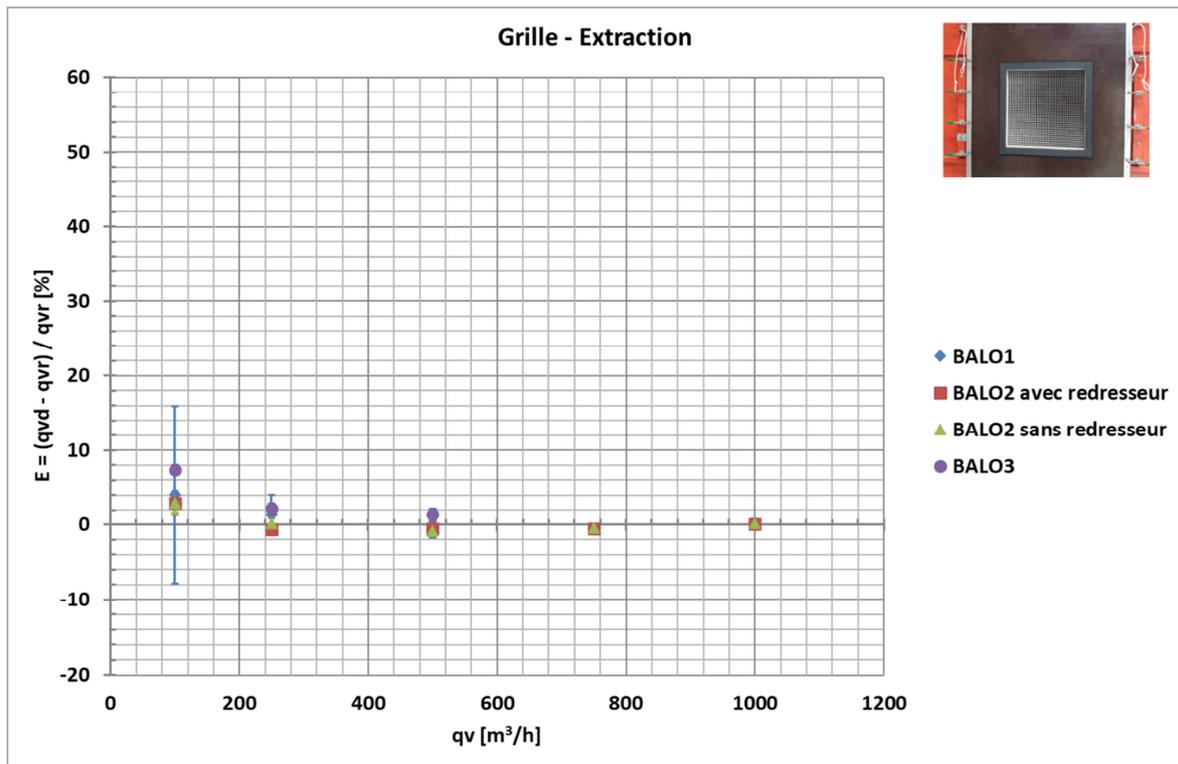


Figure 3 : Erreur de méthode pour les différents débitmètres et la grille d'extraction

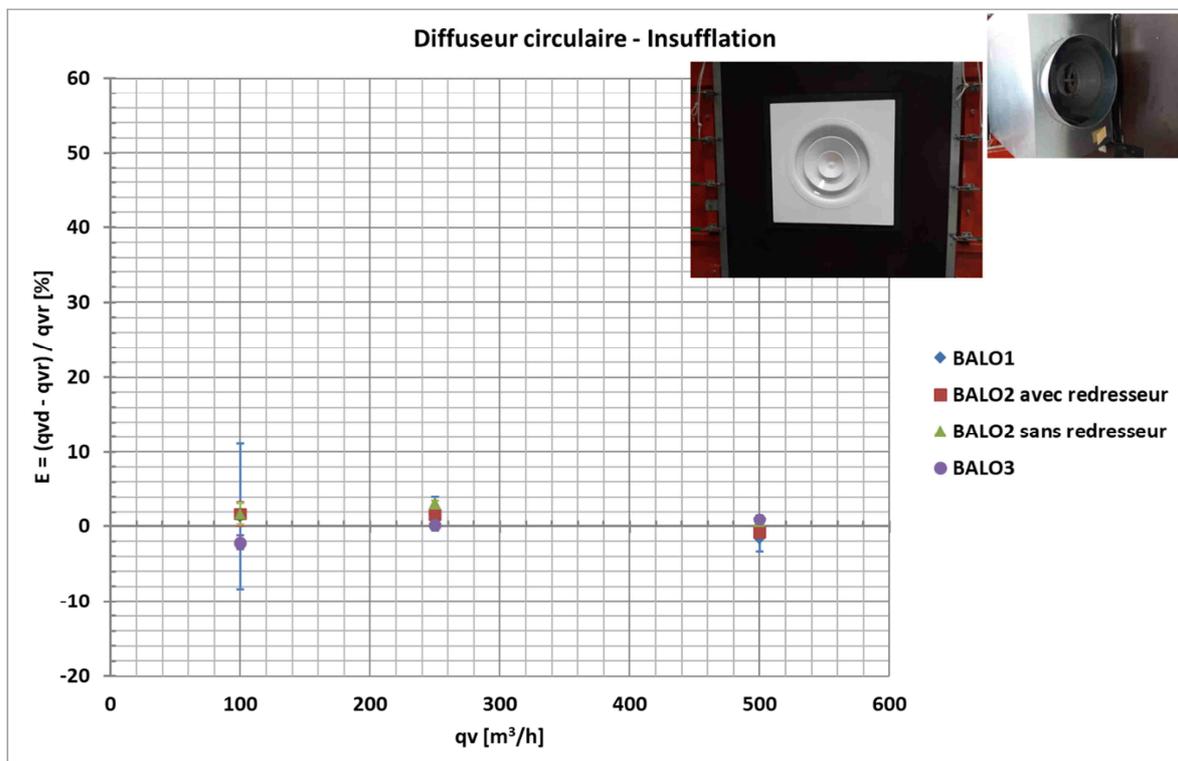


Figure 4 : Erreur de méthode pour les différents débitmètres et le diffuseur circulaire

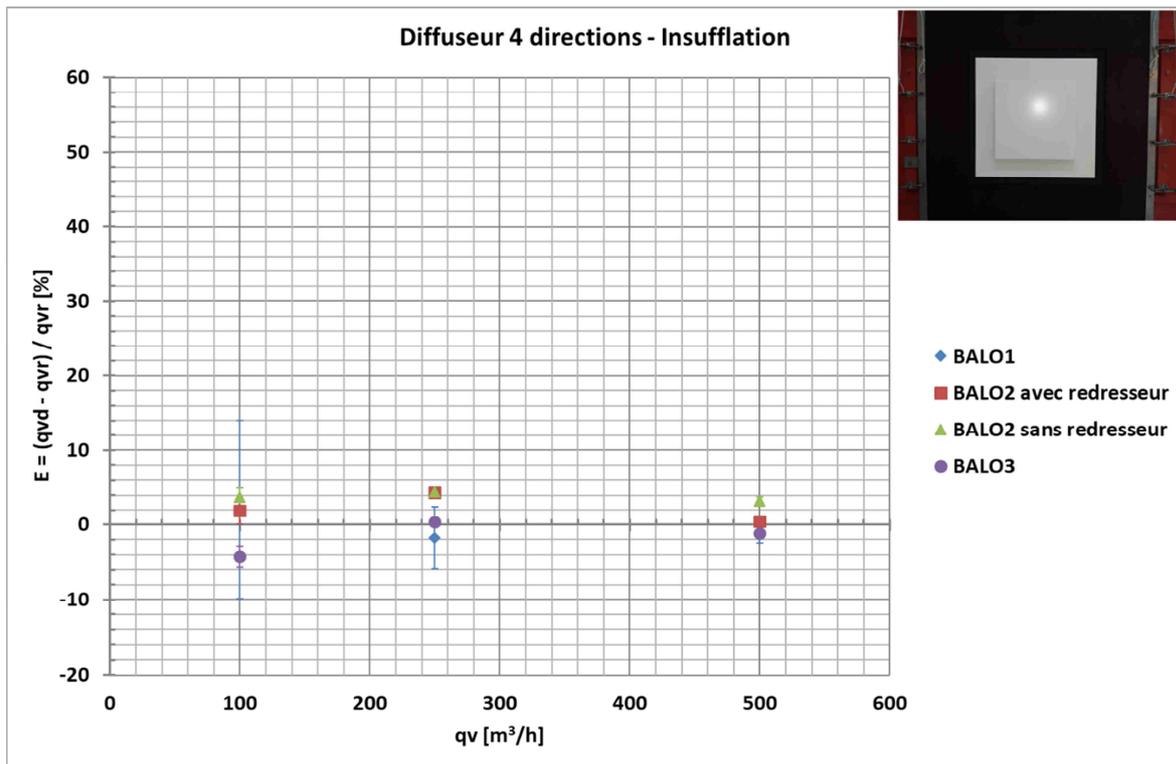


Figure 5 : Erreur de méthode pour les différents débitmètres et le diffuseur à 4 directions

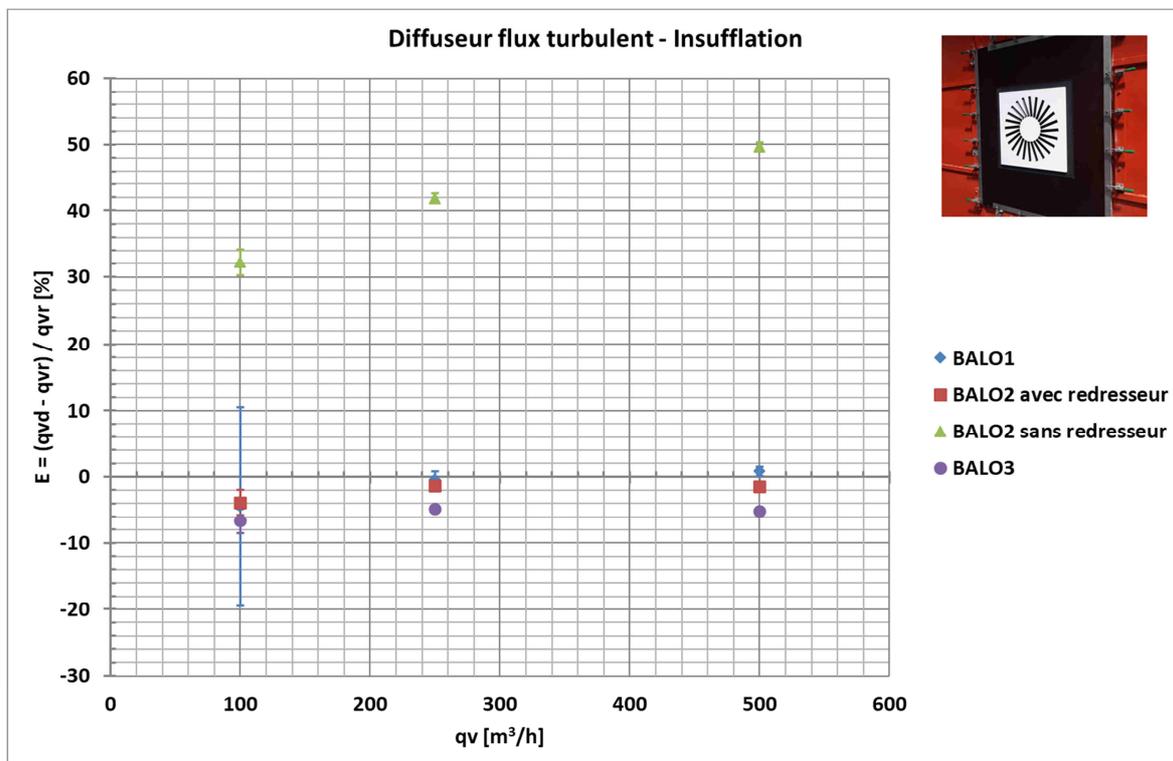


Figure 6 : Erreur de méthode pour les différents débitmètres et le diffuseur à flux turbulent

Sur l'étendue de mesure totale, l'erreur de méthode maximale est indiquée dans le Tableau 3 pour les différents couples instrument de mesure/diffuseur.

Tableau 3 : Erreur de méthode maximale pour les différents couples instrument de mesure/diffuseur sur l'étendue de débit considérée (100 à 1000 m³/h pour l'extraction et 100 à 500 m³/h pour l'insufflation)

Erreur de méthode max (%)	Grille extraction	Diffuseur circulaire	Diffuseur 4 direction	Diffuseur flux turbulent
BALO1	4	1,7	2,1	4,5
BALO2 avec redresseur	3	1,6	4,3	3,9
BALO2 sans redresseur	3	3,1	4,5	49,7
BALO3	7,4	2,2	4,3	6,7

L'erreur de mesure maximale est généralement obtenue pour le plus bas débit testé de 100 m³/h et ce, quel que soit l'instrument de mesure.

L'erreur de méthode est relativement homogène pour les différents instruments de mesure sauf pour le balomètre sans redresseur pour un diffuseur turbulent qui, par nature, génère un écoulement giratoire. Dans le cas d'un tel écoulement, un dispositif pour redresser l'écoulement est nécessaire pour un balomètre passif, sans ventilateur de compensation (de type BALO1 et BALO2). Lorsque le balomètre est équipé d'un ventilateur de compensation, ce dernier permet d'éliminer l'impact de l'effet giratoire du diffuseur sur l'élément de mesure.

Recommandation : Utiliser un redresseur de flux d'air avec des appareils de mesure de type débitmètre passif, quel que soit le diffuseur.

Dans la grande majorité des cas, l'erreur de méthode est inférieure à 5% du débit. On considèrera donc cette valeur forfaitairement comme incertitude de méthode.

2.3.3 Synthèse

L'incertitude de mesure totale est évaluée en combinant (somme quadratique) l'incertitude due à la méthode de mesure évaluée dans le § précédent à celle de l'instrument de mesure. Pour cette dernière, on considèrera les 2 hypothèses pour l'EMT appareil définies au §2.3.1.

Les mesures réalisées sur site ont permis de montrer que l'impact opérateur était faible, voire négligeable, pour ce type de mesure. L'incertitude totale calculée est toutefois majorée pour tenir compte de cet éventuel impact.

Ainsi,

- Si l'instrument de mesure est conforme à une « EMT 16211 » de 3,6% du débit + 5 m³/h, l'incertitude de mesure totale incluant l'influence du diffuseur reste inférieure à **8% du débit + 5 m³/h**
- Si l'instrument de mesure est conforme à une « EMT constructeur » de 3% du débit + 12 m³/h, l'incertitude de mesure totale incluant l'influence du diffuseur reste inférieure à **8% du débit + 12 m³/h**

Dans tous les cas, ces niveaux d'incertitude ne peuvent être atteints que si le débitmètre utilisé dispose d'un système redresseur de l'écoulement, permanent ou amovible, dans le cas où il s'agit d'un débitmètre sans ventilateur de compensation.

Le Tableau 4 ci-dessous présente la valeur de l'incertitude totale de mesure du débit proposée ci-dessus et incluant l'EMT instrument, l'incertitude due à l'opérateur et

l'incertitude de méthode due à la nature du diffuseur. Les calculs sont réalisés pour les 2 EMT instrument considérées.

Tableau 4 : Valeurs de l'incertitude totale de mesure du débit en fonction de l'EMT instrument choisie

Débit (m ³ /h)	Incetitude totale de mesure du débit	
	EMT instrument : EMT 16211	EMT constructeur : EMT constructeur
100	13%	20%
200	10,5%	14%
500	9%	10,4%
750	8,7%	9,6%
1000	8,5%	9,2%

Recommandation : S'appuyer sur l'exigence du projet de norme prEN 16211 (2022) pour plus de lisibilité mais action à mener pour faire modifier la valeur de l'EMT instrument proposée dans le projet de norme au moment de l'enquête publique.

3 Mesures de débit en conduit

3.1 Démarche

L'objectif de cette partie est, pour différentes configurations, d'évaluer l'incertitude de mesure liée à la méthode de mesure de débit en conduit pour des typologies d'installation communément rencontrées sur des sites du secteur tertiaire : conduit cylindrique ou rectangulaire avec une singularité à l'amont du plan de mesure.

Parmi les méthodes de mesure concernées, on s'intéresse ici aux méthodes de mesure en conduit, par exploration du champ des vitesses et en particulier à celles décrites dans les normes :

- EN 12599 : 2012 - Ventilation des bâtiments - Procédures d'essai et méthodes de mesure pour la réception des installations de conditionnement d'air et de ventilation
- EN 16211 : 2015 - Systèmes de ventilation pour les bâtiments - Mesurages de débit d'air dans les systèmes de ventilation – Méthode ; *Cette norme est en cours de révision, un projet de révision noté Pr EN 16211 (2022) est soumis à enquête publique fin 2022*
- NF ISO 3966 : 2021 - Mesure du débit des fluides dans les conduites fermées - Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles

Cette évaluation est réalisée par simulation numérique avec le code CFD STARCCM+.

La valeur moyenne de la vitesse dans la section est calculée comme la moyenne arithmétique des vitesses relevées aux points de mesure définis dans la norme considérée. Le débit volumique estimé est calculé comme la valeur moyenne de la vitesse moyenne multipliée par la section de la conduite. Ce débit volumique est comparé à celui défini pour le calcul. La différence entre les deux valeurs permet d'évaluer l'erreur liée au schéma de répartition des points de mesure considéré, appelée incertitude de méthode.

L'analyse réalisée présente **l'erreur relative de la méthode** calculée comme **la différence relative entre le débit calculé à partir des vitesses relevées aux points de mesure définis par le schéma de répartition considéré et le débit défini pour le calcul**. Cette erreur correspond à celle due à la répartition des points de mesure et ne prend pas en compte l'erreur supplémentaire liée au positionnement de l'instrument de mesure dans la conduite.

3.2 Simulations en conduit cylindrique

3.2.1 Configurations de simulation

On considère le cas d'un conduit lisse cylindrique de diamètre 315 mm.

Le débit est de 1500 m³/h, correspondant à une vitesse moyenne débitante de 5,35 m/s.

10 configurations géométriques sont simulées :

- régime établi, correspondant à des longueurs droites infinies
- coude 90° en amont du plan de mesure
- 2 coudes 90° espacés d'une longueur de 2D, en amont du plan de mesure
- 2 coudes 90° non espacé, en amont du plan de mesure
- Té 90° en réunion de courant, en amont du plan de mesure
- Té 90° en séparation de courant, en amont du plan de mesure
- registre fin angle 0°, en amont du plan de mesure
- registre fin angle 45°, en amont du plan de mesure
- registre épais angle 0°, en amont du plan de mesure
- registre épais angle 45°, en amont du plan de mesure

Les caractéristiques suivantes des perturbations sont considérées :

- Le rayon de courbure des coudes est de 1D.
- Le diamètre du piquage du Té est de 250 mm. On considère que 1/3 du débit est dévié dans le piquage ou provient de celui-ci.
- L'épaisseur de volet du registre fin est de 4 mm.
- L'épaisseur de volet du registre épais est de 50 mm. Ce registre simule un clapet coupe-feu.

L'évaluation de l'erreur de la méthode de mesure est réalisée au niveau de **4 plans de mesure** :

- À 1,6D après la singularité
- À 2,5D après la singularité
- À 5D après la singularité
- À 10D après la singularité

Les méthodes de mesure décrites dans les 3 normes considérées sont reproduites avec différentes répartitions des points sur la section de mesure : soit **7 répartitions de points**.

- 4 points avec méthode EN12599
- 8 points avec méthode EN12599
- 12 points avec méthode EN12599
- 20 points avec méthode EN12599
- 32 points avec méthode EN12599
- 5 points avec méthode EN16211
- 12 points avec méthode ISO 3966

2 positions des lignes de mesure ont été évaluées comme cela est suggéré dans la méthode décrite dans la norme EN 16211 (Figure 7) :

- Cas A : lignes des mesures par rapport à une singularité amont situées dans un plan horizontal
- Cas B : lignes des mesures par rapport à une singularité amont situées dans un plan vertical

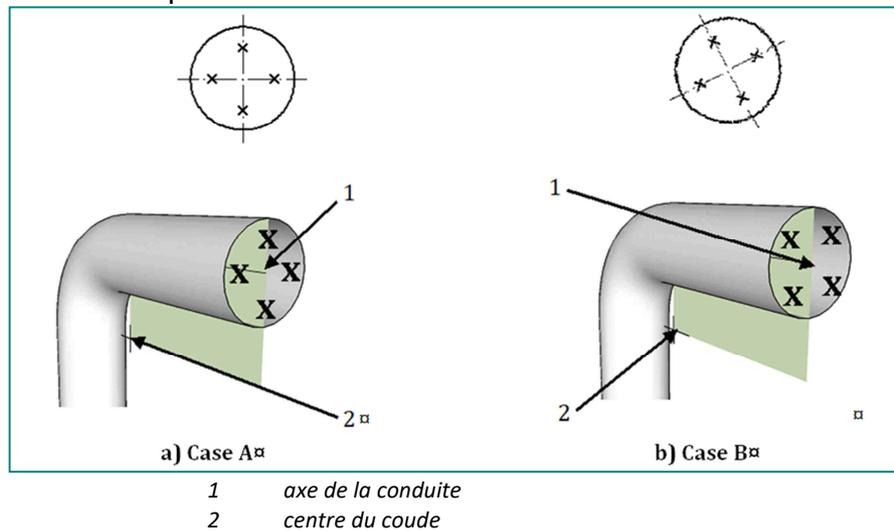


Figure 7 : Orientation des diamètres de mesure en fonction de l'axe des singularités -
Extrait de EN 16211

Pour chaque simulation d'une singularité, l'erreur sur la détermination du débit par la méthode décrite est ainsi évaluée aux 4 distances de la singularité, pour les 7 répartitions de points et pour les 2 positions des lignes de mesure (Cas A et Cas B).

Dans tous les cas, on considère que l'air qui circule dans la conduite est à température ambiante (conditions isothermes).

3.2.2 Les méthodes de mesure simulées

3.2.2.1 Méthode selon NF EN 12599 : 2012

La norme européenne NF EN 12599 (2012) propose en Annexe D une méthode de mesure en conduit cylindrique basée sur une exploration du champ des vitesses sur deux diamètres perpendiculaires, de manière que chaque point de mesure corresponde à une couronne de surface égale (Figure 8). L'évaluation du débit se fait alors en multipliant la moyenne arithmétique des vitesses unitaires par la section.

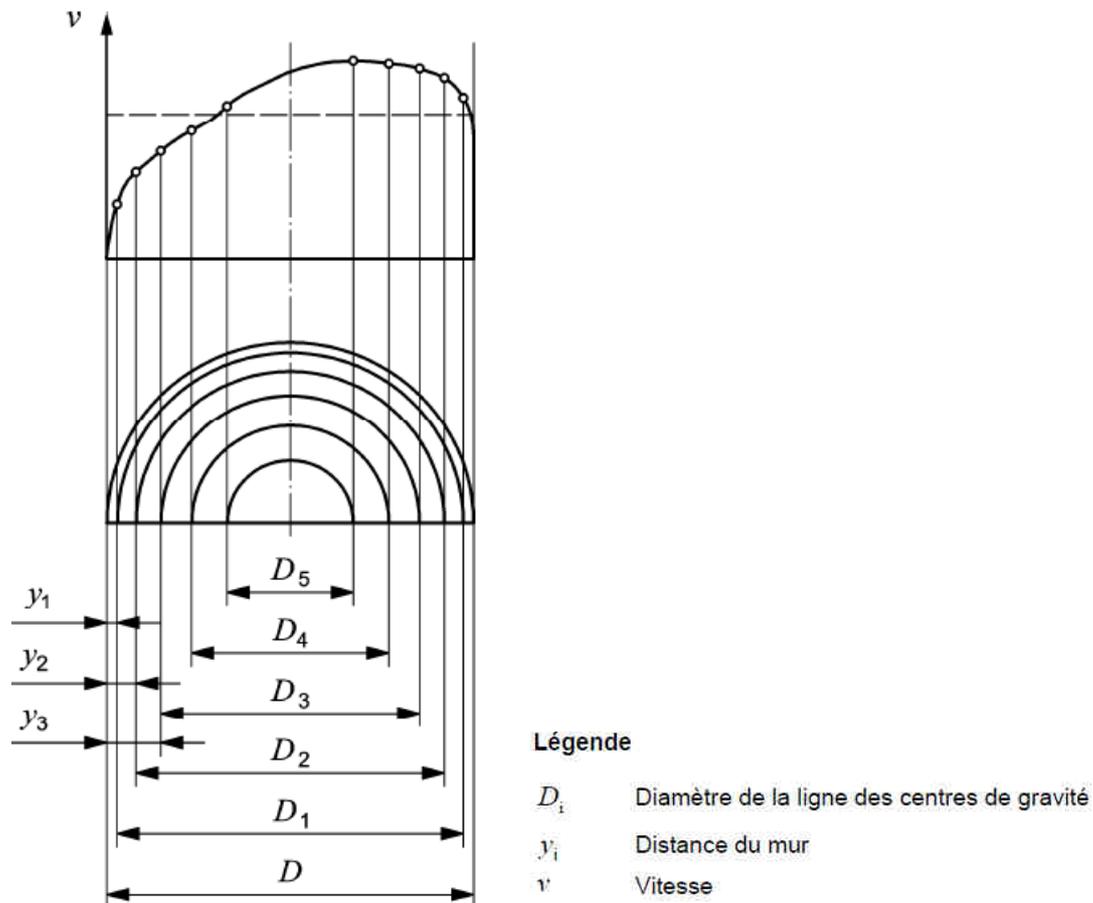


Figure 8 : Positionnement des points de mesure sur un diamètre - Extrait de NF EN 12599

La distance des points à la paroi est définie par la relation :

$$\frac{y_i}{D} = \frac{1}{2} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2i - 1}{2n}} \right)$$

Où :

- y_i est la distance à la paroi du point de mesure i
- n est le nombre d'anneaux circulaires³

On considèrera les cas correspondants à 1, 2, 3, 5, et 8 anneaux, ce qui correspond aux positions des points de mesure du

Tableau 5 pour chaque rayon. Les relevés sont effectués sur 2 diamètres perpendiculaires tels que définis sur la Figure 7.

³ Si $n = 1$, il y a 4 points (2 par diamètre), si $n = 3$, 12 points de mesure (6 par diamètre), ...

Tableau 5 : Position des points de mesure sur chaque rayon (distance à la paroi, en mm) pour un conduit cylindrique de 315 mm de diamètre

i \ n	1	2	3	4	5	6	7	8	Nombre de points total
1	46								4
2	21	79							8
3	14	46	93						12
5	8	26	46	71	108				20
8	5	16	27	39	53	69	89	118	32

Selon les indications données dans la norme, le nombre d'anneaux circulaires doit être choisi en fonction de l'incertitude de mesure attendue. Dans le cadre de l'analyse réalisée ici, l'erreur de la méthode de mesure sera évaluée pour chacun des schémas de répartition de points considéré et à toutes les distances aux singularités.

3.2.2.2 Méthode selon NF EN 16211 : 2015

La norme NF EN 16211 décrit des méthodes simplifiées pour les mesures de débit d'air sur site. En particulier la norme décrit des prises de mesure de vitesse ponctuelle sur des sections transversales de conduit.

La répartition des points de vitesse est définie selon le schéma présenté sur la Figure 9.

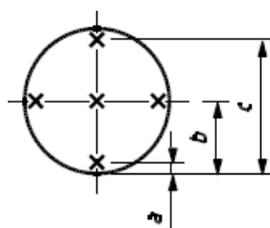


Figure 9 : Positions des points de mesure pour un diamètre de 315 mm – Extrait de NF EN 16211

Cette répartition correspond à 5 points de mesure aux positions suivantes pour un conduit de diamètre 315 mm :

- $a = 0,10D = 31,5 \text{ mm}$
- $b = 0,50D = 157,5 \text{ mm}$
- $c = 0,90D = 283,5 \text{ mm}$

Pour appliquer cette méthode simplifiée, la norme précise que des conditions de mesures particulières doivent être satisfaites en termes de longueur de conduit droit et d'uniformité de profil de vitesse. Dans le cadre de l'analyse réalisée ici, nous analyserons l'impact du non-respect de ces conditions sur le résultat final.

3.2.2.3 Méthode selon la Norme NF ISO 3966 : 2021

La norme NF ISO 3966 décrit une méthode de détermination du débit-volume d'un écoulement régulier dans une conduite fermée selon une répartition de points indiquée dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Positionnement des points de mesure de vitesses ponctuelles sur chaque rayon – Extrait de NF ISO 3966 (2021)

Number of measuring points per radius	r/R_i	y/D_i
3	$0,358\ 6 \pm 0,010\ 0$	$0,320\ 7 \pm 0,005\ 0$
	$0,730\ 2 \pm 0,010\ 0$	$0,134\ 9 \pm 0,005\ 0$
	$0,935\ 8 \pm 0,003\ 2$	$0,032\ 1 \pm 0,001\ 6$
5	$0,277\ 6 \pm 0,010\ 0$	$0,361\ 2 \pm 0,005\ 0$
	$0,565\ 8 \pm 0,010\ 0$	$0,217\ 1 \pm 0,005\ 0$
	$0,695\ 0 \pm 0,010\ 0$	$0,152\ 5 \pm 0,005\ 0$
	$0,847\ 0 \pm 0,007\ 6$	$0,076\ 5 \pm 0,003\ 8$
	$0,962\ 2 \pm 0,001\ 8$	$0,018\ 9 \pm 0,000\ 9$

Dans le cadre de l'analyse réalisée ici, on considèrera 12 points de mesure (3 points de mesure par rayon), correspondant à des distances à la paroi de :

- 10,1 mm
- 43,3 mm
- 98,4 mm
- 216,6 mm
- 271,7 mm
- 304,9 mm

3.2.3 Résultats des simulations

Les figures ci-dessous présentent pour chacune des configurations étudiées (norme, nombre de points, position des lignes de mesure) l'erreur de la méthode de mesure due à la répartition choisie des points de mesure de vitesse.

3.2.3.1 Régime établi

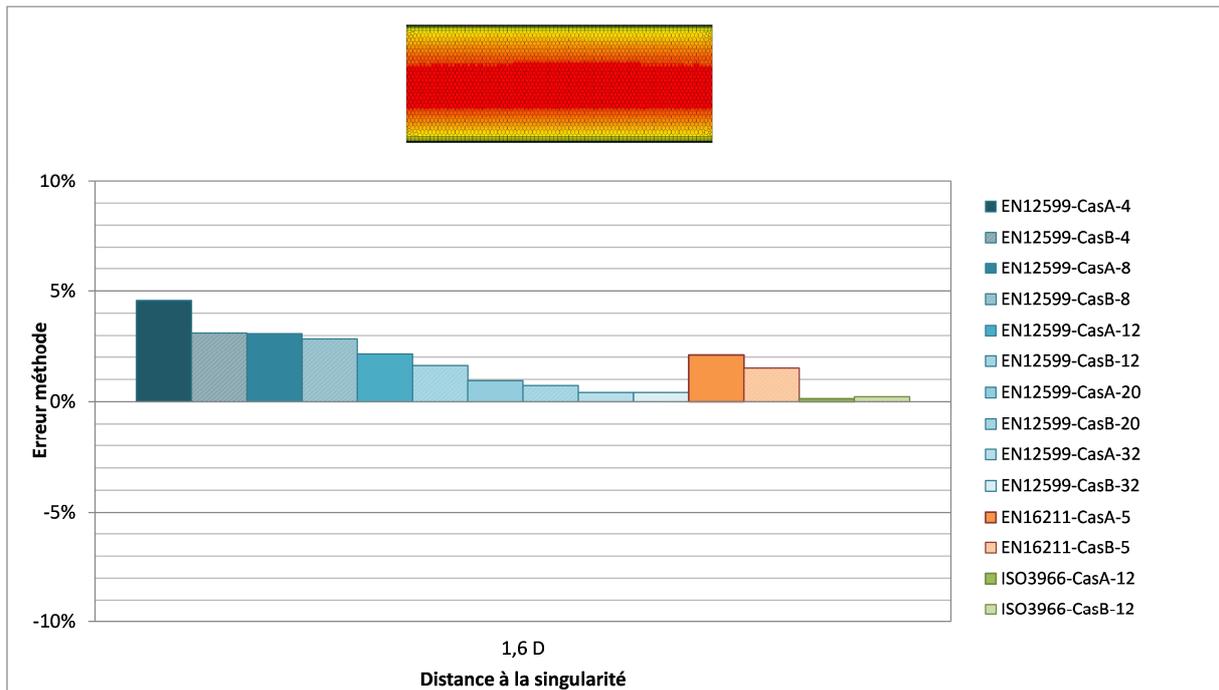


Figure 10 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées dans le cas d'un régime établi

Cette configuration permet d'évaluer l'erreur intrinsèque du schéma de répartition des points de mesure en l'absence de singularités.

3.2.3.2 Coude 90° en amont du plan de mesure

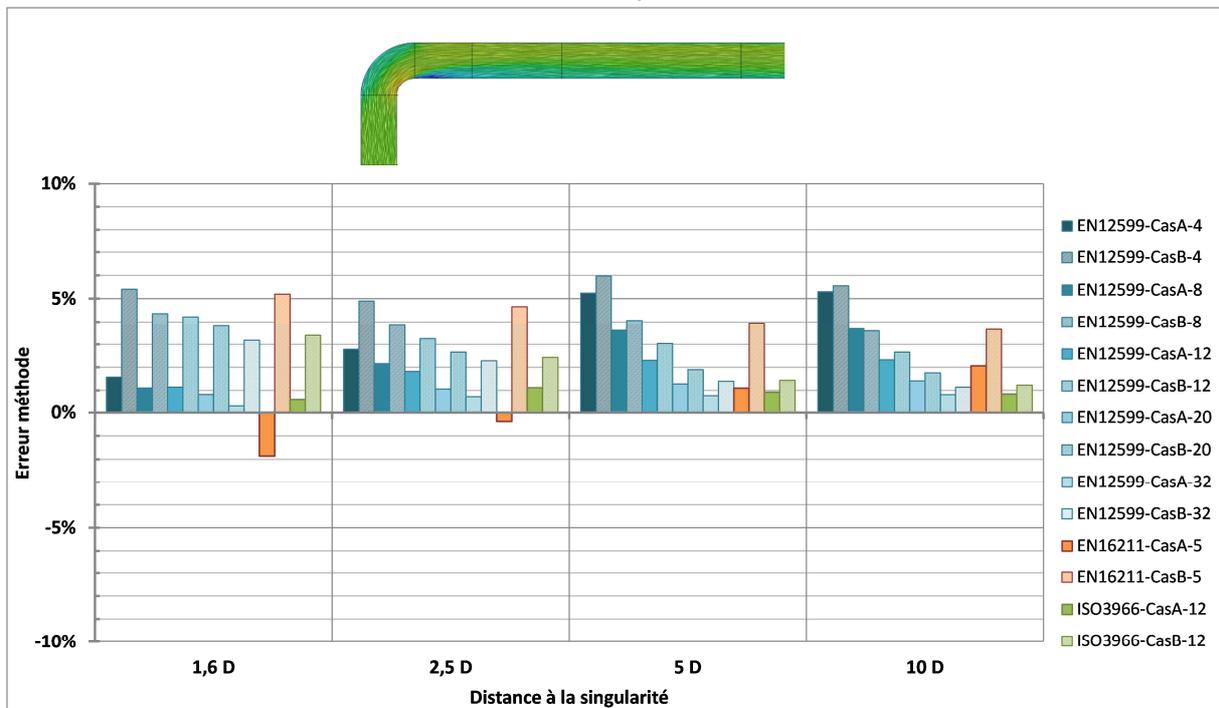


Figure 11 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un coude à 90° en amont du plan de mesure

3.2.3.3 2 coudes 90° espacés d'une longueur de 2D, en amont du plan de mesure

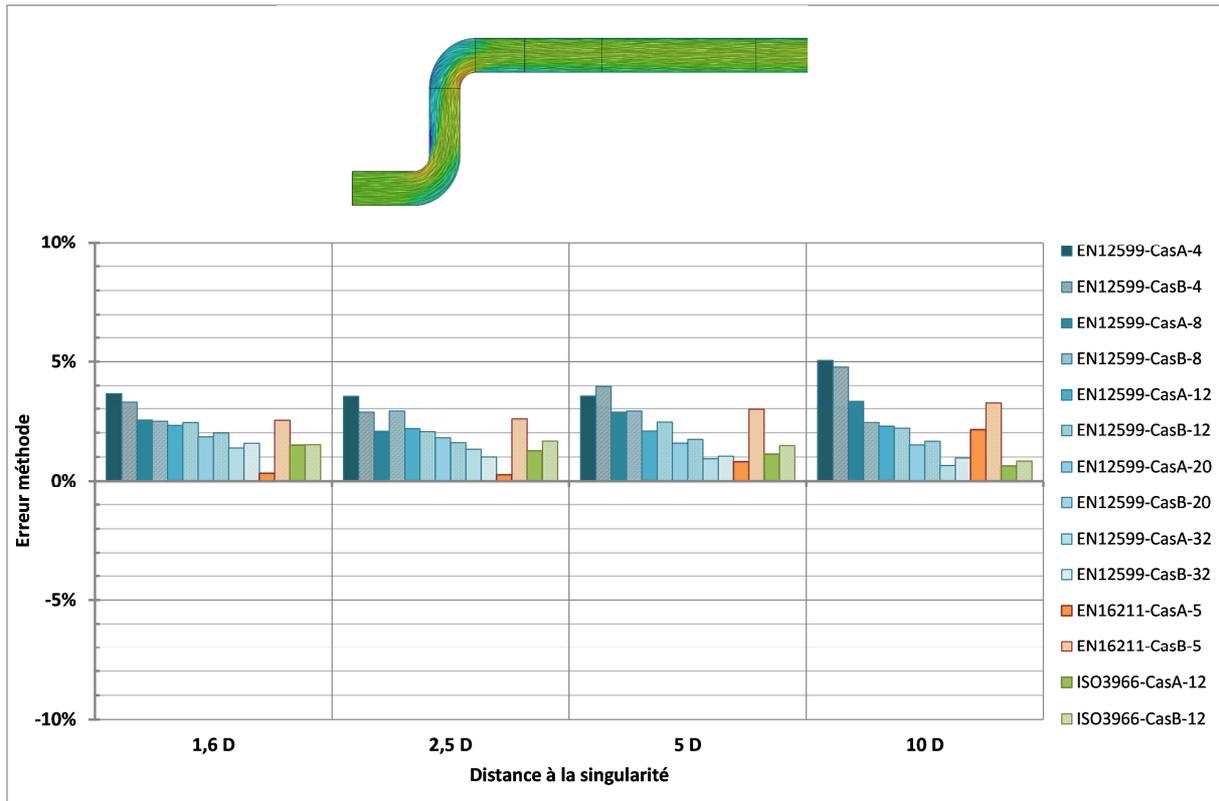


Figure 12 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas de deux coudes à 90° espacés d'une longueur de 2D en amont du plan de mesure

3.2.3.4 2 coudes 90° non espacés, en amont du plan de mesure

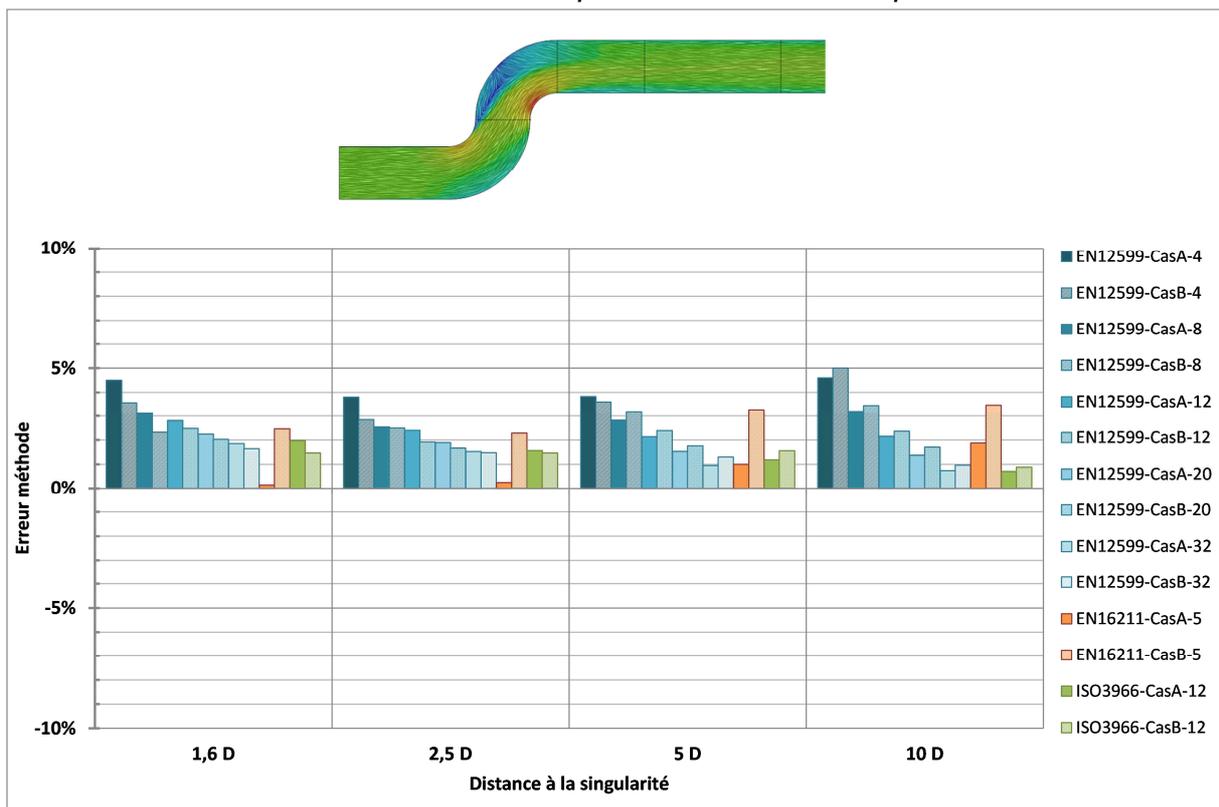


Figure 13 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas de 2 coudes à 90° non espacés en amont du plan de mesure

3.2.3.5 Té 90° en réunion de courant, en amont du plan de mesure

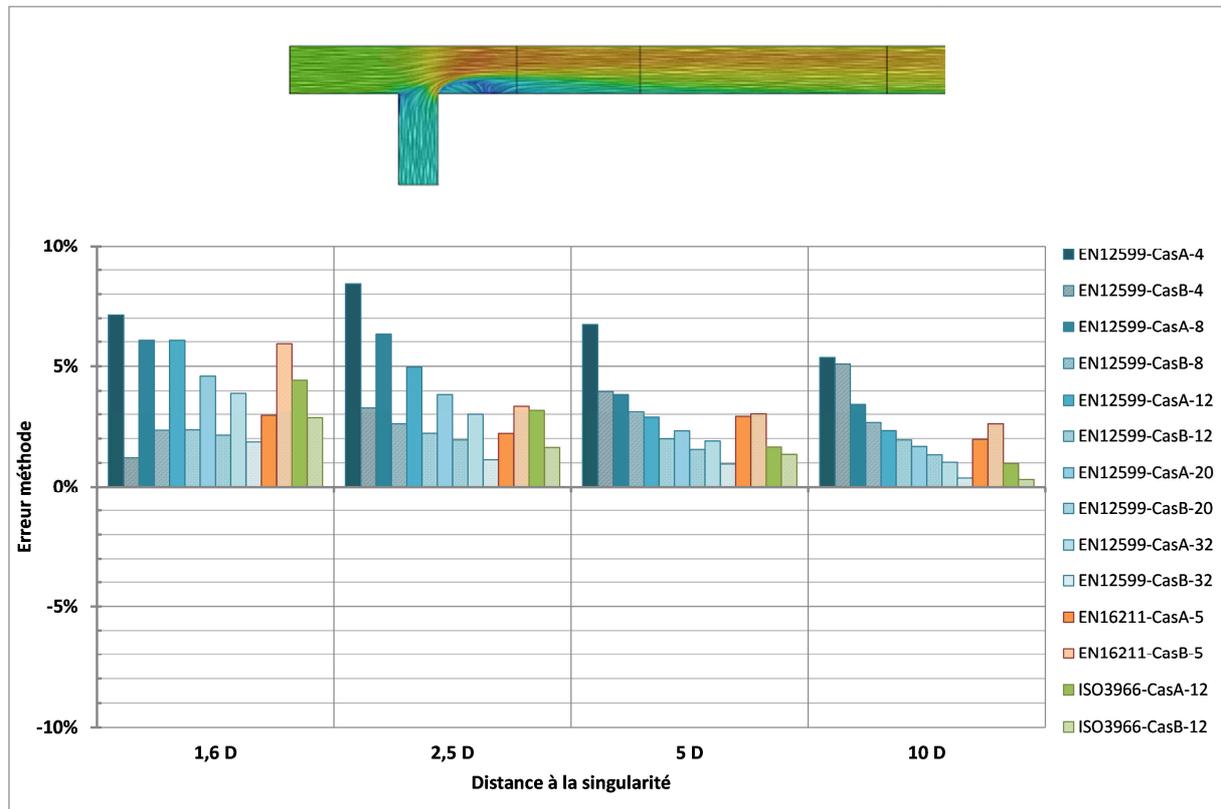


Figure 14 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un Té en réunion de courant en amont du plan de mesure

3.2.3.6 Té 90° en séparation de courant, en amont du plan de mesure

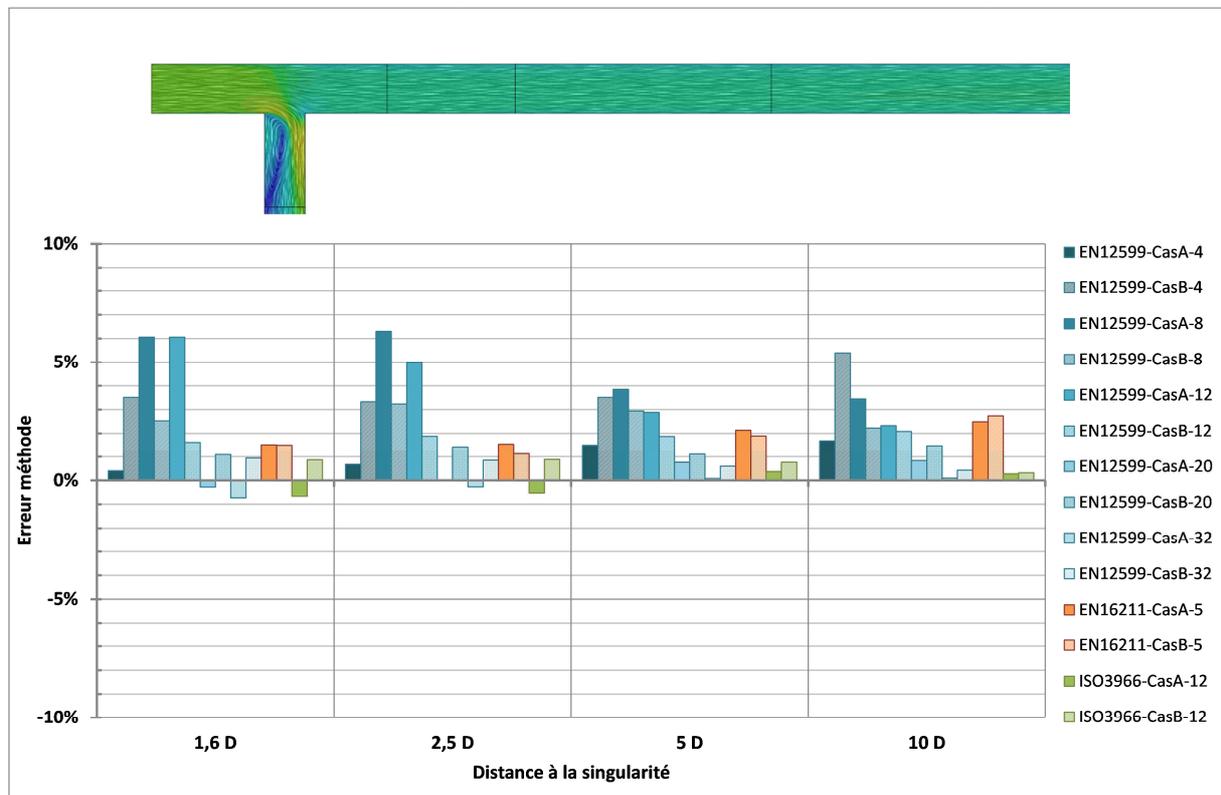


Figure 15 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un Té en séparation de courant en amont du plan de mesure

3.2.3.7 Registre fin angle 0°, en amont du plan de mesure

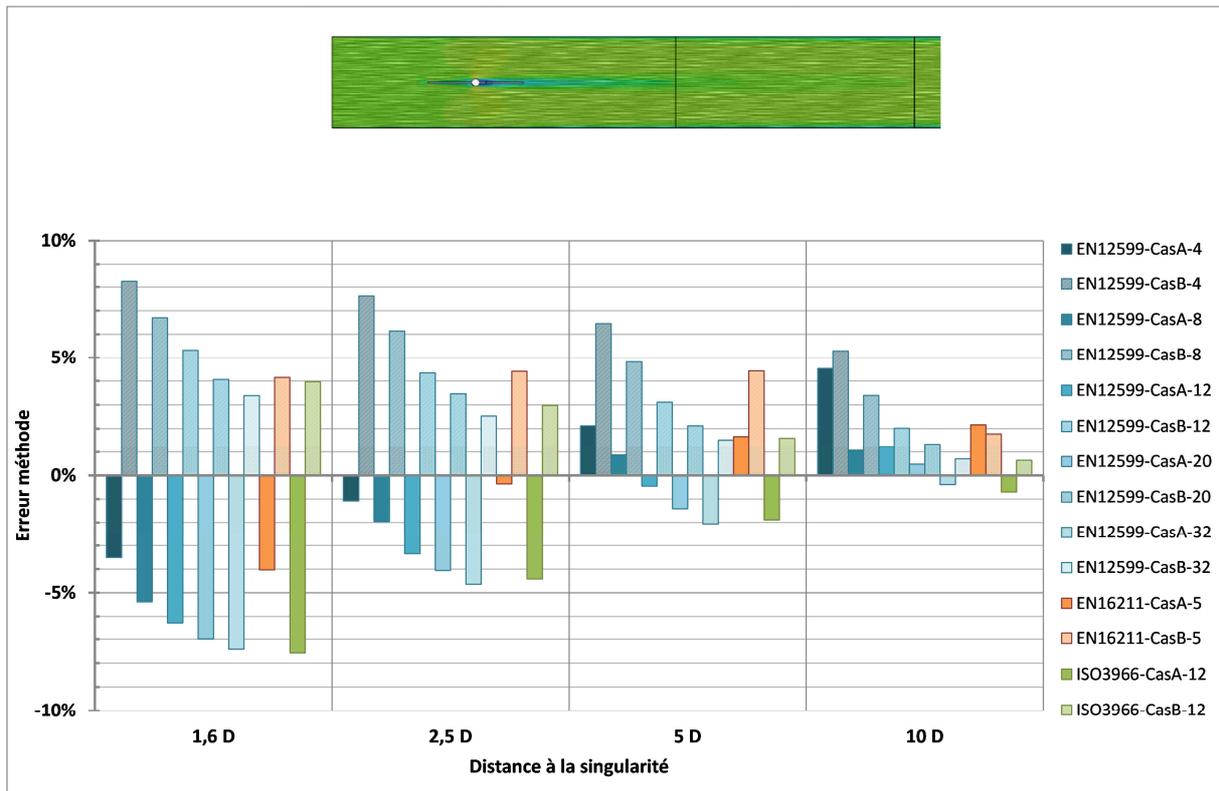


Figure 16 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un registre fin angle 0° en amont du plan de mesure

3.2.3.8 Registre fin angle 45°, en amont du plan de mesure

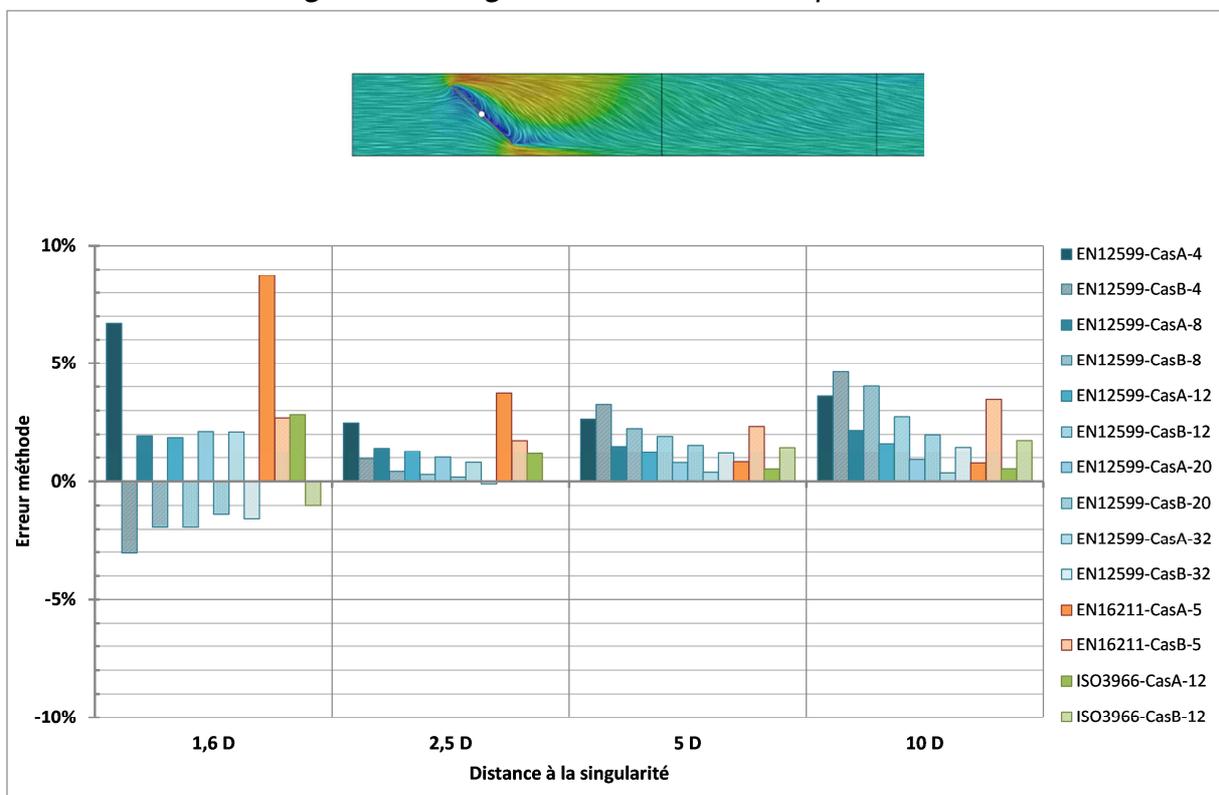


Figure 17 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un registre fin angle 0° en amont du plan de mesure

3.2.3.9 Registre épais angle 0°, en amont du plan de mesure

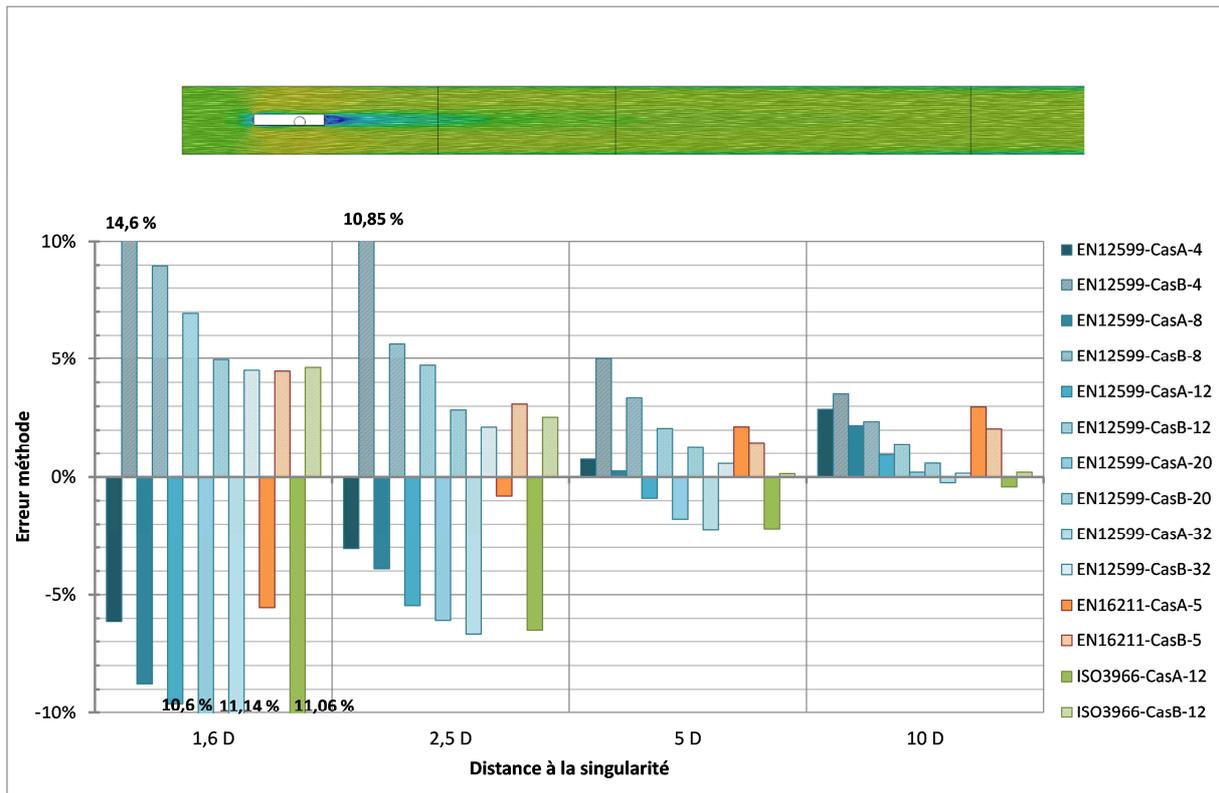


Figure 18 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un registre épais angle 0° en amont du plan de mesure

3.2.3.10 Registre épais angle 45° en amont du plan de mesure

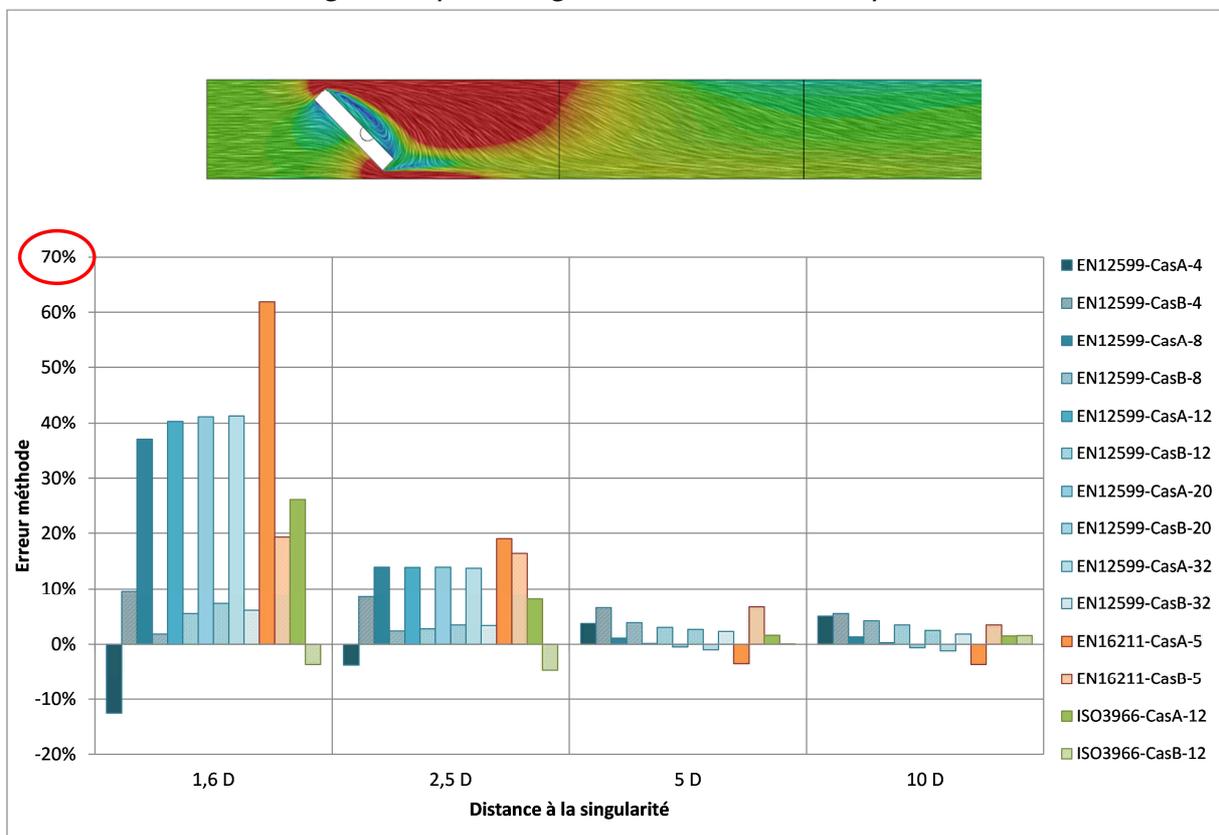


Figure 19 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un registre épais angle 45° en amont du plan de mesure

3.2.4 Conclusion des simulations CFD sur conduit cylindrique

3.2.4.1 Synthèse des résultats

Toutes singularités confondues, à chaque position par rapport à la singularité, l'erreur moyenne et l'écart-type sur cette moyenne pour chacune des méthodes évaluées sont calculés et présentés ci-dessous. Les méthodes sont repérées par la référence de la norme, la position du plan de mesure et le nombre de points considérés. L'erreur moyenne représente la moyenne des erreurs obtenues, toutes singularités confondues et l'écart-type la dispersion autour de cette moyenne.

Tableau 7 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 1,6D de la singularité amont (toutes singularités confondues)

Plan de mesure à 1,6D de la singularité amont							
Cas A	EN12599-CasA-4	EN12599-CasA-8	EN12599-CasA-12	EN12599-CasA-20	EN12599-CasA-32	EN16211-CasA-5	ISO3966-CasA-12
Moyenne	0,5%	4,2%	4,3%	3,9%	3,5%	7,1%	2,0%
Écart-type	6,6%	13,1%	14,3%	14,8%	15,0%	20,9%	10,4%
Cas B	EN12599-CasB-4	EN12599-CasB-8	EN12599-CasB-12	EN12599-CasB-20	EN12599-CasB-32	EN16211-CasB-5	ISO3966-CasB-12
Moyenne	5,2%	3,3%	3,2%	2,9%	2,4%	5,4%	1,6%
Écart-type	5,1%	3,1%	2,6%	2,5%	2,2%	5,4%	2,6%

Tableau 8 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 2,5D de la singularité amont (toutes singularités confondues)

Plan de mesure à 2,5D de la singularité amont							
Cas A	EN12599-CasA-4	EN12599-CasA-8	EN12599-CasA-12	EN12599-CasA-20	EN12599-CasA-32	EN16211-CasA-5	ISO3966-CasA-12
Moyenne	1,7%	2,7%	2,0%	1,5%	1,1%	2,8%	0,5%
Écart-type	3,8%	5,1%	5,4%	5,6%	5,7%	6,2%	4,2%
Cas B	EN12599-CasB-4	EN12599-CasB-8	EN12599-CasB-12	EN12599-CasB-20	EN12599-CasB-32	EN16211-CasB-5	ISO3966-CasB-12
Moyenne	5,0%	3,3%	2,6%	2,1%	1,6%	4,4%	1,0%
Écart-type	3,3%	1,7%	1,4%	1,1%	1,0%	4,6%	2,3%

Tableau 9 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 5D de la singularité amont (toutes singularités confondues)

Plan de mesure à 5D de la singularité amont							
Cas A	EN12599-CasA-4	EN12599-CasA-8	EN12599-CasA-12	EN12599-CasA-20	EN12599-CasA-32	EN16211-CasA-5	ISO3966-CasA-12
Moyenne	3,5%	2,1%	1,2%	0,5%	0,0%	1,0%	0,4%
Écart-type	1,7%	1,3%	1,3%	1,4%	1,4%	1,8%	1,4%
Cas B	EN12599-CasB-4	EN12599-CasB-8	EN12599-CasB-12	EN12599-CasB-20	EN12599-CasB-32	EN16211-CasB-5	ISO3966-CasB-12
Moyenne	4,7%	3,4%	2,4%	1,7%	1,2%	3,3%	1,1%
Écart-type	1,3%	0,8%	0,5%	0,5%	0,5%	1,6%	0,6%

Tableau 10 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 10D de la singularité amont (toutes singularités confondues)

Plan de mesure à 10D de la singularité amont							
Cas A	EN12599-CasA-4	EN12599-CasA-8	EN12599-CasA-12	EN12599-CasA-20	EN12599-CasA-32	EN16211-CasA-5	ISO3966-CasA-12
Moyenne	4,5%	2,6%	1,7%	0,9%	0,2%	1,4%	0,5%
Écart-type	0,8%	1,0%	0,7%	0,7%	0,7%	2,0%	0,7%
Cas B	EN12599-CasB-4	EN12599-CasB-8	EN12599-CasB-12	EN12599-CasB-20	EN12599-CasB-32	EN16211-CasB-5	ISO3966-CasB-12
Moyenne	5,0%	3,1%	2,3%	1,6%	0,9%	2,9%	0,9%
Écart-type	0,6%	0,7%	0,6%	0,5%	0,5%	0,7%	0,6%

3.2.4.2 Analyse en fonction de la norme considérée

a) Norme EN 12599 : 2012

Si le plan de mesure est situé à moins de 5D de la singularité, la norme EN 12599 : 2012 précise le nombre de points de mesure à réaliser selon la distance et le niveau d'incertitude totale attendue (Figure 20).

Nombre de points de mesure requis			
Distance relative a / D_h	Incertitude totale en % / incertitude de l'appareil de mesure en %		
	"10/5"	"15/5"	"15/10"
1,6		30	44
2,0	50	21	30
2,5	34	16	24
3,0	25	12	18
4,0	16	8	12
5,0	12	6	9
6,0	9	4	6

Figure 20 : Incertitude totale attendue en fonction du nombre de points de mesure et de la distance relative du plan de mesurage à une perturbation– extrait de NF EN 12599

Dans ce tableau, par exemple, "10/5" correspond à une incertitude totale de 10%, incluant une incertitude liée à l'instrument de 5%. L'incertitude totale de la mesure prend en compte l'incertitude liée à l'instrument de mesure, l'incertitude de la méthode (i.e. la réparation des points de mesure de vitesses) et l'incertitude liée à l'opérateur. Elle est calculée à partir de la somme quadratique des différentes composantes d'incertitude :

$$\text{Incertitude totale}^2 = \text{Incertitude_instrument}^2 + \text{Incertitude_opérateur}^2 + \text{Incertitude_méthode}^2$$

Dans la suite de l'analyse, l'incertitude liée à l'opérateur est considérée comme égale à 2%. Elle prend, en particulier, en compte les erreurs dues au positionnement de l'instrument de mesure.

En utilisant l'équation précédente, l'incertitude de la méthode de mesure peut alors être calculée en fonction de l'incertitude totale visée et l'incertitude de l'instrument. Soit :

- "10/5" correspond à une incertitude de méthode de 8,4%
- "15/5" correspond à une incertitude de méthode de 14%
- "15/10" correspond à une incertitude de méthode de 11%

Pour obtenir une incertitude de méthode au maximum de 8,4%, équivalente à la colonne "**10/5**" de la norme EN 12599 :

- Alors que, selon la norme NF EN 12599, à une distance de 5D, il faudrait avoir au minimum 12 points de mesure, les simulations réalisées montrent que
 - i. L'incertitude de méthode est bien inférieure à 8,4% lorsque la méthode de mesure utilise au minimum 12 points de mesure
 - ii. L'incertitude de méthode est également inférieure à 8,4% lorsque la méthode de mesure utilise moins de 12 points de mesure
- Alors que, selon la norme NF EN 12599, à une distance de 2,5D, il faudrait avoir au minimum 34 points de mesure,
 - i. Aucune simulation n'a été réalisée avec, au minimum 34 points
 - ii. Les simulations réalisées montrent que, si la méthode de mesure utilise au minimum 8 points, l'incertitude de méthode est inférieure à 8,4% sauf dans le cas d'un registre épais
- Les mesures ne sont pas autorisées à une distance de 1,6D des singularités. Toutefois, les simulations réalisées montrent que, si la méthode de mesure utilise au minimum 4, 8, 12, 20 ou 32 points, l'incertitude de méthode est également inférieure à 8,4% sauf dans le cas de la présence d'un registre épais

Cette analyse est réalisée pour toutes les configurations incertitude totale vs incertitude instrument proposées par la norme. Elle est synthétisée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 11 : Comparaison des simulations numériques à l'incertitude de méthode indiquée dans la norme EN 12599

Distance du plan de mesure à la singularité	Pour une incertitude totale	Avec une incertitude instrument	Incertitude de méthode (répartition des points) et nombre de points selon EN 12599	Comparaison à la simulation réalisée	Commentaires sur les résultats des simulations
5D	10%	5%	≤ 8,4% si 12 points mini	✓	≤ 8,4% si 4 points mini
	15%	5%	≤ 14% si 6 points mini	✓	
	15%	10%	≤ 11% si 9 points mini	✓	
2,5D	10%	5%	≤ 8,4% si 34 points mini	✓	≤ 8,4% si 8 points mini Sauf dans le cas d'un registre épais
	15%	5%	≤ 14% si 16 points mini	✓	≤ 11% si 4 points mini Sauf dans le cas d'un registre épais angle 45°
	15%	10%	≤ 11% si 24 points mini	✓ Sauf dans le cas d'un registre épais angle 45°	
1,6D	15%	5%	≤ 14% si 30 points mini	✓ Sauf dans le cas d'un registre épais angle 45°	≤ 8,4% si 4 points mini Sauf dans le cas d'un registre épais
	15%	10%	≤ 11% si 44 points mini	✓	

Analyse comparative :

Les incertitudes annoncées dans la norme EN 12599 : 2012 sont confirmées par les résultats des simulations CFD réalisées à 1,6D, 2,5D et 5D sauf dans le cas de la présence d'un registre épais situés à 1,6D et 2,5D en amont.

Dans le cas de la présence d'un registre épais, les mesures doivent être réalisées à au moins 5D pour obtenir les incertitudes annoncées dans la norme.

b) Norme EN 16211 : 2015

La norme EN 16211:2015 indique que si le plan de mesure se situe à plus de 5D de la singularité, **l'incertitude-type de la méthode (répartition de points) est**, comme indiqué sur la Figure 21, de :

- 4% pour le Cas A, soit 8% d'incertitude élargie
- 6% pour le Cas B, soit 12% d'incertitude élargie

Tableau 2 — Méthodes de mesure des débits d'air dans un conduit

Méthode	Désignation	Voir paragraphe	Incertitude-type de la méthode, u_2
Mesures ponctuelles au moyen d'un tube de Pitot (tube de Prandtl) :	ID 1	8.2	
1) Section circulaire	ID 11		4 % (cas A) – 6 % (cas B)
2) Section rectangulaire	ID 12		4 %
Mesure ponctuelle au moyen d'un anémomètre à fil chaud ou d'un anémomètre mécanique :	ID 2	8.2	
1) Section circulaire	ID 21		4 % (cas A) – 6 % (cas B)
2) Section rectangulaire	ID 22		4 %
Dispositifs fixes de mesure du débit	ID 3	8.3	5 %
1) Sans registre	ID 31		(S'applique généralement en utilisant les mesures de l'installation obtenues avec la méthode d'essai)
2) Avec registre	ID 32		
Gaz traceur	ID 4	8.4	5 % ou 10 % en fonction de la longueur de mélange

Figure 21 : Incertitudes-type de méthode indiquées dans la norme EN 16211 :2015 dans le respect des exigences liées aux conditions de mesure

Analyse comparative :

Les simulations réalisées à 5D et 10D confirment que l'incertitude de la méthode de mesure est inférieure à 8% pour des mesures réalisées selon le cas A et à 12% pour les mesures réalisées selon le cas B.

Les incertitudes annoncées dans la norme EN 16211 : 2015 sont donc confirmées par les résultats des simulations CFD réalisées.

Dans certains cas simulés, les niveaux d'incertitude de la norme EN 16211 : 2015 sont également atteints lorsque la distance à singularité est inférieure à 5D.

Ces conclusions sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 12 : Comparaison des simulations numériques à l'incertitude de méthode indiquée dans la norme EN 16211 : 2015

Distance du plan de mesure à la singularité	Incertitude de méthode (répartition des points) selon EN 16211 : 2015	Comparaison à la simulation réalisée	Commentaires sur les résultats des simulations
10D	≤ 8% si cas A et 4 points mini ≤ 12% si cas A et 4 points mini	✓	≤ 8% si cas A et 4 points mini ≤ 12% si cas A et 4 points mini
5D	≤ 8% si cas A et 4 points mini ≤ 12% si cas A et 4 points mini	✓	≤ 8% si cas A et 4 points mini ≤ 12% si cas A et 4 points mini
2,5D	Non couvert par EN 16211 : 2015	/	≤ 8% si cas A et 4 points mini ≤ 12% si cas A et 4 points mini Sauf dans le cas d'un registre épais
1,6D	Non couvert par EN 16211 : 2015	/	≤ 8% si cas A et 4 points mini ≤ 12% si cas A et 4 points mini Sauf dans le cas d'un registre fin ou épais

c) Norme NF ISO 3966 : 2021

Pour les conditions de mesure spécifiées par la norme NF ISO 3966, le plan de mesure des vitesses doit se situer à une distance de 20D au minimum des singularités.

Aucune simulation n'a été réalisée pour une distance aux singularités de 20D et plus. Toutefois, les simulations réalisées montrent que si la distance aux singularités est supérieure ou égale à 5D, l'erreur de méthode reste inférieure à 2% et à 4% si la distance est inférieure à 5D, sauf dans le cas d'un registre épais.

3.3 Simulations en conduit rectangulaire

3.3.1 Configurations de simulation

On considère le cas d'un conduit lisse rectangulaire de section 600 mm x 300 mm, correspondant à un diamètre hydraulique D_h de 400 mm.

Le débit est de 3500 m³/h, ce qui correspond à une vitesse moyenne débitante de 5,4 m/s.

8 configurations géométriques sont simulées :

- régime établi, correspondant à des longueurs droites infinies
- coude 90° sur le grand côté, en amont du plan de mesure
- coude 90° sur le petit côté, en amont du plan de mesure
- Té 90° sur le grand côté en réunion de courant, en amont du plan de mesure
- Té 90° sur le petit côté en réunion de courant, en amont du plan de mesure
- registre angle 0° en amont du plan de mesure
- registre angle 30° en amont du plan de mesure
- registre angle 45° en amont du plan de mesure

Les dimensions du piquage du Té sont de 600 mm x 300 mm. On considère que 1/3 du débit provient du piquage.

L'évaluation de l'erreur de la méthode de mesure est réalisée au niveau de **4 plans de mesure** :

- À 1,6D après la singularité
- À 2,5D après la singularité
- À 5D après la singularité
- À 10D après la singularité

Avec $D = D_h =$ diamètre hydraulique

Les méthodes de mesure décrites dans les 3 normes considérées sont reproduites avec différentes répartitions des points sur la section de mesure, soit **6 répartitions de points**.

- 4 points avec méthode EN12599
- 6 points avec méthode EN12599
- 16 points avec méthode EN12599
- 30 points avec méthode EN12599
- 6 points avec méthode EN16211
- 25 points avec méthode ISO 3966

Pour chaque simulation d'une singularité, l'erreur sur la détermination du débit par la méthode décrite est évaluée aux 4 distances de la singularité et pour les 6 répartitions de points

Dans tous les cas, on considère que l'air qui circule dans la conduite est à température ambiante (conditions isothermes).

3.3.2 Les méthodes de mesure simulées

3.3.2.1 Méthode selon la norme NF EN 12599 : 2012

La norme européenne NF EN 12599 (2012) propose en Annexe D une méthode de mesure en conduit rectangulaire basée sur une division de la section en éléments de surface égale selon le principe défini dans la Figure 22.

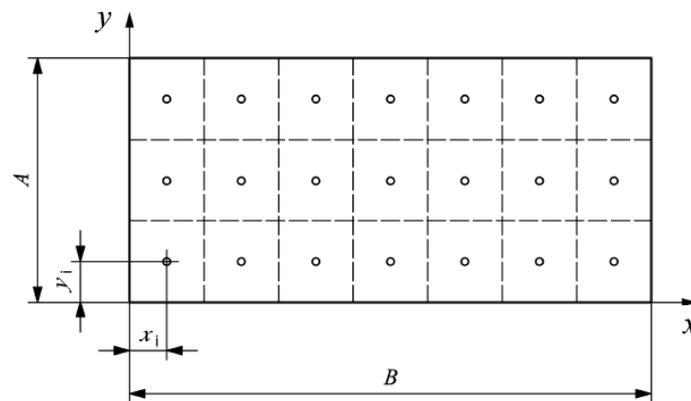


Figure 22 : Division d'une section droite de mesure en surfaces égales – extrait de NF EN 12599

$$\frac{y_i}{A} = \frac{x_i}{B} = \frac{2i - 1}{2n}$$

- y_i, x_i sont les coordonnées du point de mesure
- B est la largeur du conduit
- A est la hauteur du conduit aéraulique
- i est le nombre ordinal du point de mesure (sur une droite de mesure)
- n est le nombre de points de mesure (sur une droite de mesure)

On simule les 4 cas synthétisés dans le Tableau 13, et la Figure 23.

Tableau 13 : Configurations de répartition des points de mesures considérées

Cas	Nbre points de mesure sur la largeur (B)	Nbre points de mesure sur la hauteur (A)
30 points	6	5
16 points	4	4
6 points	3	2
4 points	2	2

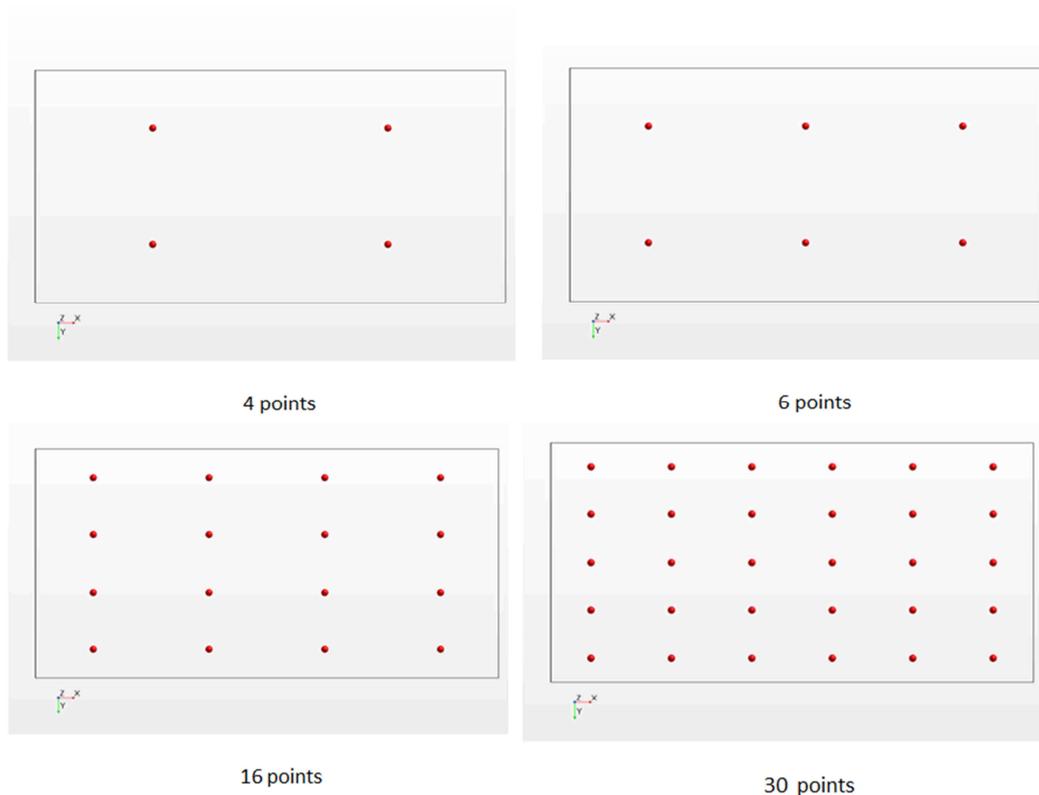


Figure 23 : Positions des points de mesure selon NF EN 12599 considérées dans la simulation

3.3.2.1 Méthode selon la norme NF EN 16211 : 2015

La norme NF EN 16211 décrit des méthodes simplifiées pour les mesures de débit d'air sur site. En particulier, la norme décrit des prises de mesure de vitesse ponctuelle sur des sections transversales de conduit.

La norme fournit la répartition des points de mesure sur la plus grande dimension L_2 du conduit ainsi que le nombre de lignes de mesures en fonction de la plus petite longueur L_1 (Figure 24).

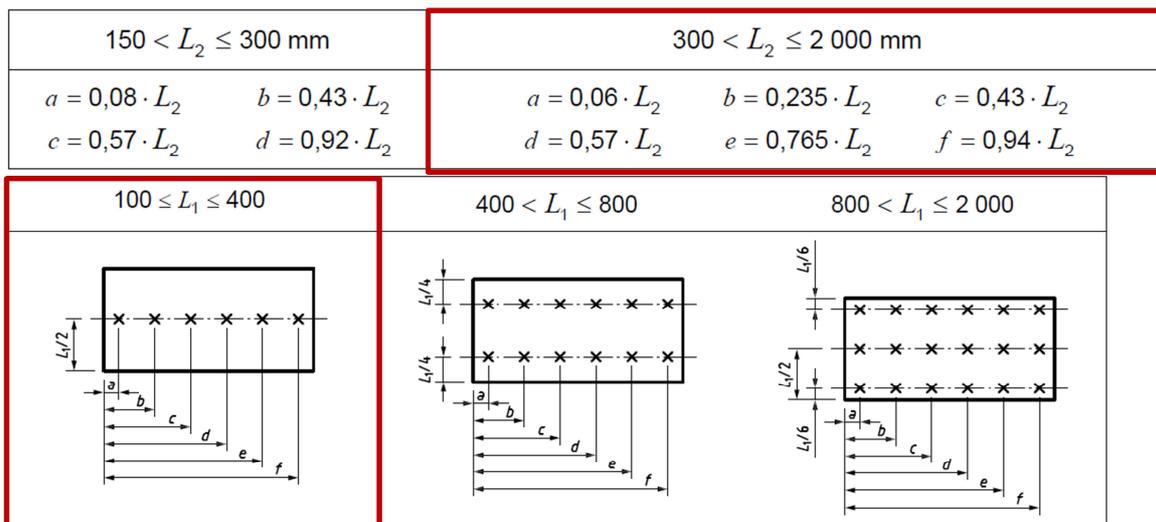


Figure 24 : Répartition des points de mesure pour les conduits rectangulaires selon la plus grande longueur L_2 et la plus petite L_1 – extrait de NF EN 16211

Dans notre cas où $L_1 = 300 \text{ mm}$ et $L_2 = 600 \text{ mm}$, les 6 points de mesures sont répartis sur une seule ligne située au centre du petit côté (Figure 25) avec :

$x = 36 \text{ mm}$	$x = 141 \text{ mm}$	$x = 258 \text{ mm}$	$x = 342 \text{ mm}$	$x = 459 \text{ mm}$	$x = 564 \text{ mm}$
---------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

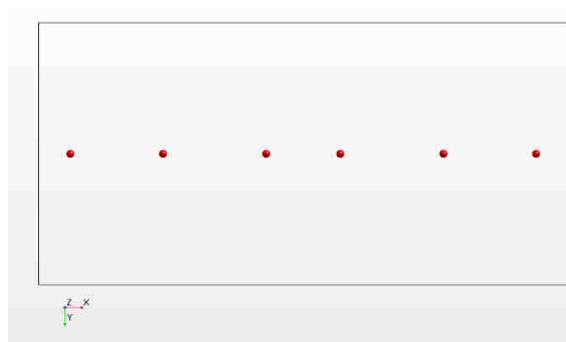


Figure 25 : Positions des points de mesure selon NF EN 16211 utilisées dans la simulation

3.3.2.2 Méthode selon la norme NF ISO 3966 :2021

La méthode de répartition des points de mesure décrite dans la norme est communément appelée « méthode Log-Tchebycheff ».

Pour les conduits rectangulaires, la norme impose un minimum de 25 points (Figure 26). Il s'agit du nombre de points utilisé pour la simulation (Figure 27).

<i>e or f</i>	Values of X_i/L or Y_i/H			
5	0	$\pm 0,212$	$\pm 0,426$	
6	$\pm 0,063$	$\pm 0,265$	$\pm 0,439$	
7	0	$\pm 0,134$	$\pm 0,297$	$\pm 0,447$

Figure 26 : Répartition des points de mesure selon la norme NF ISO 3966

Avec

e : le nombre de points choisis sur le petit côté du rectangle ; e a été pris égal à 5

f : le nombre de points choisis sur le grand côté du rectangle ; f a été pris égal à 5



Figure 27 : Positions des points de mesure selon NF ISO 3966 utilisées dans la simulation

3.3.3 Résultats des simulations

Les figures ci-dessous présentent pour chacune des configurations étudiées (norme et nombre de points), l'erreur de la méthode de mesure due à la répartition choisie des points de mesure de vitesse.

3.3.3.1 Régime établi

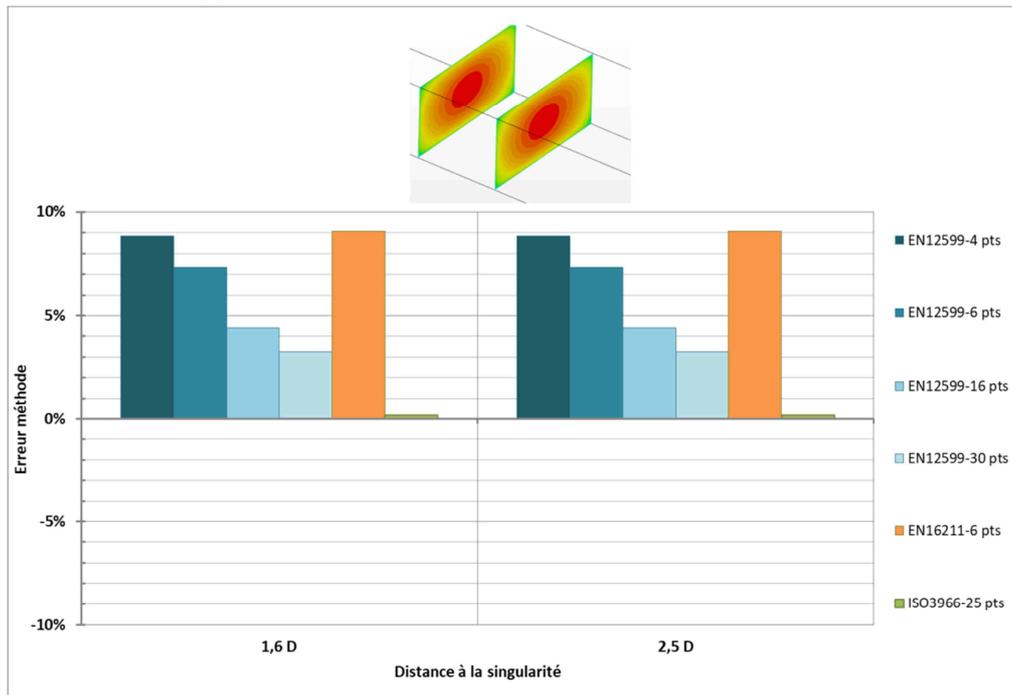


Figure 28 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées dans le cas d'un régime établi

Cette configuration permet d'évaluer l'erreur intrinsèque du schéma de répartition des points de mesure en l'absence de singularités.

3.3.3.2 Coude 90° sur le grand côté, en amont du plan de mesure

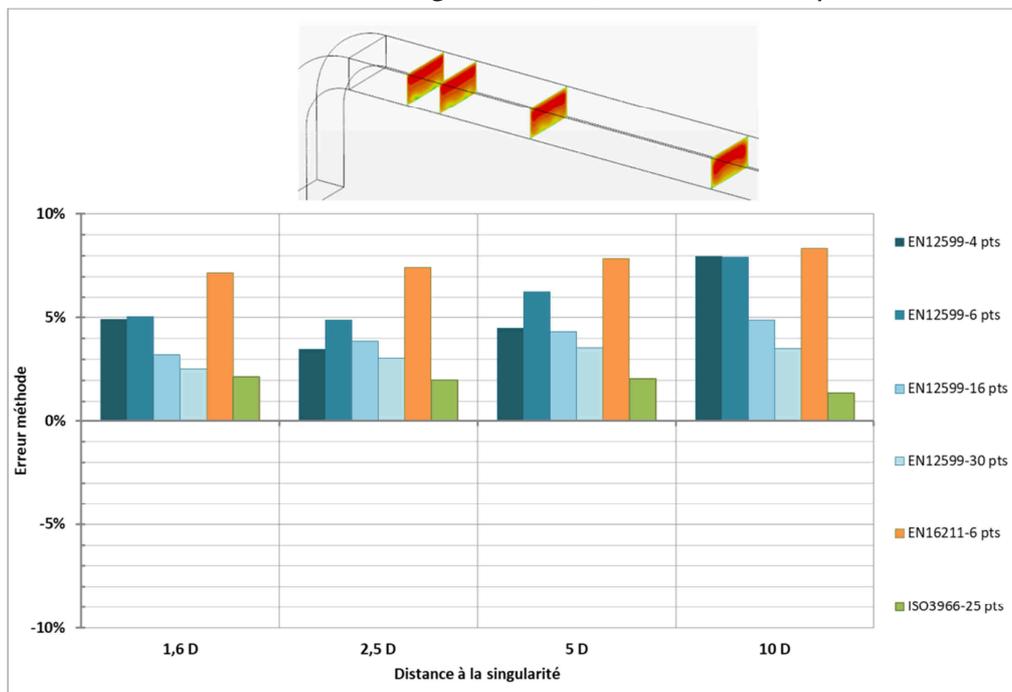


Figure 29 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un coude à 90° sur le grand côté en amont du plan de mesure

3.3.3.3 Coude 90° sur le petit côté, en amont du plan de mesure

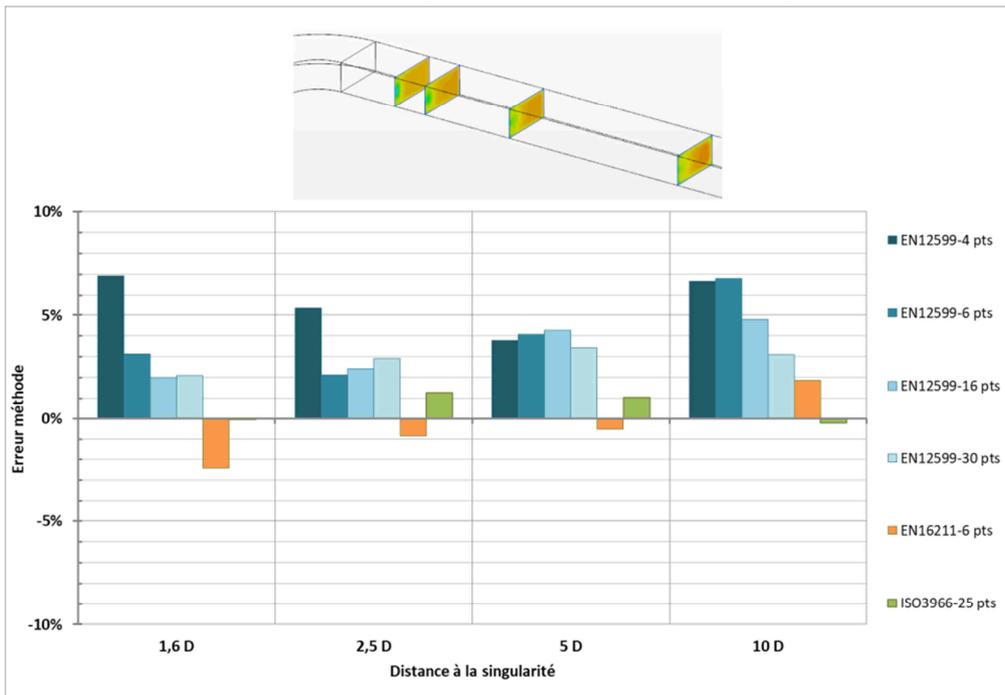


Figure 30 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un coude à 90° sur le petit côté en amont du plan de mesure

3.3.3.4 Té 90° sur le grand côté en réunion de courant, en amont du plan de mesure

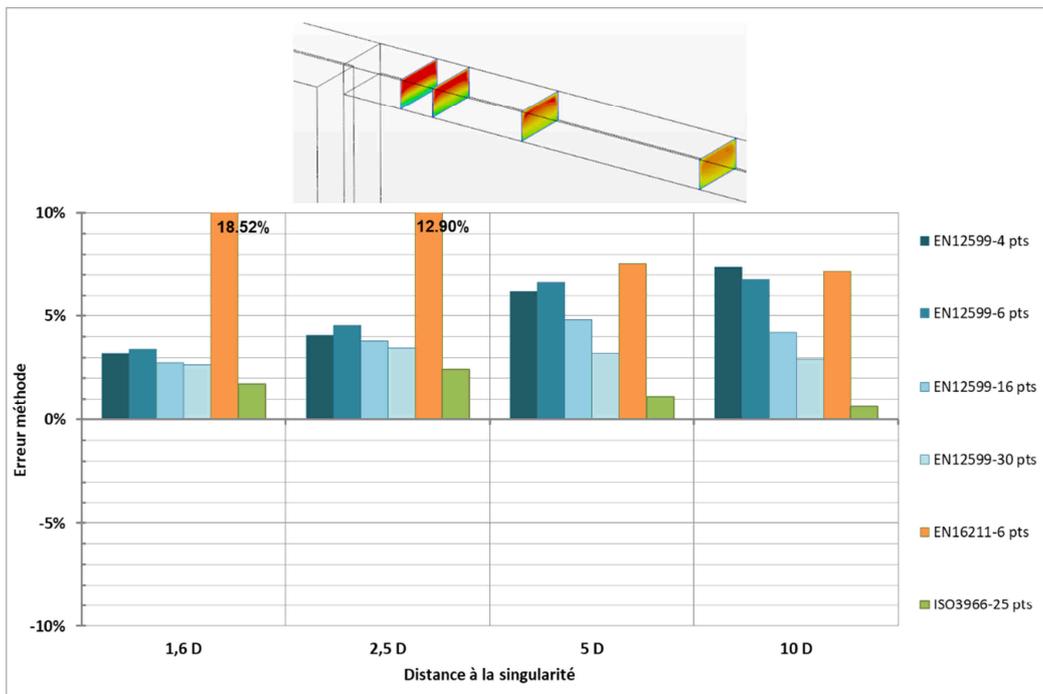


Figure 31 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un Té 90° sur le grand côté en réunion de courant en amont du plan de mesure

3.3.3.5 Té 90° sur le petit côté en réunion de courant, en amont du plan de mesure

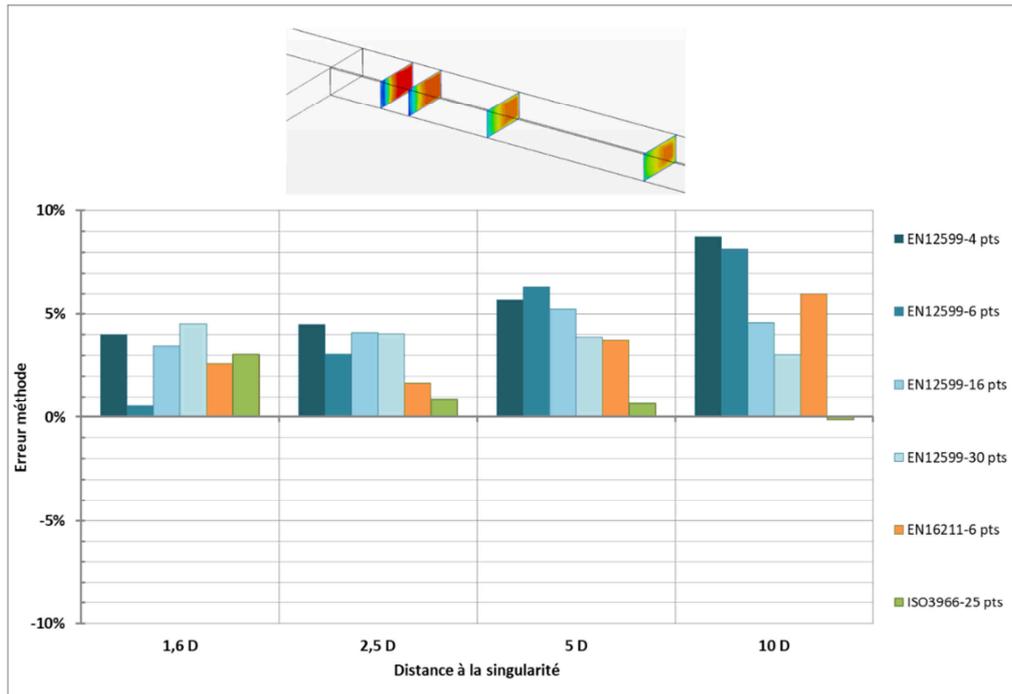


Figure 32 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un Té 90° sur le petit côté en réunion de courant en amont du plan de mesure

3.3.3.6 Registre angle 0°, en amont du plan de mesure

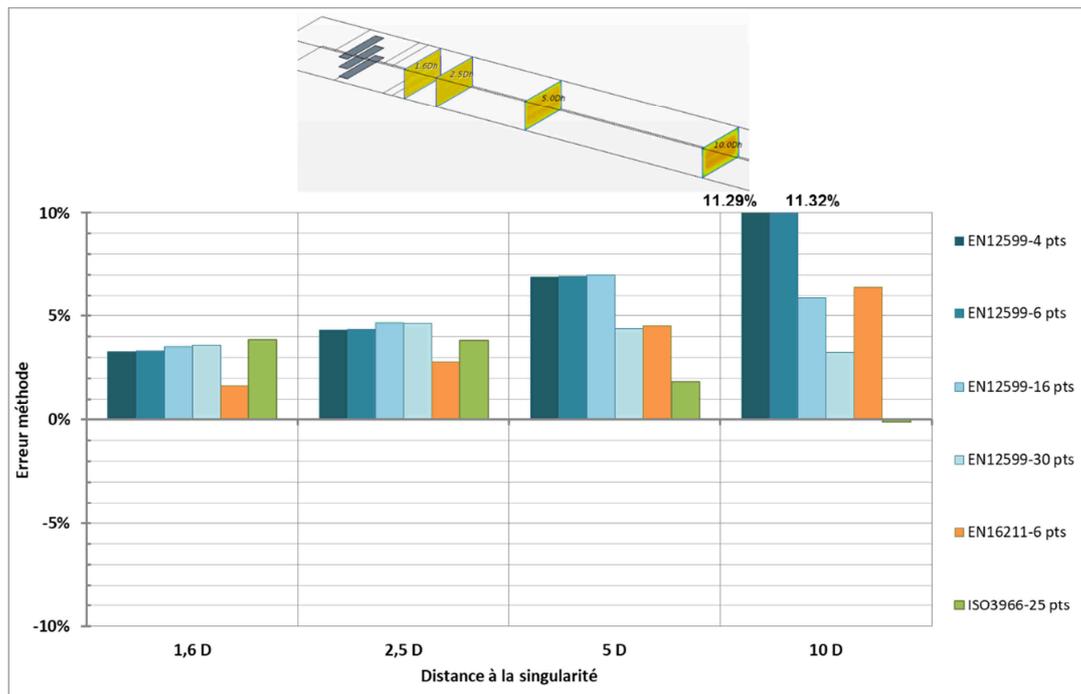


Figure 33 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un registre angle 0° en amont du plan de mesure

3.3.3.7 Registre angle 30°, en amont du plan de mesure

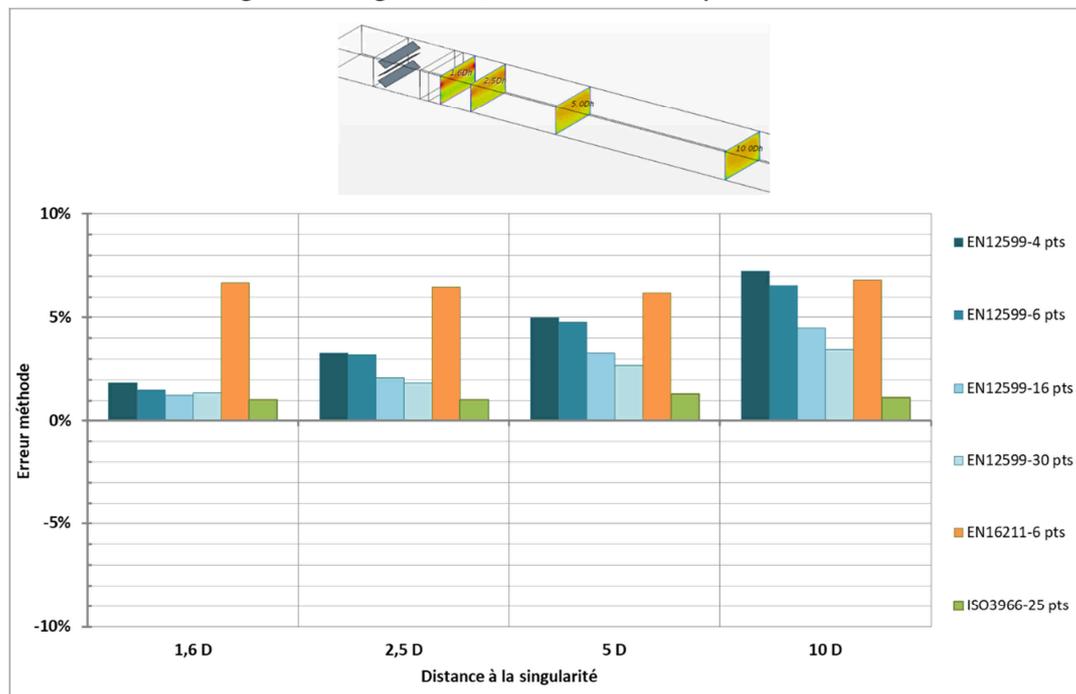


Figure 34 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un registre angle 30° en amont du plan de mesure

3.3.3.8 Registre angle 45°, en amont du plan de mesure

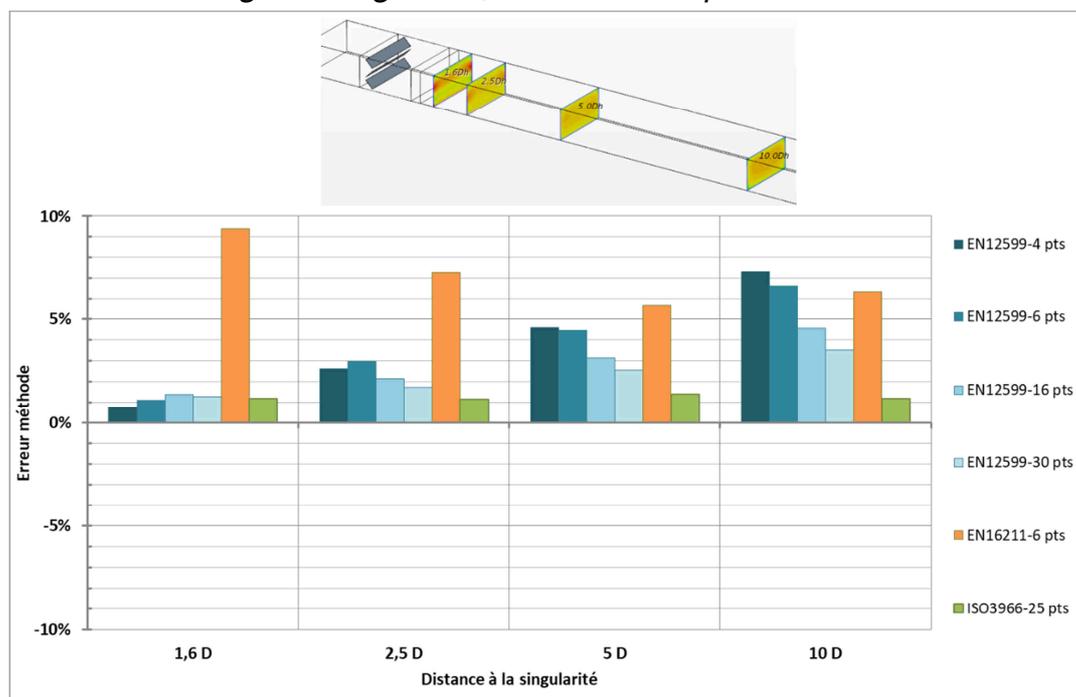


Figure 35 : Erreur de méthode pour les différentes méthodes considérées et différents plans de mesure dans le cas d'un registre angle 45° en amont du plan de mesure

3.3.4 Conclusion des simulations CFD sur conduit rectangulaire

3.3.4.1 Synthèse des résultats

Toutes singularités confondues, à chaque position par rapport à la singularité, l'erreur moyenne et l'écart-type sur cette moyenne pour chacune des méthodes évaluées sont calculés et présentés ci-dessous. Les méthodes sont repérées par la référence de la norme et le nombre de points considérés. L'erreur moyenne représente la moyenne des erreurs obtenues, toutes singularités confondues et l'écart-type la dispersion autour de cette moyenne.

Tableau 14 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 1,6D de la singularité amont (toutes singularités confondues)

Plan de mesure à 1,6D de la singularité amont						
	EN12599-4	EN12599-6	EN12599-16	EN12599-30	EN16211-6	ISO3966-25
Moyenne	3,6%	2,6%	2,5%	2,6%	6,2%	1,9%
Écart-type	2,0%	1,6%	1,0%	1,2%	6,7%	1,3%

Tableau 15 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 2,5D de la singularité amont (toutes singularités confondues)

Plan de mesure à 2,5D de la singularité amont						
	EN12599-4	EN12599-6	EN12599-16	EN12599-30	EN16211-6	ISO3966-25
Moyenne	3,9%	3,6%	3,3%	3,1%	5,4%	1,8%
Écart-type	0,9%	1,0%	1,0%	1,1%	4,6%	1,1%

Tableau 16 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 5D de la singularité amont (toutes singularités confondues)

Plan de mesure à 5D de la singularité amont						
	EN12599-4	EN12599-6	EN12599-16	EN12599-30	EN16211-6	ISO3966-25
Moyenne	5,2%	5,6%	4,6%	3,4%	5,0%	1,4%
Écart-type	1,1%	1,2%	1,3%	0,6%	2,9%	0,5%

Tableau 17 : Incertitude due à la méthode de mesure dans le cas de mesures à 10D de la singularité amont (toutes singularités confondues)

Plan de mesure à 10D de la singularité amont						
	EN12599-4	EN12599-6	EN12599-16	EN12599-30	EN16211-6	ISO3966-25
Moyenne	8,1%	7,7%	4,8%	3,3%	6,1%	0,6%
Ecart-type	1,6%	1,7%	0,5%	0,2%	2,0%	0,7%

3.3.4.2 Analyse en fonction de la norme considérée

a) Norme EN 12599 : 2012

Si le plan de mesure est situé à moins de 6Dh de la singularité, la norme EN 12599 : 2012 précise le nombre de points de mesure à réaliser selon la distance et le niveau d'incertitude totale attendue (Figure 36).

Distance relative a / D_h	Nombre de points de mesure requis		
	Incertitude totale en % / incertitude de l'appareil de mesure en %		
	"10/5"	"15/5"	"15/10"
1,6		30	44
2,0	50	21	30
2,5	34	16	24
3,0	25	12	18
4,0	16	8	12
5,0	12	6	9
6,0	9	4	6

Figure 36 : Incertitude totale attendue en fonction du nombre de points de mesure et de la distance relative du plan de mesurage à une perturbation– extrait de NF EN 12599

La signification des différentes options concernant l'incertitude totale et l'incertitude de l'appareil de mesure est donnée au a) du §3.2.4.2

De même que précédemment, les résultats des simulations sont analysés afin d'évaluer les configurations pour lesquelles l'erreur due à la méthode de mesure est bien inférieure à l'incertitude de méthode de la norme, calculé pour les différentes options :

Ainsi :

- "10/5" correspond à une incertitude de méthode de 8,4%
- "15/5" correspond à une incertitude de méthode de 14%
- "15/10" correspond à une incertitude de méthode de 11%

Pour obtenir une incertitude de méthode au maximum de 8,4%, équivalente à la colonne "**10/5**" de la norme EN 12599 :

- Alors que, selon la norme NF EN 12599, à une distance de 5D, il faudrait avoir au minimum 12 points de mesure, les simulations réalisées montrent que
 - i. L'incertitude de méthode est bien inférieure à 8,4% lorsque la méthode de mesure utilise au minimum 12 points de mesure
 - ii. L'incertitude de méthode est également inférieure à 8,4% lorsque la méthode de mesure utilise moins de 12 points de mesure
- Alors que, selon la norme NF EN 12599, à une distance de 2,5D, il faudrait avoir au minimum 34 points de mesure,
 - i. Aucune simulation n'a été réalisée avec, au minimum 34 points
 - ii. Les simulations réalisées montrent que, si la méthode de mesure utilise au minimum 4, 6, 16 ou 30 points, l'incertitude de méthode est inférieure à 8,4%
- Les mesures ne sont pas autorisées à une distance de 1,6D des singularités. Toutefois, les simulations réalisées montrent que, si la

méthode de mesure utilise au minimum 4, 6, 16 ou 30 points, l'incertitude de méthode est également inférieure à 8,4%

Cette analyse est réalisée pour toutes les configurations incertitude totale vs incertitude instrument proposées par la norme. Elle est synthétisée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 18 : Comparaison des simulations numériques à l'incertitude de méthode indiquée dans la norme EN 12599

Distance du plan de mesure à la singularité	Pour une incertitude totale	Avec une incertitude instrument	Incertitude de méthode (répartition des points) et nombre de points selon EN 12599	Comparaison à la simulation réalisée	Commentaires sur les résultats des simulations
5D	10%	5%	≤ 8,4% si 12 points mini	✓	≤ 8,4% si 4 points mini
	15%	5%	≤ 14% si 6 points mini	✓	
	15%	10%	≤ 11% si 9 points mini	✓	
2,5D	10%	5%	≤ 8,4% si 34 points mini	✓	≤ 8,4% si 4 points mini
	15%	5%	≤ 14% si 16 points mini	✓	
	15%	10%	≤ 11% si 24 points mini	✓	
1,6D	15%	5%	≤ 14% si 30 points mini	✓	≤ 8,4% si 4 points mini
	15%	10%	≤ 11% si 44 points mini	✓	

Analyse comparative :

Les incertitudes annoncées dans la norme EN 12599 : 2012 sont confirmées par les résultats des simulations CFD réalisées à 1,6D, 2,5D et 5D.

b) Norme EN 16211 : 2015

La norme EN 16211 : 2015 indique que si le plan de mesure se situe à plus de 5 Dh de la singularité, **l'incertitude-type de la méthode (répartition de points) est de 4%, soit 8% pour l'incertitude élargie** (Figure 37).

Tableau 2 — Méthodes de mesure des débits d'air dans un conduit

Méthode	Désignation	Voir paragraphe	Incertitude-type de la méthode, u_2
Mesures ponctuelles au moyen d'un tube de Pitot (tube de Prandtl) :	ID 1	8.2	
1) Section circulaire	ID 11		4 % (cas A) – 6 % (cas B)
2) Section rectangulaire	ID 12		4 %
Mesure ponctuelle au moyen d'un anémomètre à fil chaud ou d'un anémomètre mécanique :	ID 2	8.2	
1) Section circulaire	ID 21		4 % (cas A) – 6 % (cas B)
2) Section rectangulaire	ID 22		4 %
Dispositifs fixes de mesure du débit	ID 3	8.3	5 % (S'applique généralement en utilisant les mesures de l'installation obtenues avec la méthode d'essai)
1) Sans registre	ID 31		
2) Avec registre	ID 32		
Gaz traceur	ID 4	8.4	5 % ou 10 % en fonction de la longueur de mélange

Figure 37 : Incertitudes-type de méthode indiquées dans la norme EN 16211 : 2015 dans le respect des exigences liées aux conditions de mesure

Analyse comparative :

Les simulations réalisées à 10D (plan à une distance supérieure à 5Dh) confirment que l'incertitude de la méthode de mesure est inférieure à 8 %.

Les incertitudes annoncées dans la norme EN 16211 : 2015 sont donc confirmées par les résultats des simulations CFD réalisées.

Les niveaux d'incertitude de la norme EN 16211 : 2015 sont également atteints lorsque la distance à singularité est inférieure à 10Dh.

Ces conclusions sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 19 : Comparaison des simulations numériques à l'incertitude de méthode indiquée dans la norme EN 16211 : 2015

Distance du plan de mesure à la singularité	Incertitude de méthode (répartition des points) selon EN 16211 : 2015	Comparaison à la simulation réalisée	Commentaires sur le cas simulé
10D	≤ 8%	✓	≤ 8% en moyenne
5D	≤ 8%	✓	≤ 8% en moyenne
2,5D	Non couvert par EN 16211 : 2015	/	≤ 8% en moyenne Sauf dans le cas d'un Té 90° sur le grand coté en réunion de courant
1,6D	Non couvert par EN 16211 : 2015	/	≤ 8% en moyenne Sauf dans le cas d'un Té 90° sur le grand coté en réunion de courant et un registre fermé à 45°

c) Norme NF ISO 3966 : 2021

Pour les conditions de mesure spécifiées par la norme NF ISO 3966, le plan de mesure des vitesses doit se situer à une distance de 80D au minimum des singularités. Aucune simulation n'a été réalisée pour une distance aux singularités de 80D et plus. Toutefois, les simulations réalisées montrent que si la distance aux singularités est supérieure ou égale à 5D, l'erreur de méthode reste inférieure à 2% et à 4% si la distance est inférieure à 5D.

3.4 Conclusions sur les mesures de débit en conduit

Des simulations CFD ont été réalisées pour différentes configurations (conduit cylindrique ou rectangulaire avec une singularité à l'amont du plan de mesure) afin d'évaluer l'incertitude de mesure liée à la méthode de mesure et à l'emplacement du plan de mesure par rapport à la singularité.

Les singularités observées sont les suivantes :

- Pour les conduits cylindriques :
 - i. coude 90°
 - ii. 2 coudes 90° espacés d'une longueur de 2D
 - iii. 2 coudes 90° non espacé
 - iv. Té 90° en réunion de courant
 - v. Té 90° en séparation de courant
 - vi. registre fin angle 0°
 - vii. registre fin angle 45
 - viii. registre épais angle 0°
 - ix. registre épais angle 45
- Pour les conduits rectangulaires :
 - i. coude 90° sur le grand côté
 - ii. coude 90° sur le petit côté
 - iii. Té 90° sur le grand côté en réunion de courant
 - iv. Té 90° sur le petit côté en réunion de courant
 - v. registre angle 0°
 - vi. registre angle 30°
 - vii. registre angle 45°

Les méthodes évaluées sont :

- EN 12599 : 2012 - Ventilation des bâtiments - Procédures d'essai et méthodes de mesure pour la réception des installations de conditionnement d'air et de ventilation
- EN 16211 : 2015 - Systèmes de ventilation pour les bâtiments - Mesurages de débit d'air dans les systèmes de ventilation – Méthode
- ISO 3966 : 2008 - Mesure du débit des fluides dans les conduites fermées - Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles

Les résultats sont évalués sur 4 plans de mesure localisés à 1,6D, 2,5D, 5D et 10D en aval des singularités.

Les simulations ont permis d'évaluer l'incertitude de mesure liée à la répartition des points de mesure de vitesse dans le plan, appelée incertitude de méthode et ont permis de confirmer les incertitudes de méthode indiquées dans les normes NF EN 12599 : 2012 et NF EN 16211 : 2015 pour les conditions de mesure (distance aux singularités, nombre de points de mesure, ...) spécifiées dans ces normes. Ces incertitudes sont également confirmées pour des distances plus faibles aux singularités et/ou pour un nombre de points plus faible que celui spécifié sauf pour quelque cas particulier correspondant à des singularités générant de fortes perturbations de l'écoulement.

Ces conclusions sont établies à partir des résultats des cas simulés.

4 Conclusion

Dans le cadre du projet PromevenTertiaire destiné à améliorer les méthodes existantes de diagnostic des installations de ventilation mécanique dans le secteur tertiaire, l'objectif de cette tâche est d'évaluer les incertitudes de mesure du débit de ventilation en fonction des méthodes de mesure employées. Les méthodes de mesure au terminal et en conduit ont été abordées.

Pour les premières, les conclusions du projet Promevent résidentiel, ayant conduit au protocole Promevent puis au protocole Ventilation RE2020 [5], sont conservées pour les terminaux de petites dimensions. Ainsi, dans un objectif d'incertitude totale de mesure du débit inférieure à 15% et pour une incertitude due à l'instrument de mesure (EMT) inférieure à 10%, le domaine d'utilisation des différents instruments a été défini en fonction de la nature du terminal (Tableau 1).

Dans le cas de la mesure de débit au niveau d'un diffuseur de plus grande dimension, utilisé dans le tertiaire, l'incertitude de mesure du débit a été déterminée en fonction de l'incertitude due à l'instrument de mesure telle que définie au moment de l'écriture de ce rapport dans le projet de révision de la norme prEN 16211(2022) ou égale à la spécification constructeur la plus pénalisante parmi les instruments de mesure testés. Cette incertitude reste inférieure à 15% de la valeur du débit sauf dans le cas d'une mesure à très faible débit si l'incertitude due à l'instrument de mesure est égale à la spécification constructeur. Il a également été mis en évidence qu'il était nécessaire de s'assurer que l'instrument de mesure utilisé, s'il est passif (i.e. sans ventilateur de compensation) devait être équipé d'un dispositif permettant de minimiser l'impact d'un diffuseur générant un écoulement très perturbé.

Pour les mesures en conduit, l'analyse a été réalisée par simulation numérique pour différentes configurations de conduit correspondant aux singularités communément rencontrées. Différentes dispositions des points de mesure de vitesse ont été considérées, correspondants aux schémas proposés dans les normes NF EN 12599, NF EN 16211 et NF ISO 3966. Il a été montré que, pour des conduits cylindriques et rectangulaires, les incertitudes de méthode proposées dans les normes NF EN 12599 et NF EN 16211 sont confirmées dans les conditions de mesure spécifiées mais également dans des conditions plus pénalisantes (distances aux singularités, nombre de points de mesure).

5 Références bibliographiques

- [1] Rapport technique, Évaluation des incertitudes de mesure de débit aux bouches, Projet PROMEVENT 2014-2017, www.promevent.fr
- [2] NF EN 12599 (2012) Ventilation des bâtiments - Procédures d'essai et méthodes de mesure pour la réception des installations de conditionnement d'air et de ventilation. (en cours de révision).
- [3] NF EN 16211 (2015) Systèmes de ventilation pour les bâtiments - Mesurages de débit d'air dans les systèmes de ventilation – Méthodes
- [4] NF ISO 3966 (2021) Mesurage du débit des fluides dans les conduites fermées - Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles
- [5] Protocole Ventilation RE2020 - Vérification, mesures des performances et exigences pour les systèmes de ventilation mécanique dans le résidentiel neuf, juin 2022, <http://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/verification-des-systemes-de-ventilation-a561.html>



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

Appel à Projets Recherche

"Vers des bâtiments responsables à horizon 2020"

Édition 2018