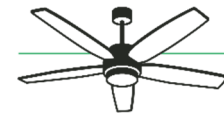


BRASSE : BRASSEURS D'AIR, UNE SOLUTION DE SOBRIÉTÉ ET D'EFFICACITÉ



BRASSE
BRASSEUR D'AIR :
UNE SOLUTION
DE SOBRIÉTÉ
ET D'EFFICACITÉ

Etude 3 – Evaluation de l'impact des brasseurs d'air
sur le confort thermique des usagers
Rapport 3.1 – Analyse des protocoles de mesures
de vitesse d'air

RAPPORT FINAL

BRASSE

Brasseurs d'air, une solution de sobriété et d'efficacité

Étude des performances, de l'impact sur le confort et de l'acceptabilité des brasseurs d'air en réponse aux changements climatiques

Les brasseurs d'air en plafond permettent d'améliorer le confort thermique des usagers des bâtiments tout en diminuant la consommation d'énergie nécessaire au refroidissement de locaux. Ils sont par conséquent une solution permettant de **s'adapter au changement climatique**. Mais ces équipements sont peu préconisés par les équipes de conception de bâtiment. D'un point de vue technique, cela est dû à un **manque de connaissance** sur ces équipements, leurs **performances** et leur **effet sur la qualité des ambiances intérieures**. Cela pourrait également être dû à des **raisons socio-économiques** non encore identifiées.

Ces constats ont fait naître le programme de recherche : BRASSE¹.

Ce projet de recherche vise principalement à **enrichir** le secteur du bâtiment de connaissances sur ces équipements, de développer des **méthodes** et outils d'aide à l'intégration et à **diffuser** cette connaissance.

Les axes de recherche :

- Performances des brasseurs
- Effets sur la qualité des ambiances intérieures
- Outil d'aide à la conception
- Identification des freins sociologiques
- Diffusion des connaissances

Les ambitions du projet sont :

- Réaliser un important **retour d'expérience** à travers 4 approches :
 1. Retour d'expérience technique préliminaire
 2. Analyse en sciences sociales
 3. Mesure sur site pour la validation de la méthodologie
 4. POE
- Établir un **protocole standardisé** de détermination des performances des brasseurs d'air présents sur le marché et **approfondir l'étude** de brasseurs d'air.
- Définir une **méthode** permettant de proposer une **conception de locaux équipés** de plusieurs brasseurs d'air (calepinage) prenant en compte les principaux paramètres : thermiques, acoustiques et aérauliques.
- **Comprendre le rapport des utilisateurs et des professionnels** aux brasseurs d'air quels que soient leurs profils, le climat ou le territoire dans lequel ils évoluent.
- **Diffuser l'information** pour faire monter en compétence l'ensemble de la filière bâtiment sur ces sujets.

Ce programme de recherche rassemble six entités regroupant des compétences pluridisciplinaires :

- **Surya consultants** : bureau d'études, recherches et développement/ Thermique – énergie – environnement – modélisation (pilote du projet)
- **LASA** : laboratoire privé en acoustique
- **ISEA** : cabinet de recherche et de conseil en sciences sociales – spécialisé en analyse et intervention comportementale
- **Laboratoire PIMENT – Université publique de la Réunion** : Génie de l'Habitat et génie thermique
- **Laboratoire Eiffel aérodynamique, filiale du groupe CSTB** : aérodynamique - expérimentation
- **EnvirobatBDM** : centre de ressources et démarche bâtiments durables méditerranéens – retour d'expérience

Le programme BRASSE est lauréat de l'appel à projets de recherche **Bâtiments responsables 2020** géré par l'Ademe.

¹ BRasseur d'Air : une Solution de Sobriété et d'Efficacité

CITATION DE CE RAPPORT

LE MAREC P.E., LE BERIGOT T., BŒUF F., DAVID M., BLANCHARD B., 2023. Evaluation de l'impact des brasseurs d'air sur le confort thermique des usagers - Analyse des protocoles de mesures de vitesse d'air - Projet BRASSE

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de convention : 2004C0018

Appel à projets de recherche Vers des Bâtiments Responsables à l'horizon 2020"

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : Pierre-Erwan LE MAREC (Surya Consultants), Tangi LE BERIGOT (Surya Consultants), Frédéric BŒUF (Surya Consultants), Mathieu DAVID (Laboratoire PIMENT) et Benoit BLANCHARD (Eiffel Aérodynamique)

Coordination technique - ADEME : LARUELLE Céline - Direction/Service : DVTD/SB

EVALUATION DE L'IMPACT DES BRASSEURS D'AIR SUR LE CONFORT DES USAGERS

PARTIE 1 : MESURE DE VITESSE D'AIR

Pierre-Erwan LE MAREC¹, Tangi LE BERIGOT¹, Frédéric BŒUF¹, Mathieu DAVID², Benoît BLANCHARD³

¹Surya Consultants, France,

²Laboratoire PIMENT, Université de la Réunion, France,

³Eiffel Aérodynamique, France

Mots clés : brasseur d'air, vitesse d'air, essais, protocole

Cette synthèse s'inscrit dans le programme de recherche « BRASSE : Étude des performances, de l'impact sur le confort et de l'acceptabilité des brasseurs d'air en réponse aux changements climatiques. ». Projet lauréat de l'appel à projets de recherche Bâtiments responsables 2020 géré par l'ADEME.

1. Introduction

La consommation d'énergie liée au refroidissement des bâtiments augmente plus rapidement que par le passé et cette tendance devrait se poursuivre jusqu'à la fin du XXI^e siècle [1]. À l'heure actuelle, la consommation d'énergie pour le refroidissement peut atteindre jusqu'à 9,3 % de la consommation mondiale totale d'énergie dans les bâtiments commerciaux [1] et pourrait être intensifiée en raison des problèmes de réchauffement de la planète [2, 3]. Bien que différentes stratégies d'économie d'énergie soient utilisées dans le bâtiment pour réduire cette demande de refroidissement, elles peuvent être coûteuses et/ou complexes [4, 5]. Par conséquent, l'utilisation d'une solution simple et abordable et la modification des paradigmes actuels de traitement de l'ambiance thermique dans les bâtiments modernes peuvent être suggérées comme urgentes.

Le brasseur d'air est un dispositif mécanique à faible consommation d'énergie qui peut être une solution d'amélioration de confort thermique appropriée répondant à l'ensemble des enjeux actuels [6]. Il n'a pas pour objectif, à l'inverse du climatiseur beaucoup plus énergivore, de refroidir et de maintenir la température d'ambiance. Il s'agit d'un dispositif de circulation d'air peu coûteux et pratique qui peut améliorer la sensation thermique des occupants en faisant circuler l'air dans une zone intérieure [7, 8].

S'il existe de nombreux avantages potentiels à l'application des brasseurs d'air, leur taux de pénétration sur le marché est encore limité ce qui est dû au manque d'informations concises sur les impacts des brasseurs d'air et les méthodologies d'évaluation des impacts [9, 10].

Le but du protocole BRASSE est de caractériser les performances des brasseurs d'air commerciaux dans leur configuration standard (celle recommandée par les fabricants) afin de les comparer en termes d'impact sur le confort des usagers et d'efficacité énergétique. L'ambition du projet BRASSE est de développer le bon usage du brasseur d'air dans le secteur du bâtiment comme adaptation frugale aux changements climatiques. Il convient ici de rappeler que le projet BRASSE n'a pas vocation à proposer des solutions d'optimisation de conception des brasseurs pour les fabricants et que ces objectifs techniques sont de définir :

- des indicateurs de performance orientés confort (thermique et acoustique) ;
- des indicateurs physiques permettant une bonne prise en compte des brasseurs en conception ;
- un protocole de mesures en laboratoire permettant d'obtenir ces indicateurs ;
- des règles de calepinage pour les utilisateurs (bureaux d'étude, etc.).

La sensation de confort induite par le brasseur d'air étant principalement liée à la vitesse d'air générée par le brasseur, il est absolument essentiel de la mesurer de façon répétable et reproductible afin d'évaluer l'impact de ces dispositifs sur le confort thermique des usagers. L'étude, sujet de ce présent article, a été réalisée afin d'évaluer la **qualité métrologique (exactitude, répétabilité et reproductibilité) de la mesure de vitesse d'air** obtenue en laboratoires et suivant la version 0 du protocole Brasse [11] et le faire évoluer si besoin.

2. Matériel et méthodes

Afin d'évaluer la reproductibilité du protocole, les essais ont été réalisés dans deux laboratoires différents : le laboratoire PIMENT (Le Tampon- La Réunion) et le laboratoire EIFFEL (Paris).

Les deux laboratoires possédant une longue expérience dans les mesures de performances de brasseurs d'air, ils ont conservé dans un premier temps leurs propres méthodes de mesure de la vitesse d'air plutôt que d'adopter un protocole commun. Les nombreux points de divergence entre les deux protocoles ont dû être discutés afin de garantir la qualité métrologique de la mesure. Nous présenterons donc dans cette partie les deux protocoles Eiffel et Piment tel qu'ils ont été mis en place et leurs évolutions éventuelles au cours de ce travail d'évaluation.

2.1 Brasseur

Lors de cette phase de validation, un seul modèle de brasseur (HUNTER Industrie II) a été utilisé comme étalon (1 machine différente du même modèle dans chaque laboratoire). Des légères différences de performances peuvent être constatées d'une machine à l'autre malgré le fait que le modèle soit identique. Pour prendre en compte cette variabilité, il était prévu d'échanger les machines en cours de projet. Cette action n'a pas pu être effectuée. Les caractéristiques principales données par le constructeur sont regroupées dans le tableau 1.



Figure 1 : Hunter Industrie II [12]

Tableau 1 : Caractéristiques du brasseur d'après les fiches techniques [12, 13]

| | |
|---|--------------------|
| Diamètre (cm) | 132 |
| Nombre de pales | 3 |
| Moteur | AC, 240 V, 50 Hz |
| Poids (kg) | 7,1 |
| Nombre de vitesses | 3 |
| Puissance électrique absorbée 1/2/3 (W) | 16 / 39 / 65 |
| Vitesse 1/2/3 (tr/min) | 79 / 127 / 157 |
| Débit 1/2/3 (m3/h) | 5134 / 7524 / 8902 |
| Efficacité 1/2/3 (m3/h/W) | 321 / 191 / 139 |
| Niveau de puissance acoustique 1/2/3 (dB(A)) | 26,3 / 32,8 / 39 |
| Distance de montage au plafond (cm) | 36 |
| Diamètre du corps du brasseur (cm) | 19 |

Afin de maîtriser parfaitement la vitesse de rotation du brasseur, il a été décidé d'utiliser un potentiomètre plutôt que la commande normale des brasseurs lors de la phase de validation du protocole. Deux vitesses sont étudiées : 80 tr/min et 150 tr/min ; ce qui correspond approximativement aux vitesses 1 et 3 de la commande du brasseur. Dans le protocole final, ce sera le dispositif de commande du brasseur qui sera utilisé afin de se placer dans les conditions d'utilisation envisagées par le constructeur.

2.2 Chambres de mesure

Deux chambres de mesure différentes ont été étudiées :

- Une chambre « fermée » de 4 m x 4 m avec le brasseur fixé en son centre (Figure 2). Cette configuration a été testée dans les deux laboratoires. Au laboratoire PIMENT, le plafond est un plafond mobile permettant d'obtenir une hauteur sous plafond (HSP) variant entre 2,5m et 2,7m.
- Une chambre « ouverte » où le brasseur est placé à 2 m d'une cloison (Figure 3). Cette configuration a été testée uniquement dans le laboratoire Eiffel. Les distances aux autres parois étant beaucoup plus importantes, il n'a pas été jugé nécessaire de les prendre en compte. Le banc est équipé d'un plafond à 2,5m de hauteur d'une surface de 4 m x 4 m au centre de laquelle est fixé le brasseur. Au-delà de cette surface, la hauteur du plafond (variant et toujours au-dessus de 2,5 m) et la présence de mobilier à des distances supérieures à 2 m du centre du brasseur sont également considérées, initialement, négligeables.



Figure 2 : Configuration des chambres « fermées » : (a) laboratoire Piment et (b) laboratoire Eiffel



Figure 3 : Configuration de la chambre « ouverte » du laboratoire Eiffel

Lors de l'évaluation du protocole, la hauteur sous plafond a été fixée à 2,50 m. Une seule hauteur a été choisie afin de permettre une comparaison entre les résultats. Le choix de 2,5 m a été fait puisqu'il correspond à la hauteur sous plafond standard dans les logements et s'applique aussi bien aux constructions neuves qu'à la rénovation. La distance de montage entre le plafond et les pales du brasseur étant de 36 cm, la hauteur sous le brasseur est de 2,14 m. Une analyse critique de ces dimensions sera proposée dans la suite de cette étude.

2.3 Mesures de vitesse d'air

Au laboratoire PIMENT, les mesures de vitesse d'air dans la chambre de mesure sont réalisées avec des anémomètres omnidirectionnels à boule chaude (SensoAnemo 5100LSF, Sensor Electronic, Pologne) reliés à une centrale d'acquisition (AirDistSys 5000, Sensor Electronic). La plage de mesure des capteurs varie de 0,05 m/s à 5 m/s avec une précision relative de 2% de la valeur mesurée à laquelle il faut ajouter $\pm 0,02$ m/s (ce qui donne une précision qui varie entre $\pm 0,02$ et $\pm 0,06$ m/s pour les vitesses d'air observées dans cette étude). La sensibilité des capteurs en fonction de la direction du flux d'air est donnée par la figure 4. On peut constater que le maximum de sensibilité du capteur est atteint lorsque le capteur est positionné perpendiculairement au flux d'air.



Figure 4 : Anémomètre SensoAnemo 5100 LSF [14]

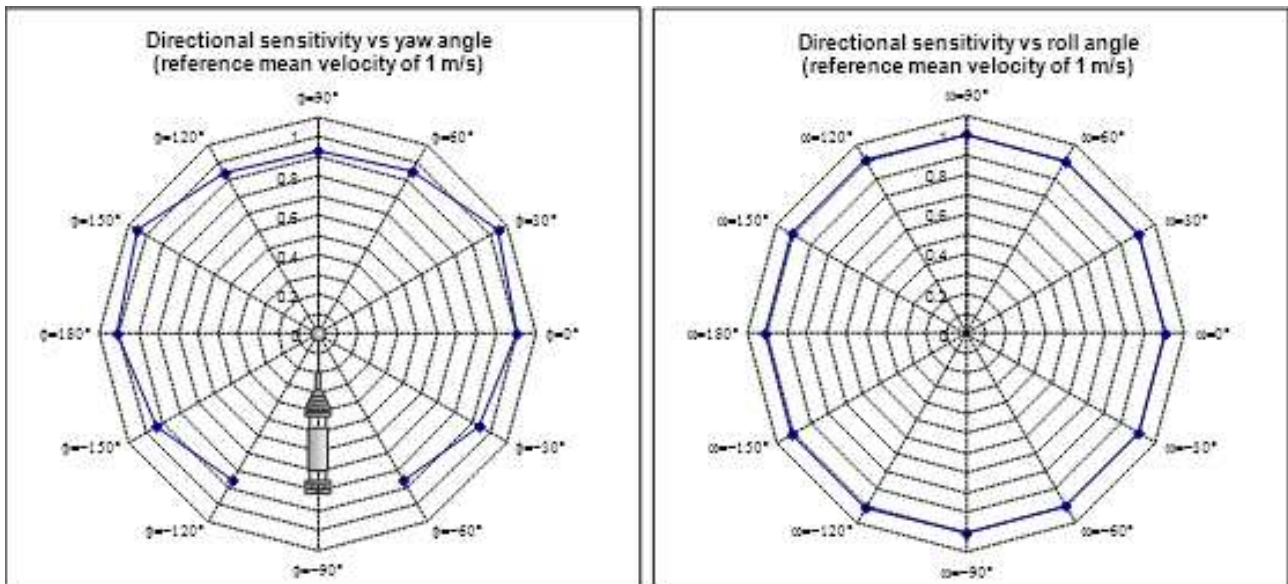


Figure 5 : Sensibilité directionnelle des anémomètres [14]

Les capteurs ont été calibrés à l'aide d'une soufflerie de calibration StreamLine Pro commercialisée par DANTEC. Les 14 sondes sont calibrées suivant deux angles d'incidence de l'air : perpendiculairement au flux d'air (90°) et parallèlement au flux d'air (0°). La Figure 6 donne un aperçu du résultat de la calibration réalisée en mai 2022 [15]. Après application du facteur de correction n'excédant pas 3% de la mesure initiale, plus de 95% des points de mesures sont compris dans l'incertitude annoncée par le fabricant.

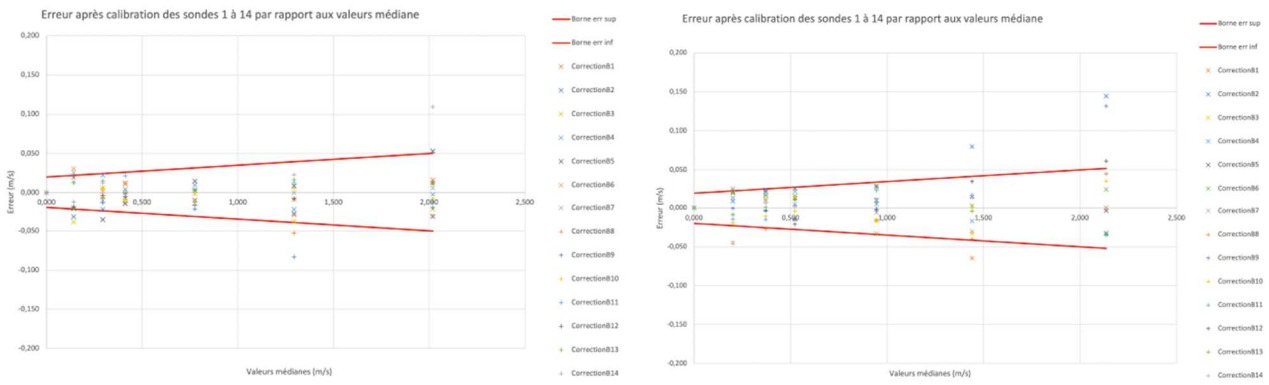


Figure 6 : Résultat de la calibration des anémomètre SensoAnemo 5100LSF pour une incidence (a) perpendiculaire du flux d'air (90°) et (b) parallèle du flux d'air (0°). Les lignes rouges indiquent l'incertitude de mesure annoncée par le fabricant [15].

Pour les essais au laboratoire PIMENT, 14 anémomètres sont positionnés verticalement ou horizontalement selon les essais sur un banc horizontal avec un espacement de 10 cm entre chaque capteur. La mesure est effectuée selon trois axes faisant un angle de 120° les uns par rapport aux autres (Figure 9a). Sur chaque axe, une première mesure est effectuée pour les distances par rapport au centre du brasseur allant de 0 à 130 cm. Dans le but d'observer les flux de recirculation le long des parois, une seconde mesure est effectuée à 150 tr/min avec les 5 derniers capteurs du banc pour les distances allant de 140 à 180 cm sur les trois axes et une troisième mesure avec un unique capteur positionné sur un pied vertical le long du mur sur l'axe 240°.

Pour les essais au laboratoire Eiffel, un unique anémomètre télescopique à boule chaude (Testo 0635 1051, Testo, Allemagne) relié à une centrale d'acquisition (Testo 400) et positionné horizontalement sur un support vertical. La plage de mesure des capteurs varie de 0 à 10 m/s avec une précision relative de 5 % de la valeur mesurée à laquelle il faut ajouter $\pm 0,03$ m/s (ce qui donne une précision qui varie entre $\pm 0,04$ et $\pm 0,13$ m/s pour les vitesses d'air observées dans cette étude). Il a été calibré en soufflerie à différentes vitesses dans toutes les directions (Figure 8).



Figure 7 : Anémomètre télescopique à boule chaude Testo 0635 1051 [16]

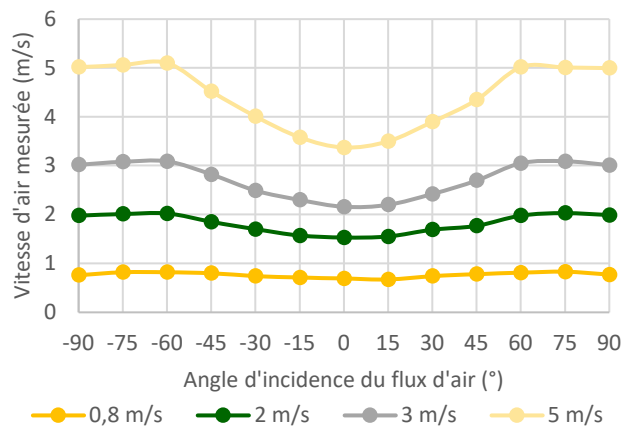


Figure 8 : Vitesses d'air mesurées à différentes vitesses d'air en fonction de l'angle d'incidence du flux d'air -Eiffel Aérodynamique

Pour les mesures de vitesse, l'anémomètre a été placé avec un angle de 90° par rapport au flux incident et déplacé selon trois axes à 90° (Figure 9b). Lors de essais en chambre ouverte, la cloison est située au bout de l'axe X-.

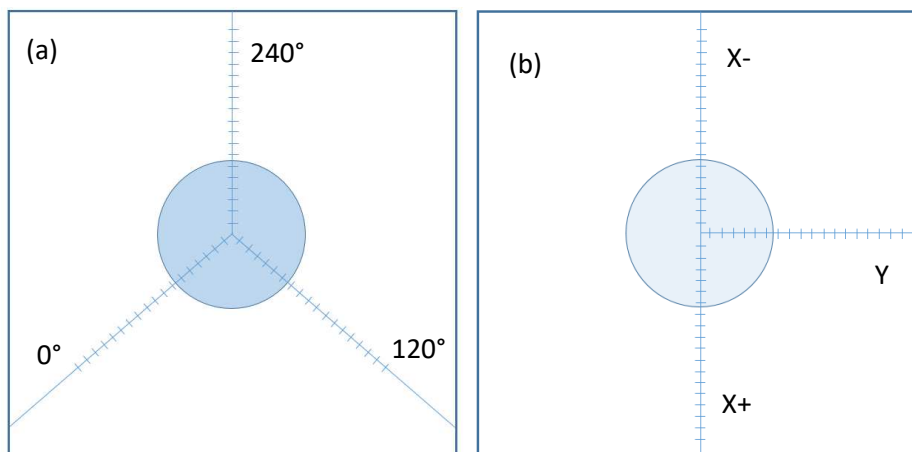


Figure 9 : Référencement des axes et positionnement des points de mesures dans les chambres de mesures : (a) laboratoire Piment et (b) laboratoire Eiffel

Au laboratoire PIMENT, la vitesse d'air est mesurée à une fréquence de 8 Hz. La valeur moyenne sur un intervalle de 10 s est enregistrée toutes les 2 s pendant les 3 min que durent l'essai. Après toute intervention d'un opérateur dans la chambre de mesure ou modification de la vitesse de rotation, un temps de stabilisation de 3 min a été respecté avant le démarrage de chaque mesure.

Au laboratoire Eiffel, la vitesse d'air est mesurée à une fréquence de 2 Hz et une vitesse moyenne était initialement calculée sur trois périodes disjointes de 30 s puis, afin de se rapprocher des conditions d'essais de PIMENT, sur une période de 3 min. Un temps de stabilisation de 1 min a été respectée avant chaque mesure, l'opérateur restant dans la pièce pendant la mesure et se plaçant en un point le plus éloigné possible du capteur. Les mesures temporelles n'étant pas enregistrées, il n'a pas été possible de conduire l'ensemble des analyses sur les données issues du protocole Eiffel.

Dans les deux laboratoires, les hauteurs de mesures ont été fixées à 36 cm, 60 cm, 100 cm, 120 cm, 132 cm, 150 cm et 170 cm. Les hauteurs de 60 cm et 170 cm sont issues de la norme ASHRAE 55 [17]. Cette norme propose également une mesure à 10 cm de hauteur mais elle n'a pas pu être mise en œuvre pour des raisons techniques, une hauteur minimale atteignable de 36 cm a été utilisée à la place. Les autres hauteurs correspondent aux hauteurs utilisées par les laboratoires dans leurs précédentes études. Une analyse critique de ces hauteurs sera proposée dans la seconde partie de l'étude.

2.4 Mesures de vitesse de rotation

Au laboratoire PIMENT, la mesure de la vitesse de rotation est effectuée avec un tachymètre optique (CTA, Kimo Instruments) dont le faisceau se réfléchit sur un ruban réfléchissant placé sur une des pales du brasseur. La précision relative du tachymètre est de $\pm 0,3\%$ de la valeur mesurée à laquelle il faut ajouter ± 1 tr/min (ce qui donne une précision de l'ordre de 1 tr/min pour les vitesses de rotation choisies dans cette étude).

Au laboratoire Eiffel, la mesure de la vitesse de rotation est effectuée avec un tachymètre optique (PCE-DT-65, PCE instruments, Allemagne). La précision relative du tachymètre est de $\pm 0,05\%$ de la valeur mesurée à laquelle il faut ajouter ± 1 tr/min (ce qui donne une précision de l'ordre de 1 tr/min pour les vitesses de rotation choisies dans cette étude).



Figure 10 : Tachymètre optique : (a) CTA [18] et (b) PCE-DT-65 [19]

2.5 Mesures de température ambiante et d'humidité relative

Au laboratoire PIMENT, les températures et humidités relatives sont relevées manuellement en court de mesure sur l'écran d'un enregistreur Testo 174H positionné dans l'enceinte de test. Sur la température, ces enregistreurs annoncent une précision de $\pm 0,5$ °C et sur l'humidité relative de ± 3 %.

Au laboratoire EIFFEL, les températures et humidités relatives sont relevées manuellement en court de mesure sur l'écran d'une station météo Excelvan. Sur la température, cet équipement annonce une précision de ± 1 °C et sur l'humidité relative de ± 5 %.



Figure 11 : Capteurs de température et d'humidité : (a) Testo 174H [20] et (b) Excelvan [21]

3. Résultats

3.1 Dimensions de la chambre de mesure

Le premier point sur lequel il faut statuer est la configuration de la chambre de mesure retenue. La Figure 12 donne les profils de vitesses sur les trois axes à une hauteur de 120 cm et une vitesse de rotation de 150 tr/min pour les deux chambres de mesures du laboratoire Eiffel (ouverte et fermée).

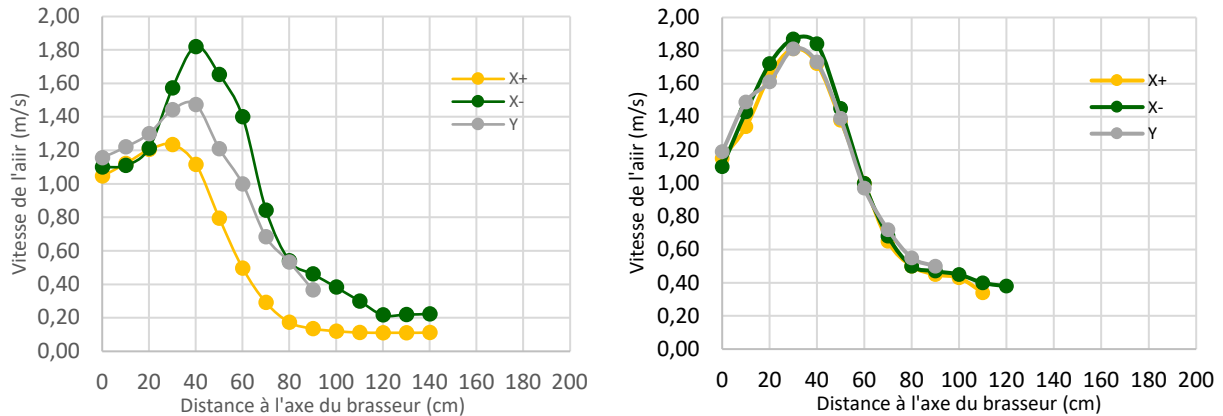


Figure 12 : Comparaison des profils de vitesse en (a) chambre ouverte et (b) chambre fermée à 150 tr/min et 120 cm de hauteur

On constate que les vitesses d'air diminuent fortement sur les côtés « ouverts » (axes X+ et Y). Ce résultat a également été observé souvent dans la littérature [22-29] et notamment par Rafferty et al. [26] qui montre que la vitesse de l'air dans la zone de recirculation varie proportionnellement au rapport D/X (où D est le diamètre du brasseur et X la distance entre le centre du brasseur et la paroi). Par conséquent, étant donné que dans la configuration ouverte la paroi est jugée éloignée, le rapport D/X diminue donc la vitesse dans cette zone sera plus faible. Il montre également que dans une configuration symétrique (configuration fermée) la vitesse de l'air sous le brasseur n'est pas impactée par les dimensions de la pièce. La dissymétrie du pic de vitesse observée dans la configuration « ouverte » est donc due à la dissymétrie de la chambre de mesure, ce qui est également observé dans la littérature [22-24, 30-32]. La chambre de mesure « ouverte » n'est en effet pas réellement ouverte mais seulement jugée hypothétiquement suffisamment large sur certains axes pour que l'impact des parois devienne négligeable. D'autres mesures pourraient être envisagées pour comprendre l'impact des dissymétries de configuration sur le champ de vitesse d'air mais n'apparaissent pas pertinentes dans cette partie de l'étude.

L'absence de symétrie de la configuration ouverte ne permettant pas d'obtenir une distribution radiale de la vitesse d'air et étant trop complexe pour pouvoir appréhender tous les phénomènes mis en jeu, il a été décidé de ne plus utiliser cette configuration.

Résultat n°1 : La configuration fermée symétrique (i.e. avec le brasseur placé au centre) est la seule configuration ayant permis d'obtenir un champ de vitesse symétrique indépendant de la distance aux parois.

Dans le cas de la chambre fermée, il faut noter que les dimensions « finies » de la pièce imposent des limitations sur la taille des brasseurs pouvant être caractérisés. Les différentes réglementations américaines (NEC – électricité, NFPA – incendie, IRC - bâtiment) ne précisent pas de distances minimales par rapport au mur ou au sol mais imposent de suivre les règles de montage données par les constructeurs. A titre d'exemple, le

Tableau 2 présente des distances minimales requises par le constructeur Big Ass Fans [33] pour ces différents modèles. On constate que la distance minimale requise par ce constructeur entre le bout des pales et les murs est égale au rayon du brasseur. Dans ces conditions, la chambre d'essai de 4 m x 4m permettrait de tester des brasseurs **jusqu'à 2 m de diamètre**.

Tableau 2 : Distances de montages requises pour les différents modèles de la gamme Big Ass Fans [33]

| Diamètre | Distance pales/plafond | Distance pales/sol | Distance bout de pales/murs |
|----------|------------------------|--------------------|-----------------------------|
| 1,32 m | 30,5 cm | 2,1 m | 66 cm |
| 1,52 m | 30,5 cm | 2,1 m | 76 cm |
| 1,82 m | 30,5 cm | 2,4 m | 91 cm |
| 2,13 m | 30,5 cm | 2,4 m | 107 cm |
| 2,4 m | 60 cm – 1,2 m | 3 m | 1,2 m |
| 3 m | 60 cm – 1,2 m | 3 m | 1,5 m |
| 3,7 m | 60 cm – 1,5 m | 3 m | 1,8 m |
| 4,3 m | 60 cm – 1,8 m | 3 m | 2,1 m |
| 4,9 m | 1,8 m | 3 m | 2,4 m |
| 5,5 m | 1,8 m – 2,1 m | 3 m | 2,7 m |
| 6,1 m | 2,1 m | 3 m | 3,0 m |
| 6,7 m | 2,4 m | 3 m | 3,4 m |
| 7,3 m | 2,1 m – 2,4 m | 3 m | 3,7 m |

Le label Energy Star [34] impose aux constructeurs de préconiser une distance minimale entre le bout des pales du brasseur et les murs qui doit être supérieure à 46 cm (18") pour des brasseurs de taille inférieurs à 213 cm (7') de diamètre, une distance de 91 cm (3') étant recommandée pour permettre un flux d'air correct. Pour les brasseurs plus grands, la distance minimale requise est de 91 cm. En respectant la distance recommandée de 91 cm, il apparait que la chambre d'essai fermée de 4 x 4 m permet de caractériser des brasseurs **jusqu'à un diamètre de 218 cm (85")**. Au-delà de ce diamètre, il faudrait envisager une dimension de chambre de mesure plus grande.

Dans le rapport du laboratoire Eiffel « Mise au point d'un banc d'essai pour la caractérisation des brasseurs d'air » [35, 36], les auteurs observent également cette dissymétrie du champ de vitesse. Ils ont observé qu'en éloignant le brasseur du mur le plus proche, cette dissymétrie s'atténuait et ont conclu sur des distances minimales requises pour l'utilisation optimum des brasseurs. Or ces essais complémentaires (en chambre ouverte et fermée) ainsi que la littérature internationale [22-29] démontrent que la dissymétrie du champ de vitesse est expliquée par la dissymétrie de la configuration (configuration symétrique = pièce carrée avec brasseurs au centre). Ce n'est donc pas la grande proximité du mur qui est à l'origine de la dissymétrie du champ de vitesse mais bien l'absence de murs positionnés de façon symétrique sur les axes opposés. Les recommandations issues de ce rapport [36] sur les distances minimales à respecter entre le bout de pales de brasseur et les parois donc ne seront pas retenues dans le projet BRASSE.

Le guide de conception des brasseurs d'air [37] proposé par le CBE (Centre for Building Environment – Université de Berkeley) indique que le diamètre d'un brasseur d'air doit être compris entre 0,2 et 0,4 fois la taille de la pièce pour garantir un flux d'air optimum. Une taille de pièce trop petite ou trop grande induirait d'autres phénomènes pouvant affecter les performances du brasseur. Cette contrainte limite cette fois le **diamètre du brasseur à 160 cm** dans la chambre de 4 m x 4 m en considérant le ratio de 0,4. Lors d'échanges que nous avons eus avec lui au sujet de ces recommandations, Paul Raftery, responsable des études sur les brasseurs d'air au CBE et auteur de ce guide de conception, nous a indiqué que :

« Lorsque le diamètre du brasseur commence à dépasser la moitié de la largeur de la pièce, le brasseur s'étouffe, i.e. le courant de recirculation retournant vers l'entrée du brasseur commence à être affecté par le courant de sortie, ce qui affecte les performances. La recommandation du guide est issue de cette observation ainsi que d'autres aspects pratiques observés par les concepteurs et les installateurs. Lorsque la taille dépasse 0,4x la taille de la pièce, il devient alors difficile d'installer d'autres appareils au plafond (éclairage, sécurité incendie...). Par ailleurs, lorsque que les distances aux parois sont trop petites, les occupants de la pièce trouvent cela « troublant » et le risque de dommage en cas de tremblement de terre devient important. »

Par ailleurs, d'après le guide de conception du CBE Berkeley et toujours dans le but de ne pas observer un effet d'étouffement du brasseur, il faut également respecter une distance entre les pales et le plafond qui doit être supérieure à 0,2 fois le diamètre [37], soit 32 cm si on se limite aux brasseurs de 160 cm de diamètre ou 40 cm pour les brasseurs de 200 cm. Cette distance sera approfondie dans le rapport 3.4 du projet BRASSE.

Le label Energy Star [34] impose quant à lui une hauteur minimale sous les pales de 2,13 m (7') pour des brasseurs de diamètre inférieur à 213 cm et de 3,05 m (10') pour des brasseurs plus grands. Les brasseurs jusqu'à **un diamètre de 185 cm** pourraient ainsi être utilisés avec une hauteur sous plafond de 2,50 m. On constate par ailleurs que Big Ass Fan [33] recommande des hauteurs sous plafond supérieures à 2,70 m pour ses modèles de plus 1,80 m de diamètre afin que la hauteur de pales soit supérieure à 2,40 m.

La Figure 13 montre l'évolution du ratio entre la distance au plafond et le diamètre du brasseur préconisé par Big Ass Fan ainsi que la hauteur sous plafond requise pour utiliser ces brasseurs. On observe que, selon les modèles, ce constructeur peut préconiser des distances au plafond qui peut être soit inférieures, soit supérieures au ratio de 0,2. Pour les modèles de diamètre inférieurs à 2 m, les ratios utilisés sont toutefois proches de la valeur de 0,2, alors que, à quelques exceptions près, pour les brasseurs plus grands, le ratio utilisé est plutôt de l'ordre de 0,4.

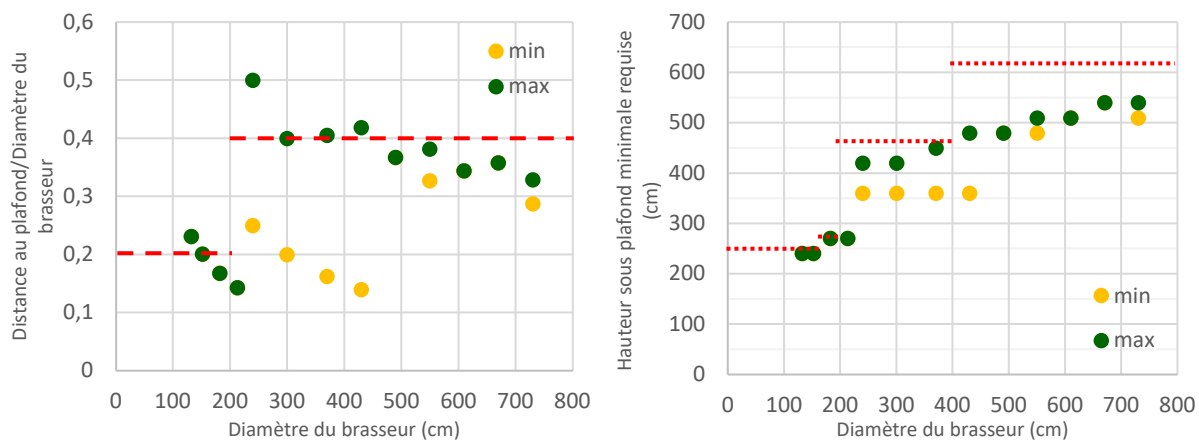


Figure 13 : Evolution du ratio Distance au plafond/diamètre du brasseur et de la hauteur sous plafond minimale requise pour les brasseurs de la gamme Big Ass Fans, d'après [33]. En pointillés rouge, les limites retenues dans le cadre du projet BRASSE pour dimensionner la chambre de mesure.

La norme NF EN CEI 60335-2-80 [38] recommandant d'avoir une distance supérieure à 2,30 m entre le sol et les pales du brasseur, il faut une hauteur sous plafond pouvant aller jusqu'à 2,62 m ou 2,74 m selon le diamètre maximum choisi. Cette hauteur minimale sera également influencée par la longueur de la tige de fixation du brasseur. Dans le cas du Hunter Industrie II, par exemple, la distance pales/plafond est de 36 cm, ce qui nécessiterait de monter le plafond à 2,66 m de façon à respecter cette recommandation de la norme européenne. Une hauteur sous plafond standard de 2,50 m limitant l'utilisation des brasseurs à ceux inférieurs à 1 m de diamètre, cette recommandation de la norme européenne est donc trop restrictive pour permettre une utilisation à grande échelle des brasseurs d'air et ne sera pas suivie dans le projet BRASSE pour les brasseurs de diamètre inférieur à 160 cm.

En considérant l'ensemble de ces éléments, les trois critères que nous recommandons de retenir sont donc :

- Diamètre du brasseur inférieur à 0,4 fois la taille de la pièce ;
- Distance minimale entre les pales et le plafond de 0,2 fois le diamètre pour les diamètres inférieurs à 200 cm et de 0,4 fois le diamètre pour les brasseurs plus grands ;
- Hauteur de pales supérieure à 2,13 m pour les diamètres inférieurs à 160 cm, supérieure à 2,30 m pour les diamètres compris entre 160 cm et 200 cm, et supérieure à 3 m pour les brasseurs plus grands.

Selon les trois hypothèses que nous avons présentées ici, les dimensions de nos chambres de mesure sont suffisantes pour les dimensions de brasseurs inférieures à 160 cm telles que celles envisagées dans le projet BRASSE. La Figure 14 montre que cette limite n'exclue qu'un très petit nombre de brasseur parmi les modèles commerciaux et que l'usage de ces grands brasseurs est particulièrement rare pour des locaux ayant des HSP de 2,5m.

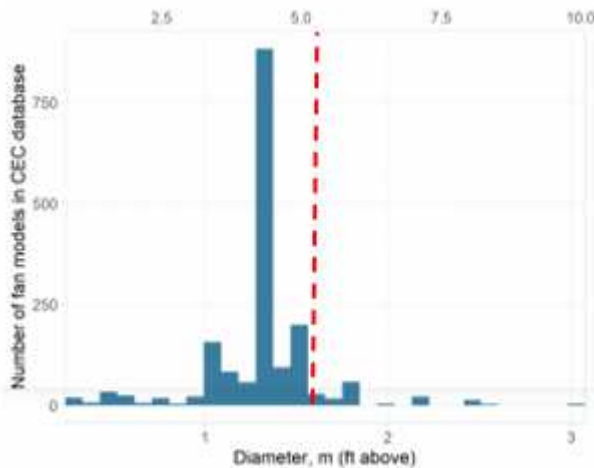


Figure 14 : Distribution de diamètre de brasseur dans un échantillon aléatoire de brasseurs dans la base de données CEC [37]. L'axe vertical en pointillés représente la limite à 1,60 m de diamètre imposée par nos chambres de mesure.

Résultat n°2 : Selon ces critères, les dimensions des chambres de mesure actuelles (4 x 4 x 2,5 m) permettent de caractériser des brasseurs jusqu'à 160 cm de diamètre.

Résultat n°3 : Selon ces critères, les brasseurs jusqu'à 185 cm pourraient être utilisés avec une hauteur sous plafond de 2,50 m.

En prenant en compte les différentes règles, selon le diamètre du brasseur, les dimensions de la chambre devront être :

Tableau 3 : Dimensions de la chambre de mesure selon le diamètre du brasseur

| Diamètre max du brasseur | Largeur de la chambre | Hauteur sous plafond |
|--------------------------|-----------------------|----------------------|
| 160 cm | 4 m | 2,50 m |
| 200 cm | 5 m | 2,70 m |
| 300 cm | 7,5 m | 4,20 m |
| 400 cm | 10 m | 4,60 m |
| 600 cm | 15 m | 5,40 m |
| 800 cm | 20 m | 6,20 m |

RECOMMANDATION N°1 :

Dans le cas des brasseurs pouvant être utilisés avec une hauteur sous plafond de 2,50 m, c'est-à-dire ayant un diamètre inférieur à 160 cm, les dimensions de la chambre de mesure du protocole BRASSE doivent être de 4 m x 4 m x 2,5 m.

Pour les brasseurs de taille supérieure à 160 cm, il convient de définir également dans le protocole des tailles de chambres de mesure permettant leur évaluation. A partir des valeurs du tableau 3, nous recommandons trois tailles de chambre de mesure supplémentaires :

- 5 m x 5 m x 2,7 m pour les brasseurs dont le diamètre est compris entre 160 cm et 200 cm
- 10 m x 10 m x 4,6 m pour les brasseurs dont le diamètre est compris entre 200 cm et 400 cm
- 20 m x 20 m x 6,2 m pour les brasseurs dont le diamètre est compris entre 400 cm et 800 cm

3.2 Positionnement des capteurs

Plusieurs configurations de positionnement des capteurs ont été testées : 14 capteurs positionnés horizontalement ou verticalement sur un support horizontal (PIMENT) et 1 capteur positionné horizontalement sur un support vertical (PIMENT + EIFFEL). Les capteurs du laboratoire PIMENT ont été calibrés pour chacune des deux positions utilisées. La Figure 15 montre qu'il n'y a pas d'influence significative du support, du nombre de capteurs utilisés ou de l'orientation de capteur choisie.

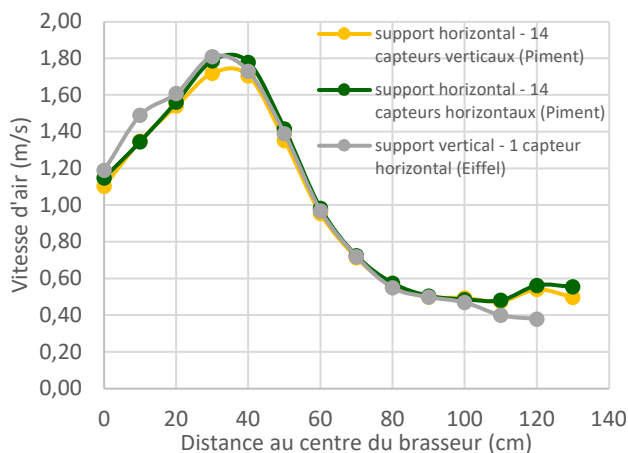


Figure 15 : Influence du positionnement des capteurs sur les profils de vitesse d'air

Résultat n°4 : Le choix du support et de l'orientation des capteurs n'a pas d'impact significatif sur la mesure, il sera déterminé selon des critères pratiques qui restent à définir.

Il conviendra donc de choisir un dispositif en fonction de critères pratiques tels que la facilité (voire la possibilité) de mise en place par l'opérateur. Il est par exemple impossible de mesurer la vitesse à une hauteur inférieure à 36 cm avec le banc d'essai horizontal du laboratoire PIMENT alors qu'une mesure à 10 cm a été envisagée pour évaluer le risque de courant d'air au niveau des chevilles. Afin de pouvoir évaluer cet effet, il serait préférable d'utiliser un support à tige verticale tel que celui utilisé par Eiffel.

Un essai avec un espacement de 5 cm entre les capteurs a également été réalisé par le laboratoire PIMENT pour évaluer la nécessité d'avoir plus de positions de mesures. La Figure 16 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montrent les profils de vitesse à 150 tr/min et 120 cm de hauteur pour des espacements entre capteurs différents. On peut constater que la présence de capteurs supplémentaires ne perturbe pas le flux d'air. Toutefois, les points supplémentaires ne semblent apporter aucune information supplémentaire utile. Il n'apparaît donc pas pertinent d'utiliser un espacement inférieur à 10 cm tant que l'analyse des résultats obtenus réalisée en seconde partie de cette étude ne le requiert pas.

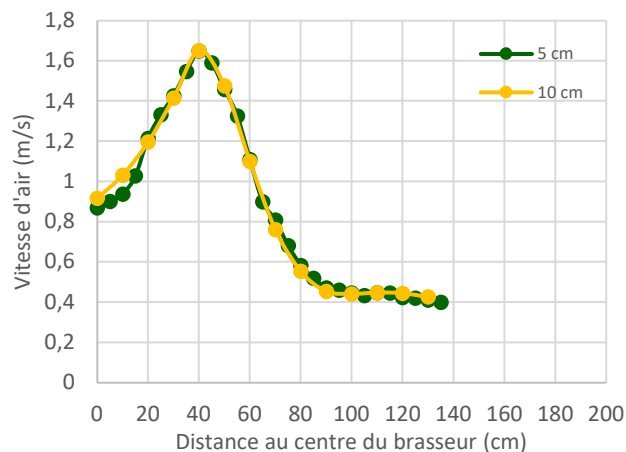


Figure 16 : Influence de l'espacement entre les capteurs sur les profils de vitesse moyenne

Résultat n°5 : L'espacement de 10 cm entre les positions de mesures peut être conservé.

Les hauteurs et les distances maximales de mesure choisies ne sont pas discutées ici puisqu'elles dépendront de l'analyse des résultats qui sera effectuée dans une prochaine partie.

3.3 Temps de stabilisation avant la mesure

Avant de démarrer la mesure, il convient de connaître le temps nécessaire à l'établissement d'un régime permanent d'écoulement d'air dans la chambre de mesure après le démarrage du brasseur ou après l'intervention d'un opérateur dans la chambre de mesure. Pour cela, un essai particulier a été réalisé au laboratoire PIMENT. Il a été jugé représentatif du phénomène et appliqué aux deux laboratoires. Ici, la mesure (120 cm de hauteur sur l'axe 240°) commence avant le démarrage du brasseur et dure 25 min.

La Figure 17 montre l'évolution de la vitesse de rotation du brasseur sur les 5 premières minutes. On observe que la vitesse de rotation est établie au bout de 30 s. La vitesse de rotation moyenne entre 30 s et 3 min 30 s est de 149,5 tr/min avec un écart type de 1,3 tr/min (ce qui est inférieur à la précision annoncée par le fabricant du capteur : 1,45 tr/min à 150 tr/min). On retrouve exactement les mêmes valeurs entre 3 min et 6 min, ce qui indique que la stabilisation de la vitesse de rotation est atteinte dès 30 s et qu'il n'est pas nécessaire d'attendre jusqu'à 3 min comme cela était prévu initialement par le protocole.

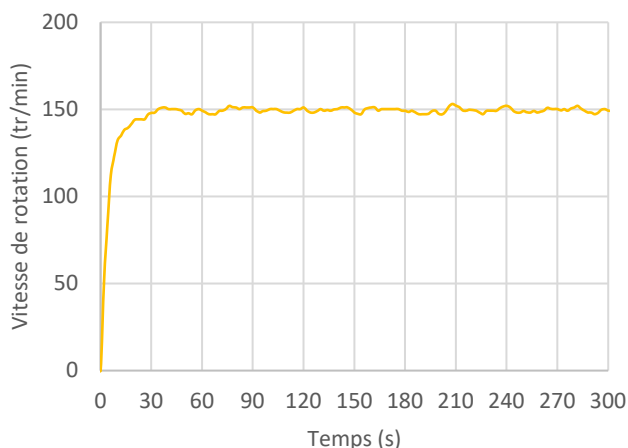


Figure 17 : Evolution de la vitesse de rotation après le démarrage du brasseur

La Figure 18 montre l'évolution de la vitesse d'air à différentes distances du centre du brasseur pendant les 6 premières minutes après le démarrage du brasseur. On observe que les vitesses augmentent pendant les 30 premières secondes. Après cette phase d'établissement de la vitesse, on constate qu'elle ne se stabilise pas particulièrement avec le temps.

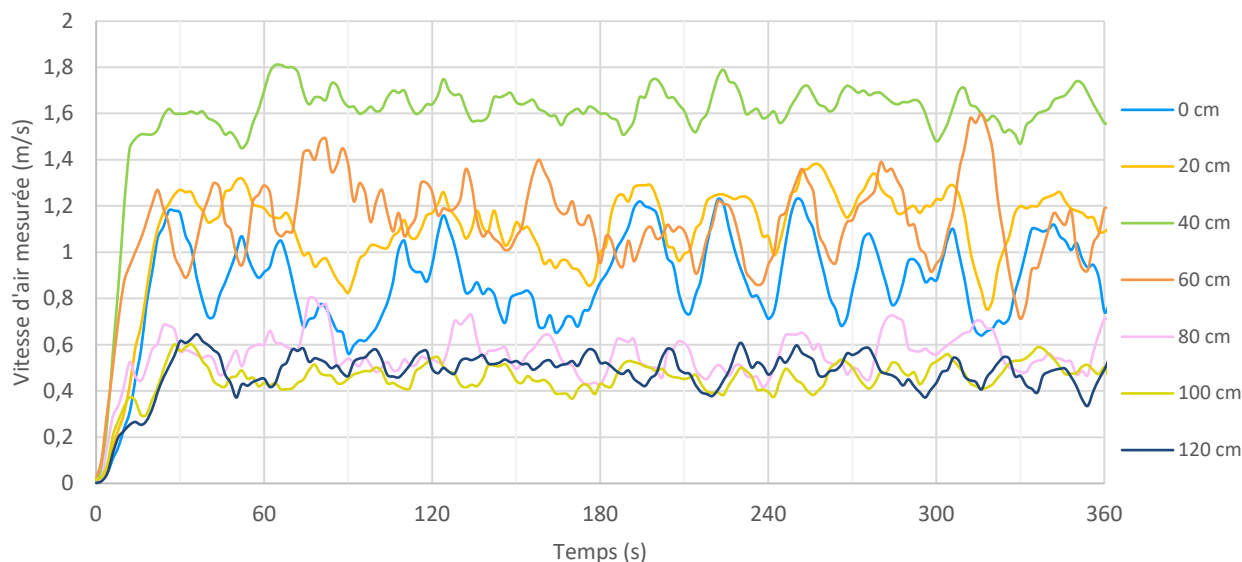


Figure 18 : Evolution des vitesses d'air à différentes positions après le démarrage du brasseur

La Figure 19 présente les profils de vitesse d'air moyenne sur un intervalle de 3 min aux différentes positions pour des temps de stabilisation (i.e. temps à partir duquel on commence la mesure) de 30 s, 3 min, 5 min et 10 min. On observe qu'augmenter le temps de stabilisation n'a pas d'influence sur les valeurs de vitesse moyenne.

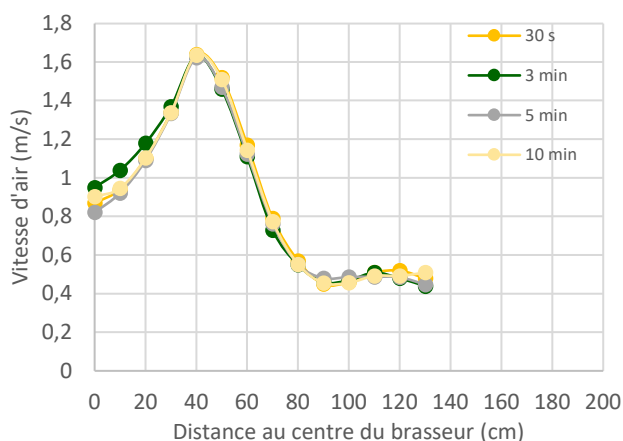


Figure 19 : Profils de vitesse moyenne après différents temps de stabilisation

On peut donc convenir qu'il ne semble pas utile d'avoir un temps de stabilisation de 3 min mais qu'un temps de 30 s pourrait suffire, ce qui est conforme à d'autres protocoles de mesures rencontrés dans la littérature [29, 39], bien que des temps supérieurs soient aussi rencontrés (2 min [26]).

Résultat n°6 : Dans le cas du brasseur témoin, un temps de stabilisation de 3 min est suffisamment long pour considérer un champ de vitesse en régime permanent.

Cependant l'étude sur un unique brasseur témoin est trop limitante pour conclure définitivement sur le temps de stabilisation car il n'est pas évident que ce temps soit suffisant dans le cas d'autres brasseurs (pales plus lourdes, moteur moins puissant, diamètre plus important, etc.). C'est pourquoi nous ne pouvons pas faire de recommandation sur un temps minimal de stabilisation sur la base de ces mesures.

La norme ASHRAE 216 [40], dont l'objectif est également de mesurer le profil de vitesse d'air pour déterminer des indicateurs de confort thermique et de performances énergétique, recommande un temps minimal de stabilisation de 3 min et y ajoute un test permettant de vérifier que le régime permanent est atteint lors de la mesure. Ce test vérifie que l'écart entre la valeur moyenne de vitesse mesurée sur la première moitié de la durée du test et celle mesurée sur la seconde moitié de la durée est inférieur à 10 % ou à 0,05 m/s. Si le régime permanent n'est pas atteint, la mesure est invalidée et le temps de stabilisation doit être incrémenté de 3 min jusqu'à un maximum de 12 min. Nous recommandons donc d'utiliser la même méthode. Cette recommandation a été vérifiée lors des essais en laboratoire dans la suite du projet BRASSE.

RECOMMANDATION N°2 :

Le temps de stabilisation minimal avant chaque mesure (vitesse d'air et vitesse de rotation) est fixé à 3 min.

Un test doit être réalisé après chaque mesure pour vérifier que le régime permanent est atteint. L'écart entre la valeur moyenne de vitesse mesurée sur la première moitié de la durée du test et celle mesurée sur la seconde moitié de la durée doit être inférieur à 10 % ou à 0,05 m/s.

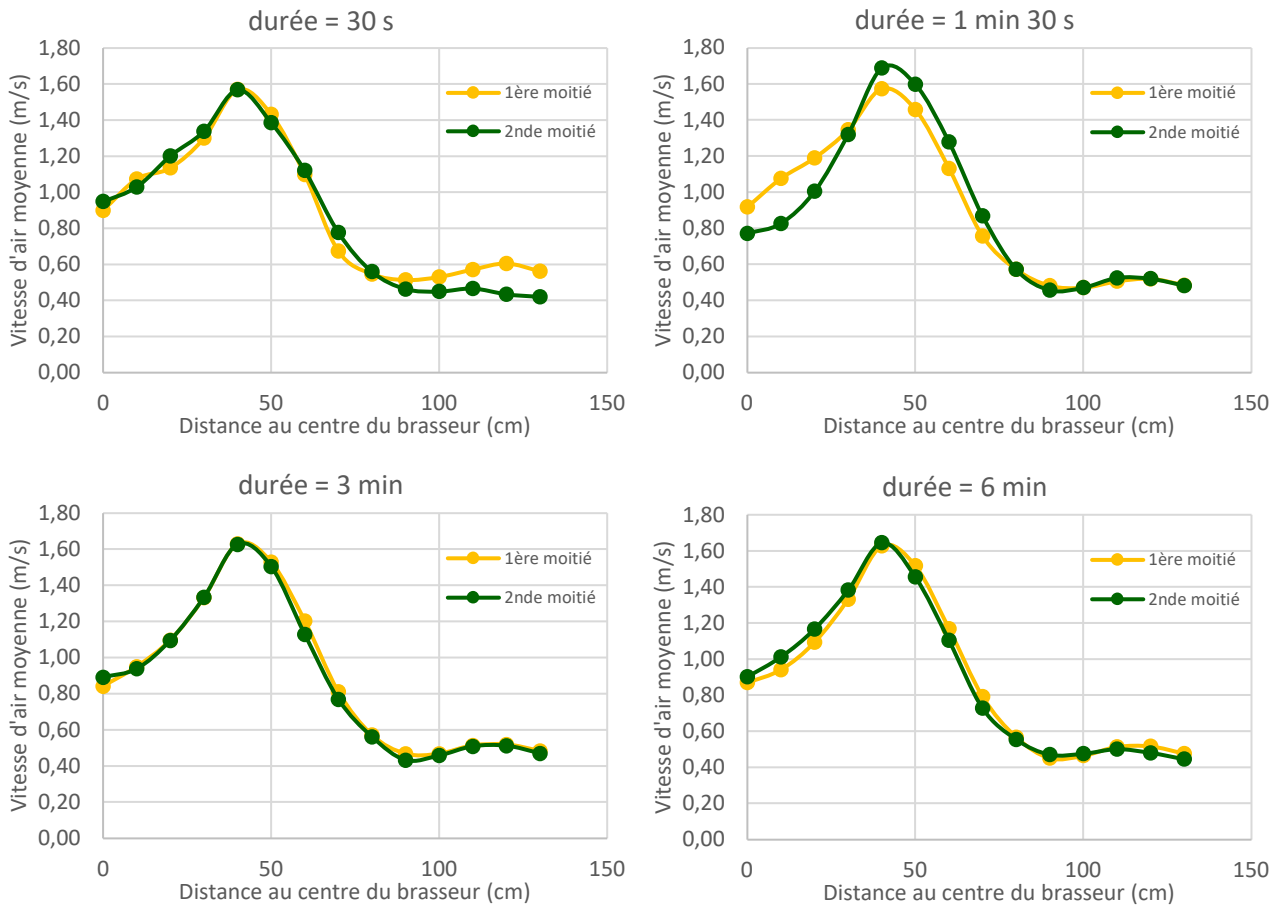
Si le régime permanent n'est pas atteint, la mesure est invalidée et le temps de stabilisation doit être incrémenté de 3 min jusqu'à un maximum de 12 min.

3.4 Echantillonnage et exactitude de la mesure

Pour cette partie, on étudie les résultats du même essai que dans la partie précédente (150 tr/min, 120 cm de hauteur et durée de 25 min) afin de valider la pertinence de la durée de mesure et de l'intervalle de temps entre deux mesures définies par la version 0 du protocole.

Afin de vérifier que le régime permanent est atteint, la Figure 20 montre la différence entre la vitesse d'air moyenne calculée sur la première moitié de la durée de l'essai et la vitesse d'air moyenne calculée sur la seconde moitié en utilisant différentes durées d'essai. On constate que l'écart relatif entre les deux moitiés de l'essai est inférieur à 10 % pour des durées d'essai supérieures à 3 min.

Résultat n°7 : Une durée d'essai de 3 min est suffisante pour vérifier l'établissement du régime permanent.



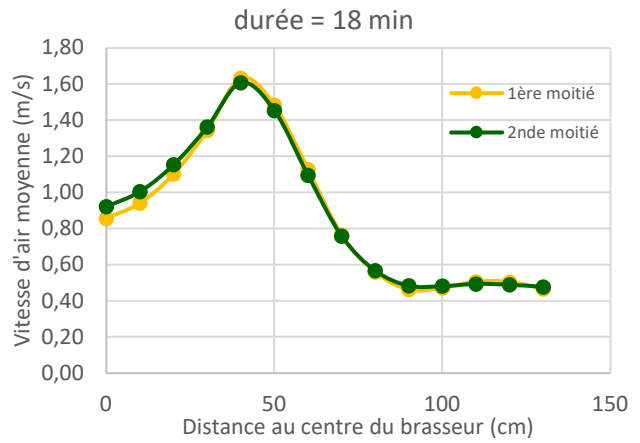
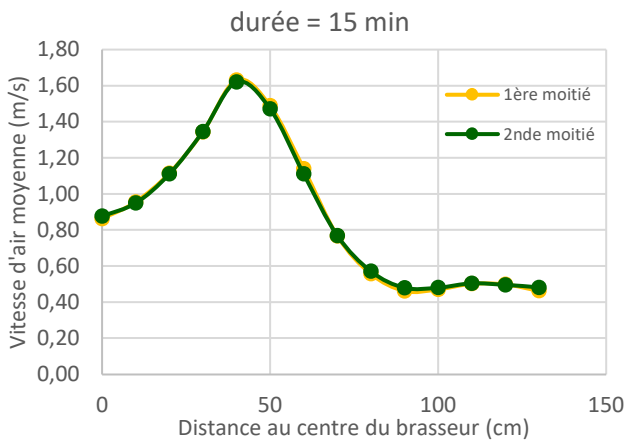
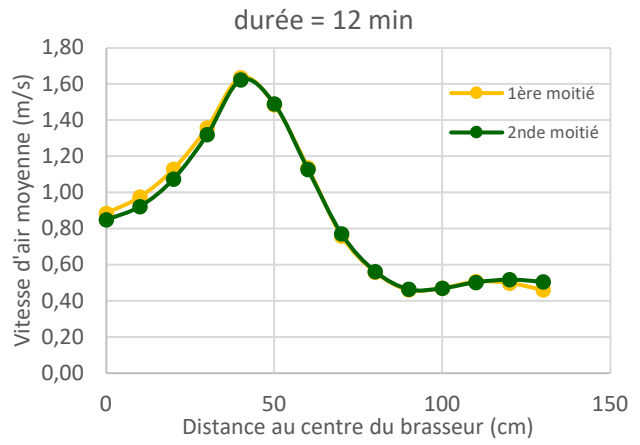
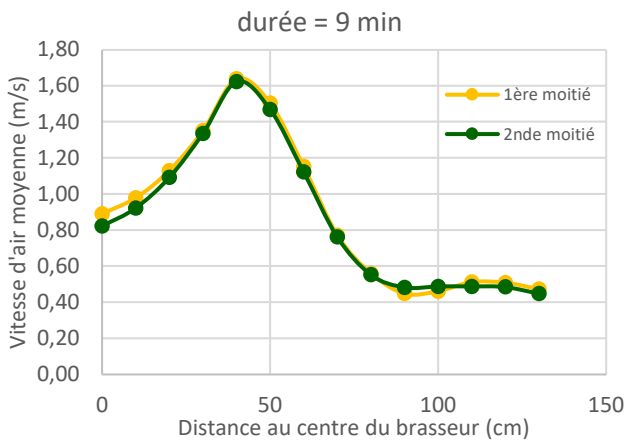


Figure 20 : Profil de vitesse obtenus sur les deux moitiés de l'essai en fonction de la durée de l'essai

La Figure 21 montre l'évolution du profil de vitesse en fonction de la durée d'essai. Plus la durée d'essai est importante, plus les valeurs de moyenne estimées convergent vers une valeur « exacte » de la moyenne. On observe que cette convergence est plus lente (de l'ordre de 9 min) dans les zones de fortes turbulences situées en bout de pales (entre 50 et 70 cm). Il conviendra donc de définir un temps de mesure adapté à chaque position de mesure afin de s'assurer de l'exactitude de la mesure.

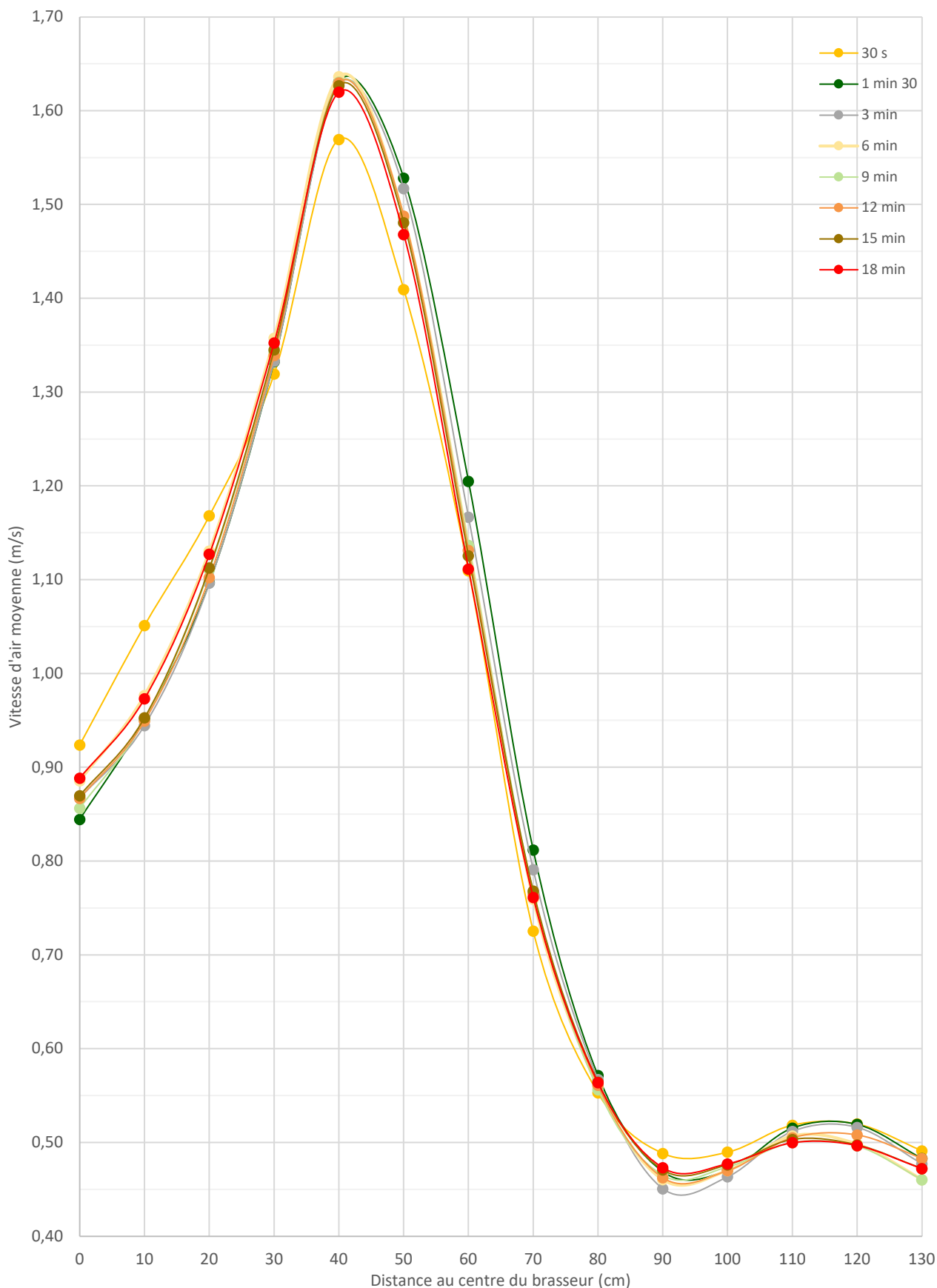


Figure 21 : Profils de vitesse obtenus en fonction des différentes durées d'essai

Afin de déterminer une durée optimum de l'essai pour obtenir une moyenne exacte, il est nécessaire de faire un test statistique en utilisant un intervalle de confiance souhaité (95% par exemple). Pour cela, il faut d'abord connaître la distribution des mesures autour de la moyenne. La Figure 22 présente les distributions de mesures pour les essais à 150 tr/min et 120 cm de hauteur. On observe que la modélisation de ces distributions par une loi normale donne une bonne corrélation.

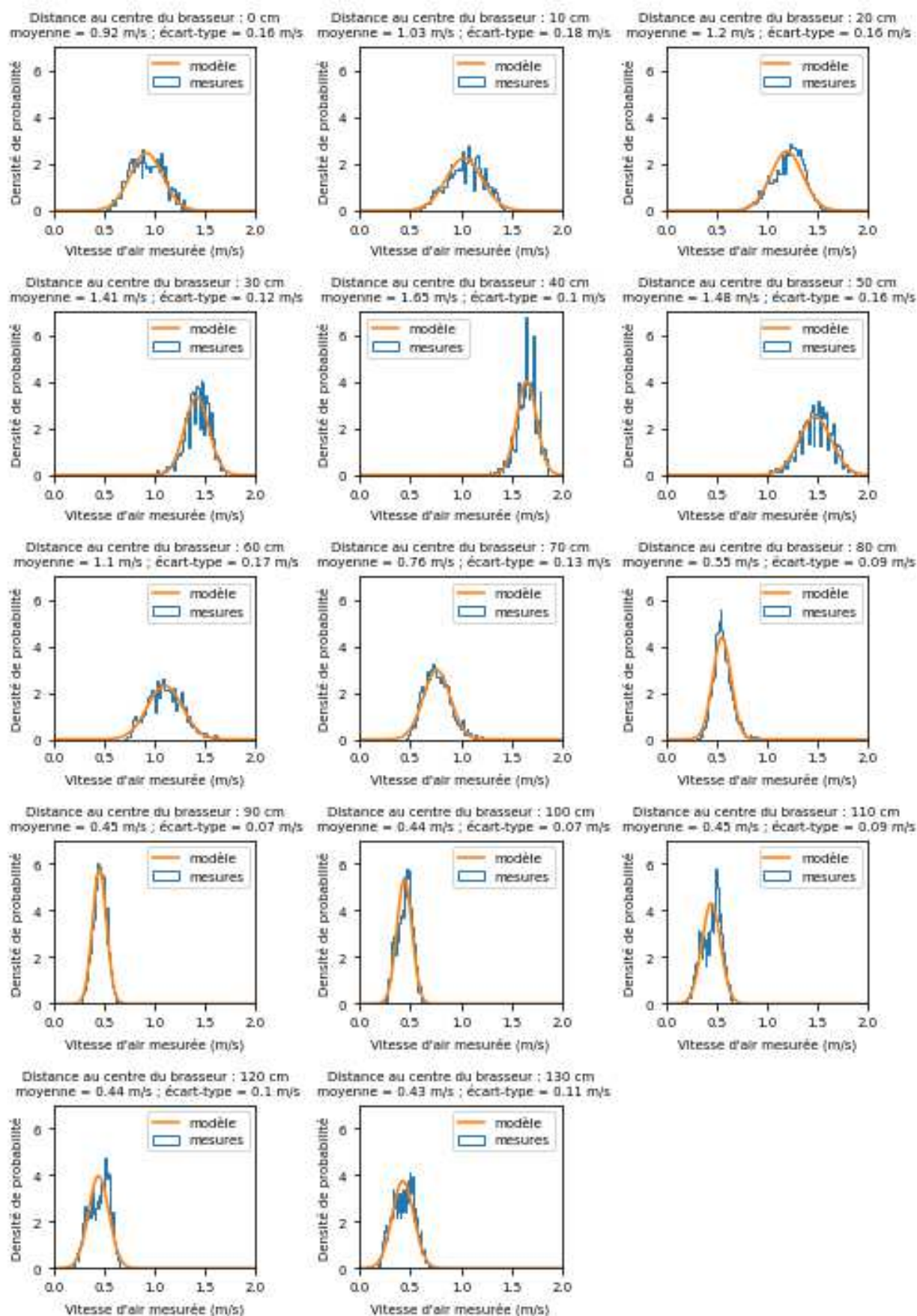


Figure 22 : Distribution des mesures de vitesse d'air à 150 tr/min et 120 cm de hauteur

Pour la loi normale, l'inégalité de concentration avec un intervalle de confiance de 95 % permettant d'obtenir une moyenne de l'échantillon M_n comprise dans un intervalle autour de l'espérance μ de la loi normale inférieur à l'incertitude de mesure $u(v_{air})$ s'écrit :

$$P(|M_n - \mu| \geq u(v_{air})) = \frac{\sigma^2}{n (u(v_{air}))^2} \leq (1 - 95\%)$$

$$n \geq \frac{\sigma^2}{(u(v_{air}))^2 (1 - 95\%)}$$

En appliquant cette démarche à l'ensemble des mesures effectuées sur une durée de 3 min à toutes les hauteurs pour les deux vitesses de rotation, on obtient les temps minimaux d'acquisition indiqués par la Figure 23 :

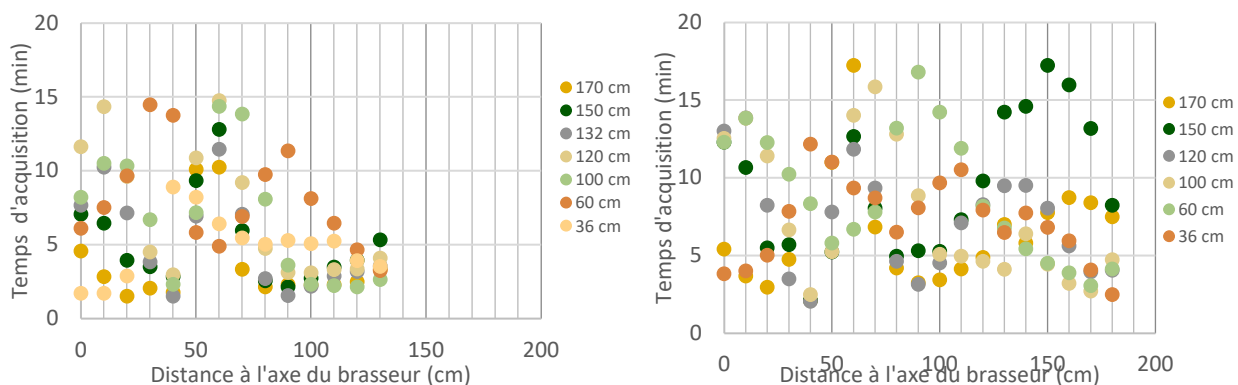


Figure 23 : Temps d'acquisition minimal pour chaque position à (a) 80 tr/min et (b) 150 tr/min (ici le calcul prend en compte l'incertitude de chaque mesure)

On constate que pour obtenir une valeur moyenne respectant les critères définis précédemment, le temps d'acquisition avec le protocole PIMENT doit être augmenté à 18 min. Il est également possible de fixer l'erreur de détermination de la valeur moyenne à l'incertitude de mesure maximale observée lors de la campagne d'essai (ici 0,06 m/s). La Figure 24 présente les temps d'acquisition minimaux avec ce critère et le temps d'acquisition maximal est réduit à 9 min.

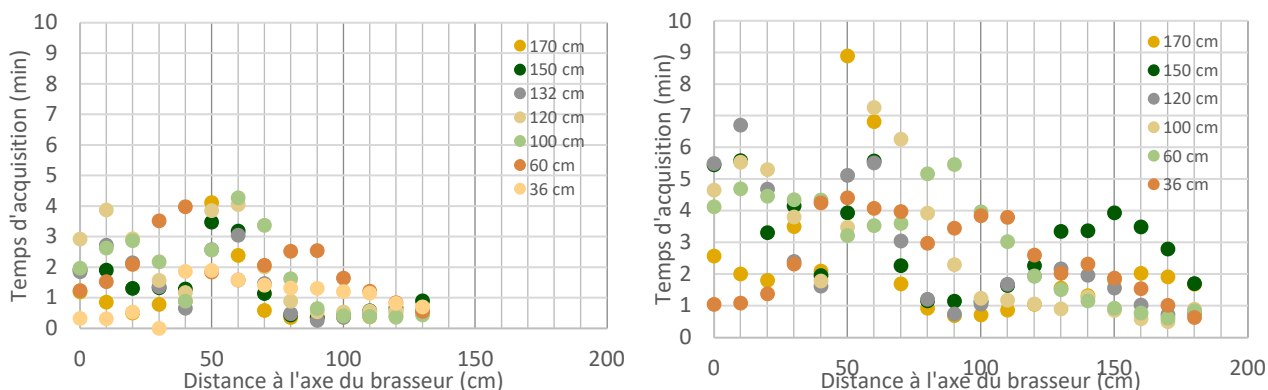


Figure 24 : Temps d'acquisition minimal pour chaque position à (a) 80 tr/min et (b) 150 tr/min (ici le calcul prend en compte une incertitude de 0,06 m/s)

Le second critère présente l'inconvénient de maximiser l'erreur aux faibles vitesses alors que l'incertitude de mesure y est moins élevée. L'étude sur l'effet de rafraîchissement induit par la vitesse d'air (présentée dans le rapport 3.2 du projet brasse) a montré l'importance de la prise en compte de la vitesse d'air dès les faibles vitesses (à partir de 0,2 m/s) que l'on peut rencontrer dans les zones de recirculation. Dans cette gamme de vitesse, la variation de l'effet ressenti avec la vitesse est très élevée et il convient donc de mesurer au mieux la vitesse d'air. En effet, pour donner un exemple, une vitesse de $0,3 \pm 0,06$ m/s donnera un effet rafraîchissant compris entre 1 et 1,7 °C alors qu'une vitesse de $0,3 \pm 0,026$ m/s donnera un effet rafraîchissant compris entre 1,2 et 1,5 °C. Cette observation faite, nous recommandons plutôt l'usage du premier critère qui utilise l'incertitude la plus faible possible.

Cependant, pour ne pas augmenter la durée d'une campagne d'essai dans des proportions déraisonnables, il est possible de convenir d'une incertitude minimale et d'une durée d'essai maximale. Par exemple, la norme ASHRAE 216 [40] fixe une limite basse d'incertitude à 0,05 m/s et une durée maximale d'essai de 12 min. La Figure 25 montre les temps d'acquisition minimaux en utilisant le critère défini par cette norme. On constate que pour l'ensemble des points de mesure, le temps d'acquisition reste inférieur à 12 min, ce qui permet d'obtenir une exactitude de mesure satisfaisante sans voir à dépasser la durée maximale de mesure.

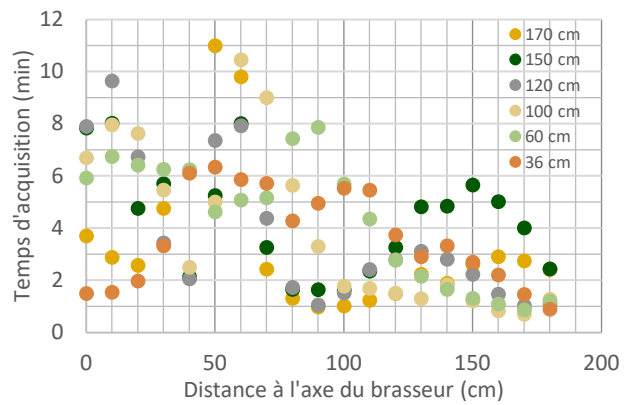
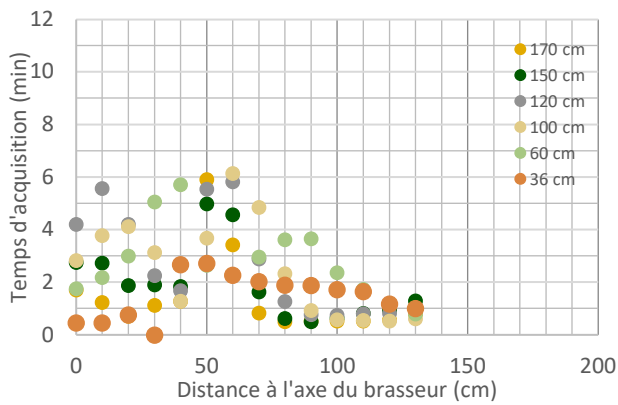


Figure 25 : Temps d'acquisition minimal pour chaque position à (a) 80 tr/min et (b) 150 tr/min
(ici le calcul prend en compte le maximum entre l'incertitude de chaque mesure et une incertitude minimale de 0,05 m/s)

La Figure 26 montre les temps minimaux d'acquisition obtenus en abaissant la valeur minimale d'incertitude à 0,04 m/s. On constate que cette fois la durée maximale de 12 min est dépassée pour un petit nombre de point de mesure à 150 tr/min, ce qui entraîne une diminution de l'exactitude de la mesure.

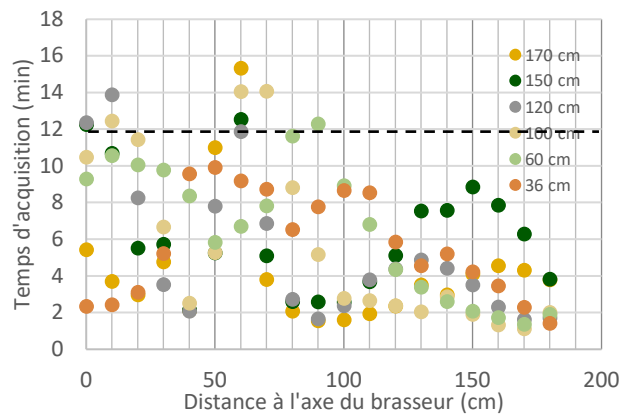
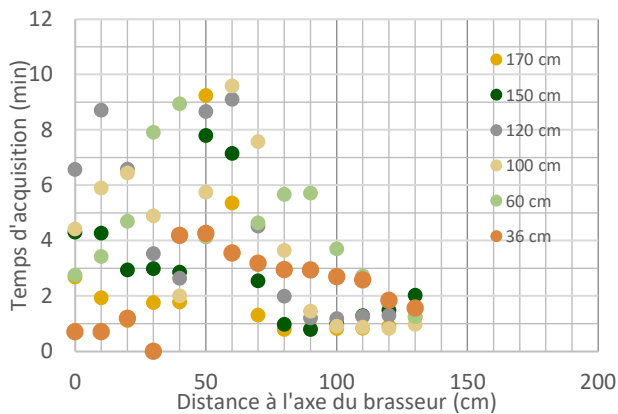


Figure 26 : Temps d'acquisition minimal pour chaque position à (a) 80 tr/min et (b) 150 tr/min
(ici le calcul prend en compte le maximum entre l'incertitude de chaque mesure et une incertitude minimale de 0,04 m/s)

Afin de minimiser la durée d'essai maximale et l'incertitude de mesure minimale, on pourrait également utiliser les mesures instantanées des capteurs (mode INST qui renvoie les mesures à une fréquence de 8 Hz) et obtenir un nombre plus élevé de points sur une durée plus courte, l'écart-type serait toutefois plus important puisque les mesures ne seraient pas moyennées sur un intervalle de 10 s. Lors d'essais réalisés avec des mesures instantanées avec à une fréquence de 5 Hz (dispositif utilisé par Surya Consultants lors des essais in-situ), nous avons constaté que l'écart-type était multiplié par un facteur 2 comparé aux essais avec une moyenne mobile sur un intervalle de 2 s. En supposant que l'écart-type soit également doublé avec une mesure instantanée à une fréquence de 8 Hz, on pourrait espérer obtenir un temps de mesure divisé par 4, soit environ 5 min sans avoir à définir de limite basse d'incertitude.

Résultat n°8 : Avec la méthode d'échantillonnage choisie par le laboratoire PIMENT, la durée de la mesure devra être augmentée jusqu'à 18 min pour avoir une erreur inférieure à l'incertitude de mesure du capteur avec un intervalle de confiance à 95 %.

Les mesures réalisées au laboratoire Eiffel n'étant pas enregistrées par la centrale d'acquisition, il n'a pas été possible de réaliser la même analyse avec leur méthode d'échantillonnage.

RECOMMANDATION N°3 :

La durée minimale d'acquisition est fixée à 3 min.

Tous les essais devront être validés en vérifiant que le temps d'acquisition est suffisant pour obtenir à la fois le régime permanent et une vitesse moyenne considérée exacte, c'est-à-dire en faisant une erreur inférieure à 0,05 m/s avec un intervalle de confiance à 95 %.

Si ce test n'est pas vérifié, le temps d'acquisition pourra être augmenté par incréments de 3 min jusqu'à un maximum de 12 min.

3.5 Répétabilité de la mesure

Six essais de répétabilité ont été effectués au laboratoire PIMENT à une hauteur de 120 cm et une vitesse de rotation de 150 tr/min sur chacun des trois axes. Ces essais ont été réalisés à des dates différentes et, pour certains, après démontage et remontage du brasseur et du banc de mesure. La Figure 27 montre les profils de vitesse moyenne et les écarts-types pour chaque répétition sur les différents axes. On observe une répétabilité satisfaisante entre les différents essais pour l'obtention des profils de vitesse bien qu'il y ait de variations sensibles pour les écarts-types dont les valeurs restent toutefois cohérentes avec la littérature [29]. On observe par ailleurs que l'écart type varie essentiellement dans les zones de fortes turbulences au centre du brasseur et en bout de pales, confirmant ainsi la nécessité d'ajuster le temps d'acquisition dans ces zones selon les principes énoncés dans la partie précédente.

Résultat n°9 : Le protocole PIMENT permet la répétabilité de la mesure.

Les tests de répétabilité n'ayant pas pu être réalisés au laboratoire Eiffel, il n'a pas été possible de réaliser la même analyse.

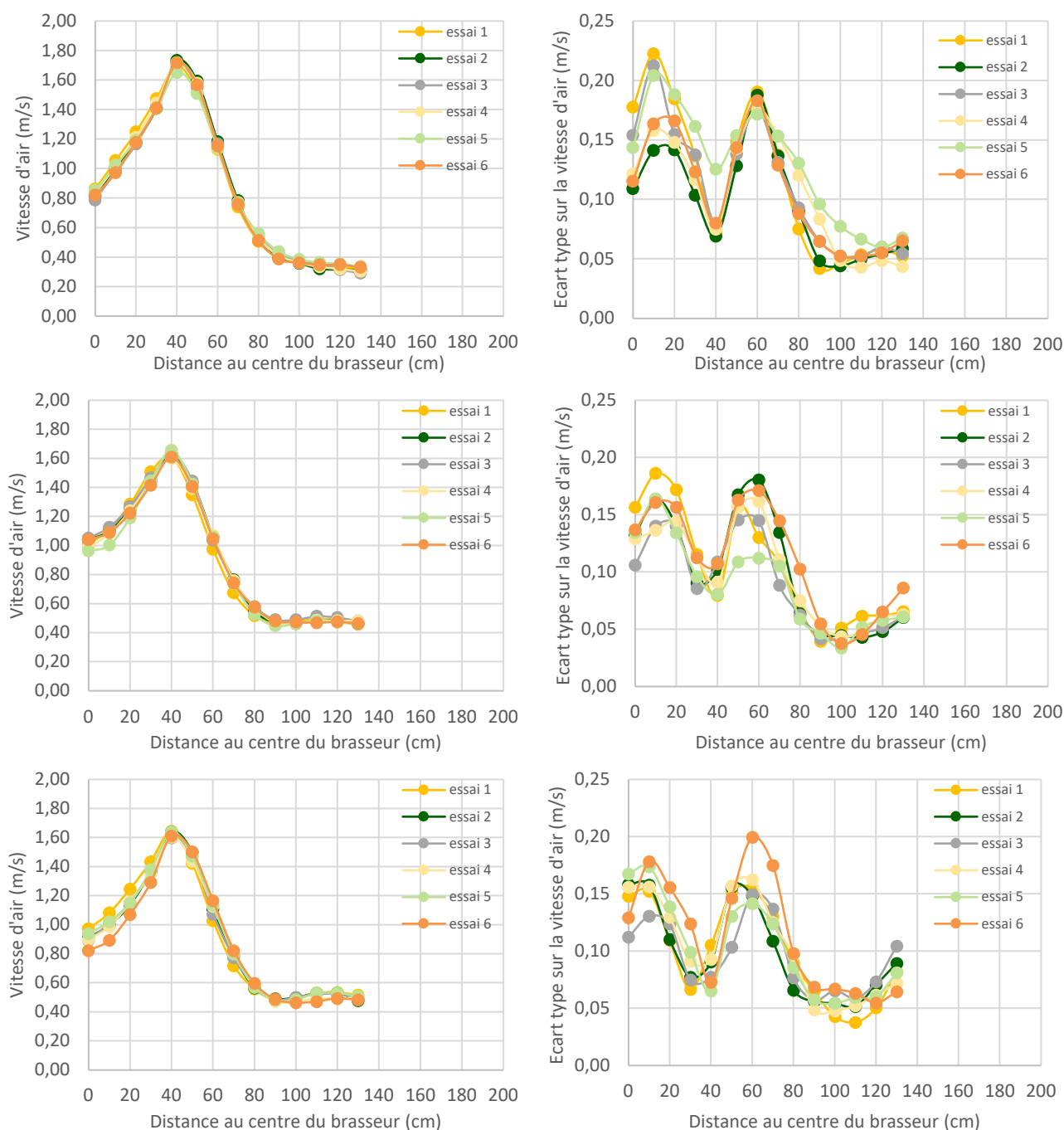


Figure 27 : Profils de vitesse et écarts-type pour les différentes répétitions à 150 tr/min et une hauteur de 120 cm : (a) axe 0°, (b) axe 120° et (c) axe 240°

3.6 Hypothèse de distribution radiale de la vitesse d'air

La géométrie de la chambre de mesure a été choisie de façon à obtenir des symétries suffisantes pour que la vitesse d'air ne dépende que de la distance au brasseur (distribution radiale). Les Figure 28 et 26 montrent les profils de vitesse mesurés sur les trois axes de la chambre du laboratoire PIMENT aux différentes hauteurs et vitesses de rotation. Hormis quelques petites divergences sur certains essais qui restent toutefois inférieurs aux écarts-type, on constate que l'hypothèse de distribution radiale de la vitesse d'air est vérifiée. Il est donc possible de calculer un profil de vitesse moyen ne dépendant pas de la position de l'axe de mesure. La validité de cette hypothèse permettra également de n'effectuer les mesures que sur un seul axe. Afin de pouvoir relier la vitesse moyenne dans la zone se situant entre le brasseur et les murs avec la distance qui les sépare [26], il est préférable de mesurer le profil de vitesse entre le centre du brasseur et la paroi la plus proche. Cela conduit à réaliser la mesure sur un des axes allant vers le centre d'une paroi.

Résultat n°10 : L'hypothèse de distribution radiale de la vitesse d'aire est vérifiée dans la chambre de mesure fermée

RECOMMANDATION N°4 :

La mesure est effectuée sur un seul axe radial allant du centre du brasseur vers le centre de l'une des parois (point le plus proche du brasseur).

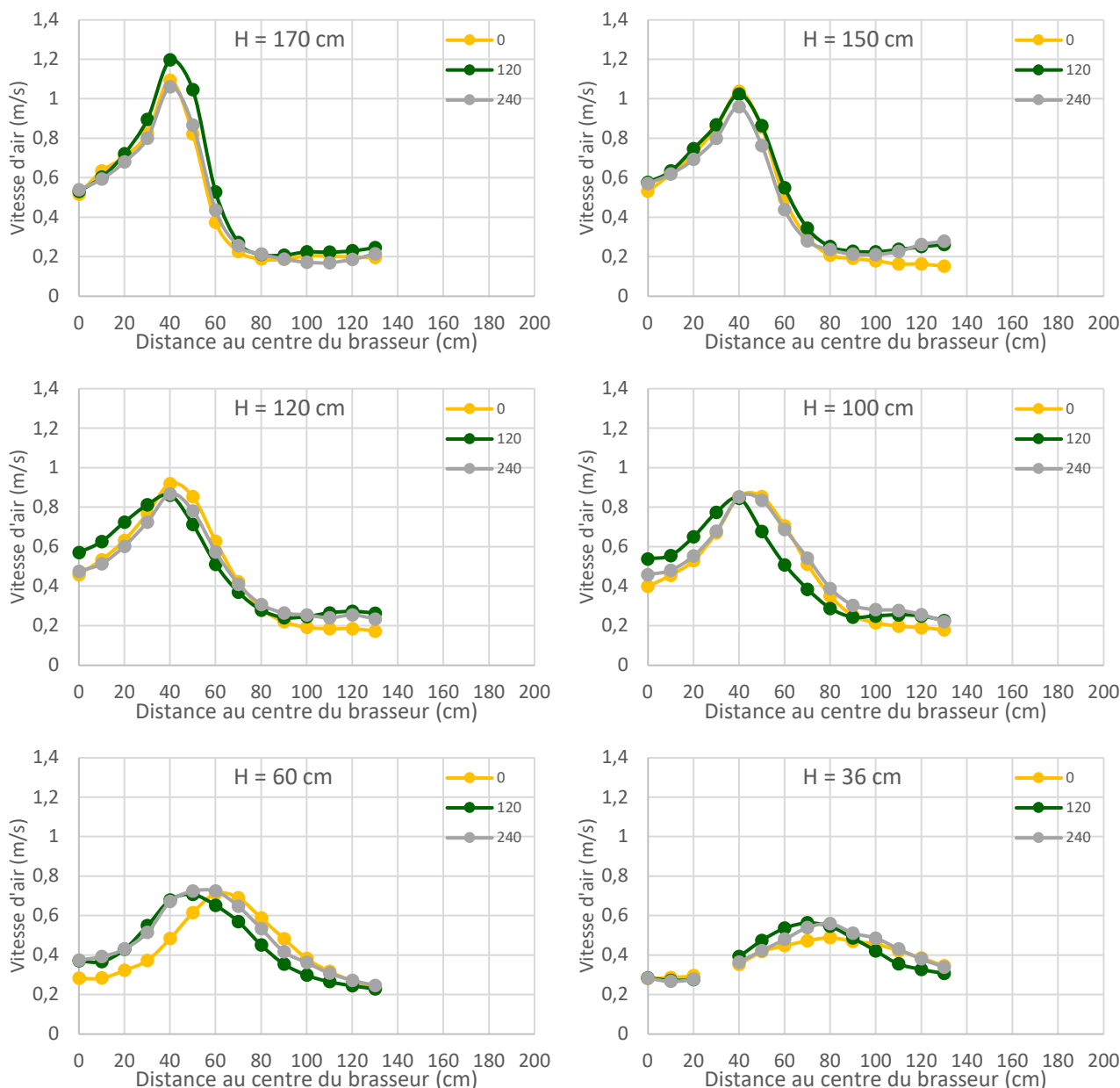


Figure 28 : Profils de vitesse à 80 tr/min

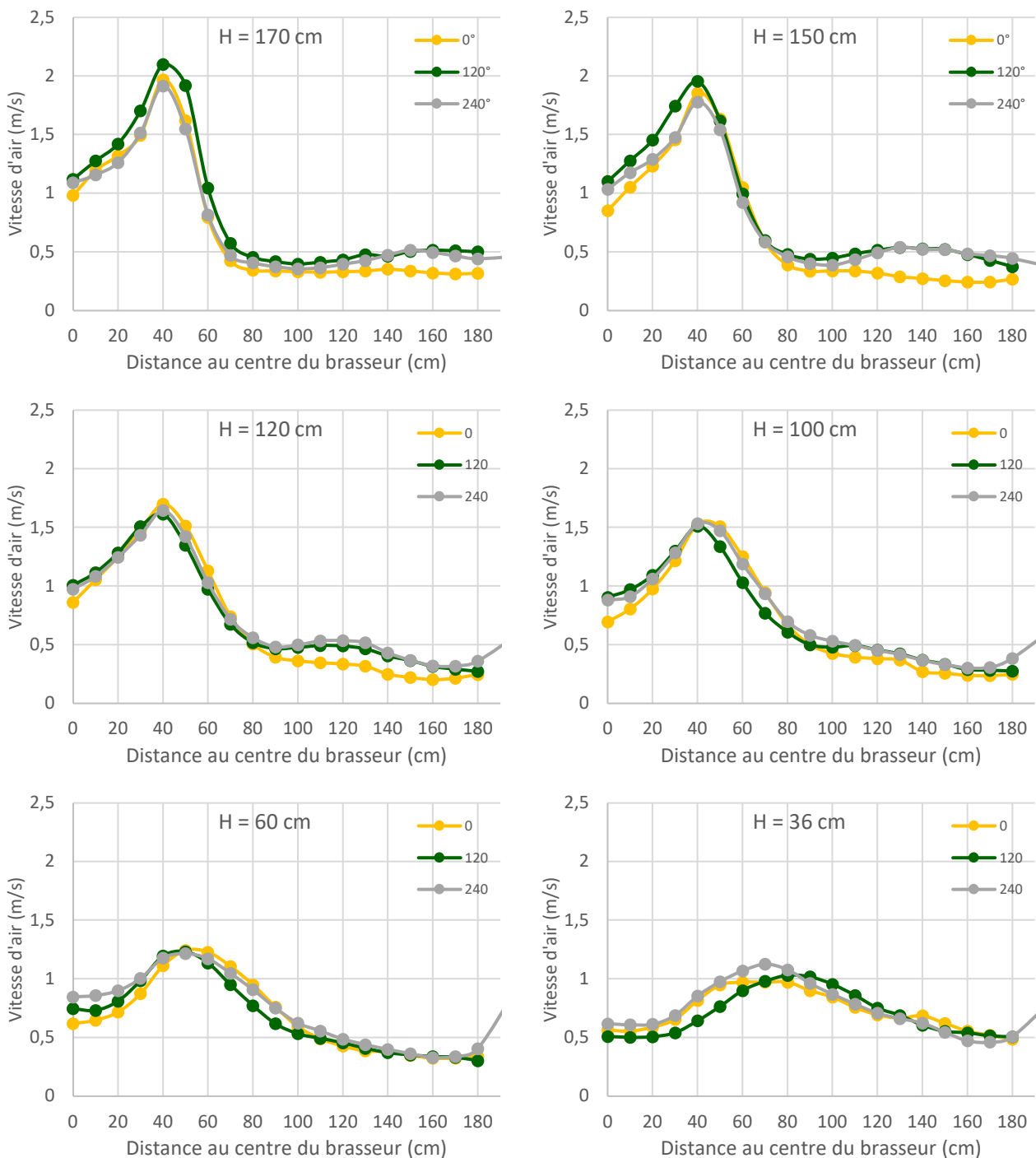


Figure 29 : Profils de vitesse à 150 tr/min

Sur la Figure 29, on peut observer la mesure du courant ascendant le long de la paroi (mesurée à 2 cm du mur). Cette observation est cohérente avec le fonctionnement attendu d'un brasseur et son impact sur les courants dans un local notamment à proximité d'une paroi. La littérature scientifique prouve par ailleurs que la valeur de la vitesse d'air en ce point n'impacte pas les valeurs des vitesses sous le brasseur et dans la zone de recirculation, s'y tenté que la distance brasseur d'air/mur respecte les préconisations énoncées précédemment [33]. De plus, la mesure de ce courant d'air particulier ne semble pas utile puisque la surface concernée par ce phénomène est trop petite pour qu'un usager puisse s'y placer dans le but ressentir un éventuel effet rafraichissant. Nous recommandons donc de ne pas effectuer de mesure de vitesse pour des points situés à moins de 20 cm de la paroi.

3.7 Reproductibilité de la mesure entre les deux laboratoires

Afin d'étudier la reproductibilité du protocole expérimental en configuration fermée entre les deux laboratoires, il a été décidé de refaire des essais à 120 cm de hauteur et 150 tr/min au laboratoire PIMENT en utilisant le système d'axes du laboratoire Eiffel. La Figure 30 montre que le profil de vitesse obtenu sur les axes X- et Y sont similaires. On observe toutefois une différence importante entre les deux profils obtenus sur l'axe X+, ce qui infirme cette fois l'hypothèse d'une distribution radiale des profils de vitesse. Des essais supplémentaires sont nécessaires afin de comprendre l'origine de cette dissymétrie obtenue lors de cette série d'essais au laboratoire PIMENT qui pourrait s'expliquer par un certain nombre de modifications comparé aux séries précédentes (changement d'opérateur, nouvelle calibration des anémomètres, conditions climatiques).

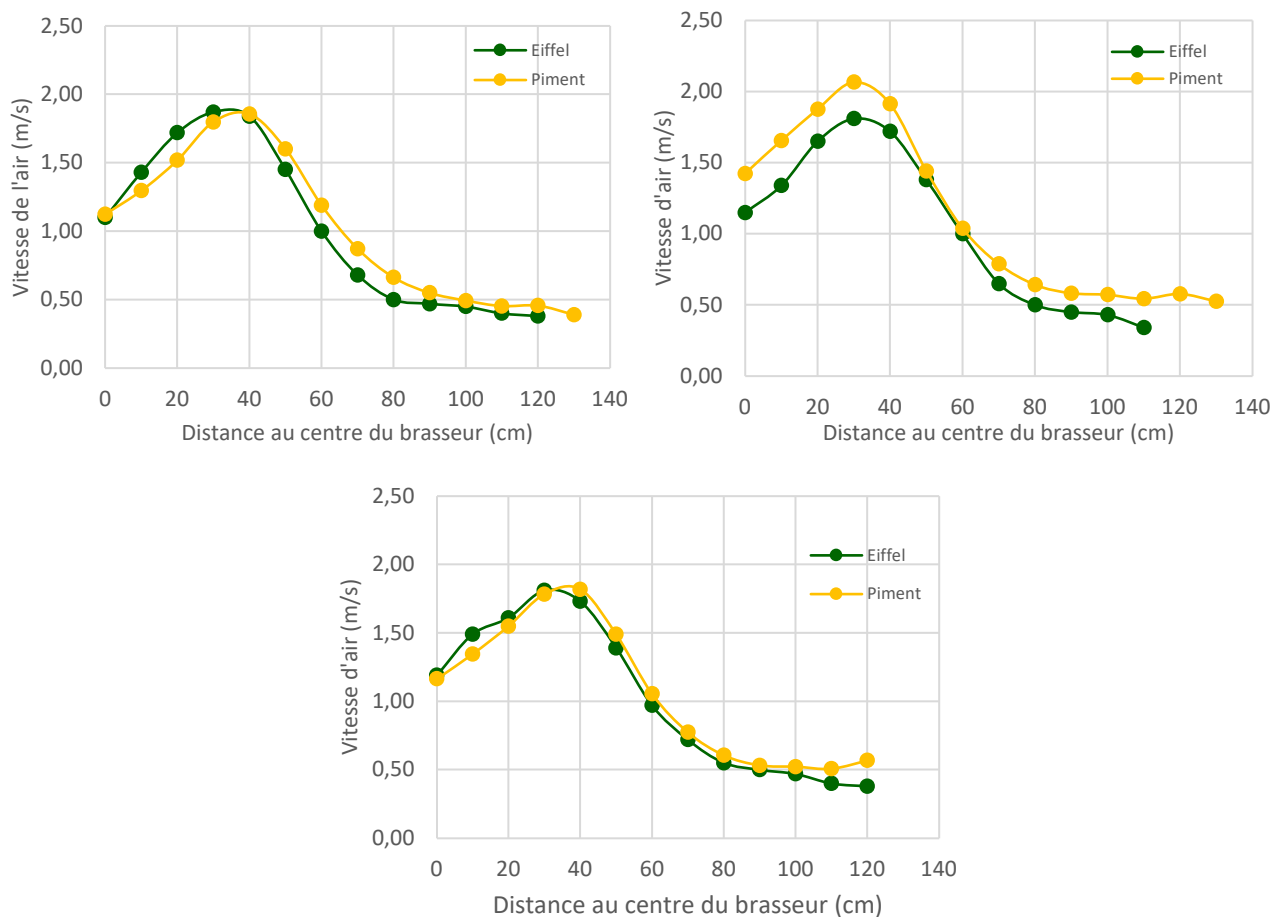


Figure 30 : Reproductibilité du protocole entre les deux laboratoires : (a) axe X-, (b) axe X+ et (c) axe Y

Les valeurs obtenues lors de cette campagne sont également très supérieures (écart supérieur à 10%) aux valeurs obtenues lors de la campagne précédente avec l'autre système d'axe.

La Figure 31 montre les profils de vitesse obtenus sur l'axe X- (ou 240° selon l'autre nomenclature) lors des deux campagnes d'essais. Ces deux campagnes ont été réalisées à des saisons différentes et la différence de température entre ces deux périodes était en moyenne de 5 °C. Ces deux campagnes ont également été menées par deux opérateurs différents. Ces expériences devraient être répétées afin de mieux comprendre l'origine de ces différences et notamment l'influence particulière de la température dans la chambre de mesure en la contrôlant avec un système de climatisation.

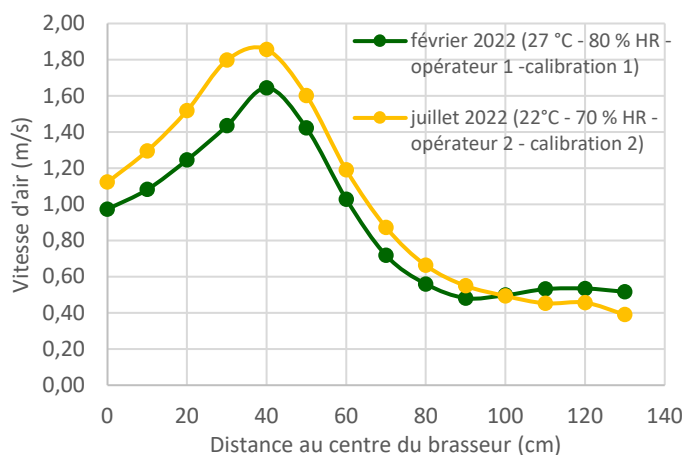


Figure 31 : Profils de vitesse à 120 cm de hauteur et 150 tr/min sur l'axe X- (240°) obtenus lors des deux campagnes différentes

Résultat n°11 : La reproductibilité entre les deux laboratoires et avec des opérateurs différents n'est pas encore pleinement satisfaisante, il faudra de nouveaux essais pour comprendre la raison de ces différences.

4. Conclusion

Dans le cadre du projet BRASSE, des essais en laboratoire ont été réalisés dans deux laboratoires différents : le laboratoire PIMENT (Le Tampon- La Réunion) et le laboratoire EIFFEL (Paris). L'objectif de cette étude est d'évaluer la qualité métrologique (exactitude, répétabilité et reproductibilité) de la mesure de vitesse d'air à la fois au sein de chaque laboratoire mais également entre les deux laboratoires.

L'étude de deux configurations différentes (« ouverte » et « fermée ») a permis de conclure que la configuration fermée symétrique (i.e. avec le brasseur placé au centre de 4 murs) est la seule configuration permettant d'obtenir un champ de vitesse à symétrie radiale.

Les essais en laboratoire ainsi que l'analyse de littérature technique et scientifique et les échanges que nous avons eu avec Paul Raftery (CBE Berkeley) ont permis d'établir un certain nombre de contraintes sur la chambre de mesure et les dimensions des brasseurs associées. Ainsi, selon les critères que nous avons retenus, les dimensions des chambres de mesure actuelles (4 x 4 x 2,5 m) permettent de caractériser des brasseurs jusqu'à 160 cm de diamètre. Pour les brasseurs de taille supérieure à 160 cm, trois tailles de chambre de mesure supplémentaires sont recommandées.

Les analyses des essais réalisés ont permis de conclure que le choix du support et l'orientation des capteurs n'a pas d'impact significatif sur la mesure, qu'un espacement de 10 cm entre les positions de mesures peut être conservé et que la mesure peut être effectuée sur un seul axe radial allant du centre du brasseur vers le centre de l'une des parois.

Dans le cas du brasseur témoin, il a été prouvé qu'un temps de stabilisation de 30 secondes est suffisamment long pour obtenir le régime permanent. Dans l'impossibilité de vérifier cette durée pour un grand nombre de brasseur, nous recommandons, en accord avec la littérature, d'utiliser une durée minimale de 3 min et un test de vérification de l'établissement du régime permanent.

Il a été établi que, selon les critères d'exactitude utilisés, une durée d'essai de 3 min est insuffisante pour la plupart des points de mesure et en particulier pour ceux où le niveau de turbulence est important. Nous recommandons donc valider tous les essais par un test vérifiant que le temps d'acquisition choisi est suffisant pour obtenir une vitesse moyenne considérée exacte, c'est-à-dire en faisant une erreur inférieure à l'incertitude de mesure de 0,05 m/s avec un intervalle de confiance à 95 %.

Il est également montré que, d'après les résultats issus du laboratoire PIMENT, le protocole permet la répétabilité de la mesure mais que la reproductibilité avec des opérateurs différents et entre les deux laboratoires n'est pas encore pleinement satisfaisante. Sur ce dernier point, il faudra de nouveaux essais pour comprendre la raison de ces différences.

Des essais complémentaires permettant de confirmer ou de préciser certaines de ces conclusions pourraient être nécessaires. Par exemple, une série d'essais réalisés par le laboratoire PIMENT montrent une dissymétrie. Des essais supplémentaires seront nécessaires afin de comprendre l'origine de cette dissymétrie qui pourrait s'expliquer par un certain nombre de modifications comparé aux séries précédentes (changement d'opérateur, nouvelle calibration des anémomètres, conditions climatiques). Il faudrait également étudier l'impact d'autres fréquences d'échantillonnage sur la durée de mesure nécessaire pour obtenir l'exactitude souhaitée.

La plupart des conclusions de cette étude a été tiré à partir des essais réalisés au sein du Laboratoire PIMENT. En effet, l'exactitude de mesure, la méthode d'échantillonnage et le test de répétabilité par exemple n'ont pas pu être étudié sur les résultats des essais d'Eiffel par manque de données.

Le protocole défini ici sera appliqué sur un panel d'une dizaine de brasseurs entre 100 et 160 cm dans le but d'établir les premiers éléments de la base de données BRASSE, ce qui permettra de vérifier s'il est généralisable à l'ensemble des brasseurs dans cette gamme de dimensions.

Cet article a donc permis de confirmer, d'ajuster et d'infirmier les éléments liés à la partie mesure du protocole d'essais en laboratoire du projet BRASSE. Pour finaliser le protocole, il est désormais nécessaire de valider la partie analyse des résultats et détermination des indicateurs de confort et de performances. Ceci est l'objet de la partie 2 : détermination des indicateurs de confort et de performances.

Bibliographie :

- [1] Santamouris M. (2016) Cooling the buildings – past, present and future, *Energy and Buildings*, vol. 128, p. 617-638
- [2] Santamouris M., Cartalis C., Synnefa A. (2015) On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review, *Energy and Buildings*, vol. 98, p. 119-124
- [3] Bamdad K., Cholette M. E., Omrani S., Bell J. (2021) Future energy-optimised buildings — Addressing the impact of climate change on buildings, *Energy and Buildings*, vol. 231, p. 110610
- [4] Bamdad K., Cholette M. E., Guan L. (2017) Ant colony algorithm for building energy optimisation problems and comparison with benchmark algorithms, *Energy and Buildings*, vol. 154, p. 404-414
- [5] Bamdad K., Cholette M. E., Guan L. (2018) Building energy optimisation under uncertainty using ACOMV algorithm, *Energy and Buildings*, vol. 167, p. 322-333
- [6] Yang B., Wang F. (2018) Supplementary opinions on alternative cooling technologies in hot climate, *International Journal of Biometeorology*, vol. 62, p. 1927-1928
- [7] Sadripour S., Mollamahdi M., Sheikhzadeh G. A. (2017) Providing thermal comfort and saving energy inside the buildings using a ceiling fan in heating systems, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 39, p. 4219-4230
- [8] Mihara K., Sekhar C., Takemasa Y. (2019) Thermal comfort and energy performance of a dedicated outdoor air system with ceiling fans in hot and humid climate, *Energy and Buildings*, vol. 203, p. 109-118
- [9] He Y., Chen W., Wang Z., Zhang H. (2019) Review of fan-use rates in field studies and their effects on thermal comfort, energy conservation, and human productivity, *Energy and Buildings*, vol. 194, p. 140-162
- [10] Litvine D., De Laage R., Hoarau S. (2022) Analyse de l'acceptabilité et des conditions de déploiement des brasseurs d'air : Une étude qualitative de l'offre et de la demande. Tache 4 du Projet BRASSE – Pour le compte de l'ADEME
- [11] Le Berigot T, Bœuf F, Ossakowsky P, David M, Garde F, Litvine D, De Laage R, Vasquez C (2021) Rapport d'avancement du projet BRASSE : Étude des performances, de l'impact sur le confort et de l'acceptabilité des brasseurs d'air en réponse aux changements climatiques. 32 pages.
- [12] Hunter Industrie II, Product specification sheet,
https://cdn.shopify.com/s/files/1/0542/0698/8471/files/24545_Industrie_II.pdf?v=1618334700
- [13] Hunter Industrie II, Fiche technique,
<https://www.construction21.org/france/data/sources/users/1438/annexe-7---fiche-brasseur-dair.pdf>
- [14] Anémomètre SensoAnemo 5100 LSF, fiche technique,
http://www.sensor-electronic.pl/pdf/MAN_AirDistSys5000.pdf
- [15] Gueux L, Travaux sur les méthodes de mesures des performances des brasseurs d'air dans le cadre du projet BRASSE, rapport de stage d'ingénieur au Laboratoire PIMENT, ENSI Poitiers.
- [16] Anémomètre télescopique à boule chaude Testo 0635 1051, fiche technique,
<https://static-int.testo.com/media/4a/93/e679058284a3/testo-Sondes-climatiques-cble-fixe-Mode-d'emploi.pdf>
- [17] ASHRAE Standard 55 (2020), Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- [18] Tachymètre CTA, Kimo instruments, fiche technique
https://www.testoon.com/Fichier/A/FICHIER_LIE_A_55173.pdf
- [19] Tachymètre PCE-DT-65, PCE-instruments, fiche technique
https://www.pce-instruments.com/french/api/getartfile?_fnr=948573&_dsp=inline
- [20] Station météo Testo 174H, Fiche technique,
<https://static-int.testo.com/media/c2/71/81a18d3b30d1/Doc-174H-200982-3823.pdf>
- [21] Station météo Excelvan, Fiche technique,
<https://fr.aliexpress.com/i/32986031206.html>

- [22] Chen W., Liu S., Gao Y., Zhang H., Arens E., Zhao L., Liu J. (2017) Experimental and numerical investigations of indoor air movement distribution with an office ceiling fan, *Building and Environment*, vol. 130, p. 14-26.
- [23] Gao Y., Zhang H., Arens E., Present E., Ning B., Zhai Y., Pantelic J., Luo M., Zhao L., Raftery P., Liu S. (2017) Ceiling fan air speeds around desks and office partitions, *Building and Environment*, vol. 124, p. 412-440.
- [24] Liu S., Lipczynska A., Schiavon S., Arens E. (2018) Detailed experimental investigation of air speed field induced by ceiling fans. *Building and Environment*, vol. 142, p. 342-360.
- [25] Wang H., Zhang H., Hu X., Luo M., Wang G., Li X., Zhu Y. (2019) Measurement of airflow pattern induced by ceiling fan with quad-view colour sequence particle streak velocimetry, *Building and Environment*, vol. 152, p. 122-134.
- [26] Raftery P., Fizer J., Chen W., He Y., Zhang H., Arens E., Schiavon S., Paliaga G. (2019) Ceiling fans: Predicting indoor air speeds based on full scale laboratory measurements, *Building and Environment*, vol. 155, p. 210-223.
- [27] Raftery P., Brager G., Graham L. (2019) Ceiling Fans in Commercial Buildings: In Situ Airspeeds & Practitioner Experience. *Building and Environment*, vol. 147, p. 241-257
- [28] Zhai Y., Elsworth C., Zhang H., Arens E., Zhang Y., Zhao L. (2015) Using air movement for comfort during moderate exercise, *Building and Environment*, vol. 94, p. 344-352
- [29] Luo M., Zhang H., Raftery P., Zhou L., Parkinson T., Arens E., He Y., Present E. (2021) Detailed measured air speed distribution in four commercial buildings with ceiling fans, *Building and environment*, 200, p. 107979
- [30] Babich F., Cook M., Loveday D., Rawal R., Shukla Y. (2017), Transient three-dimensional CFD modelling of ceiling fans, *Building and Environment*, vol. 123, p. 37-49
- [31] Faria L.C.d., Romero M.d.A., Porras-Amores C., Pirró L.F.d.S., Saez P.V. (2022) Prediction of the impact of air speed produced by a mechanical fan and operative temperature on the thermal sensation, *Buildings*, vol. 12, p. 101
- [32] Momoi, Y., Sagara K., Yamanaka T., Kotani H., Kuise M. (2005) Modeling of ceiling fan based on velocity measurement for CFD simulation of airflow in large room, *Journal of environmental engineering*, vol. 595, p 41-48
- [33] Big Ass Fans, Fan distance guidelines,
<https://tbcsupply.com/wp-content/uploads/2022/06/Fan-Distance-Guidelines.pdf>
- [34] Energy Star, Ceiling fan Basics,
https://www.energystar.gov/products/lighting_fans/ceiling_fans/ceiling_fan_basics
- [35] Blanchard B. (2019) Mise au point d'un banc d'essais pour la caractérisation des brasseurs d'air, rapport d'étude EDF-ADEME n° Aé - 19-123, Eiffel Aérodynamique.
- [36] Gandemer J. (2018) Etude méthodologique de qualification aéroulque des Brasseurs d'Air dans leur contexte d'utilisation- Caractérisation et critères d'efficacités aéroulques, rapport d'étude EDF-ADEME n° Aé - 19-123, Eiffel Aéroulque.
- [37] Raftery P., Douglass-Jaimes D. (2020), *Ceiling Fan Design Guide*, First Edition, CBE Berkeley.
- [38] NF EN CEI 60335-2-80 (2002), Appareils électrouestiques et analogues – Sécurité – Partie 2-80 : Règles particulières pour les ventilateurs
- [39] ASHRAE. Performance Measurement Protocols for Commercial Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Atlanta (2012)
- [40] ASHRAE Standard 216 (2020), Methods of test for determining application data of overhead circulator fans