THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
Opérée au sein de
L'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

***Ecole Doctorale** N° accréditation 162*
MEGA (Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique)

***Spécialité / discipline de doctorat** : ENERGETIQUE*

par :
Gabriel, André, Henri REMION

Mesure in situ des performances aérauliques d'un système de ventilation naturelle par conduit

---

Devant le jury composé de :

Stabat, Pascal	*Professeur*	*Mines Paristech*	*Rapporteur*
Lassue, Stéphane	*Professeur*	*Université d'Artois*	*Rapporteur*
Musy, Marjorie	*Professeur*	*Cerema Ouest*	*Examinatrice*
Laverge, Jelle	*A. Professeur*	*Université UGent*	*Examinateur*
Giroux, Stéphanie	*Docteur*	*Université Lyon 1*	*Examinatrice*
Rouchier, Simon	*Docteur*	*Université Savoie Mt Bc*	*Examinateur*
Moujalled, Bassam	*Docteur*	*Cerema Centre-Est*	*Co-directeur*
El Mankibi, Mohamed	*Professeur*	*ENTPE*	*Directeur*
Allard, Francis	*Professeur Emérite*	*Université La Rochelle*	*Invité*
Mos, Antoine	*Docteur*	*CETU*	*Invité*

Abstract

The PhD thesis presented in this manuscript aims at developing a measurement protocol able to assess the real performance of natural ventilation systems in dwellings. It particularly focuses on passive-stack ventilation systems, which represent a large part of natural ventilation systems implemented in French dwellings and which are involved in hybrid ventilation systems. Measuring the aeraulic performance of natural ventilation is a challenging task, which is even more challenging when speaking of multi-zones buildings. The presented work first identifies the tracer gas decay method as the most suitable method to assess natural ventilation's aeraulic performance. Its reliability is experimentally and numerically increased thanks to a procedure that pre-treats concentration data, and to the implementation of the Kalman filter. Both allow to overcome constraints that the application of a tracer gas method in a multi-zones dwelling brings. Finally, a turnkey solution is proposed that allows any measurer to measure the aeraulic performance of a passive-stack ventilation system implemented in a multi-zones dwelling.

Remerciements

J'ai réalisé ce travail de thèse en collaboration avec l'équipe Bâtiment du Cerema Centre-Est de l'isle d'Abeau, l'équipe de recherche 'Bâtiment Performant dans son Environnement' du Cerema, et le 'Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Structures', dans l'équipe construction durable basée en partie à l'ENTPE. Je souhaite remercier ces trois entités qui m'ont chacune accueilli très chaleureusement. Faire partie intégrante de plusieurs équipes m'a réellement permis de m'épanouir professionnellement et personnellement durant ce projet.

Je voudrais ensuite exprimer ma profonde reconnaissance envers Bassam Moujalled qui a su encadrer cette thèse de la meilleure manière qui soit, de par sa disponibilité, son soutien technique, et la confiance qu'il a su me donner tout au long de ces trois années et demi. Il m'a été d'un soutien sans failles, et j'ai particulièrement apprécié sa qualité d'écoute qui a rendu notre collaboration très agréable.

Je souhaite également remercier tout particulièrement Mohamed El Mankibi, qui a dirigé ce travail de thèse. Il m'a apporté le recul qui peut manquer dans les moments plus compliqués et un enseignement des plus marquants : l'adaptabilité qui le caractérise si bien, qu'il prône au quotidien et lui permet de toujours trouver une solution. Cette qualité sur laquelle peuvent s'appuyer ses doctorants permet d'envisager les obstacles plus sereinement. Mohamed sait également fédérer ses équipes multiculturelles autour d'un projet commun, en proposant au-delà du côté académique, des moments de convivialité très appréciés de tous.

Mes remerciements les plus sincères vont aux Professeurs Pascal Stabat et Stéphane Lassue d'avoir accepté de rapporter ce travail. De la même manière, je remercie la Pr. Marjorie Musy et Mme. Stéphanie Giroux, ainsi que M. Jelle Laverge et Simon Rouchier d'avoir accepté de faire partie des membres du Jury.

Je remercie également le Professeur émérite Francis Allard de me faire l'honneur de juger de mon travail en tant que membre invité de mon jury.
Merci également à M. Antoine Mos d'avoir accepté l'invitation.
J'ai également une pensée particulière pour Mme. Sihem Guernouti qui suit mes travaux avec intérêt depuis le début.

Je ne peux continuer ces remerciements sans exprimer l'étendue de ma reconnaissance envers ma famille et le support constant et juste qu'elle m'apporte. Elle m'a permis de rester équilibré tout au long de ce chemin en partageant mes joies, et en relativisant mes inquiétudes. Je remercie bien évidemment Marie qui m'a accompagné quotidiennement et dont le réconfort pendant les moments plus délicats de ce chemin sinueux m'a été précieux. Un immense merci à mes parents, Christelle et Yannick, pour la confiance qu'ils ont portée dans chacun de mes choix, qui m'a permis d'arriver à l'aboutissement de ce projet. Ils m'ont toujours épaulé, jusque dans le « money time » précédant le dépôt de ce mémoire, et je sais leur soutien total et pérenne. Je remercie également Justine et Quentin qui m'ont soutenu et encouragé pendant toutes mes études. Un merci tout particulier à notre petit Jacques qui nous a rejoint pendant ce projet, et qui sait me détendre par sa joie de vivre communicative, même à distance.

Je voudrais terminer ces remerciements en exprimant ma gratitude envers mes collègues doctorants du laboratoire pour tous les moments d'échanges, de convivialité, et d'activités extra-académiques passés à leur côté. Je leur suis reconnaissant que nos relations ne se soient

pas arrêtées au travail, mais qu'ils soient devenus des amis, et fassent aujourd'hui partie intégrante de ma vie.

Tables des matières

Abstract 2
Remerciements 4
Table des Illustrations 10
Table des tableaux 14
Nomenclature 16
Chapitre 1 Introduction 23
1 Contexte & Motivations 24
1.1 Contexte réglementaire 24
1.2 Enjeux de la ventilation naturelle par conduit 25
1.3 Enjeu de la vérification des performances à réception 30
2 Problématique scientifique 31
3 Objectifs & Approche scientifique 32
4 Plan du manuscrit 36
Chapitre 2 Etat de l'art sur la mesure des performances aérauliques des systèmes de ventilation naturelle 37
1 Introduction 38
2 Caractérisation de la performance aéraulique 39
2.1 Le taux de ventilation, indicateur quantitatif 39
2.2 L'âge de l'air, indicateur qualitatif 40
2.3 L'indice d'efficacité de renouvellement d'air 40
3 Méthodes gaz traceur 42
3.1 Méthodologie de l'analyse des méthodes gaz traceur 42
3.2 Description des méthodes de mesure gaz traceur 44
3.3 Analyse comparative des méthodes gaz traceur 57
4 Discussion 62
5 Conclusion 63
Chapitre 3 Comparaison expérimentale des méthodes gaz traceur pour la mesure du taux de ventilation mono-zone variable 64
1 Introduction 65
2 Méthodologie 65
2.1 Chambre expérimentale 65
2.2 Instrumentation 68
2.3 Choix des profils de variation 69

2.4 Procédure pour évaluer la concentration du CO_2 extérieur 73
2.5 Protocole expérimental 73
2.6 Analyses d'incertitude 75
3 Mesures du taux de ventilation moyen par les méthodes par décroissance de la concentration et dose continue 79
3.1 Exemple de mesure du taux de ventilation 79
3.2 Comparaison de la précision des deux méthodes de mesure 82
3.3 Influence de la sélection d'un seul capteur 83
4 Mesure du taux de ventilation instantanée par la méthode concentration constante 84
5 Discussion 86
6 Conclusion 87
Chapitre 4 Fiabilisation de la mesure par décroissance de la concentration par le filtre de Kalman 89
1 Introduction 90
1.1 Contraintes associées à l'application in situ en bâtiment multi-zones 90
1.2 Objectif 91
2 Théorie du filtre de Kalman 92
2.1 Introduction au filtre de Kalman 92
2.2 Mise sous forme de la représentation d'état du modèle 93
2.3 Principe du filtre de Kalman étendu 97
3 Méthodologie de l'expérimentation 98
3.1 Chambre expérimentale 98
3.2 Instrumentation 100
3.3 Procédure d'estimation du CO_2 de transit 101
3.4 Choix du profil de variation 105
3.5 Protocole expérimental 106
3.6 Analyse de sensibilité sur les paramètres de filtrage 107
3.7 Paramètres de calculs 112
4 Mesure du taux de ventilation en configuration multi-zones 113
4.1 Répétabilité des méthodes de mesure sur le taux de ventilation moyen 113
4.2 Mesure du taux de ventilation dynamique par le filtre de Kalman 116
4.3 Analyse paramétrique expérimentale 118
4.4 Influence de la fréquence d'acquisition 125
5 Discussion 126
6 Conclusion 127
Chapitre 5 Analyse de sensibilité numérique de la méthode Kalm'Air 129

1 Introduction 130
2 Présentation du code en pression 130
2.1 Modèle aéraulique 130
2.2 Modèle de transfert de polluants 136
2.3 Couplage des modèles & conditions aux limites 136
3 Présentation du dispositif expérimental de validation du modèle 137
3.1 Adaptation expérimentale de HYBCELL 137
3.2 Protocole expérimental 139
3.3 Données climatiques 140
4 Modélisation de NATCELL 142
4.1 Configuration et liens aérauliques 142
4.2 Calibration de la modélisation aéraulique de NATCELL 142
4.3 Validation du modèle 149
5 Analyse de sensibilité 155
5.1 Objectif de l'analyse de sensibilité 155
5.2 Méthode de l'analyse de sensibilité 156
5.3 Sensibilité du filtre de Kalman 166
5.4 Définition de l'incertitude 173
6 Conclusion 175
Chapitre 6 Application in situ automatisée de la méthode Kalm'Air 176
1 Introduction 177
2 Protocole d'injection et de mesure de la méthode Kalm'Air 178
2.1 Dispositif expérimental 178
2.2 Le protocole d'injection et de mesure de la méthode Kalm'Air 179
3 Développement de l'outil automatisé 'Kalm'Air' 181
3.1 Introduction à l'outil Kalm'Air 181
3.2 Fonctionnement de l'outil Kalm'Air 181
3.3 Interface 185
4 Application in situ de la méthode Kalm'Air 189
4.1 Présentation du cas d'étude 189
4.2 Mise en place du protocole 190
4.3 Résultats obtenus par Kalm'Air 192
5 Conclusion 195
Chapitre 7 Conclusion générale 196
1 Conclusion 197

2 Perspectives 200
Références 203
Annexes 210
Annexe 1.1 : Principe de la ventilation naturelle 210
Annexe 3.1 : Documentation technique des capteurs 214
Annexe 3.2 : Analyse d'incertitude 217
Annexe 4.1 : Article présenté à la 40eme conférence de l'AIVC 219
Annexe 4.2 : Développement du gain de Kalman 226
Annexe 4.3 : Documentation technique, sonde GMP252 228
Annexe 4.4 : Conditions expérimentales 230
Annexe 4.5 : Moyenne et écart-type de l'erreur des 30 tests de répétabilité 231
Annexe 4.6 : Erreurs des 3 méthodes avec une calibration majorée de 5% 232
Annexe 5.1 : Documentation technique station météorologique 233
Annexe 5.2 : Mesures en soufflerie des pressions dynamiques et statiques pour la détermination du coefficient de pression 234
Annexe 5.3 : Norme 12599, incertitude de mesure du débit dans le conduit par un anémomètre 236
Annexe 5.4 : Recirculation de l'air de la cellule A à la cellule B 237
Annexe 5.5 : Analyse des variances pour le cas classique 238
Annexe 5.6 : Effets prépondérants par zones pour chaque cas 240
Annexe 5.7 : Equations de l'incertitude résultante de l'analyse de sensibilité 243
Annexe 6.1 : Protocole d'utilisation de l'outil Kalm'Air 244

Table des Illustrations

Figure 1-1 : Les trois types de ventilation naturelle 26
Figure 1-2 : Schéma des conduits installés dans les logements collectifs, [13] 27
Figure 1-3 : Répartition des systèmes de ventilation naturelle dans le parc de logements en 2009, adapté de Réf. [14] 28
Figure 1-4 : Evolution de la part des différents dispositifs de ventilation, en fonction de la période de construction, adapté de Réf. [14] 29
Figure 1-5 : Organigramme de la thèse 35
Figure 2-1 : Schéma représentant la notion de l'âge de l'air, adapté de Réf. [31] 40
Figure 2-2 : Les trois types de mixage de l'air, adapté de Réf. [33] 41
Figure 2-3 : Schéma de principe de la méthode par décroissance de la concentration 48
Figure 2-4 : Schéma de principe des méthodes par dose continue 50
Figure 2-5 : Schéma de principe de la méthode par concentration constante 51
Figure 2-6 : Schéma du dispositif expérimental requis pour une méthode gaz traceur conventionnelle 54
Figure 2-7 : Schéma de principe de la méthode "Build-up" 55
Figure 2-8 : Schéma de principe de la méthode TMBE 56
Figure 3-1 : Schéma de la cellule expérimentale HYBCELL, utilisée en monozone 67
Figure 3-2 : Photographies de l'extérieur et de l'intérieur de la cellule expérimentale 67
Figure 3-3 : Calcul du débit d'une ventilation naturelle par conduit 70
Figure 3-4 : Mesure du débit total traversant les ouvrants d'un bâtiment ventilé de manière traversante, données de J.Lo [28] 71
Figure 3-5 : Mesures dans le conduit d'extraction du débit des 5 profils de variations décrits ci-dessus, de haut en bas : profil stationnaire, profil traversant, profil conduits croissant, profil conduits décroissant, profil traversant hautement variable. 72
Figure 3-6 : Schéma expérimental d'une session de mesure, exemple pour le profil de ventilation traversant 74
Figure 3-7 : Evolution de l'incertitude de mesure, profil traversant, méthode 2 points 76
Figure 3-8 : Evolution de l'incertitude de mesure, profil traversant, méthode par dose continue moyenne de la concentration inverse 77
Figure 3-9 : Evolution des concentrations pendant la méthode dose continue, profil décroissant (i), profil croissant (ii) 78
Figure 3-10 : Evolution des concentrations pendant la décroissance de la concentration, profil stationnaire 80
Figure 3-11 : Evolution du taux de renouvellement d'air calculé par décroissance de la concentration 2-points 80
Figure 3-12 : Evolution des concentrations pendant la dose continue, pour le profil traversant 81
Figure 3-13 : Evolution du taux de renouvellement d'air calculé par la méthode moyenne de la concentration inverse, pour le profil traversant 82
Figure 3-14 : Diagramme à barres de l'erreur expérimentale pour les méthodes 2 points et moyenne de la concentration inverse, tous capteurs 83
Figure 3-15 : Diagramme à barres de l'erreur expérimentale pour les méthodes 2 points et moyenne de la concentration inverse, un seul capteur 84
Figure 3-16 : Evolution des concentrations moyennées sur chaque type de capteurs 85

Figure 3-17 : Evolution du taux de ventilation instantanée et de l'erreur expérimentale de la méthode par concentration constante 86
Figure 4-1 : Schéma de principe du filtre de Kalman, adapté de Réf. [49] 98
Figure 4-2 : Photo de l'intérieur de la cellule A 99
Figure 4-3 : Schéma de la chambre expérimentale en 3 dimensions, en configuration multi-zones 99
Figure 4-4 : Disposition de la cellule expérimentale dans son environnement 100
Figure 4-5 : Procédure d'estimation du CO_2 de transit 104
Figure 4-6 : Exemple d'évolutions des concentrations avant (i), et après (ii) correction 105
Figure 4-7 : Profils de débits synthétiques calculés analytiquement 106
Figure 4-8 : Filtrage des concentrations 109
Figure 4-9 : Analyse de sensibilité des variances du bruit de processus sur le calcul du taux de ventilation moyen 110
Figure 4-10 : Exemple d'une variance du bruit de processus de taux de ventilation trop élevée (1 $Vol^2.h^{-2}$) 111
Figure 4-11 : Exemple d'une variance du bruit de processus du taux de ventilation adéquatement choisie (0.1 Vol^2/h^2) 112
Figure 4-12 : Exemple d'une variance du bruit de processus du taux de ventilation trop faible (0.01 $Vol^2.h^{-2}$) 112
Figure 4-13 : Exemple du calcul de l'ACH sur un des tests DFN 114
Figure 4-14 :Exemple de filtrage des concentrations par le filtre de Kalman, DFO1 116
Figure 4-15 : ACH instantanés de référence, et calculé par le filtre de Kalman pour les tests (i) DFN, et (ii) DOO 117
Figure 4-16 : Diagramme à barres de l'erreur expérimentale moyenne pour les 3 méthodes 118
Figure 4-17 : Corrélation entre dégradation de l'erreur sans application de la procédure et CO2 ambiant moyen 122
Figure 4-18 : Fuseaux représentants les taux de ventilation instantané extrêmes calculés depuis les capteurs, (i) DON2, (ii) DFN2 124
Figure 5-1 : Principe d'un code en pression, [101] 132
Figure 5-2 : Position du plan neutre pour une grande ouverture 135
Figure 5-3 : Couplage du modèle aéraulique avec le modèle de polluants 137
Figure 5-4 : Mise en place du conduit de ventilation naturelle 138
Figure 5-5 : Façade extérieure de la Cellule NATCELL, avec le conduit d'extraction 138
Figure 5-6 : Schéma de l'instrumentation de NATCELL 139
Figure 5-7 : Rose des vents pour les six séquences de tests 141
Figure 5-8 : Evolution de la température pour les six séquences 141
Figure 5-9 : Schéma du zonage et des liens aérauliques de la cellule NATCELL 142
Figure 5-10 : Représentation de la face avant de la cellule NATCELL 144
Figure 5-11 : Evolution des Cp par rapport à l'angle d'incidence du vent 145
Figure 5-12 : Coefficients de pression exercé sur l'entrée d'air en fonction de l'angle d'incidence du vent 145
Figure 5-13 : Schéma du dispositif expérimental 146
Figure 5-14: Détermination du Cp exercé sur l'extracteur statique en soufflerie 147
Figure 5-15 : Configuration des infiltrations 148
Figure 5-16 : Erreurs globales, validation du modèle 151
Figure 5-17 : Corrélations entre concentration mesurée et simulée pour les 4 séquences 151
Figure 5-18 : Débits extraits simulés et mesurés associés à la vitesse du vent, S1_2 153

Figure 5-19 : Débits extraits simulés et mesurés associés à la vitesse du vent,,S2_2 153
Figure 5-20 : Débits extraits simulés et mesurés associés à la vitesse du vent, S3 154
Figure 5-21 : Débits extraits simulés et mesurés associés à la vitesse du vent, S4 154
Figure 5-22 : Configuration du modèle utilisé pour l'analyse de sensibilité 160
Figure 5-23 : Evolutions des concentrations pour le cas avec occupation 162
Figure 5-24 : Niveau bas (i) et niveau haut (ii) des profils de vent 163
Figure 5-25 : Rose des vents pour le profil haut 163
Figure 5-26 : Evolutions des concentrations pour le mixage imparfait forcé (i), et pour le mixage parfait (ii) 165
Figure 5-27 : Diagramme à barres des effets pour le capteur placé sous l'évacuation 169
Figure 5-28 : Effets pour le capteur placé de manière indifférente 170
Figure 5-29 : Effets de la méthode 2 points et du filtre de Kalman pour le cas de base 171
Figure 5-30 : Lien entre la précision et le nombre de points disponibles pour le cas avec occupation, et mixage imparfait 173
Figure 5-31 : Arbre de décision pour le calcul de l'incertitude du filtre de Kalman 174
Figure 6-1 : Matériel requis dans le dispositif expérimental, ... 178
Figure 6-2 : Protocole d'injection et de mesure 180
Figure 6-3 : Schéma des entrées et sorties de l'outil Kalm'Air 181
Figure 6-4 : Organigramme de la procédure de Kalm'Air 182
Figure 6-5 : Interface d'accueil de Kalm'Air 186
Figure 6-6 : Interface de Kalm'Air, Phase 1 choix du point initial t0 186
Figure 6-7 : Interface de Kalm'Air, phase 2 question qualité de la filtration 187
Figure 6-8 : Interface de Kalm'Air, phase 2 question fluctuations hautes fréquences 187
Figure 6-9 : Interface de Kalm'Air, phase 2 aide sur les fluctuations hautes fréquences 188
Figure 6-10 : Interface finale de Kalm'Air 188
Figure 6-11 : Photographie aérienne du cas d'étude 190
Figure 6-12: Photographie des extracteurs basse pression du système de ventilation hybride 190
Figure 6-13 : Plan de l'appartement R+3 de l'empilement Nord 191
Figure 6-14: Disposition des capteurs dans deux pièces de service 192
Figure 6-15 : Résultats de l'outil Kalm'Air pour la salle de bain 193
Figure 6-16 : Résultats de l'outil Kalm'Air pour la cuisine 194
Figure 6-17 : Résultats de l'outil Kalm'Air pour les toilettes 194
Figure 0-1 : Action du vent sur les façades d'un bâtiment 211
Figure 0-2 : Action du tirage thermique 212
Figure 0-3 : Actions combinées du vent et du tirage thermique 213
Figure 0-4 : Erreur des 3 méthodes avec une calibration majorée de 5% 232
Figure 0-5 : Caractéristiques techniques de la station météorologique 233
Figure 0-6 : Mesures des pressions dynamiques et statiques dans le soufflerie, cas classique 234
Figure 0-7 : Mesures des perssions dynamique et statiques dans le soufflerie, cas incliné 235
Figure 0-8 : Incertitude du débit mesuré dans le conduit par un anémomètre en fonction du nombre de points de mesure dans la section du conduit, (ISO 12599) 236
Figure 0-9 : Recirculation de l'air de la cellule A à la cellule B 237
Figure 0-10 : Protocole d'utilisation de l'outil Kalm'Air 244

Table des tableaux

Tableau 2-1 : Corpus d'articles utilisés pour l'analyse comparative des méthodes gaz traceur, [30] 44
Tableau 2-2 : Synthèse de l'analyse des comparative des méthodes gaz traceur, [30] 61
Tableau 3-1 : Caractéristiques de l'instrumentation 68
Tableau 3-2 : Statistiques des 5 profils de variation 72
Tableau 3-3 : Plan d'expérimentation 75
Tableau 3-4 : Incertitudes de mesure de la méthode par décroissance de la concentration 77
Tableau 3-5 : Incertitude de mesure de la méthode par dose continue 78
Tableau 3-6 : Incertitude de mesure de la méthode par concentration constante 79
Tableau 3-7 : Erreur expérimentale de la méthode concentration constante par profil de variation de débit 86
Tableau 4-1 : Caractéristiques techniques de l'instrumentation 101
Tableau 4-2 : Plan d'expérimentation 107
Tableau 4-3 : Paramètres de l'analyse de sensibilité 108
Tableau 4-4 : Incertitude globale et incertitude spatiale 115
Tableau 4-5 : Erreur du taux de ventilation calculé par le filtre de Kalman pour chaque test 119
Tableau 4-6 : Erreur du filtre de Kalman pour chaque test sans procédure d'estimation du CO_2 de transit 121
Tableau 4-7 : Incertitude spatiale et erreur à partir de la moyenne des capteurs 123
Tableau 4-8 : Capteurs tendant aux erreurs minimales et maximales 125
Tableau 4-9 : Influence de la fréquence d'acquisition sur l'incertitude globale 125
Tableau 5-1 : Caractéristiques de l'instrumentation 139
Tableau 5-2: Protocole expérimental 140
Tableau 5-3 : Coefficient de pertes de charge 143
Tableau 5-4 : Récapitulatif des 2 niveaux des 6 paramètres de l'analyse de sensibilité 161
Tableau 5-5 : Ecart maximal moyen de l'âge de l'air entre les zones 165
Tableau 5-6 : Analyse de variance zone 3 166
Tableau 5-7 : Test de Kolmogorov Smirnov pour vérifier la normalité des résidus, et de la variabilité naturelle 167
Tableau 5-8 : Sélection des paramètres influents et effet correspondant 168
Tableau 6-1 : Grammage des bouteilles à percuter en fonction du volume de la pièce 179
Tableau 0-1 : Conditions expérimentales 230
Tableau 0-2 : Statistiques du test de répétabilité 231
Tableau 0-3 : Analyse de la variance pour le capteur 2 238
Tableau 0-4 : Analyse de la variance pour le capteur 1 239
Tableau 0-5 : Analyse de la variance pour le capteur 4 239
Tableau 0-6 : Effets prépondérants pour la dégradation de la précision des capteurs 240
Tableau 0-7 : Effets prépondérants pour l'application la procédure de correction du CO2 de transit 240
Tableau 0-8 : Effets prépondérants pour le filtre de Kalman avec une fréquence d'acquisition réduite de 66% 241
Tableau 0-9 : Effets prépondérants du cas de base pour la méthode deux points 242
Tableau 0-10: Formulation des incertitudes 243
Tableau 0-11 : Incertitude liée aux points de mesure sur 2 constante de temps 243

Nomenclature

Symbole	Définition	Unité
	Indicateurs	
ϵ	Indice d'efficacité de renouvellement d'air	[%]
ϵ_p	Indice d'efficacité locale de renouvellement d'air	[%]
τ	Constante nominale de temps	[h]
τ_p	Âge local de l'air	[h]
$\overline{\tau_r}$	Temps de résidence	[h]
	Incertitudes	
σ	Incertitude de mesure	
σ_N	Incertitude globale du taux de ventilation	[%]
σ_{Nmean}	Erreur systématique de la mesure sur le taux de ventilation	[%]
σ_{Nstd}	Erreur aléatoire de la mesure du taux de ventilation	[%]
$\sigma_{Nspatial}$	Incertitude spatiale relative à l'écart-type de l'erreur entre capteurs	[%]
$\sigma_{NKalm'Air}$	Incertitude globale de la méthode KalmAir	[%]
$\sigma_{NModélisation}$	Incertitude tolérée de modélisation	[%]
ε	Erreur	
ε_i	Erreur du taux de ventilation de la ième décroissance entre la mesure et la référence	[%]
$\varepsilon_{i,j}$	Erreur du taux de ventilation de la ième décroissance du jème capteur	[%]
$N_{i\ ref}$	Taux de ventilation de référence du ième test	[vol.h^{-1}]
$N_{i\ mes}$	Taux de ventilation mesuré au ième test	[vol.h^{-1}]
$n_{capteur}$	Nombre de capteurs	[-]

n_{dec}	Nombre de décroissances	[-]

Modélisation

ξ	Coefficients de perte de charge dynamique	[-]
$\eta_{i,j,k}$	Efficacité de filtration de l'ouverture k entre la zone i et la zone j	[-]
K_{ri}	Réactivité du gaz i	[-]
$S_{j,m}$	Débit de production du gaz m dans la zone i	[$m^3.h^{-1}$]
D_h	Diamètre hydraulique	[m]
$\boldsymbol{F}$	Vecteur des résidus	[Pa]
L	Longueur caractéristique du conduit	[m]
W	Largeur de l'ouverture	[m]
Z_n	Hauteur du plan neutre	[m]
$\boldsymbol{P_u}$	Vecteur des pressions à l'itération u	[Pa]
$Relax$	Coefficient de relaxation	[-]
$Q_{,i,j,k}$	Débit volumique de la zone entre la zone i et j à travers l'ouverture k	[$m^3.h^{-1}$]
f	Coefficient de friction	[-]

Analyse de sensibilité

δ	Symbole de Koenecker	[-]
μ	Moyenne de l'incertitude globale	[%]
E_i	Effets du ième facteur sur l'incertitude globale	[%]
E_R	Effets du résidu sur l'incertitude globale	[%]
$\boldsymbol{y}$	Vecteurs réponses du plan d'expérience (incertitude globale)	[%]
P	Matrice du plan d'expérience	[-]
M	Matrice du modèle du plan d'expérience	[-]

$\boldsymbol{a}$	Vecteur des coefficients du modèle du plan d'expérience	[%]

Calcul du taux de ventilation

V	Volume de la pièce	[m^3]
V_e	Volume effectif de la pièce	[m^3]
C	Concentration intérieure	[ppm]
C_{ext}	Concentration extérieure	[ppm]
m	Taux d'émission du gaz	[$m^3.h^{-1}$]
Q	Débit de ventilation	[$m^3.h^{-1}$]
C_R	Concentration de régression	[ppm]
Q_R	Débit de ventilation de régression	[$m^3.h^{-1}$]
V_R	Volume de régression	[m^3]
C_0	Concentration initiale	[ppm]
C_f	Concentration finale	[ppm]
t_0	Temps initial	[h]
t_f	Temps final	[h]
N	Taux de ventilation	[$vol.h^{-1}$]
N_2	Taux de ventilation calculé par la méthode 2 points	[$vol.h^{-1}$]
N_n	Taux de ventilation calculé par la méthode multi-points	[$vol.h^{-1}$]
N_{evac}	Taux de ventilation calculé par la méthode de concentration dégressive à l'extraction	[$vol.h^{-1}$]
$Q_{moy.C°}$	Débit de ventilation calculé par la méthode par moyenne de la concentration	[$m^3.h^{-1}$]
$Q_{inv.C°}$	Débit de ventilation calculé par la méthode par inverse de la concentration moyenne	[$m^3.h^{-1}$]
ΔT	Différentiel de température	[°C]
C_d	Coefficient de décharge	[-]
C_L	Coefficient de fuite	[-]

A_{eff}	Surface effective	[m²]
$P°$	Pression de référence	[Pa]
P_{int}	Pression intérieure	[Pa]
P_x	Pression statique dans le conduit	[Pa]
P_{ext}	Pression extérieure	[Pa]
ΔP_{int}	Différentiel de pression de part et d'autre d'une ouverture	[Pa]
P_w	Pression dynamique	[Pa]
g	Accélération de la pesanteur	[m.s^{-2}]
H	Hauteur séparant une ouverture basse d'une ouverture haute	[m]
$C_{transit}$	Concentration de transit (concentration moyenne de l'air pénétrant dans la pièce testée)	[ppm]
u_{tt}	Vitesse de l'air traversant une ouverture par tirage thermique	[m.s^{-1}]
u_{vent}	Vitesse de l'air traversant une ouverture par l'action du vent	[m.s^{-1}]
U	Vitesse du vent	[m.s^{-1}]
Cp	Coefficient de pression	[-]
ΔCp	Différentiel de coefficient de pression entre deux ouvertures	[-]
$\widetilde{U(t)}$	Fluctuations du vent par rapport au vent moyen	[m.s^{-1}]
n_{pts}	Nombre de points de mesure	[-]

Filtre de Kalman

$\widehat{\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{k/k-1}}}$	Estimation du vecteur des paramètres d'états à partir de l'itération k-1
$\widehat{\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{k}}}$	Estimation du vecteur des paramètres d'état mis à jour
$\boldsymbol{x_k}$	Vecteur des paramètres d'état à l'état k
$\boldsymbol{z_k}$	Vecteur des mesures bruitées à l'état k

$\widehat{z_{k/k-1}}$	Estimation du vecteur de mesure bruitées à partir de l'état k-1	
K_k	Gain de Kalman	
ε_k	Résidus de mesure à l'état k	
S_k	Matrice des résidus de mesure à l'état k	
$\widetilde{x_{k/k-1}}$	Erreur d'estimation du vecteur de paramètres d'état	
P_k	Matrice de l'erreur d'estimation du paramètre d'état à l'état k	
F_k	Matrice de transition à l'état k	
G_k	Fonction de transition à l'état k	
H_k	Matrice d'observation à l'état k	
V	Matrice de covariance des bruits de mesure	
v_C	Variance associée au bruit de mesure de la concentration intérieure	[ppm²]
$v_{Ctransit}$	Variance des bruits de mesure du CO_2 de transit	[ppm²]
W	Matrice de covariance des bruits de processus	
r_N	Bruits de processus du taux de ventilation	[vol.h-2]
$r_{Ctransit}$	Bruits de processus du CO_2 de transit	[ppm.h^{-1}]
r_C	Bruits de processus du CO_2 intérieur	[ppm.h^{-1}]
w_N	Variance des bruits de processus du taux de ventilation	[vol².h-²]
$w_{Ctransit}$	Variance des bruits de processus du CO2 de transit	[ppm²]
w_C	Variance des bruits de processus du CO2 intérieur	[ppm²]

Abréviations

ELA	Effective Leakage Area (Surface équivalente de fuite)
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers

ENTPE	Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat
AIVC	Air Infiltration and Ventilation Center (association internationale de la ventilation
PIV	Particle Image Velocimetry
ACH	Air Change per Hour (taux de ventilation)
NDIR	Non-Dispersive Inrared absorption (technologie par absorption infrarouge)
TMBE	« Transient Mass Balance Equation method »
CILTS	Constant Injection Long Term Sampling method ou méthode PFT
CFD	Computational Fluid Dynamics
TPU	Tokyo Polytechnic University
COP	Conference of Parties
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

Chapitre 1 Introduction

1 Contexte & Motivations

1.1 Contexte réglementaire

La COP 21 (Conference of Parties), accueillie à Paris en 2015, a marqué une collaboration inédite de 196 pays en faveur d'une réduction globale des émissions de gaz à effet de serre, avec comme objectif de contenir le réchauffement climatique moyen en deçà des 2°C. En préparation de l'accueil de cette conférence, la France avait voté la Loi relative à la Transition Energétique pour la Croissance Verte de 2015, qui a pour but de promouvoir des actions concrètes en faveur des accords de Paris [1]. Plus récemment, la loi Energie Climat de 2019 vient assoir encore davantage les ambitions de la France [2]. Cette loi ambitionne une neutralité carbone d'ici 2050, avec une réduction des émissions de gaz à effet de serre par un facteur d'au moins six.

Etant le secteur le plus énergivore avec 42% de la consommation totale en énergie finale, le secteur du bâtiment est particulièrement visé par les lois susmentionnées. Ces lois appliquées au secteur du bâtiment doivent permettre de réduire les émissions liées au secteur du bâtiment ; d'accélérer la rénovation énergétique des bâtiments ; et de favoriser le recours aux énergies renouvelables dans les bâtiments. Les bâtiments doivent donc devenir à la fois plus sobres en énergie, et moins impactant au niveau environnemental. Ces objectifs se traduisent par des réglementations thermiques de plus en plus contraignantes. Une réglementation environnementale RE 2020 est actuellement en expérimentation au moyen du label E+C-, afin de respecter les ambitions de la loi Energie Climat. Ce label vise à augmenter les exigences de sobriété énergétique par rapport au label BBC de la réglementation thermique en vigueur (RT 2012), en se basant dorénavant sur le référentiel BEPOS (Bâtiment à Energie Positive). Le bâtiment doit donc produire plus d'énergie qu'il n'en consomme. Pour ce faire, il doit donc intégrer des énergies renouvelables, et/ou des systèmes de récupération d'énergie, tout en étant moins énergivore. En parallèle, ce label a également trait à l'analyse du cycle de vie du bâtiment afin d'évaluer les émissions qui lui sont liées. Le label E+C- actuellement en expérimentation qui sera concrétisé en réglementation environnementale concerne les bâtiments neufs et fixe des exigences de moyens et de résultats. Une réglementation fixant des exigences de moyen est dite « prescriptive », alors qu'une réglementation fixant des objectifs de résultats est dite « performantielle ». L'approche de cette nouvelle réglementation est donc mixte. Concernant les bâtiments existants, toute rénovation doit satisfaire aux exigences de l'Arrêté du 3 mai 2007, révisé en 2017, qui fixe des caractéristiques minimales à respecter pour les composants du bâtiment [3]. Cette approche est, a contratio, prescriptive, car elle ne caractérise pas les résultats de performance énergétique à obtenir.

En parallèle des exigences croissantes en termes de sobriété énergétique des bâtiments, ainsi que de réduction des émissions de gaz à effet de serre, la qualité d'air intérieur devient une préoccupation grandissante. Nous passons plus de 90% au sein des bâtiments, alors que l'air qui y réside est souvent plus pollué que l'air extérieur [4]. Les produits ménagers, l'activité humaine, les matériaux, ainsi que les meubles sont sources de pollution au sein des bâtiments qui induit de pathologies graves associées à un coût de 14 millions d'euros par an à la Caisse de Sécurité Sociale. La pandémie de la COVID 19 vient encore accentuer la mise en lumière sur la nécessité d'une grande maîtrise des débits, et des flux d'air au sein des espaces clos. En termes de réglementation, les exigences en matière de ventilation sont anciennes. Elles sont définies par l'arrêté du 24 Mars 1982 pour les logements [5], et du Règlement Sanitaire

Départemental RSD[1] ou du Code du travail pour les locaux non résidentiels. Concernant les bâtiments résidentiels, l'arrêté de Mars 1982 a été déposé pour consolider l'arrêté du 26 Octobre 1969, qui imposait déjà une ventilation permanente par balayage avec des entrées d'air dans les pièces de vie (séjour, chambres), et des extractions d'air dans les pièces de service (cuisine, salle de bain, toilettes). Dans les pièces de service les activités qui y sont pratiquées sont susceptibles d'émettre une pollution spécifique. Le principe de balayage permet alors de ne pas diffuser la pollution émise dans ces pièces vers les pièces de vie. L'arrêté de Mars 1982 complète celui de 1969 en imposant des débits minimums à respecter en fonction du nombre de pièces. Concernant les bâtiments non résidentiels, le RSD ou le Code du travail fixent des exigences de débits par rapport au nombre d'occupants pour des locaux à pollution non spécifique, et des débits minimums pour les locaux à pollution spécifique. Ces approches sont purement prescriptives car elles traduisent une obligation de moyens, mais pas une obligation de résultats. Les débits requis sont permanents et généraux.

Depuis le 1er février 2019, la loi pour un Etat au Service d'une Société de Confiance (ESSOC) est venue révolutionner les exigences réglementaires en matière notamment de construction en favorisant les systèmes innovants [6]. Dans le domaine de la construction, elle permet à un maître d'ouvrage de déroger aux exigences de moyens (approche prescriptive) s'il justifie que la solution qu'il propose entraîne un résultat équivalent à ceux obtenus grâce aux exigences réglementaires (approche performantielle). Elle concerne l'intégralité des systèmes et matériaux du bâtiment. Cette approche performantielle est mieux adaptée à une transformation des modes de construction, transformation indispensable pour répondre aux défis du XXIe siècle. En matière de ventilation par exemple, les critères de performance restent à définir car les exigences réglementaires étaient, jusque-là, prescriptives. Un groupe de travail s'est constitué afin de définir ces critères, basés par exemple sur une concentration de polluants à ne pas dépasser. Il ne faudrait donc plus assurer un débit fixe minimum, mais une modélisation numérique vérifierait que le critère de performance est respecté. Cette procédure est, d'ailleurs, déjà en place dans certains pays européens (en Espagne, par exemple). Cela permet une plus grande flexibilité dans le choix des installations de ventilation. L'implémentation de la ventilation naturelle en est favorisée car son efficacité variable ne vérifie pas les exigences prescriptives [7].

1.2 Enjeux de la ventilation naturelle par conduit

1.2.1 Les types de systèmes de ventilation

La ventilation est à l'interface entre les considérations énergétiques traduites par les réglementations environnementales, et les considérations de qualité d'air intérieur traduites par les réglementations de la construction. La ventilation hygiénique étant essentielle pour le maintien d'une bonne qualité d'air intérieur, elle a également un rôle majeur à jouer dans la sobriété énergétique des bâtiments en maîtrisant les débits pour ne pas engendrer de déperditions thermiques inutiles, tout en étant sobre en énergie dans son fonctionnement. Le renouvellement hygiénique de l'air est assuré par le système de ventilation, qui comporte l'ensemble des composants aérauliques prévus pour acheminer l'air des entrées d'air vers les bouches d'extractions. L'air peut également être renouvelé par l'action de l'occupant grâce à l'aération par les fenêtres par exemple. Ce type de renouvellement d'air permet, notamment en été, de rafraîchir les bâtiments en ouvrant les fenêtres la nuit quand l'air est plus frais [8]. Il

[1] RSD Règlement Sanitaire Départemental

n'est, en revanche, pas compris dans la désignation « système de ventilation ». Enfin, l'air peut provenir des infiltrations, mais ces infiltrations perturbent la maîtrise des débits et de l'écoulement de l'air. Elles ne sont pas souhaitables, et les réglementations environnementales visent des bâtiments toujours plus étanches.

Parmi les systèmes de ventilation, on retrouve trois grands types de systèmes : les systèmes de ventilation mécanique, les systèmes de ventilation naturelle, et les systèmes de ventilation hybride. Les systèmes de ventilation mécanique comportent des conduits de ventilation horizontaux, et/ou verticaux, ainsi que des ventilateurs d'extraction, souvent situés en toiture. Les systèmes de ventilation naturelle profitent, eux, uniquement des forces motrices naturelles. Le principe de la ventilation naturelle et ses forces motrices, que sont le vent et le tirage thermique, sont décrits en annexe 1.1. Finalement, les systèmes de ventilation hybride combinent les forces motrices naturelles à celles d'un ventilateur d'extraction plus économe qu'un ventilateur utilisé par les systèmes mécaniques. Les pressions qu'il impose sont significativement plus faibles que celles d'un ventilateur impliqué dans un système de ventilation mécanique. On le qualifie donc de ventilateur basse pression. Suivant le type de ventilation hybride, le ventilateur basse pression fonctionne en appui aux forces motrices naturelles de manière permanente, ou non. Si l'action n'est pas permanente, le ventilateur est déclenché par un système de régulation en fonction de la température extérieure et/ou de la vitesse du vent.

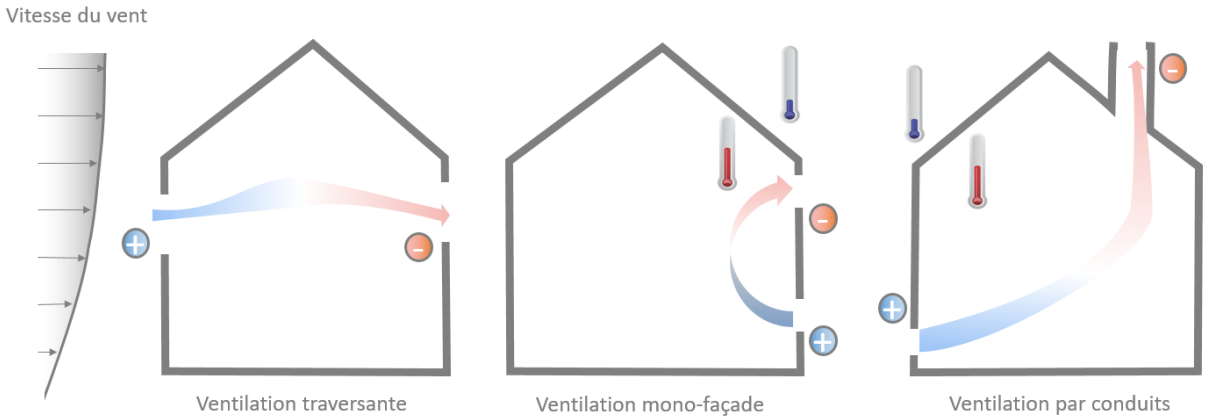


Figure 1-1 : Les trois types de ventilation naturelle

La ventilation naturelle permet donc de s'affranchir de la consommation énergétique des ventilateurs d'extraction. Elle se décline sous trois types constructifs principaux qui tirent profit différemment des forces motrices naturelles (vent et tirage thermique). Ces trois types constructifs sont présentés en Figure 1-1. Le premier système de ventilation de la Figure 1-1 est appelé système de ventilation traversante. Si les deux ouvertures sont situées à une hauteur équivalente, seul le vent engendre le flux d'air. C'est le système de ventilation qui permet en général d'atteindre les plus grands débits. En revanche, sa seule dépendance vis-à-vis du vent en fait un système de ventilation instable, difficile à prévoir, dont le dimensionnement est donc compliqué. Le deuxième type de ventilation naturelle situé au milieu de la figure est appelé ventilation mono-orientée ou mono-façade. Elle comporte deux ouvertures situées, comme son nom l'indique, sur une même façade. Même si le vent peut influer sur ce système de ventilation [9], [10], sa principale force motrice est le tirage thermique. C'est le système de ventilation naturelle qui engendre les plus faibles débits. Aussi, les flux d'air ont peu de chances de ventiler l'intégralité de la profondeur de la pièce, et peuvent donc court-circuiter des zones de l'espace

[11]. En revanche, ce système de ventilation est intéressant pour ventiler les bureaux car il permet de ventiler chaque pièce indépendamment.

Le dernier système est appelé système de ventilation naturelle par conduit. Comme il l'est expliqué dans l'annexe 1.1, la force des débits engendrés par le tirage thermique est intimement liée à la hauteur séparant deux ouvertures. Pour une différence de température donnée entre l'intérieur et l'extérieur, plus la hauteur séparant deux ouvertures est importante, plus fort sera le débit. Le principe de la ventilation naturelle par conduit consiste alors à augmenter la différence de hauteur entre les bouches de ventilation à l'aide d'un conduit vertical pour renforcer les débits naturels. La ventilation naturelle par conduit présente plusieurs avantages par rapport aux autres systèmes de ventilation naturelle :

- son efficacité est davantage prévisible que celle des types de ventilation dont le moteur principal est le vent ;
- installée dans les logements collectifs qui présentent une grande hauteur, les débits qu'elle engendre sont importants ;
- elle représente la ventilation naturelle impliquée dans les systèmes de ventilation hybride. Elle est donc également particulièrement bien adaptée à la rénovation en ventilation hybride car le réseau de conduit existant peut être conservé, s'il est en bon état. Une rénovation en système de ventilation mécanique nécessiterait, à l'inverse, de remplacer l'intégralité des conduits de ventilation existants en conduits plus étanches car les pressions en jeux sont beaucoup plus importantes.
- elle engendre une qualité de mélange de l'air neuf avec l'air vicié intéressante car l'air monte à l'intérieur du bâtiment à mesure qu'il se réchauffe, ce qui provoque un renouvellement d'air par « effet piston », qui est le type de renouvellement d'air le plus efficace [12]. Les différents types de mixage de l'air seront traités dans le deuxième chapitre.

Parmi les systèmes de ventilation naturelle par conduit installés dans les logements collectifs, on retrouve les conduits individuels, et les conduits shunt. Le conduit shunt, à l'inverse des conduits individuels, permet à l'aide d'un seul conduit appelé « conduit collecteur » de ventiler tous les logements d'une même colonne, et donc de nécessiter moins d'espace. Les raccordements individuels des logements à ce conduit shunt sont construits de sorte à éviter tout refoulement de l'air du collecteur commun vers les logements. Les deux types de conduits sont présentés en Figure 1-2.

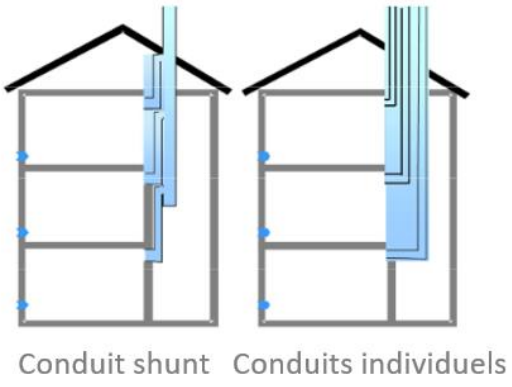


Figure 1-2 : Schéma des conduits installés dans les logements collectifs, [13]

1.2.2 La répartition des systèmes de ventilation dans le parc de bâtiments français

L'Observatoire sur la Qualité d'Air Intérieur (OQAI), département du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), a publié un rapport datant de 2009 qui traite de la ventilation dans les logements [14]. En 2009, la part de ventilation mécanique dans les logements occupe quasiment la même proportion que la ventilation naturelle, à hauteur de 35% chacune. Les systèmes de ventilation installés dans les logements collectifs existants sont majoritairement naturels, à hauteur de 41,4%. On y retrouve principalement des systèmes de ventilation par conduits. En revanche, pour les maisons individuelles, la ventilation mécanique est préférée. Le graphique présenté en Figure 1-3 récapitule la répartition des systèmes de ventilation dans le parc de logements en 2009. La ventilation naturelle par conduit représente 20% des systèmes de ventilation, 5% de plus que les deux autres types de ventilation naturelle réunis, notamment parce qu'elle est très largement représentée dans les bâtiments de logement collectifs.

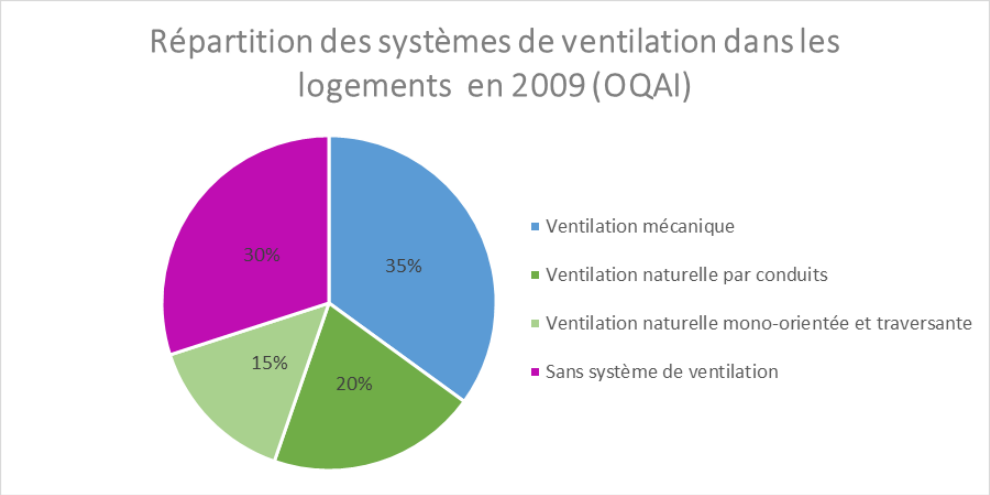


Figure 1-3 : Répartition des systèmes de ventilation naturelle dans le parc de logements en 2009, adapté de Réf. [14]

Le même rapport s'intéresse à l'évolution de la part des types de ventilation dans les logements neufs [14]. La Figure 1-4 montre l'évolution de l'implémentation des dispositifs de ventilation dans les constructions neuves depuis la fin du 19eme siècle jusqu'à aujourd'hui. On observe que, jusque les années 1945, les logements qui ne comportaient aucun système de ventilation étaient majoritaires. Des années 50 jusqu'au début des années 70, la ventilation naturelle occupait plus de 50% des constructions neuves. Sa part dans les constructions neuves va ensuite décliner jusqu'à atteindre seulement 2% aujourd'hui. En parallèle, la part de la ventilation mécanique a augmenté de manière exponentielle jusqu'à atteindre 90% des constructions neuves aujourd'hui. On remarque donc un déclin certain de la ventilation naturelle depuis l'année 1969 au profit des systèmes de ventilation mécanique, déclin accentué à partir de 1982. Cela s'explique par les réglementations de la construction présentées dans le premier paragraphe, qui imposent des débits généraux et permanents. La ventilation naturelle, ayant une efficacité variable et dépendante des conditions atmosphériques, ne permet pas de vérifier les exigences réglementaires, notamment les débits minimaux imposés par l'arrêté du 24 Mars 1982. L'efficacité de la ventilation mécanique étant fixe, et aujourd'hui vérifiable grâce au protocole PROMEVENT [15], elle est quasi-systématiquement préférée dans les constructions neuves.

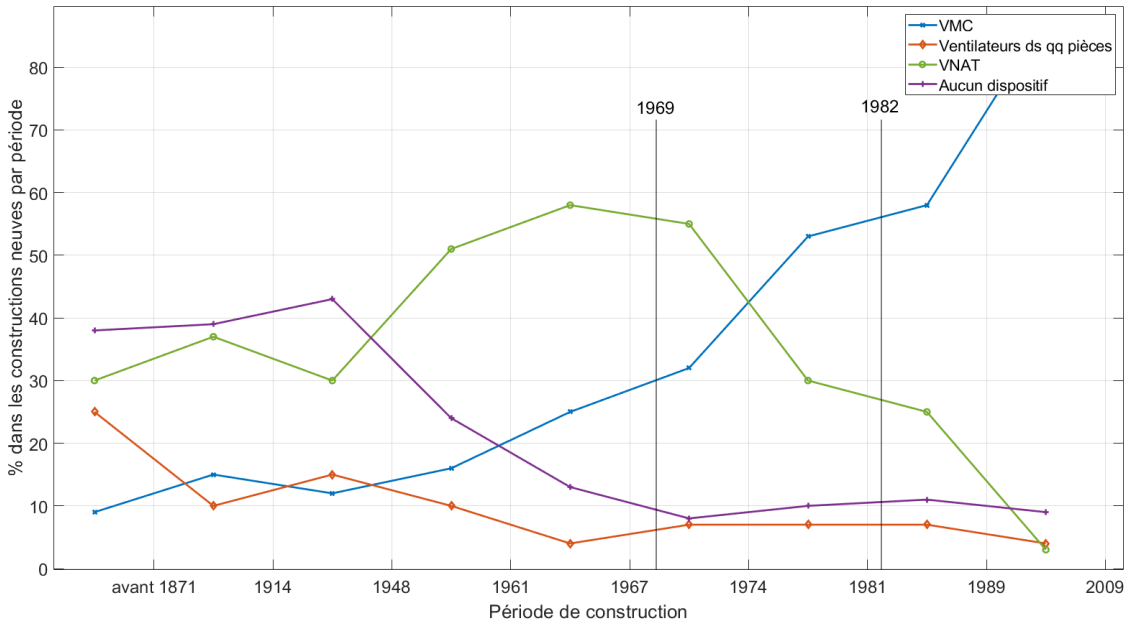


Figure 1-4 : Evolution de la part des différents dispositifs de ventilation, en fonction de la période de construction, adapté de Réf. [14]

Note: l'échelle des abscisses n'est pas linéaire.

On remarque, à l'aide de ces deux graphiques, que la ventilation naturelle est largement représentée dans les logements français, notamment grâce à la ventilation par conduits installée dans les logements collectifs. En revanche, la ventilation naturelle occupe majoritairement le bâti existant ayant été construit avant 1982, dont une part importante devrait probablement être rénovée. La ventilation naturelle par conduit, majoritaire au sein des systèmes de ventilation naturelle, est très bien adaptée à la rénovation en ventilation hybride, par simple ajout d'un extracteur basse pression à connecter au réseau de ventilation naturelle existant. L'extracteur basse pression permet d'augmenter les débits quand les exigences de performance réglementaires ne sont pas atteintes. La ventilation hybride représente donc un enjeu majeur de rénovation des systèmes de ventilation naturelle par conduit, qui sont installés dans 20% du parc de logements français.

Par ailleurs, le développement des systèmes de ventilation hybride associé à la loi ESSOC orientée vers une approche perfomantielle, peut permettre le nouvel essor de la ventilation naturelle par conduit dans les constructions neuves. La ventilation hybride participerait à réduire considérablement la consommation énergétique des bâtiments, notamment en réduisant voire en supprimant les besoins énergétiques liés au ventilateur d'extraction. Une étude portée par le Cerema « PREBAT démonstrateurs », dans laquelle ont été instrumentés cinquante bâtiments de logements collectifs à basse consommation d'énergie, a évalué la consommation des ventilateurs d'extraction à 5 $kWh.m^{-2}.an^{-1}$ en moyenne, avec un maximum de 13,4 $kWh.m^{-2}.an^{-1}$ [16]. Concernant les bâtiments de bureaux, Schulze et Eicker [8] ont estimé les gains énergétiques possibles à 4 $kWh.m^{-2}.an^{-1}$ grâce à l'implémentation d'un système de ventilation naturelle au détriment d'un système de ventilation mécanique. A titre de comparaison, la RT2012 impose une consommation maximale des 5 postes réglementaires (chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, auxiliaires de ventilation, et éclairage) de 50 $kWh.m^{-2}.an^{-1}$ pour toute construction neuve.

L'enjeu de la ventilation naturelle par conduit est donc double. Il est intimement lié au développement des systèmes de ventilation hybride qui intègrent ce système de ventilation naturelle, que ce soit en rénovation ou en implémentation dans les constructions neuves. La ventilation hybride permet d'améliorer les performances aérauliques des systèmes de ventilation naturelle par conduit installés dans l'existant, et donc d'améliorer la qualité de l'air intérieur des bâtiments. Dans le neuf, elle participe à l'enjeu de sobriété énergétique des bâtiments, en réduisant significativement la consommation liée à l'auxiliaire de ventilation.

1.3 Enjeu de la vérification des performances à réception

L'écart entre les performances du bâtiment estimées en phase de conception, et ses performances réelles représente un frein à la course en faveur de la sobriété énergétique des bâtiments associée à une qualité d'air maîtrisée [17]. Zou et al. [17] ont identifié trois causes responsables de cet écart :

i. les hypothèses et les données utilisées pour concevoir les bâtiments sont souvent lacunaires. On peut par exemple citer les données climatiques, ou l'hypothèse concernant le scenario d'occupation du bâtiment ;
ii. l'utilisation de modèles simplifiés qui ne sont pas représentatifs de la complexité réelle des bâtiments ;
iii. les écarts entre la performance des systèmes ou matériaux annoncée par les fabricants, et leur performance quand ils sont installés dans leur environnement.

Dans le domaine de la ventilation, de nombreux dysfonctionnements sont observés sur le terrain, et amplifient le besoin de vérifier la performance des systèmes à réception [18]. Concernant la ventilation mécanique, la responsabilité des écarts de performance est plutôt portée par la cause (iii.). La qualité de la mise en place, et de l'étanchéité des jonctions du réseau aéraulique peut considérablement impacter les débits extraits au sein du bâtiment. En France, la vérification à réception des systèmes de ventilation mécanique est cadrée par le protocole Promevent [15]. Cette vérification est obligatoire dans le cadre des labels Effinergie, et sera rendue obligatoire pour toute construction neuve par la réglementation environnementale RE2020.

Les systèmes de ventilation naturelle apportent encore davantage de contraintes en phase de conception par rapport aux systèmes mécaniques, et les écarts de performance peuvent avoir trait aux trois causes citées par Zou et al. [17]. De ce fait, la vérification de leur performance à réception serait encore davantage nécessaire. Or, il n'existe pas de protocole de vérification adapté aux contraintes de la ventilation naturelle. Les seuls protocoles de vérification existants, comme celui décrit dans le guide de la ventilation naturelle et hybride « VNHY » [19], concernent des inspections visuelles, mais aucune mesure fonctionnelle n'est prévue. Ce manque de protocole participe grandement au recul considérable de la part de la ventilation naturelle dans les constructions neuves observé dans le paragraphe 1.2.2.

2 Problématique scientifique

La problématique inhérente aux systèmes de ventilation naturelle et hybride concerne l'évaluation de leur performance aéraulique. Comme leurs forces motrices sont régies par des conditions atmosphériques et intérieures variables, et que les débits qu'elles engendrent sont dépendants de la configuration du bâtiment, l'évaluation de la performance aéraulique des systèmes de ventilation naturelle ou hybride requiert une approche conjointe mesure & modélisation. La mesure permet de valider la modélisation aéraulique, alors que cette dernière permet d'extrapoler le niveau de performance, d'un système de ventilation à partir d'une mesure. Or, il existe aujourd'hui de grandes lacunes à la fois sur la mesure de la performance aéraulique des systèmes de ventilation naturelle et hybride, ainsi que sur la modélisation des transferts aérauliques naturels. Le manque de protocole d'évaluation représente un frein majeur à l'implémentation de la ventilation naturelle ou hybride dans les constructions neuves, ainsi qu'à la rénovation des systèmes de ventilation naturelle par conduit en systèmes hybrides. Il n'y a pas de protocole précis permettant de justifier que ces systèmes atteignent les exigences réglementaires des réglementations de la construction, même si ces exigences venaient à devenir performantielles grâce à la loi ESSOC.

Les forces motrices naturelles entraînent des différences de pression de quelques pascal, alors que la ventilation mécanique fait plutôt intervenir des pressions de l'ordre de 80-200 pascal. Mesurer le débit aux bouches n'est pas adapté car l'application d'un instrument de mesure utilisé pour la ventilation mécanique, de type débitmètre « cône » ou autre, viendrait introduire une perte de charge. Cette perte de charge, comparée aux quelques pascal engendrant les débits, rendrait alors la mesure inexploitable. De plus, la variabilité des forces motrices nécessite que la mesure des performances aérauliques soit représentative dans le temps. Une période de mesure s'étalant sur 30 minutes est recommandée par Etheridge [20]. Parmi les méthodes utilisées, on retrouve principalement les méthodes de mesure par gaz traceur [21], [22]. Ces méthodes reposent sur un grand nombre d'hypothèses qui ont très peu de probabilités d'être respectées, notamment en ventilation naturelle. Les méthodes gaz traceur sont, par ailleurs, inadaptées en l'état à une application multi-zones.

L'autre obstacle vis-à-vis de l'évaluation de la performance des systèmes de ventilation naturelle et hybride concerne leur dépendance vis-à-vis d'un grand nombre de facteurs. La modélisation numérique est donc nécessaire pour extrapoler la performance de ces systèmes. Elle présente également des lacunes importantes. On retrouve dans la littérature trois grands types de méthodes de modélisation aéraulique : les modélisations empiriques, les modélisations zonales, et les modélisations Computational Fluid Dynamics (CFD[2]) [23].

Les modèles empiriques sont les modèles utilisés dans les normes pour calculer les débits réglementaires [24]. Ils sont fondés sur l'hypothèse d'une homogénéité des paramètres d'état dans l'intégralité du bâtiment. Les débits sont ensuite calculés à l'aide de loi en pression. Ces modèles sont les plus directs à implémenter. En revanche, ils reposent sur un grand nombre d'hypothèses pour fermer le système d'équations, ce qui, associé à l'homogénéité des paramètres au sein du bâtiment, entraîne une faible fiabilité [23].

Les modélisations zonales sont beaucoup utilisées au travers des logiciels comme COMIS, CONTAM, ou encore MATHYS. Elles sont basées sur la résolution des équations de

[2]CFD : Computational Fluid Dynamics, modèles basés sur la résolution des équations de Navier-Stokes

Bernoulli, appliquées à chaque zone du bâtiment. Les zones peuvent représenter les pièces du bâtiment, ou plus finement, différentes zones d'une même pièce. A l'image des modèles empiriques, les paramètres d'état sont supposés homogènes au sein des zones, et les transferts d'air entre les zones sont également régis par des lois en pression. L'inconvénient de cette modélisation réside dans la mauvaise prise en compte des effets du vent [25], [26]. Les coefficients de pression introduits en annexe 1.1, et utilisés dans ces modèles sont souvent supposés uniformes en fonction de la direction du vent et de la position de l'ouverture sur la façade. Cependant, ceux-ci dépendent en réalité de leur position sur la façade, de la géométrie du bâtiment, ainsi que de la direction du vent. Une mauvaise prise en compte de ces coefficients de pression est donc préjudiciable à la bonne prise en compte des effets du vent.

Finalement, les modèles CFD sont également beaucoup utilisés en ventilation naturelle. Ils sont basés sur une discrétisation fine du volume, et les équations de Navier Stokes sont résolues sur chacun des volumes infinitésimaux résultants de la discrétisation. La modélisation CFD est la modélisation la plus sophistiquée, et elle calcule elle-même les coefficients de pression appliqués sur l'enveloppe du bâtiment. Elle tient également compte des turbulences que le vent entraîne. C'est donc la meilleure méthode de modélisation pour prendre en compte les effets du vent. En revanche, la modélisation CFD est complexe et le modélisateur doit établir un grand nombre d'hypothèses de thermodynamique qui requièrent une grande expertise. Or, ce haut niveau d'hypothèses requiert une validation expérimentale, difficile à effectuer en ventilation naturelle pour les raisons susmentionnées. Par ailleurs, la plus grande précision offerte par ce type de modélisation s'obtient au prix d'un coût de calcul élevé. Il est, aujourd'hui, difficilement concevable qu'un protocole d'évaluation de la performance aéraulique des systèmes de ventilation naturelle intègre une modélisation CFD en termes de ressource en temps et en calcul qu'elle requiert.

Finalement, aucune méthode de mesure n'est fiable et adaptée à une application in situ dans un bâtiment multi-zones ; et parallèlement aucune modélisation aéraulique ne permet d'estimer rapidement, et/ou de manière fiable, la performance aéraulique d'un système de ventilation naturelle. Les contraintes liées à l'évaluation in situ de la performance aéraulique des systèmes de ventilation naturelle sont donc majeures.

3 Objectifs & Approche scientifique

Dans le but de lever certains verrous scientifiques révélés par la problématique scientifique décrite ci-dessus, le présent travail de thèse traitera de la fiabilisation d'un protocole de mesure dédié aux systèmes de ventilation naturelle. L'objectif est de proposer un protocole de mesure in situ des performances aérauliques d'un système de ventilation naturelle par conduit qui soit fiable, applicable par le plus grand nombre possible d'opérateurs, et relativement peu coûteux. Il doit être applicable à grande échelle. La ventilation naturelle par conduit a été choisie car elle est la plus représentée dans le parc de bâtiment français. Ses similitudes de conception avec la ventilation hybride lui confèrent un atout supplémentaire par rapport aux autres systèmes de ventilation naturelle, que ce soit en vue de rénovations des systèmes existants, ou d'implémentation dans les constructions neuves. C'est également le système de ventilation naturelle dont les forces motrices sont les plus prévisibles, et dont le dimensionnement et l'implémentation dans les constructions neuves sont donc les plus aisés. Le développement d'un protocole de mesure fiable des performances aérauliques d'un système de ventilation naturelle par conduit permettrait :

- d'accroître les connaissances sur la ventilation naturelle par conduit, et donc de faciliter son implémentation dans les constructions neuves ;
- de faciliter les travaux sur l'amélioration de la modélisation de la ventilation naturelle en homogénéisant la méthode de validation des modèles, et donc de faciliter son implémentation dans les constructions neuves ;
- de vérifier la performance à réception d'un système de ventilation naturelle par conduit ou d'un système de ventilation hybride ;
- d'évaluer la performance d'un système de ventilation par conduits existants, d'en adapter la rénovation en système hybride, et de vérifier la performance aéraulique du système rénové. Compte tenu des 18% de logements ventilés naturellement par conduits en 2009, le potentiel de rénovation est substantiel ;
- d'améliorer les modes de régulation des systèmes hybrides qui sont basés sur des mesures de vitesse de vent, et de température. Il permettrait de réduire sensiblement les marges usuellement prises pour respecter les débits réglementaires.

Comme finalité, le travail de thèse cible le développement d'une méthode suivant un protocole de mesure assorti d'un outil automatisé procédant à l'analyse complète de la performance d'un système de ventilation naturelle par conduit. Nous avons appelé la méthode globale, « méthode Kalm'Air ».

Pour répondre à ces objectifs, et atteindre la finalité Kalm'Air, la démarche scientifique présentée en Figure 1-5 a structuré les travaux de thèse.

L'état de l'art (2) a d'abord été réalisé afin d'identifier les indicateurs de performance aéraulique des systèmes de ventilation. Il a également permis d'identifier les méthodes de mesure existantes appliquées en ventilation naturelle. Nous avons questionné leur adaptation en vue d'une application in situ, ainsi que leur précision. Des pistes de fiabilisation y ont également été trouvées. Ensuite trois expérimentations ont été menées en conditions de laboratoire.

Une comparaison expérimentale de la précision des méthodes (3) a d'abord été effectuée pour sélectionner, parmi les méthodes identifiées dans l'état de l'art, celle qui présentait le meilleur rapport adaptation à la mesure in situ / précision. Cette comparaison expérimentale a été opérée dans la cellule expérimentale Hybcell du LTDS[3], ventilée mécaniquement avec des débits variables et aléatoires, afin de tester la robustesse des méthodes. La méthode sélectionnée durant cette phase est la méthode qui a été fiabilisée par la suite.

La fiabilisation de la méthode a ensuite été élaborée en deux temps. La fiabilisation a d'abord été expérimentale (4), avec l'application d'un outil de traitement du signal et le développement d'une procédure de prétraitement des données, qui ont permis d'adapter la méthode originelle aux contraintes de l'application in situ dans un logement ventilé naturellement par conduits. L'expérimentation a été effectuée dans la même cellule expérimentale que celle utilisée à l'étape (3), mais utilisée cette fois dans sa configuration multi-zones. L'outil de traitement du signal, couplé à la procédure de prétraitement des données ont permis d'augmenter la précision de la méthode originelle, de réduire sa sensibilité, et de l'adapter à un logement multi-zones. Une première analyse paramétrique a été réalisée pour

[3] LTDS : Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Structures, Université de Lyon

vérifier la moins grande sensibilité de la méthode fiabilisée expérimentalement par rapport à la méthode originelle. La méthode fiabilisée a été nommée méthode Kalm'Air.

Une fois que cette méthode a été fiabilisée expérimentalement, Kalm'Air a été modélisée, et fiabilisée numériquement (5). L'objectif de cette fiabilisation numérique était d'effectuer une analyse de sensibilité pour formuler l'incertitude de la méthode fiabilisée en fonction d'un certain nombre de paramètres. La fiabilité du modèle utilisé pour l'analyse de sensibilité a été testée sur la base d'une comparaison avec des données expérimentales obtenues dans la cellule expérimentale NatCell, adaptation de la cellule Hybcell à la ventilation naturelle par conduit opérée pour cette thèse.

Finalement, les protocoles d'injection et de mesure, et un outil automatisé Kalm'Air effectuant l'analyse complète ont été développés et testés en conditions in situ (6). Les derniers ajustements de la méthode Kalm'Air et de son protocole d'implémentation et d'analyse ont été réalisés durant cette phase finale. Cette phase livre la méthode Kalm'Air comprenant le protocole expérimental et l'outil automatisé Kalm'Air effectuant l'analyse dont le calcul d'incertitude. Cette méthode Kalm'Air permet à un agent non expert de mesurer in situ les performances aérauliques d'un système de ventilation naturelle par conduit installé dans un logement, sans requérir de connaissances en traitement du signal ou en méthode gaz traceur.

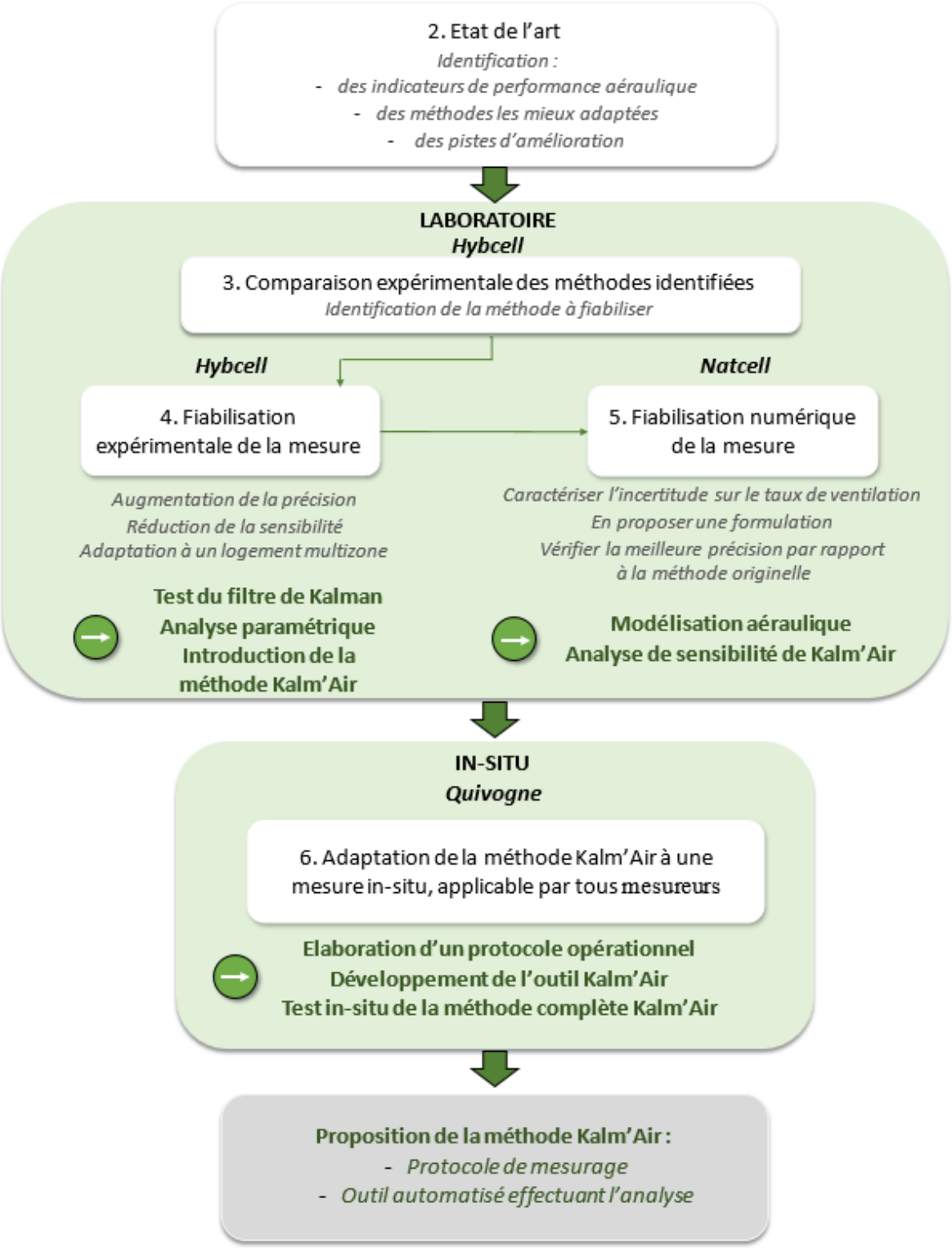


Figure 1-5 : Organigramme de la thèse

4 Plan du manuscrit

Le chapitre 2 introduit les indicateurs de performance aéraulique des systèmes de ventilation. Il introduit également toutes les méthodes de mesure des indicateurs de performance aéraulique utilisées pour la caractérisation de la ventilation naturelle. Il dresse une comparaison basée sur un corpus d'articles des contraintes d'applications, ainsi que de la précision des méthodes. L'outil de traitement du signal utilisé pour la fiabilisation de la méthode de mesure a été identifié au cours de l'état de l'art présenté dans ce chapitre. Ce chapitre permet donc de donner un premier avis sur la méthode la mieux adaptée à la caractérisation de la performance aéraulique d'un système de ventilation naturelle, ainsi qu'une estimation de son incertitude. Ses lacunes, et des pistes d'amélioration de cette méthode sont aussi identifiées.

Le chapitre 3 décrit l'expérimentation menée pour comparer expérimentalement les méthodes de mesure utilisées en ventilation naturelle. L'objectif est de vérifier que la méthode susceptible d'être la mieux adaptée aux contraintes de la ventilation naturelle l'est effectivement et que sa précision est intéressante comparée aux autres méthodes testées.

La méthode retenue, dont la meilleure adaptation a été estimée dans le deuxième chapitre, et vérifiée dans le troisième chapitre, est ensuite fiabilisée expérimentalement dans le chapitre 4 à l'aide de l'outil de traitement du signal « filtre de Kalman », ainsi que d'une procédure de prétraitement des données. Ils permettent de dépasser une grande partie des contraintes identifiées dans l'état de l'art. Le fonctionnement du filtre est décrit, puis le protocole expérimental et les résultats ayant permis de vérifier le potentiel de fiabilisation du filtre de Kalman sont présentés. La réduction de la sensibilité de la méthode originelle est vérifiée.

Le potentiel de la fiabilisation de la méthode intitulée Kalm'Air doit ensuite être concrétisé numériquement, car la modélisation numérique permet de tester l'influence d'un grand nombre de paramètres. C'est l'objet du chapitre 5. Après avoir justifié le choix du modèle, son fonctionnement est présenté. Il est ensuite testé sur la base d'une comparaison avec des données expérimentales obtenues dans la cellule expérimentale préalablement adaptée à la ventilation naturelle par conduit (NATCELL). Une fois validé, celui-ci est utilisé pour effectuer une analyse de sensibilité sur dix paramètres. Ce chapitre se conclut avec l'élaboration de formules qui caractérisent l'incertitude de la méthode de mesure fiabilisée en fonction des dix paramètres. La cohérence avec l'incertitude expérimentale obtenue dans le chapitre précédent est questionnée.

Finalement, le chapitre 6 traite de l'adaptation du protocole à une application in situ en délivrant la méthode Kalm'Air regroupant un protocole de mesure et un outil automatisé réalisant toute l'analyse. Ce chapitre concrétise et concentre ainsi les apports théoriques et expérimentaux de la thèse en donnant une méthode et un outil « clés en main » permettant à tout agent non expert de mesurer les performances aérauliques d'un système de ventilation naturelle par conduit installé dans un logement.

Chapitre 2 Etat de l'art sur la mesure des performances aérauliques des systèmes de ventilation naturelle

Identification des indicateurs de la performance aéraulique

Identification des méthodes de mesure utilisées en ventilation naturelle

Analyse comparative de leur incertitude sur la base de la littérature

1 Introduction

Le chapitre 1 a mis en lumière les difficultés ou contraintes associées à la caractérisation expérimentale des performances aérauliques des systèmes de ventilation naturelle qui, pour rappel, concernent:

- les faibles différentiels de pressions impliqués en ventilation naturelle qui écartent les appareils de mesure utilisés en ventilation mécanique ;
- la variabilité du taux de ventilation qui implique que la période de mesure s'étale sur une période de trente minutes minimum afin d'être représentative [20].

Certaines études ont étudié le flux qui traversait des fenêtres ouvertes à l'aide d'anémomètres thermiques [10], ou de capteurs de pression [27], [28]. Ces techniques font l'hypothèse de l'uniformité du champ de vitesses sur la section de l'ouverture. De plus, elles ne peuvent pas rendre compte du flux proche des bords [27]. Cela peut conduire à des incertitudes importantes. D'autres études utilisent la méthode de Particle Image Velocimetry[4] (PIV) [9], [29]. La PIV est très bien adaptée à des mesures à échelle réduite [29]. En revanche, bien que possible, il n'existe pas de protocole normé pour des applications in situ [29]. Chaque expérimentation in situ doit faire l'objet d'une étude en amont afin d'adapter au mieux le protocole. Cette restriction, couplée au risque que le laser atteigne la rétine d'un occupant ou de l'expérimentateur, complique l'implémentation de la technologie PIV dans un bâtiment réel.

Les difficultés techniques mentionnées ci-dessus concernant la mesure de la performance aéraulique des systèmes de ventilation naturelle peuvent être dépassées grâce aux méthodes gaz traceur. Ces méthodes sont qualifiées d'indirectes car elles sont basées sur l'injection et le suivi d'un gaz traceur dont la concentration sera le reflet du taux de ventilation. Si le gaz traceur est adéquatement choisi, ces méthodes n'interfèrent pas avec le flux d'air, ce qui justifie qu'une grande majorité des articles traitant de la mesure des systèmes de ventilation naturelle utilisent une méthode gaz traceur. Elles présentent également l'avantage de mesurer les infiltrations en plus du taux de ventilation, et donc de connaître le taux de ventilation effectif [27]. Finalement, ces méthodes durent entre plusieurs minutes et plusieurs semaines suivant leur type. Cela vérifie le prérequis proposé par Etheridge [20] concernant la durée représentative d'au moins 30 minutes.

Cependant ces méthodes sont sensibles aux bruits de mesure, et reposent sur des hypothèses dont la violation peut entraîner de fortes incertitudes. Ces hypothèses peuvent concerner la qualité du mixage de l'air neuf avec l'air vicié, ou la stationnarité des taux de ventilation. Elles sont donc particulièrement critiques quand le bâtiment est ventilé naturellement. De plus, les méthodes gaz traceur utilisées avec un seul gaz traceur ne sont pas adaptées à une mesure en bâtiment multi-zones, ce qui représente une contrainte majeure en vue d'une application in situ.

Ce chapitre dresse un état des lieux concernant les méthodes de mesure gaz traceur des performances aérauliques des systèmes de ventilation naturelle. L'objectif est d'identifier la méthode la mieux adaptée, ainsi que des pistes de fiabilisation qui puissent lui être apportée. Les indicateurs de performance aéraulique d'un système de ventilation seront décrits. Ensuite, ce chapitre questionne la pertinence de chaque méthode vis-à-vis d'une mesure in situ des

[4] PIV : Particle Image Velocimetry, méthode de mesure du champ de vitesses à travers une ouverture

performances aérauliques d'un système de ventilation naturelle. Finalement, une analyse comparative de la précision de la mesure du taux de ventilation par les méthodes gaz traceur est réalisée. La majeure partie de ce chapitre a fait l'objet de l'article de Remion et al., [30] publié dans le journal Building and Environment.

2 Caractérisation de la performance aéraulique

Un système de ventilation doit assurer trois fonctions principales [31]: (i) introduire de l'air neuf au sein du bâtiment, (ii) le distribuer équitablement dans l'ensemble du bâtiment, puis (iii) extraire l'air vicié. La caractérisation de la performance aéraulique d'un système de ventilation, repose sur deux types d'indicateurs : les indicateurs quantitatifs, et les indicateurs qualitatifs. Les indicateurs quantitatifs sont plutôt relatifs aux fonctions (i) et (iii), car ils renseignent sur la quantité d'air neuf introduit dans le bâtiment (ou similairement d'air vicié extrait du bâtiment). Ces indicateurs sont en lien avec les considérations énergétiques car ils permettent d'estimer les déperditions thermiques liées au renouvellement d'air. La fonction (ii) peut s'évaluer à l'aide des indicateurs qualitatifs qui renseignent sur la qualité de la distribution de l'air au sein du bâtiment. Ces deux types d'indicateurs doivent être considérés conjointement pour caractériser pleinement la performance aéraulique d'un système de ventilation.

2.1 Le taux de ventilation, indicateur quantitatif

Les indicateurs quantitatifs sont ceux que l'on connaît le mieux. Ils sont liés au taux de ventilation. Celui-ci renseigne sur le volume d'air introduit dans le bâtiment. Le taux de ventilation s'exprime en [$vol.h^{-1}$]. Il peut également être exprimé en [$m^3.h^{-1}$] en multipliant le taux de ventilation par le volume de la pièce, et se nomme ainsi le débit de ventilation. Finalement, la constante nominale de temps peut être calculée en considérant l'inverse du taux de ventilation. Elle sera largement utilisée par la suite pour définir les périodes d'analyse des méthodes gaz traceur à prendre en compte. Le taux de ventilation est l'indicateur qui est utilisé dans les réglementations de la construction comme l'arrêté du 24 Mars 1982 en France, mais également dans les autres pays européens [7]. La norme NF EN 15665 [32] définit des critères d'évaluation de la performance des systèmes de ventilation, en étant basée sur des seuils de concentrations de polluants à respecter. Les taux de ventilation prescrits dans les réglementations de la construction sont alors calculés pour vérifier les critères définis dans la norme.

L'utilisation individuelle des taux de ventilation pour caractériser la performance aéraulique d'un système de ventilation présente une limite [31]. La constante nominale de temps est souvent considérée comme la durée nécessaire à ce qu'une quantité d'air soit évacuée depuis son entrée dans le bâtiment. C'est d'ailleurs la notion qui est utilisée pour calculer les taux de ventilation minimum qui permettent de respecter les critères développés dans la norme 15665 [32]. Or, la constante nominale de temps représente la durée minimum qu'une quantité d'air peut passer dans le bâtiment s'il n'y avait pas de mélange de l'air neuf avec l'air vicié. L'air neuf viendrait progressivement remplacer l'air vicié sans se mélanger avec. On appelle ce type de renouvellement d'air, renouvellement par « effet piston », ou « balayage ». Or cette hypothèse n'est jamais vérifiée dans un bâtiment [33]. En réalité, l'air neuf se mélange avec l'air vicié, plus ou moins parfaitement, ce qui augmente le temps de renouvellement d'air. On appelle mixage parfait le cas où l'air neuf se mélange avec l'air vicié dans la totalité du volume.

A l'inverse, le mixage est imparfait si l'air neuf n'atteint jamais certaines zones dites « court-circuitées ».

2.2 L'âge de l'air, indicateur qualitatif

La finalité des indicateurs qualitatifs est de renseigner sur la qualité de la distribution de l'air neuf. Pour ce faire, il faut s'intéresser à la notion de l'âge de l'air, initialement introduite par Sandberg [34]. L'âge de l'air local représente la durée moyenne qu'a passé une quantité d'air dans le bâtiment quand elle atteint un point P de l'espace. L'âge de l'air global représente la moyenne des âges de l'air locaux. Comme pour le taux de ventilation, l'âge de l'air peut s'exprimer sous plusieurs formes. On peut parler d'âge de l'air résiduel, qui représente la durée moyenne qu'une quantité d'air va passer entre son passage par le point P et son évacuation. Le temps de résidence représente la durée moyenne passée par l'air au sein du bâtiment. La Figure 2-1 synthétise la notion d'âge de l'air, sous toutes ses formes. Si le temps de résidence est égal à 2h, alors après 1h depuis son entrée dans le bâtiment, une quantité d'air a, en moyenne, passé la moitié du temps qu'elle doit passer à l'intérieur du bâtiment. Cette période d'1h correspond donc à l'âge global de l'air. L'âge global de l'air sera systématiquement égal au temps de résidence divisé par 2.

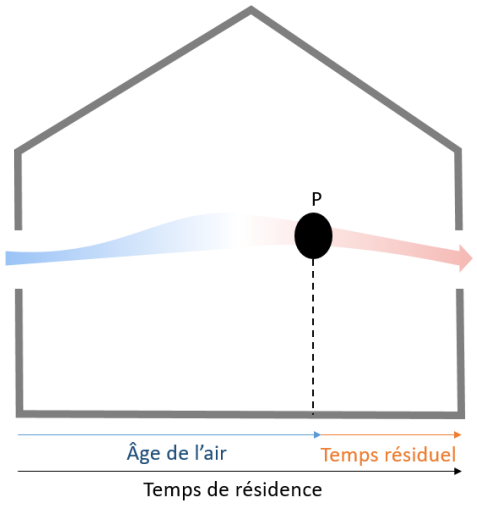


Figure 2-1 : Schéma représentant la notion de l'âge de l'air, adapté de Réf. [31]

2.3 L'indice d'efficacité de renouvellement d'air

L'indice d'efficacité de renouvellement d'air tire profit des indicateurs qualitatifs et quantitatifs présentés ci-dessus. C'est véritablement la considération conjointe de ces deux types d'indicateurs qui permet de caractériser l'efficacité d'un système de ventilation. L'indicateur quantitatif donnera l'information sur la quantité d'air introduite, et l'indice d'efficacité de renouvellement d'air, qui découle des deux types d'indicateurs, décrira la qualité de la distribution de l'air dans le bâtiment. Comme l'âge de l'air peut être local ou global, l'indice d'efficacité de renouvellement d'air le sera également. L'indice d'efficacité du renouvellement d'air local ϵ_p est obtenu en divisant la constante nominale de temps τ par l'âge de l'air local τ_p. L'indice d'efficacité du renouvellement d'air local ϵ_p est donc défini comme suit [33]:

$$\epsilon_p = \frac{\tau}{\tau_p} * 100 \quad (2.1)$$

Avec :

- ϵ_p l'indice d'efficacité locale de renouvellement d'air [%] ;
- τ la constante nominale de temps [h] ;
- τ_p l'âge de l'air local [h].

L'indice d'efficacité de renouvellement d'air global ϵ est obtenu par le quotient de la constante nominale de temps par le temps de résidence $\overline{\tau_r}$.

$$\epsilon = \frac{\tau}{\overline{\tau_r}} * 100 = \frac{\tau}{2\,\overline{\tau_p}} * 100 \quad (2.2)$$

Avec :

- ϵ l'indice d'efficacité de renouvellement d'air [%] ;
- τ la constante nominale de temps [h] ;
- τ_r le temps de résidence [h].

Si l'indice d'efficacité de renouvellement d'air global vaut 100%, cela signifie qu'il n'y a pas eu mélange entre l'air neuf et l'air vicié, et donc que le renouvellement d'air s'est fait par « effet piston », renouvellement d'air le plus efficace. Si le rapport vaut 50%, l'air neuf s'est mélangé avec la totalité de l'air vicié. Le mixage est donc parfait. En dessous de 50%, certaines zones sont court-circuitées. La Figure 2-2 présente les trois types de mixages de l'air correspondants à un indice de 100% (en haut), de 50% (au milieu), et inférieur à 50% (en bas), et les valeurs caractéristiques de l'âge moyen et du temps de résidence en fonction d'un taux de ventilation de 1vol.h^{-1}.

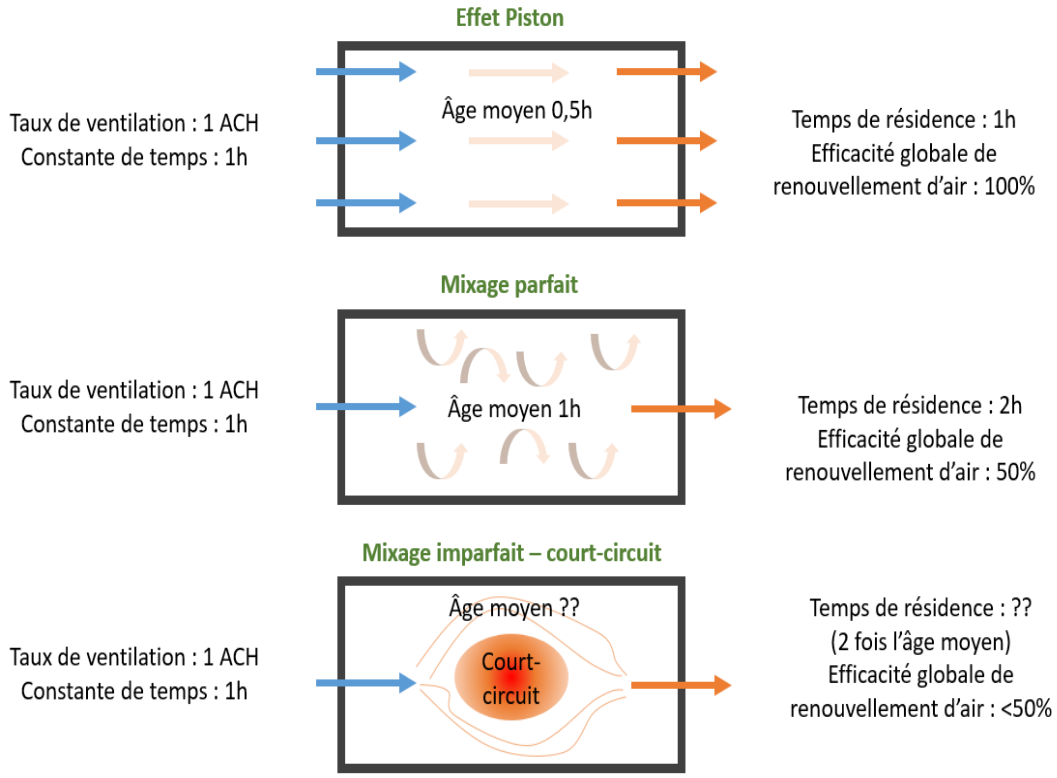


Figure 2-2 : Les trois types de mixage de l'air, adapté de Réf. [33]

3 Méthodes gaz traceur

3.1 Méthodologie de l'analyse des méthodes gaz traceur

Les méthodes adaptées à la ventilation naturelle sont décrites dans le paragraphe 3.2. On retrouve les méthodes gaz traceur conventionnelles, les méthodes à partir du CO_2 métabolique de l'occupant, ainsi que quelques méthodes innovantes. Leurs avantages et inconvénients en termes de praticité de mise en place pour la mesure des systèmes de ventilation naturelle sont mentionnés. La mesure du taux de ventilation et de l'âge de l'air sont traités dans le paragraphe 3.2. Ensuite, une analyse comparative des méthodes préalablement décrites sera effectuée dans le paragraphe 3.3. Comme les seules méthodes permettant de mesurer l'âge de l'air sont les méthodes gaz traceur, l'analyse de leur précision concernera uniquement la mesure du taux de ventilation. L'analyse comparative des méthodes de mesure des performances aérauliques des systèmes de ventilation naturelle est basée sur 49 études publiées entre 1980 et 2018, ainsi que sur 4 normes internationales. Ce corpus n'est pas exhaustif, il comprend des articles, des ouvrages, ainsi que des rapports. L'analyse comparative de la précision des méthodes présentée au paragraphe 3.3 requiert d'avoir accès à des articles qui comparent les méthodes de mesure à une mesure de référence. Pour cette raison, le corpus d'articles comprend également des articles qui traitent de la ventilation mécanique, car elle permet une mesure de référence à l'aide d'un débitmètre, a contrario de la ventilation naturelle.

Le Tableau 2-1 présente les références qui ont été utilisées pour l'analyse. Les études sont triées suivant plusieurs critères. La troisième colonne (type d'étude) fait la distinction entre les études qui décrivent simplement l'implémentation d'une méthode gaz traceur (descr.), celles qui testent leur précision (test), ou celles qui présentent un développement théorique (théorie). La colonne suivante renseigne sur le système de ventilation de l'étude (naturelle, mécanique ou les deux). Ensuite, la distinction est faite entre les méthodes conventionnelles (GT) et les méthodes à partir de l'occupation (Occ) (cf. paragraphe 3.2.4). La colonne d'après mentionne la méthode utilisée (décroissance, dose continue, concentration constante…) (cf. paragraphes 0 et 3.2.4). Ensuite, le paramètre mesuré est mentionné (âge de l'air, ACH, volume effectif). Finalement les deux dernières colonnes spécifient la référence utilisée pour comparer la précision des méthodes, pour les études qui testent les méthodes. L'avant dernière colonne se réfère à une comparaison à un modèle, alors que la dernière colonne se réfère à une comparaison à une mesure de référence.

Auteurs	Réf.	Type d'étude	Système de ventilation	Gaz traceur ou à partir de l'occupant	Méthode	Paramètre mesuré	Compa-raison avec modèle	Mesure de référence
(Allab, 2017)	[31]	Test	Les 2	GT	Dec	ACH; Age	-	Fil chaud
(ASTM E741, 2017)	[35]	Norme	Les 2	GT	Dec ; DC; CC	ACH	-	-
(ASTM D6245, 2012)	[36]	Norme	Les 2	Occ	TMBE ; Bui ; Dec	ACH	-	-
(Batterman, 2017)	[37]	Revue	Nat	Occ	TMBE ; Dec ; Bui ; Moy	ACH	-	-
(Bekö, 2010)	[38]	Descr.	Nat	Occ	Bui ; moy ; Dec	ACH	-	-

(Bekö, 2016)	[39]	Test	Nat	Occ; GT	Bui ; DC	ACH	-	CC
(Blomsterberg, 1999)	[40]	Descr.	Les 2	GT	CC ; DC	ACH	Nod.	-
(Buratti, 2011)	[41]	Test	Nat	GT	Dec	Age	CFD	-
(Caciolo, 2011)	[9]	Descr.	Nat	GT	Dec	ACH	Emp	-
(Caciolo, 2013)	[10]	Descr.	Nat	GT	Dec	ACH	Emp ; CFD	-
(Dias Carrihlo, 2015)	[42]	Test	Nat	GT	Cyclic atm. CO2	ACH	-	Occ dec
(Chao, 2004)	[43]	Test	Les 2	GT	CC ; Dec	ACH	-	CC
(Chu, 2015)	[44]	Descr.	Nat	GT	Dec	ACH	-	Autres études
(Coley, 2002)	[45]	Test	Nat	Occ	TMBE	ACH	-	Dec
(Cui, 2015)	[46]	Test	Méc	GT	Dec	ACH	-	Déb.-mètre
(Cui, 2015)	[47]	Descr.	Nat	GT	Dec	ACH	Emp	-
(Demmers, 2000)	[48]	Test	Méc	GT	DC	ACH	CFD	Ventil. calibré
(Duarte, 2018)	[49]	Théorie	Nat	Occ	TMBE filtre Kalman	ACH	-	-
(Dias Carrihlo, 2015)	[42]	Test	Nat	-	Cyclic atm. CO_2	ACH	-	Occ dec
(Etheridge, 2012)	[20]	Théorie	Nat	GT	Dec ; DC ; CC	ACH	-	-
(Gough, 2018)	[50]	Descr.	Nat	GT	Dec	ACH	Emp	-
(Han, 2011)	[51]	Théorie	Méc	GT	Dec ; DC	Age	-	-
(Hou, 2018)	[52]	Descr.	Nat	Occ	Bui	ACH	-	-
(ISO 12569, 2017)	[53]	Norme	-	GT	Dec ; DC; CC	ACH	-	-
(ISO 16000-8, 2017)	[54]	Norme	-	GT	Dec ; DC; Pulse	Age	-	-
(Koinakis, 2005)	[55]	Descr.	Nat	GT	Dec	ACH	Rés.	-
(Laussmann , 2011)	[56]	Théorie	-	GT	Dec ; DC; CC	ACH	-	-
(Lu, 2009)	[57]	Test	Méc	Occ	Dec	ACH	-	Pression
(Lunden, 2012)	[58]	Descr.	Nat	GT	DC	ACH	-	-
(Macarulla, 2018)	[59]	Test	Nat	Occ	Grey-box	ACH	-	-
(Mikola, 2017)	[60]	Descr.	Nat	Occ	Bui	ACH	-	-
(Nikoloupoulos, 2012)	[61]	Test	Nat	GT	Dec	ACH	CFD	-
(Okuyama, 2011)	[62]	Théorie	Nat	GT	Dec	ACH	-	-
(Penman, 1980)	[63]	Descr.	Nat	Occ	TMBE	ACH	-	-

(Riffat, 1993)	[64]	Descr.	Nat	GT	Dec	Volume Eff	-	-
(Roulet, 1991)	[65]	Théorie	Méc	GT	Dec	Age	-	-
(Roulet, 1991)	[66]	Théorie	-	GT	Dec ; DC ; CC	ACH; Age	-	-
(Roulet, 2002)	[67]	Test	Nat	Occ	Dec	ACH	-	Dec SF6
(Sandberg, 1983)	[68]	Théorie	Méc	GT	DC ; Dec	Age	-	-
(Sandberg, 1985)	[69]	Test	Méc	GT	Dec ; CC	ACH; age	-	Déb.-mètre
(Sandberg, 1989)	[70]	Test	Méc	GT	CI ; CC	ACH	-	Déb.-mètre
(Santamouris, 2008)	[71]	Descr.	Nat	GT	Dec	ACH	-	-
(Schibuola, 2016)	[72]	Descr.	Nat	Occ	TMBE	ACH	-	-
(Sherman, 1990)	[73]	Théorie	-	GT	Dec ; DC ; CC	ACH	-	-
(Sherman, 2014)	[74]	Test	Nat	GT	DC	ACH	-	-
(Smith, 1988)	[75]	Test	Nat	Occ	TMBE	ACH	-	-
(Sutcliffe, 1990)	[76]	Test	-	GT	Dec ; DC ; Pulse	Age	-	-
(Turanjanin, 2014)	[77]	Descr.	Nat	Occ	Dec	ACH	-	-
(Turiel, 1980)	[78]	Test	Nat	Occ	Dec	ACH	-	Dec ; Déb.-mètre
(Van Buggenhout, 2006)	[79]	Descr.	Méc	GT	DC	Age	Grey-box	CI
(Van buggenhout, 2009)	[80]	Test	Méc	GT	Dec	ACH	-	Déb.-mètre

Tableau 2-1 : Corpus d'articles utilisés pour l'analyse comparative des méthodes gaz traceur, [30]

Méc = Mécanique ; Nat = naturelle; GT = Gaz Traceur; Occ = CO_2 métabolique; Dec = Decay; CC =Concentration constante; DC = Dose Continue; TMBE = Transient mass balance equation; Bui = Build-up; Moy= Moyenne de la concentration inverse; Cyclic atm. CO_2 =Variation cyclique de CO_2 atmosphérique; Déb.mètre = Débit-mètre; ACH = Air Change per Hour; Emp = Empirique; CFD = Computational Fluid Dynamic; Rés. =Réseau

3.2 Description des méthodes de mesure gaz traceur

3.2.1 Introduction aux méthodes gaz traceur

Les méthodes gaz traceur conventionnelles sont décrites par les normes européenne ISO 12569 [22], et américaine ASTM E741 [35]. Elles peuvent être catégorisées suivant la manière d'injecter le gaz. On recense trois manières d'injecter le gaz : avant la mesure, pendant la mesure à un débit constant, ou pendant la mesure avec un débit variable capable de maintenir une concentration cible du gaz traceur. La première est utilisée par les méthodes dites de décroissance de la concentration, qui calculent le taux de ventilation moyen ou l'âge de l'air depuis la décroissance de la concentration sur environ une constante de temps τ. Le deuxième

type d'injection cité est lié aux méthodes par dose continue qui utilisent la concentration d'équilibre atteinte au bout d'au moins 3τ pour calculer le taux de ventilation ou l'âge de l'air. Finalement, le dernier type d'injection concerne la méthode par concentration constante. Elle requiert un régulateur de débit massique qui soit asservi à une concentration cible. C'est la seule méthode gaz traceur qui permet de mesurer l'évolution d'un taux de ventilation dynamique.

On retrouve également dans la littérature des méthodes dérivées des méthodes gaz traceur, mais qui tirent profit du CO_2 métabolique produit par les occupants d'une pièce [37]. Ces méthodes montrent un intérêt grandissant car elles ne requièrent pas d'injection de gaz, et sont donc moins coûteuses. Turiel et Rudy [78] étaient parmi les premiers à identifier le potentiel de ces méthodes dans les années 1980. Récemment, Batterman [37] a réalisé un état des lieux les concernant. Elles sont décrites dans une norme américaine ASTM D6245 [36]. Batterman [37] a identifié quatre méthodes principales. Deux sont directement dérivées des méthodes conventionnelles, à savoir la méthode par dose continue, et la méthode par décroissance de la concentration. Deux autres méthodes sont basées sur les mêmes principes mais ne s'apparentent pas directement à une méthode gaz traceur conventionnelle, à savoir les méthodes « Build-up », et «Transient Mass balance Equation (TMBE) ». A contrario des méthodes conventionnelles, les méthodes par CO_2 métabolique ne permettent pas la mesure de l'âge de l'air. Le problème majeur émanant de ces méthodes concerne l'incertitude liée au taux d'émission de CO_2 métabolique, qui dépend d'un certain nombre de paramètres comme le sexe, l'activité, l'âge etc. Persily et de Jonge [81] ont proposé une mise à jour de la formule du taux d'émission de CO_2 métabolique, qui n'avait pas été révisée depuis 1980. L'ancienne formule surestimait le taux d'émission masculin de 15%, et le féminin de 25%.

Finalement, quelques méthodes innovantes, toujours basées sur les principes des méthodes gaz traceur conventionnelles, ont été identifiées.

3.2.2 Principes physiques des méthodes gaz traceur

Les méthodes gaz traceur sont tout d'abord basées sur une hypothèse de zone unique incluant quatre prérequis [21] :

- La concentration de gaz traceur doit être homogène dans la pièce d'étude ;
- la zone doit être isolée, en contact exclusif avec l'extérieur ;
- l'air neuf provenant de l'extérieur doit être parfaitement mixé avec l'air vicié de la pièce ;
- si le gaz traceur est présent dans l'atmosphère, sa concentration ne doit pas varier pendant la mesure.

Même si certaines techniques permettent la mesure des taux de ventilation multi-zones par gaz traceur (cf. paragraphe 3.2.3.5), ces méthodes en sont à la base inadaptées. Les deux normes qui concernent les méthodes gaz traceur traitent d'ailleurs uniquement du cas mono-zone [22], [35]. Si les conditions de l'hypothèse de zone unique sont remplies, on peut alors décrire l'évolution du gaz à l'aide de l'équation de bilan de masse :

$$V\frac{dC(t)}{dt} + Q(t) * [C(t) - C_{ext}(t)] = m(t) \quad (2.3)$$

Avec :

- V le volume de la pièce [m^3] ;
- $C(t)$ la concentration dans la pièce [ppm] ;
- $C_{ext}(t)$ la concentration extérieure [ppm] ;
- $Q(t)$ le débit de ventilation [$m^3.h^{-1}$] ;
- $m(t)$ le taux d'émission du gaz [$m^3.h^{-1}$].

Sherman [21] propose ensuite de résoudre l'équation 2.3 au moyen de trois techniques qui résultent d'hypothèses différentes. Il propose la résolution par intégration (équation 2.5), la résolution par régression (équation 2.4), et la résolution par moyenne (équation 2.6). En sus de la manière d'injecter le gaz, les méthodes sont également distinguées suivant la technique utilisée pour résoudre l'équation de bilan de masse. On parlera alors de sous-méthode pour cette deuxième source de distinction. Pour chaque technique, la résolution de l'équation de bilan de masse suppose que la concentration extérieure soit fixe.

La résolution par régression de l'équation de bilan de masse vise à identifier le taux de ventilation qui permet à la formule suivante (équation 2.4) de décrire au mieux l'évolution de la concentration. Le taux de ventilation est supposé fixe par la régression :

$$C(t) = (C_R - C_{ext})\, e^{-\frac{Q_R}{V_R}t} + C_{ext} + \int_0^t \frac{m(t\prime)}{V_R} e^{-\frac{Q_R}{V_R}(t-t')}\, dt' \qquad (2.4)$$

Avec :

- C_R la concentration de régression [ppm] ;
- Q_R le débit ventilation de régression [$m^3.h^{-1}$] ;
- V_R le volume de régression [m^3].

La deuxième méthode de résolution proposée par Sherman est la résolution par intégrale. Elle suppose également que le taux de ventilation est fixe. En intégrant de part et d'autres de l'équation 2.3, et en isolant Q supposé constant, on obtient la formulation suivante :

$$Q = \frac{\int_{t_0}^{t_f} m(t)\, .dt + V(C_0 - C_f)}{\int_{t_0}^{t_f} C(t) - C_{ext}\, .\, dt} \qquad (2.5)$$

Finalement, la dernière résolution de l'équation 2.3 qui, elle, permet au taux de ventilation de varier, est la résolution par moyenne. Cette fois, le débit de ventilation Q est isolé, puis la moyenne de part et d'autre de l'équation est considérée. On obtient la formulation suivante du débit de ventilation :

$$\bar{Q} = \frac{\overline{m(t)}}{C - C_{ext}} - \frac{V}{t_f - t_0} ln(\frac{C_f - C_{ext}}{C_i - C_{ext}}) \qquad (2.6)$$

Les normes ISO 12569 [20], et ASTM E741 [33] décrivent chacune de ces méthodes et sous-méthodes. Ces méthodes sont aussi décrites individuellement dans le paragraphe suivant.

3.2.3 Méthodes de mesure conventionnelles

3.2.3.1 Choix du gaz traceur

Le choix du gaz traceur est d'une importance primordiale. Sherman [21] propose un certain nombre de propriétés que doit vérifier un gaz traceur idéal :

- il doit être sans danger pour l'expérimentateur, pour le matériel ou pour le bâtiment. Il ne doit donc pas être inflammable, toxique, allergénique etc. ;
- il ne doit pas être réactif car cela biaiserait le calcul des indicateurs de performance aéraulique s'il réagissait chimiquement ou physiquement avec le système ;
- il ne doit pas affecter le flux d'air, ou la densité de l'air. Les mécanismes observés ne doivent être altérés d'aucune manière ;
- il ne doit idéalement pas être présent dans l'atmosphère, afin de pouvoir l'identifier directement. Si le gaz traceur utilisé est présent dans l'atmosphère, sa concentration doit être fixe, et la quantité de gaz injectée doit permettre à la concentration du gaz d'être largement supérieure à la concentration atmosphérique;
- finalement, le gaz traceur doit être mesurable.

Aucun gaz traceur n'est idéal malgré de nombreuses études les comparant [21], [56]. Depuis les années 1990, la grande majorité des études gaz traceur utilisaient le SF_6. C'est le gaz qui se rapproche le plus d'un gaz traceur idéal [56]. Sa densité vaut 5 fois celle de l'air, mais les faibles quantités injectées n'entraînent pas d'influence sur l'écoulement de l'air. Il est extrêmement stable, et n'est quasiment pas présent dans l'atmosphère. La mesure de sa concentration est très précise grâce à la technologie par détection de capture électronique. En revanche, son impact environnemental est très élevé. Son potentiel de réchauffement climatique est évalué à 24000 fois celui du CO_2 sur 100 ans [82].

Le CO_2 a donc progressivement remplacé le SF_6 grâce à son faible coût et à la disponibilité sur le marché de capteurs autonomes présentant un bon rapport coût/efficacité, qui facilitent grandement l'application in situ des méthodes gaz traceur [83]. Son efficacité en tant que gaz traceur a été prouvée par comparaison avec les résultats provenant du SF_6 [56]. Les écarts moyens étaient de 6%. Le CO_2 constituera donc le gaz traceur de prédilection utilisé dans la présente thèse en raison de sa plus grande praticité. Son utilisation entraînera, toutefois, des contraintes, notamment à cause de l'émission du CO_2 métabolique. Cette principale contrainte sera traitée dans le chapitre 4.

3.2.3.2 Mesure du taux de ventilation par décroissance de la concentration

Les méthodes gaz traceur par décroissance de la concentration sont les plus utilisées en ventilation naturelle grâce à leur facilité de mise en œuvre et au faible taux de gaz qu'elles requièrent. Le gaz est donc injecté avant la mesure. L'injection du gaz est stoppée quand la concentration initiale souhaitée est atteinte. Il est conseillé d'utiliser un ventilateur de brassage pendant l'injection afin d'injecter le gaz de manière homogène. La concentration du gaz doit être homogène avant de démarrer la méthode de décroissance de la concentration [22]. Si le taux de ventilation est fixe, et que l'hypothèse de zone susmentionnée (paragraphe 3.2.2) est vérifiée, alors la décroissance de la concentration du gaz traceur sera exponentielle. Cette décroissance permet le calcul du taux de ventilation (moyen si le taux de ventilation varie) entre le premier et le dernier point de mesure. Le choix du premier et du dernier point de mesure est, comme pour la plupart des méthodes gaz traceur, d'une importance capitale : la décroissance

doit être suffisamment importante pour que la différence des concentrations extrêmes soit éloignée de l'incertitude usuelle des instruments de mesure, mais la concentration finale ne doit pas être trop proche de la concentration ambiante [56]. Concernant le premier point de mesure, il convient d'avoir dépassé une période transitoire qui a lieu juste après la fin de l'injection, où l'évolution de la concentration est fluctuante. Cette période dure quelques minutes et dépend du niveau du taux de ventilation. Concernant le dernier point de mesure, il est souvent conseillé d'attendre au moins 1 renouvellement d'air. La période optimale pour minimiser les incertitudes de mesure pour une décroissance exponentielle se trouverait entre 1,1τ, et 1,25τ suivant la sous-méthode par décroissance de la concentration retenue [62]. La Figure 2-3 présente le schéma de la méthode par décroissance de la concentration.

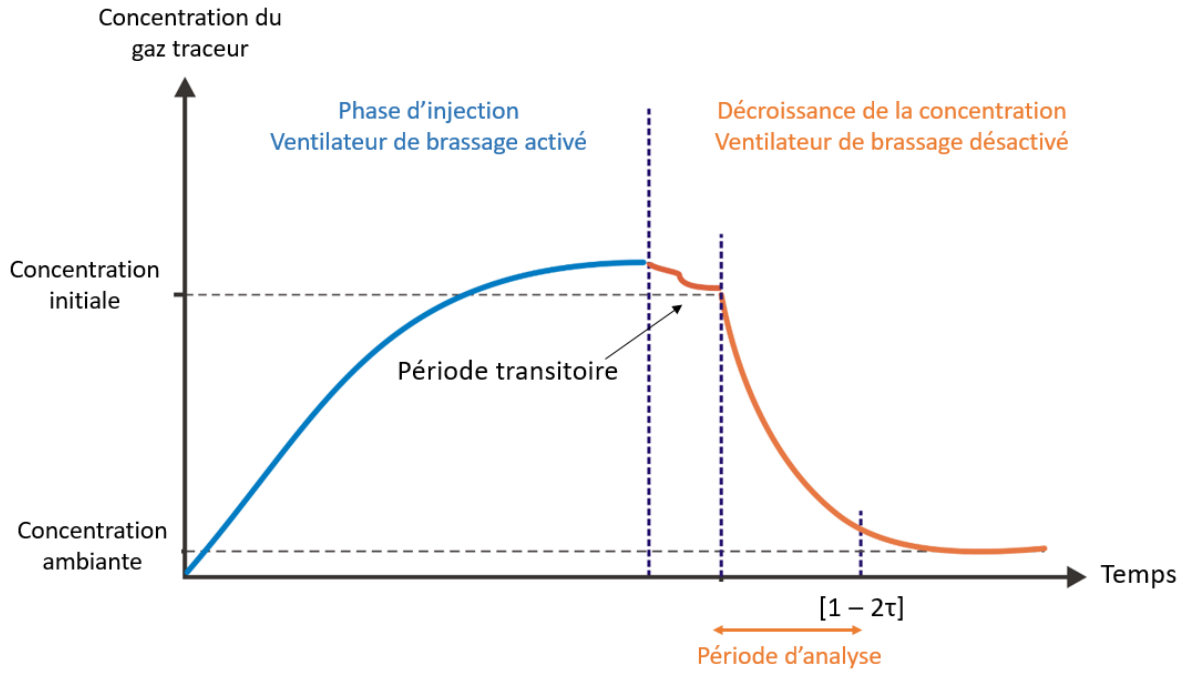


Figure 2-3 : Schéma de principe de la méthode par décroissance de la concentration

La mesure du taux de ventilation est alors obtenue par résolution de l'équation de bilan de masse selon l'une des trois sous-méthodes suivantes:

- la méthode 2 points basée sur une résolution par moyenne (équation 2.7) ;
- la méthode multipoints basée sur une résolution par régression (équation 2.8) ;
- la méthode par concentration dégressive du gaz à l'extraction basée sur une résolution par intégration (équation 2.9).

$$N_2 = \frac{ln(C_0 - C_{ext}) - ln(C_f)}{t_f - t_0} \quad (2.7)$$

$$N_n = \frac{\sum t_i * \sum ln(C_i - C_{ext}) - n * \sum t_i * ln(C_i - C_{ext})}{n * \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} \quad (2.8)$$

$$N_{evac} = \frac{C_0 - C_{ext}}{t_f - t_0 \, \overline{C(t)}} \quad (2.9)$$

Avec :

- N le taux de ventilation [vol.h^{-1}] ;
- C_0 la concentration initiale [ppm] ;
- C_f la concentration finale [ppm] ;
- C_{ext} la concentration extérieure [ppm] ;
- t_i le temps au i^{ème} pas de temps [s].

Basée sur la résolution par moyenne, la première tolère un débit variable. En revanche, reposant sur 2 points de mesure uniquement, elle est caractérisée par des incertitudes importantes.

La méthode multipoints représente une régression aux moindres carrés. Cela permet de réduire considérablement l'influence des bruits de mesure, mais le taux de ventilation est supposé fixe.

Finalement, la méthode par concentration dégressive du gaz à l'extraction suppose également un taux de ventilation fixe, et requiert que le système de ventilation comporte une bouche d'extraction. La norme précise qu'elle permet d'inhiber l'influence d'un mixage imparfait de l'air neuf avec l'air vicié pendant la mesure car toute la concentration du gaz injecté dans la salle sera évacuée par le conduit d'extraction [4].

La méthode par concentration dégressive du gaz à l'extraction est très peu adaptée à la ventilation naturelle, à cause de la nécessité pour le système de comporter une bouche d'extraction, parfois incompatible avec la ventilation traversante et mono-façade. De plus, le capteur doit être placé à proximité immédiate de la bouche, si elle existe, et donc il peut potentiellement perturber le flux d'air. Par ailleurs, elle ne tolère pas la variabilité du taux de ventilation. Aucun article n'a été identifié dans la littérature traitant de cette méthode.

La méthode multipoints ne tolère pas le débit variable. En revanche, parce qu'elle réduit l'influence des bruits de mesure, elle est souvent préférée à la méthode 2 points, même en conditions de ventilation naturelle [9], [27], [47], [50], [55], [71]. L'analyse de la précision de ces deux sous-méthodes sera traitée dans le paragraphe 3.3.1.

3.2.3.3 Mesure du taux de ventilation par dose continue

Les méthodes par dose continue sont également régulièrement utilisées. Elles requièrent l'injection constante d'un gaz. Un régulateur de débit massique doit être utilisé pour s'assurer du taux d'émission constant. Le gaz doit être dosé de manière homogène dans la pièce d'intérêt. A la différence de la méthode par décroissance de la concentration, l'utilisation d'un ventilateur de brassage doit être évitée car la période d'injection n'est pas distincte de la période d'analyse. Celui-ci perturberait l'écoulement de l'air pendant l'analyse. Le dosage homogène requiert donc l'implémentation d'un grand nombre de points de dosage au sein du volume, ce qui complique la mise en œuvre de la méthode.

Comme pour la méthode par décroissance de la concentration, la résolution de l'équation de bilan de masse conduit à plusieurs sous-méthodes. La résolution par intégration donne la méthode par moyenne de la concentration qui suppose le taux de ventilation constant (équation 2.10). Si le taux de ventilation est variable, la norme ISO 12569 [22] propose d'utiliser la méthode par inverse de la concentration moyenne qui résulte de la méthode de résolution par moyenne (équation 2.11). On observe dans les deux expressions un terme

d'accumulation du gaz qui peut être négligé si suffisamment de temps est attendu. On peut considérer qu'après 3τ, la concentration a atteint 95% de sa valeur d'équilibre [56]. Il est conseillé de ne pas considérer la période transitoire qui précède ces 3τ [22]. Ces méthodes requièrent donc beaucoup plus de temps que les méthodes par décroissance de la concentration, et donc davantage de gaz traceur.

$$Q_{moy.C°} = \frac{m.\Delta T}{\int_{t_0}^{t_f}(C - C_{ext}).dt} - \frac{V}{t_f - t_0}\left[\frac{C_f - C_0}{\bar{C} - C_{ext}}\right] \quad (2.10)$$

$$\overline{Q_{inv.C°}} = \frac{m}{t_f - t_0}.\int_{t_0}^{t}\frac{dt}{C - C_{ext}} + \frac{V}{t_f - t_0}.ln\left(\frac{C_O - C_{ext}}{C_f - C_{ext}}\right) \quad (2.11)$$

Avec :

- Q le débit de ventilation [$m^3.h^{-1}$] ;
- m le taux d'émission du gaz [$m^3.h^{-1}$] ;
- V le volume de la pièce [m^3].

La Figure 2-4 propose le schéma de principe des méthodes par dose continue. On peut aussi citer une méthode dose continue qui utilise l'émission passive d'un gaz à travers une membrane contrôlante communément appelée Constant Injection Long-Term Sampling méthode (CILTS), ou PFT-méthode en référence au type de gaz qu'elle requiert (PerFreons tracer gas). Cette méthode est intéressante car elle permet de mesurer le taux de ventilation moyen d'un logement habité sur plusieurs semaines ou plusieurs mois [58], [84]–[86].

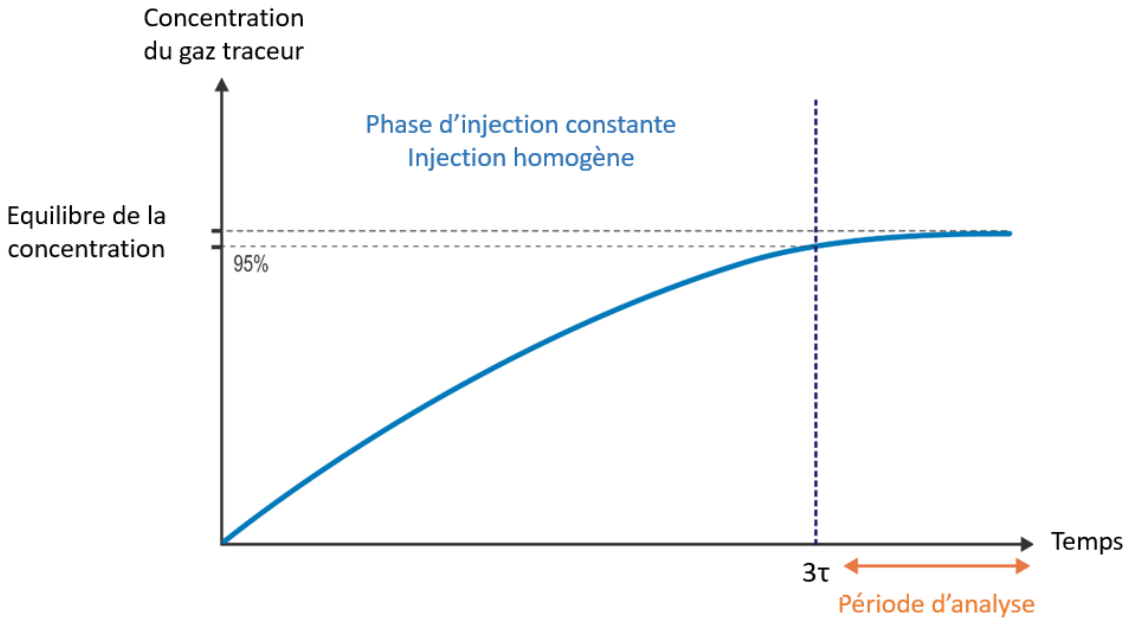


Figure 2-4 : Schéma de principe des méthodes par dose continue

3.2.3.4 Mesure du taux de ventilation par concentration constante

La méthode par concentration constante est considérée comme la méthode gaz traceur de référence. Son régulateur de débit massique asservi à une valeur de concentration cible lui permet de décrire l'évolution d'un taux de ventilation dynamique. Comme la concentration est supposée constante, la résolution de l'équation de bilan de masse est immédiate. Le taux de ventilation est obtenu grâce au ratio du taux d'émission sur la concentration cible. Pour prendre en compte l'inertie du système, il est toutefois conseillé de moyenner l'équation sur des périodes successives [87]. Chao et al. [87] préconisent de démarrer l'injection quelques heures avant de démarrer l'analyse. Cette méthode requiert donc un matériel sophistiqué, ainsi que des expérimentateurs entraînés à utiliser des régulateur Proportionnel Intégral Dérivé (PID). Elle est donc majoritairement restreinte à des projets de recherche [84], [85], [87]. Elle est souvent utilisée pour évaluer la précision des autres méthodes gaz traceur, en considérant qu'elle représente la référence. La Figure 2-5 propose le schéma de la méthode par concentration constante.

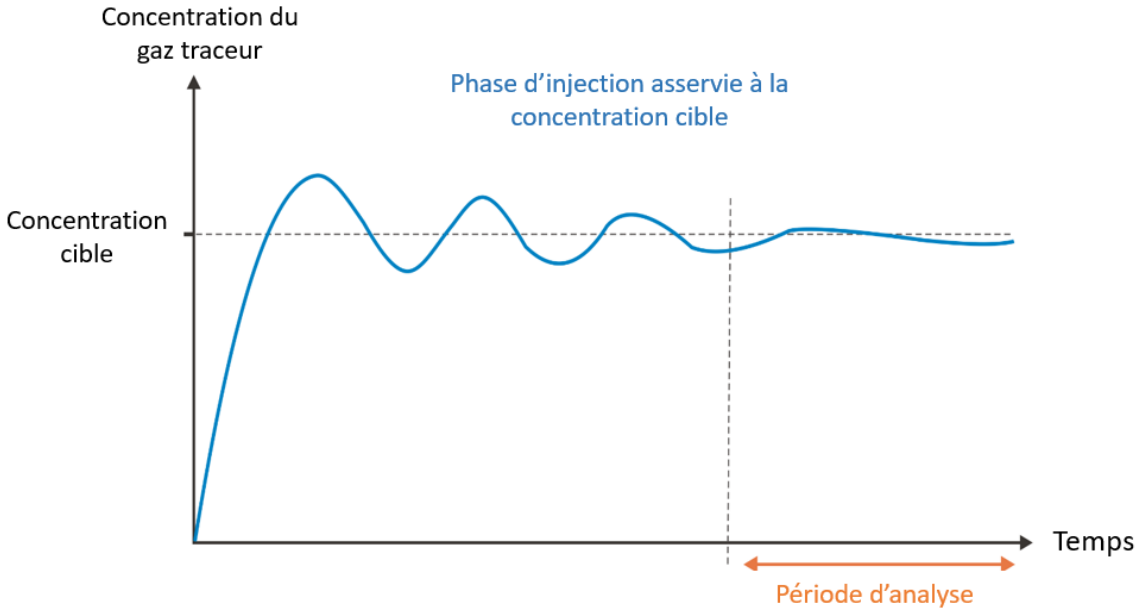


Figure 2-5 : Schéma de principe de la méthode par concentration constante

3.2.3.5 Mesure du taux de ventilation multi-zones

L'hypothèse de zone unique mentionnée dans le paragraphe 3.2.2 spécifie que la zone d'étude doit être en contact exclusif avec l'extérieur [21]. Les normes qui décrivent les méthodes gaz traceur ne traitent d'ailleurs que le cas mono-zone [22], [35]. Les bâtiments sont rarement mono-zone, donc ce paragraphe présente les solutions existantes pour mesurer le taux de ventilation global d'un bâtiment multi-zones, ou les flux interzones.

Si le taux de ventilation global est recherché, la solution, pour les méthodes par décroissance de la concentration et par concentration constante, est de traiter le bâtiment en tant que zone unique. Pour la méthode par décroissance de la concentration, cela signifie que le gaz doit être rendu homogène dans tout le bâtiment au début de la mesure. Il convient alors de disposer les capteurs dans chaque pièce du bâtiment et de moyenner la concentration des capteurs pour calculer le taux de ventilation. Concernant la méthode par concentration

constante, le principe est identique : il convient d'instrumenter chaque pièce avec un régulateur de débit massique asservi à une même valeur cible de concentration pour inhiber l'effet des flux interzones [84]. Pour les deux méthodes, plus la différence des taux de ventilation entre les pièces sera importante, plus grand sera le biais de la méthode [69]. La recirculation de l'air d'une pièce vers une autre peut également impacter significativement le résultat. Concernant la méthode par dose continue, Sandberg et al. [70] proposent, si le schéma d'écoulement de l'air est bien identifié, d'injecter le gaz dans la pièce d'entrée d'air et de mesurer sa concentration dans la pièce d'extraction. Cela suppose que le bâtiment ne dispose que d'une seule pièce d'extraction, ce qui n'est pas vérifié dans un bâtiment de logements. Globalement aucune méthode n'est adaptée à une mesure du taux de ventilation global d'un bâtiment multi-zones.

Concernant la mesure des flux interzones, Roulet et Vandaele [66] proposent deux méthodes :

- une méthode développée par Afonso [88], qui requiert de réaliser les mesures alternativement dans chaque pièce. La concentration doit être mesurée dans la pièce dans laquelle est réalisée la mesure, ainsi que dans les pièces adjacentes. Pour commencer la mesure dans une nouvelle pièce, il faut que la totalité du gaz ait été évacuée du bâtiment. Cette méthode est intéressante, mais elle repose sur l'hypothèse que les flux interzones sont constants pendant le temps nécessaire à compléter les mesures dans chaque pièce du bâtiment. Cette hypothèse a très peu de chances d'être vérifiée en ventilation naturelle [27]. Koinakis et al. [55] ont, toutefois, utilisé cette méthode pour valider un modèle nodal de ventilation naturelle ;
- une méthode utilisant un gaz différent par zone [89], [90]. La méthode multi-gaz traceur est alors résolue individuellement pour chaque zone. C'est une méthode difficilement applicable car elle requiert autant de gaz traceurs différents que le bâtiment comporte de zone. Le nombre de gaz traceur différents peut, cependant, être réduit si deux zones n'ont aucune chance de communiquer entre elles.

3.2.3.6 *La mesure de l'âge de l'air*

L'hypothèse de zone unique mentionnée dans le paragraphe 3.2.2 suppose également que le gaz doit être homogène dans la pièce étudiée, et que le mixage de l'air neuf avec l'air vicié doit être parfait [21]. Ce paragraphe montre qu'avec plusieurs capteurs, les méthodes gaz traceur peuvent permettre d'évaluer la qualité de la distribution de l'air si cette hypothèse n'est pas vérifiée.

Plusieurs études [20], [66], [68], [76] mettent l'accent sur la nécessité de considérer la notion de l'âge de l'air dans l'évaluation de la performance des systèmes de ventilation. Cela permet d'apprécier la mauvaise distribution de l'air qui peut régner dans les bâtiments réels. Les méthodes gaz traceur sont les seules méthodes de mesure existantes qui permettent la mesure de l'âge de l'air, qu'il soit local ou global (cf. paragraphe 2.2). En plus de leur adaptation vis-à-vis des systèmes de ventilation naturelle, cette caractéristique leur confère un avantage certain sur toutes les autres méthodes de mesure du taux de ventilation. La norme 16000-8 [54] décrit l'application des méthodes gaz traceur pour la mesure de l'âge de l'air. La méthode par dose continue, la méthode pulse non décrite précédemment, ainsi que la méthode par décroissance de la concentration permettent la mesure de l'âge de l'air. La méthode pulse a le même mode d'application que la méthode par décroissance de la concentration, à la différence que l'injection se fait par une « impulsion » d'une faible quantité de gaz. La deuxième

différence par rapport à la méthode par décroissance de la concentration réside dans la période d'analyse qui démarre au début de l'injection.

Le principe derrière la mesure de l'âge de l'air est de marquer l'air juste avant qu'il ne pénètre dans la zone. Il convient donc d'injecter le gaz en amont de l'entrée d'air. Cela représente un double problème en ventilation naturelle [31], [41]. Le premier problème concerne la ventilation mono-orientée et traversante pour lesquelles il est pratiquement compliqué de marquer l'air avant qu'il ne rentre dans la pièce. Le deuxième problème concerne l'objectif de la mesure de l'âge de l'air. Comme expliqué dans le paragraphe 2.3, l'âge de l'air est un indicateur qui, conjointement avec la mesure du taux de ventilation, permet de calculer l'efficacité de ventilation. La variabilité du taux de ventilation et l'instabilité de l'écoulement de l'air, qui sont deux caractéristiques de la ventilation naturelle, encouragent à réaliser la mesure des deux indicateurs de manière simultanée [27]. Or, injecter le gaz en amont de la bouche d'entrée d'air est incompatible avec la mesure du taux de ventilation. La seule méthode gaz traceur qui n'impose pas nécessairement le marquage de l'air avant qu'il ne pénètre dans la pièce étudiée est la méthode par décroissance de la concentration [66]. C'est donc la seule méthode qui a le même mode opératoire, compatible avec la ventilation naturelle, pour la mesure des deux indicateurs [31]. Le gaz doit être homogène dans la pièce au début de la mesure, comme pour la mesure du taux de ventilation. Les deux indicateurs peuvent alors être mesurés simultanément. Buratti et al. [41] ont montré que les résultats de la mesure de l'âge de l'air sont similaires à 10% près à ceux d'une modélisation CFD. Cela démontre la précision intéressante de la mesure.

Trois possibilités permettent de remonter des âges de l'air locaux à l'âge global de l'air:

- moyenner les âges locaux, mais cela suppose d'avoir beaucoup de capteurs ;
- modéliser spatialement la répartition de l'âge de l'air à partir d'un nombre limité de points de mesure. C'est une méthode développée par Roulet, et basée sur le développement en suite de Taylor [65], [66] ;
- mesurer la concentration au niveau de l'évacuation, en supposant que tout l'air est évacué par cette évacuation. Cette méthode est moins adaptée à la ventilation naturelle.

3.2.3.7 Equipement et installation des méthodes gaz traceur

La norme ISO 12569 [22] spécifie l'équipement requis pour la réalisation des tests gaz traceur. La Figure 2-6 montre un schéma du montage expérimental requis. Le dispositif comporte :

1. une bouteille de gaz ;
2. un détenteur régulateur de débit massique ;
3. un ventilateur de brassage ;
4. un échantillonneur (portable comme le sac dans le schéma, ou juste un tube si l'analyseur de gaz est sur site) ;
5. un analyseur de gaz ;
6. un ordinateur pour le post-traitement.

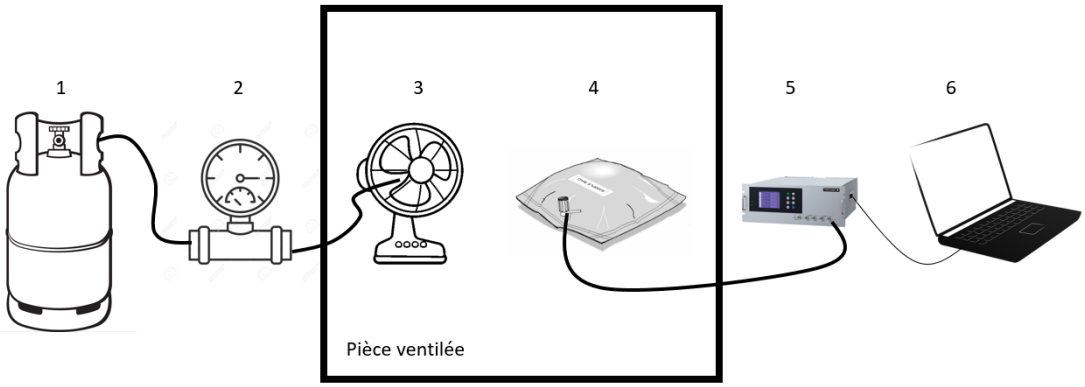


Figure 2-6 : Schéma du dispositif expérimental requis pour une méthode gaz traceur conventionnelle

Certains équipements permettent de réunir le régulateur de débit massique, et l'analyseur de gaz. Ces matériels sont très onéreux, de l'ordre de 50k euros. L'objectif d'une application in situ est de simplifier ce schéma tout en minimisant les coûts. Par exemple, la méthode par décroissance de la concentration ne requiert pas forcément de régulateur de débit massique. Une bouteille de gaz peut être percutée à l'intérieur de la pièce ventilée. L'utilisation du CO_2 qui a progressivement remplacé le SF6 (cf. paragraphe 3.2.3.1) permet de ne pas nécessiter d'échantillonneur associé à un analyseur de gaz. Il suffirait de placer un capteur autonome de concentration de CO_2 à l'intérieur de la pièce. Cela simplifie le dispositif expérimental, et réduit considérablement les coûts de mise en œuvre. Cui et al. [83] ont montré que les résultats provenant de capteurs in situ de CO_2 étaient fiables, comparés aux résultats provenant d'un analyseur de gaz.

3.2.4 Mesure du taux de ventilation par CO_2 métabolique

3.2.4.1 Méthodes empruntées aux méthodes conventionnelles

On retrouve parmi les méthodes empruntées aux méthodes conventionnelles : la méthode par décroissance de la concentration (cf. Figure 2-3) et la méthode moyenne de la concentration par dose continue (cf. Figure 2-4). Pour la méthode occupant par décroissance de la concentration, la mesure commence quand les occupants quittent la pièce d'intérêt. Cela lui donne l'avantage d'être indépendante vis-à-vis du taux d'émission qui présente une source d'incertitude importante. Cependant, cela requiert que la concentration ait atteint une valeur importante, et donc que le taux d'occupation précédant la mesure soit également important. Ce prérequis en fait une méthode très adaptée à la mesure du taux de ventilation dans les écoles [65], [77], [78], [91]. Un grand nombre d'élèves quitte les classes simultanément pendant les pauses, ou à la fin de la journée, ce qui laisse place à une décroissance de la concentration significative. Lu et al. [91] ont proposé une amélioration de la méthode en utilisant l'estimation du maximum de vraisemblance. Cette méthode d'estimation est supposée être plus puissante que la régression des moindres carrés (utilisée dans la méthode conventionnelle de décroissance multipoints), mais elle ne tolère pas non plus les taux de ventilation variable.

La méthode par dose continue requiert que l'occupation ne varie pas pendant au moins 3τ. Cela représente un obstacle significatif à son utilisation [37]. La méthode « Build-up » décrite dans le prochain paragraphe est souvent préférée car elle profite de la croissance en CO_2 et non de l'équilibre en concentration de CO_2 atteint en fin de croissance, ce qui réduit le temps de mesure requis.

3.2.4.2 Méthode Build-up

La méthode « Build-up » peut également être considérée comme une méthode par dose continue. Cependant, elle utilise la période transitoire de croissance de CO_2 et non la période stationnaire d'équilibre. Elle requiert donc significativement moins de temps que les autres méthodes par dose continue. Une régression non linéaire de la croissance de la concentration par rapport au temps est réalisée à l'aide d'un solveur numérique. Le taux de ventilation ne doit pas varier. Cette méthode est souvent utilisée pour mesurer le taux de ventilation des chambres [38], [52], [60], [84]. La Figure 2-7 présente un schéma de la méthode Build-up, avec la régression non linéaire qui est représentée en noir.

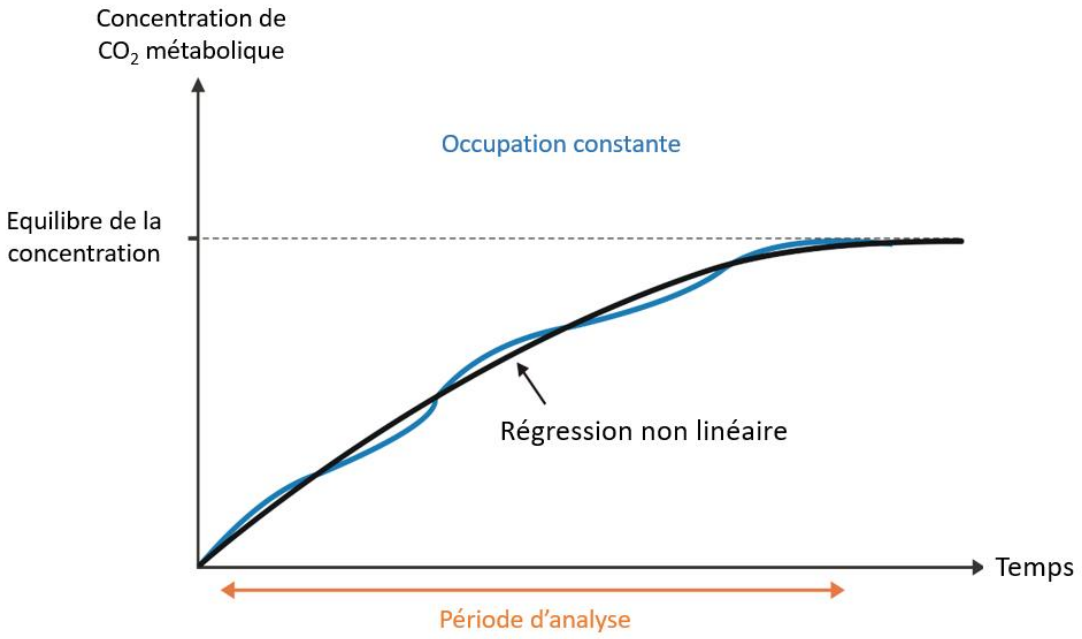


Figure 2-7 : Schéma de principe de la méthode "Build-up"

3.2.4.3 Méthode TMBE (transient mass balance equation)

La méthode TMBE utilise un solveur numérique qui réalise des régressions non linéaires successives. Pendant une régression non-linéaire, le taux d'occupation et le taux de ventilation ne doivent pas varier. Si l'un de ces deux paramètres varie, il faut changer de période de régression [37]. Le changement d'occupation est facile à connaître en remplissant un questionnaire. Les fluctuations du taux de ventilation ne sont, en revanche, pas décelables, donc elles biaisent la méthode. Cette méthode est, une nouvelle fois, bien adaptée au suivi du taux de ventilation renouvelant l'air des salles de classe [45], [63], [72], [75], [92]. Sur une journée ou plus, il suffit de renseigner l'évolution du taux d'occupation des classes, et le modèle peut réaliser des régressions non linéaires successives sur les heures de cours, et les pauses. La flexibilité que cette méthode offre vis-à-vis de l'occupation en fait la méthode par CO_2 métabolique la plus pratique [37]. La Figure 2-8 schématise la méthode TMBE.

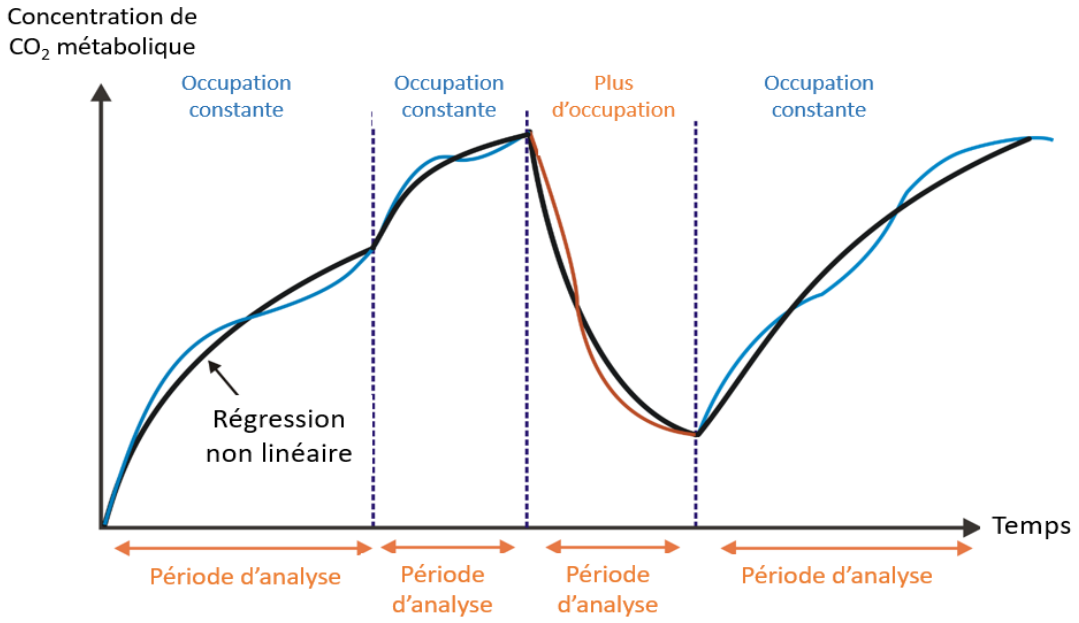


Figure 2-8 : Schéma de principe de la méthode TMBE

3.2.5 Mesure du taux de ventilation par méthodes innovantes

Quelques méthodes gaz traceur innovantes ont été identifiées pendant cette revue de littérature. Il n'y a pas encore de retours sur ces méthodes mais il est intéressant de les mentionner ici, car l'objectif est d'identifier toutes les pistes potentielles de fiabilisation des méthodes gaz traceur. Dias Carrihlo et al. [42] ont développé une méthode qui tire profit de la variation cyclique de la concentration de CO_2 atmosphérique pour calculer le taux de ventilation. Pour résoudre l'équation de bilan de masse (équation 2.3), la concentration extérieure du gaz traceur ne doit théoriquement pas varier. Or, la méthode développée ici résout le problème dans le domaine fréquentiel, ce qui permet d'utiliser la variation du CO_2 extérieur. Le bâtiment ne doit pas être occupé pendant la période du test qui dure plusieurs jours. Okuyama et Onishi [62] ont, également, testé la résolution dans le domaine fréquentiel. Ils ont proposé une injection de gaz traceur sinusoïdale. Cette injection requiert un régulateur de débit massique sophistiqué, ce qui compliquerait l'application in situ. Par ailleurs, le taux de ventilation est supposé fixe.

La modélisation en boîte grise a été testée pour calculer l'âge de l'air, ou le taux de ventilation [79], [93]. La modélisation en boîte grise est un mélange de données stochastiques (boîte noire), combinées à des équations analytiques déterministes (boîte blanches). Les données stochastiques sont dans notre cas les mesures des concentrations du gaz traceur, et les équations représentent l'équation de bilan de masse (équation 2.3). Un grand nombre de données permet alors de définir un modèle. En revanche, le taux de ventilation ne doit pas varier pendant le temps de modélisation.

Récemment, Duarte et al. [49] ont proposé d'utiliser le filtre de Kalman pour résoudre l'approche TMBE. Le filtre de Kalman est considéré comme le meilleur compromis pour réduire l'influence des bruits de mesure tout en permettant de suivre l'évolution d'un système dynamique [94]. Cela paraît donc optimal pour les systèmes de ventilation naturelle car la réduction de l'influence des bruits de mesure dont les méthodes gaz traceur sont très sensibles est toujours synonyme d'hypothèse d'un taux de ventilation fixe.

3.3 Analyse comparative des méthodes gaz traceur

Maintenant que les principales méthodes de mesure rencontrées dans la littérature ont été décrites, avec leurs avantages et inconvénients en termes d'implémentation, ce paragraphe traite de la comparaison de leur précision, basée sur les articles du corpus présenté dans le Tableau 2-1.

3.3.1 Précision des méthodes conventionnelles

La principale difficulté des études qui testent la précision des méthodes de mesure de la performance aéraulique des systèmes de ventilation naturelle concerne la difficulté d'avoir une mesure de référence. Les méthodes gaz traceur sont alors comparées soit à la méthode par concentration constante [84], [87], soit à des modèles empiriques [9], [10], [50], [83], zonaux [26], [55], [85], ou CFD [27], [41], [47]. Les modèles empiriques sont caractérisés par une plus grande incertitude que les méthodes gaz traceur donc ils ne peuvent pas constituer la référence. Les comparaisons entre méthodes gaz traceur et modèles empiriques montrent d'ailleurs une faible corrélation qui ne peut pas être imputée aux méthodes gaz traceur uniquement [26], [48], [50]. Les modèles zonaux sont plutôt fiables pour les géométries simples mais les coefficients de pression standardisés et les paramètres du vent moyennés peuvent mener à de larges incertitudes pour les bâtiments complexes [26], [85]. Par exemple, Blomsterberg et al. [85] ont mesuré des écarts de 20% sur le taux de ventilation traversant un appartement entre la méthode concentration constante et un modèle nodal. Belleri et al. [26] ont obtenu des écarts de plus de 100%. Les modèles CFD peuvent être davantage fiables, mais le haut niveau d'hypothèses qu'ils requièrent, tant en nombre qu'en technicité, rend une validation expérimentale obligatoire. Il est compliqué d'obtenir cette validation dans le cas de ventilation naturelle. Les modèles CFD sont donc souvent validés grâce aux méthodes gaz traceur, notamment par la méthode décroissance de la concentration, considérée alors comme référence [9], [52].

L'incapacité des modèles à pouvoir tester la précision des méthodes gaz traceur ayant été démontrée, il faut avoir recours à une méthode de mesure de référence pour tester les méthodes gaz traceur. La seule méthode assez fiable pour faire office de référence en conditions de ventilation naturelle est donc la méthode par concentration constante. Chao et al. [87] ont testé la précision de la méthode par décroissance de la concentration dans un open-space ventilé naturellement. Ils ont trouvé une différence entre les deux méthodes de 10% avec les fenêtres ouvertes et de 16% avec les fenêtres fermées. Bekö et al. [84] ont testé la précision de la méthode par dose continue « CILTS » dans une vraie maison. Ils ont trouvé que la méthode « CILTS » pouvait surestimer le taux de ventilation de 150% par rapport à la méthode par concentration constante. Les résultats sont cohérents avec l'étude de Sherman et al. [74] basée sur des mesures terrain implémentées par Lunden et al. [58]. Ils avaient estimé l'incertitude de la méthode « CILTS » à 100% dans un bâtiment réel.

Pour aller plus loin dans l'analyse de la précision des méthodes gaz traceur, il faut s'intéresser aux études qui permettent la mesure directe du taux de ventilation de référence. Il faut donc analyser les études qui font intervenir un système de ventilation mécanique. Cela a toutefois la conséquence d'inhiber l'effet d'un taux de ventilation variable, qui peut induire des incertitudes significatives sur certaines méthodes gaz traceur. Les prochains résultats concernent uniquement les taux de ventilation fixes.

L'incertitude de la méthode par concentration constante a été testé deux fois par Sandberg et al. [69], [70] dans un bâtiment expérimental. L'écart des résultats par rapport à une mesure de référence par débitmètre a été inférieur à 6%. Cette grande précision justifie le choix de cette méthode comme référence quand une mesure par débitmètre n'est pas possible.

La méthode par décroissance de la concentration est la plus documentée. Les seules sous-méthodes par décroissance de la concentration traitées dans le corpus identifié sont les méthodes 2 points et multipoints. Il est admis que la source d'incertitude la plus critique des méthodes gaz traceur, quelles qu'elles soient, concerne l'inhomogénéité du gaz traceur, ou le mixage imparfait de l'air. Il est commun, bien que théoriquement biaisé, de moyenner plusieurs capteurs répartis au sein de la pièce d'étude, afin de minimiser l'influence des disparités spatiales [69]. Plusieurs auteurs se sont attaqués à la question de la sensibilité spatiale de la méthode par décroissance de la concentration [80], [83]. Van Buggenhout [80] a trouvé une erreur maximale de 86% pour le capteur situé proche de l'entrée d'air. Le capteur proche de l'évacuation s'est montré le plus précis avec des résultats de la méthode multipoints compris dans les 10%. Cui et al. [83] ont également observé les meilleures performances du capteur placé proche de l'évacuation. Les résultats de la méthode multipoints provenant de ce capteur étaient également compris dans les 10%. Sandberg et Blomqvist [69] ont également obtenu une précision de la méthode multipoints de 11% dans une cellule expérimentale. Allab [31], dans ses travaux de thèse, a mis en évidence l'impact de la variation du taux de ventilation sur la méthode par décroissance de la concentration multipoints. Il a comparé, sous débit fixe, le résultat de la méthode par décroissance de la concentration 2 points qui tolère un débit variable, avec le résultat de la méthode multipoints. L'écart était de 2%, alors que sous débit variable, il était de 7%. Un taux de ventilation variable est susceptible d'augmenter l'incertitude de la méthode multipoints de 5 points. La méthode 2 points présente, elle, une incertitude de mesure, d'après un calcul basé sur la loi de propagation des écart-types, de 6 points supérieure à la méthode multi-points [83]. Or, elle tolère un débit variable. On peut donc estimer une précision similaire des deux méthodes par décroissance de la concentration, en cas de débit variable, et si le capteur est proche de l'évacuation, de 15%.

Concernant les méthodes par dose continue, seule la méthode par moyenne de la concentration a été traitée dans le corpus d'articles. Sa précision a été évaluée par Demmers et al. [48] à 20%. Sandberg et Stymne [70] estiment que, si l'injection du gaz a lieu dans la pièce d'extraction, ce qui est toujours le cas dans une étude en mono-zone, la perte directe de gaz par le conduit d'extraction peut conduire à une incertitude de 100%.

L'estimation de la précision de chaque méthode, ainsi que les considérations pratiques sont reportées dans le Tableau 2-2. Les références mentionnées dans la dernière colonne sont les références ayant permis d'estimer l'incertitude de la méthode. Comme il a déjà été expliqué, il convient de faire la distinction entre les précisions qui sont estimées à partir de cellules expérimentales de petits volumes ventilées mécaniquement et les précisions qui sont estimées à partir de conditions in situ, en ventilation naturelle. La précision estimée en conditions in situ est notée entre parenthèses. Le Tableau 2-2 permet de qualifier les méthodes par décroissance de la concentration comme à la fois les mieux adaptées à l'implémentation in situ, et précises par rapport aux méthodes par dose continue. Elles requièrent un faible temps de mesure, ont un coût raisonnable car elles n'imposent pas spécifiquement de régulateur de débit massique, et surtout, elles ne requièrent qu'un seul point de dosage car la période d'injection est distincte de la période de mesure. Le ventilateur de brassage peut donc être actionné pendant l'injection et

rendre le dosage homogène indépendamment du nombre de points d'injection. La précision des deux sous-méthodes, en conditions in situ, est évaluée à 15%.

3.3.2 Précision des méthodes par CO_2 métabolique

Les contraintes vis-à-vis de l'occupation restreignent les applications des méthodes par CO_2 métabolique. Les méthodes par décroissance de la concentration et TMBE sont souvent utilisées dans les salles de classe et les bâtiments de bureaux [45], [63], [72], [75], [77], [78], [92], alors que la méthode « Build-up » est exclusivement utilisée dans des chambres, la nuit [38], [52], [60], [84].

La précision de la méthode « Build-up » a été évaluée par rapport à la méthode par concentration constante [84]. Bekö et al. [84] ont évalué la surestimation de la méthode Build-up à 100%. Hou et al. [52] ont reporté que Stavova, dans ses travaux de thèse, avait estimé l'erreur de cette méthode en conditions contrôlées à 15%. Coley et al. [45] ont analysé la précision de la méthode TMBE en comparant ses résultats à la méthode conventionnelle de décroissance multipoints [45]. Ils ont trouvé 15% d'écart quand les fenêtres étaient fermées, 40% quand elles étaient ouvertes. L'ouverture des fenêtres peut impacter les deux méthodes car elles sont biaisées en cas de taux de ventilation variable. La méthode par décroissance de la concentration à partir du CO_2 métabolique a été comparé à des mesures de décroissance à partir du SF_6 dans des salles de classe par Turiel et al. [45] ainsi que Roulet et al. [56]. Les écarts, pour ces deux études étaient compris entre 1 et 30%. Les écarts par rapport à la méthode conventionnelle peuvent s'expliquer par un niveau initial de CO_2 trop faible par rapport à la concentration extérieure.

Smith et al. [75] proposent une analyse d'incertitude pour les méthodes par CO_2 métabolique. Ils ont identifié quatre principales sources d'incertitudes : (i) le mixage imparfait de l'air neuf avec l'air vicié et le dosage non homogène ; (ii) la variation du taux de ventilation ; (iii) l'incertitude de mesure du CO_2 ; (iv) l'incertitude sur l'estimation du taux d'émission du CO_2 métabolique. La source (i) est plus critique pour les méthodes par CO_2 métabolique que pour les méthodes conventionnelles car le dosage est moins bien contrôlé, et ne peut pas être homogène. Les incertitudes (ii) et (iii) sont communes pour les méthodes conventionnelles et les méthodes par CO_2 métabolique. Certaines comme la méthode par décroissance de la concentration 2 points sont toutefois tolérantes au taux de ventilation variable. Finalement, la source (iv) est restreinte aux méthodes par CO_2 métabolique qui utilisent la période d'occupation dans l'analyse. Les méthodes par CO_2 métabolique sont susceptibles d'être moins précises que les méthodes conventionnelles. Cela peut s'observer également dans le Tableau 2-2. La moins bonne maîtrise de l'injection a un impact significatif sur les résultats.

3.3.3 Précision des méthodes innovantes

Parmi les méthodes gaz traceur innovantes, seule la méthode de variation cyclique du CO_2 atmosphérique a été comparée à une mesure de référence [42]. La précision des autres méthodes innovantes a été testée en calculant l'écart-type directement à partir du modèle utilisé pour reconstruire le taux de ventilation [49], [62], [93]. L'estimation de leur précision ne tiendra donc pas compte d'incertitudes dues à des contraintes expérimentales.

La méthode de variation cyclique du CO_2 atmosphérique a été testée sur la base d'une comparaison avec les résultats de la méthode par décroissance à partir de l'occupant. La comparaison montre que les écarts des résultats des 6 tests ont tous été inférieurs à 10% [42].

La méthode semble donc plutôt précise. A rappeler toutefois que la méthode de référence utilisée a une précision de 40%.

La méthode par modélisation en boîte grise a été testée à partir de mesures de CO_2 d'une salle de classe [93]. Avec une précision des capteurs de 2%, l'écart-type était calculé par le modèle à 8%.

Les deux autres méthodes, à savoir l'injection sinusoïdale de gaz traceur, ainsi que la méthode TMBE par filtre de Kalman ont été testées à l'aide d'une génération synthétique de séries temporelles de CO_2 [42], [49]. Concernant l'injection sinusoïdale, Okuyama et Onishi [20] ont considéré un taux de ventilation constant. L'écart-type du taux d'émission est fixé à 1,2%, celui du capteur de concentration à 0,5%. Dans ces conditions, l'évaluation de l'écart-type du taux de ventilation calculé à partir des résidus de régression vaut 5%. Cela ne comprend cependant pas les incertitudes dues à un mixage imparfait ou à un taux de ventilation variable.

Pour la méthode TMBE par filtre de Kalman, les séries temporelles des concentrations ont été calculées à partir d'un taux de ventilation et d'un taux d'occupation tous deux variables [49]. Pour générer les séries temporelles synthétiques, l'incertitude sur le taux d'émission du gaz et sur la mesure des capteurs ont été fixés à respectivement 4% et 50 ppm. L'écart-type du taux de ventilation reconstruit a été estimé en moyenne à 20%. Pendant les pauses fictives où tous les élèves quittaient la pièce, la corrélation entre le taux de ventilation reconstruit, et le taux de ventilation générique était importante. L'incertitude liée au taux d'émission du gaz a une influence directe sur la précision de la méthode.

Le Tableau 2-2 précise l'estimation de la précision et des considérations pratiques des méthodes innovantes. Parmi elles, la méthode par injection sinusoïdale n'est pas adaptée aux conditions in situ à cause du régulateur de débit massique qu'elle requiert. La méthode par modélisation en boîte grise suppose un débit fixe. La méthode par variation cyclique du CO_2 atmosphérique est intéressante car elle permet de mesurer le taux de ventilation dynamique. En revanche, elle requiert plusieurs jours de tests et d'inoccupation du bâtiment. La méthode TMBE par filtre de Kalman est très intéressante car elle permet également de mesurer le taux de ventilation dynamique. L'outil a l'air tout à fait adapté aux contraintes de l'application in situ d'une méthode gaz traceur. Sa précision est intéressante, surtout pendant les périodes de décroissance de la concentration.

Méthode	Sous-méthode	ACH variable	Temps de mesure	Coût	Précision	Méthode de référence	Autres limites	Références
Décroissance de la C°	Multi-points	Non	1 AC	-	< 10% (< 15%)	-Déb.mètre -(CC)	- Volume < 500 m^3	[31], [43], [46], [69], [80]
	2 points	Oui	1 AC	-	(< 15%)	-Déb.mètre		
Dose continue	Moyenne	Non	3 AC	+	< 100%	-Déb.mètre -Ventilateur calibré	- Dose importante de gaz - L'injection doit être homogène -Matériel sophistiqué	[48], [70]
	Inverse C°	Oui	3 AC	+	NA	--		
	CILTS	Oui	Semaines, Moiss	--	(< 150%)	-(CC)		[39], [58], [74]
Constant concentration		Oui [1]	NA	++	< 6%	- Déb.mètre	-Matériel sophistiqué	[69], [70]
CO_2 métabolique	Build-up	Non	NA < 3 AC	--	<15% (< 100%)	-Déb.mètre -(CC)	- Occupation constante - Requiert le taux d'émission	[37], [38], [52]
	Déc.	Non - Oui	1 AC	--	(< 40%)	-(Conv. Déc.)	-Requiert une forte occupation	[37], [67], [78]
	TMBE[3]	Non	NA	--	(< 40%)	-(Conv. Déc.)	-Requiert le taux d'occupation - Requiert le taux d'émission	[37], [45], [63]
Méthode innovantes	Cyclic atm. Variation	Oui[1]	Jours, semaines	--	(< 10%)	-(Occ. Déc.)	-Sans occupation	[42]
	Grey box	Non	Jours	--	< 8% [2]	-	-Requiert le taux d'occupation	[59]
	Injection sinusoïdale	Non	NA	++	< 5% [2]	-Taux de ventilation synthétique	-Matériel sophistiqué	[62]
	TMBE filtre Kalman	Oui[1]	NA	--	< 20% [2]	-Taux de ventilation synthétique	-Pas d'autres limites	[49]

Tableau 2-2 : Synthèse de l'analyse des comparative des méthodes gaz traceur, [30]

Note : Les précisions entre parenthèses se réfèrent à des conditions in situ de ventilation naturelle.. [1] La méthode concentration constante permet de mesurer l'évolution du taux de ventilation dynamique.[2] Estimation à partir des résidus de

régression, et non à partir de conditions expérimentales. TMBE = méthode Transient Mass Balance Equation. Cyclic atm. Variation = Variation cyclique du CO_2 atmosphérique. Deb.-mètre = Débitmètre; CC = Concentration Consante; Conv. Déc = décroissance de la concentration conventionnelle; Occ. déc = Décroissance à partir du CO_2 métabolique.

4 Discussion

Les méthodes à partir du CO_2 métabolique sont intéressantes mais leurs applications sont restreintes, à cause des contraintes fortes associées à l'occupation. La majorité des articles traitent donc d'études dans les salles de classe, dans les bureaux, ou dans les chambres. De plus, étant basées sur les mêmes principes que les méthodes conventionnelles, l'impossibilité de contrôler le dosage du gaz tend nécessairement à des incertitudes plus importantes.

Concernant maintenant les méthodes gaz traceur conventionnelles, la méthode par dose continue nécessite des efforts d'implémentation supplémentaires par rapport à la méthode par décroissance de la concentration. Elle requiert un grand nombre de points de dosage, car la période d'injection n'est pas distincte de la période d'analyse. Or, le dosage doit être homogène mais un ventilateur de brassage pendant l'injection perturberait le flux d'air pendant la mesure. Parmi ces techniques, la méthode CILTS était beaucoup utilisée. Cependant des études ont montré que la variation du taux de ventilation, et du dosage du gaz, observée sur des périodes de plusieurs semaines, tendait à des incertitudes importantes (>100%). Les autres méthodes par dose continue sont moins documentées. Toutefois, indépendamment du dosage homogène au sein du volume, elles peuvent être très fortement impactées par l'évacuation directe de gaz par les bouches d'extraction (100% d'incertitude). Les méthodes par décroissance de la concentration sont plus pratiques à mettre en place, car l'homogénéité du gaz peut être assurée par un ventilateur de brassage avant le début de la mesure. De plus, elles ne requièrent pas spécifiquement de régulateur de débit massique car l'injection peut se faire par percussion d'une bouteille de gaz. L'estimation de leur précision s'est avérée meilleure que la plupart de celle des autres méthodes. Seule la méthode par concentration constante a une meilleure précision, mais elle n'est pas adaptée à une application in situ, à cause du matériel sophistiqué qu'elle requiert. En conditions in situ, avec un taux de ventilation variable, les deux sous-méthodes 2 points, et multipoints ont une précision similaire de 15%. Il est préférable d'utiliser la méthode 2 points en ventilation naturelle afin de respecter les prérequis de la norme, et de ne pas utiliser une méthode biaisée en cas de taux de ventilation variable. Au-delà de leur plus grande praticité et de leur relativement bonne précision, les méthodes par décroissance de la concentration sont les seules à pouvoir mesurer conjointement l'âge de l'air et le taux de ventilation. Elles permettent ainsi le calcul de l'efficacité de ventilation, ce qui leur confère un avantage certain par rapport à toutes les autres méthodes.

Parmi les méthodes innovantes, seule la méthode TMBE par filtre de Kalman semble adaptée à la mesure in situ des performances aérauliques d'un système de ventilation naturelle. Elle est prometteuse car elle permet de réduire l'influence des bruits de mesure tout en calculant l'évolution du taux de ventilation dynamique. L'erreur de la méthode était significativement réduite en absence d'occupation, laissant présager le fort impact de l'incertitude liée au taux d'émission métabolique. Il serait alors intéressant de tester expérimentalement le filtre de Kalman sur la méthode conventionnelle identifiée comme la mieux adaptée dans cette revue de littérature : la méthode gaz traceur par décroissance de la concentration 2 points.

5 Conclusion

Ce chapitre a permis de dresser un état de lieux concernant les méthodes de mesure des performances aérauliques des systèmes de ventilation naturelle. Plusieurs types de méthodes ont été identifiés, tous basés sur les principes des méthodes gaz traceur. En effet, l'approche indirecte qu'offrent ces méthodes permet de dépasser une partie des contraintes associées à la mesure in situ des performances aérauliques de la ventilation naturelle. Parmi toutes les méthodes gaz traceur, celle par décroissance de la concentration a été identifiée comme étant la plus pratique à mettre en place, tout en gardant une précision intéressante. La sous-méthode décroissance 2 points est moins précise que la sous-méthode multipoints mais tolère un taux de ventilation variable. En conditions in situ en ventilation naturelle, ces deux méthodes ont une précision similaire. La sous-méthode 2 points doit donc être appliquée en ventilation naturelle.

Le chapitre 3 visera à tester la précision des trois méthodes gaz traceur conventionnelles qui tolèrent un taux de ventilation variable, à savoir la sous-méthode décroissance de la concentration 2 points, la sous-méthode moyenne de la concentration inverse par dose continue, ainsi que la méthode par concentration constante. L'objectif du chapitre 3 est donc de vérifier la précision intéressante de la méthode par décroissance de la concentration 2 points, en comparaison avec les autres méthodes mentionnées.

Certaines méthodes gaz traceur innovantes ont pu être identifiées. Une des méthodes en particulier semble tout à fait adaptée aux contraintes de la mesure in situ des performances aérauliques d'un système de ventilation naturelle, notamment à travers l'outil de traitement du signal qu'elle utilise. Cet outil, le filtre de Kalman, permet de réduire l'influence des bruits de mesure tout en permettant la mesure du taux de ventilation dynamique. Il a été testé sur la méthode TMBE par CO_2 métabolique. Il peut être très intéressant de le tester sur la méthode par décroissance de la concentration. La méthode décroissance de la concentration qui serait alors en partie fiabilisée en la rendant moins sensible aux erreurs de mesure, et capable de suivre le taux de ventilation dynamique. Le test du filtre de Kalman pour augmenter la précision de la méthode et permettre la mesure du taux de ventilation dynamique est un des objectifs du chapitre 4.

De plus, l'application multi-zones des méthodes gaz traceur n'est pas prévue dans les normes. La résolution de l'équation de bilan de masse ne permet pas d'envisager une mesure multi-zones à l'aide d'un seul gaz traceur. En plus de l'augmentation de la précision de la méthode, il faudra donc rendre la mesure par décroissance de la concentration adaptée à une application multi-zones, afin de répondre à l'objectif de la thèse. Le chapitre 4 sera donc également consacré à l'adaptation de la méthode par décroissance de la concentration aux contraintes d'un bâtiment multi-zones.

Chapitre 3 Comparaison expérimentale des méthodes gaz traceur pour la mesure du taux de ventilation mono-zone variable

Test des méthodes gaz traceurs

Comparaison de leur incertitude

1 Introduction

Le chapitre précédent a identifié les méthodes gaz traceur comme les seules qui soient adaptées à la ventilation naturelle. La méthode par décroissance de la concentration est par ailleurs la seule à permettre la mesure conjointe du taux de ventilation et de l'âge de l'air en ventilation naturelle, ce qui lui confère un avantage certain sur les autres méthodes. L'expérimentation de ce chapitre vise à tester la précision sur le taux de ventilation des méthodes gaz traceur qui tolèrent sa variabilité [30]: méthode par décroissance de la concentration 2 points ; méthode par dose continue moyenne de la concentration inverse ; et méthode par concentration constante. Graduellement, les méthodes ont été citées de la méthode la plus simple et la moins onéreuse à implémenter, à celle qui nécessite le plus grand effort d'implémentation. La méthode décroissance de la concentration est donc la plus simple et la moins coûteuse à réaliser, et elle permet également la mesure de l'âge de l'air en conditions in situ. La méthode par dose continue requiert un effort d'implémentation supplémentaire, mais elle reste, contrairement à la méthode par concentration constante, adaptée à une application in situ à grande échelle. L'expérimentation doit donc déterminer si cet effort supplémentaire permet d'améliorer, ou non, la précision de la méthode concernant la mesure du taux de ventilation. La dernière méthode testée (méthode par concentration constante) est très peu adaptée à une application in situ à grande échelle à cause du matériel sophistiqué qu'elle requiert, ainsi que du haut niveau d'expertise requis pour l'expérimentateur. Elle ne sera donc pas l'objet de la fiabilisation réalisée durant cette thèse. Elle est toutefois testée ici pour évaluer le gain de précision associé à un effort et un coût d'implémentation considérables. Cette méthode est, qui-plus-est, la seule méthode qui mesure l'évolution du taux de ventilation dynamique. Elle est souvent considérée comme la méthode gaz traceur de référence dans la mesure des taux de ventilation naturels.

Pour comparer le rapport facilité de mise en œuvre / précision des trois méthodes, l'expérimentation a été élaborée en conditions de laboratoires. La cellule expérimentale comporte un système de ventilation mécanique contrôlable. Des profils de variation de débit cohérents avec les débits engendrés par les forces motrices naturelles ont été reproduits. Le paragraphe 2 développe la méthodologie de l'expérimentation, en justifiant les débits susmentionnés, et en décrivant le protocole expérimental. Ensuite, l'analyse de la précision des méthodes est réalisée en deux temps. Les deux méthodes adaptées à une application in situ (par décroissance de la concentration et par dose continue), sont d'abord comparées à l'aide d'une analyse d'incertitude et d'une estimation expérimentale de leur précision. Ensuite, la mesure du taux de ventilation dynamique par la méthode par concentration constante est réalisée. La précision de cette méthode est comparée à celle des deux méthodes précédentes.

2 Méthodologie

2.1 Chambre expérimentale

L'expérimentation a eu lieu dans une cellule expérimentale composée de deux zones identiques de volume respectif égal à 20,4 m^3 avec une surface au sol de 7,8 m^2. Cette cellule expérimentale est située à Vaulx-en-Velin, à l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE). Elle comporte une façade avant orientée Nord Est à 72° en contact avec l'extérieur. La reste de la cellule est logé intégralement à l'intérieur du bâtiment. La Figure 3-1 montre un schéma de la cellule. La Figure 3-2 montre des photos de l'intérieur et de l'extérieur de la

cellule. L'expérimentation présentée ici ne requiert que la zone A. La zone B sera utilisée dans les chapitres suivants. La zone A de la cellule comprend des entrées d'air classiques situées sur une fenêtre. Le système de ventilation équipé dans la cellule A est un système de ventilation mécanique simple flux à ventilateur d'extraction centrifugeur situé sur le toit de la cellule. Ce ventilateur est à débit variable, et contrôlable afin de pouvoir imposer un profil de débit variable pendant l'expérimentation. Les hautes pressions induites par les systèmes de ventilation mécanique permettent une mesure directe du débit, qui permettra la comparaison avec le résultat des méthodes gaz traceur, ce qui justifie pleinement ce choix de système. La mesure directe du débit est réalisée dans le conduit d'extraction, en ayant pris la précaution qu'un mètre sépare le débitmètre d'un point singulier du conduit. Cette précaution permet de faire l'hypothèse que le flux d'air est pleinement développé dans le conduit. Le débit ainsi mesuré permettra de calculer le taux de ventilation de référence. La méthode par dose continue et la méthode par concentration constante requièrent un dosage homogène du gaz pendant la mesure, prérequis que l'on ne peut assurer à l'aide du ventilateur de brassage si la période de mesure n'est pas distincte de la période d'injection. C'est la raison pour laquelle 5 points de dosage ont été implémentés. Un test préliminaire sans ventilation a permis de vérifier que la concentration des différents points de mesure était effectivement homogène, à plus ou moins 5% près. Le gaz est injecté à l'aide d'un régulateur de débit massique qui peut injecter à un taux allant jusque 2 $L.min^{-1}$. Un régulateur Proportionnel Intégral Dérivé a été mise en place, afin de pouvoir asservir le débit du régulateur de débit massique pour la méthode par concentration constante. Un ventilateur de brassage était mis en place pour homogénéiser la concentration avant de débuter la méthode par décroissance de la concentration.

Les infiltrations de la salle d'extraction ont été mesurées à l'aide de la technique gaz traceur par décroissance de la concentration. Toutes les ouvertures, ainsi que le détalonnage entre les deux pièces ont été préalablement obturés à l'aide d'adhésif. Les infiltrations ont été mesurées dans la nuit du 11 septembre 2019. La température extérieure était en moyenne égale à 22,6 °C pour une température intérieure moyenne égale à 24,6 °C. Dans ces conditions, les infiltrations de la salle d'extraction ont été mesurées à 0,14 $Vol.h^{-1}$. Ces infiltrations sont prises en compte dans l'analyse d'incertitude. Le résultat de la méthode gaz traceur comprend le renouvellement d'air par les infiltrations. On fait l'hypothèse que la totalité des infiltrations sont évacuées par le conduit et donc sont également comprises dans le débit extrait mesuré dans le conduit d'extraction. La cellule étant logée dans le bâtiment, la pression induite par le vent sur toutes les façades excepté la façade avant, est nulle. Les infiltrations sont donc majoritairement induites par le tirage thermique. Il est donc cohérent de penser que les infiltrations sont évacuées par le conduit vertical d'extraction. Cette hypothèse revient à comparer directement le résultat de la méthode gaz traceur à celui mesuré par le débitmètre installé dans le conduit d'extraction.

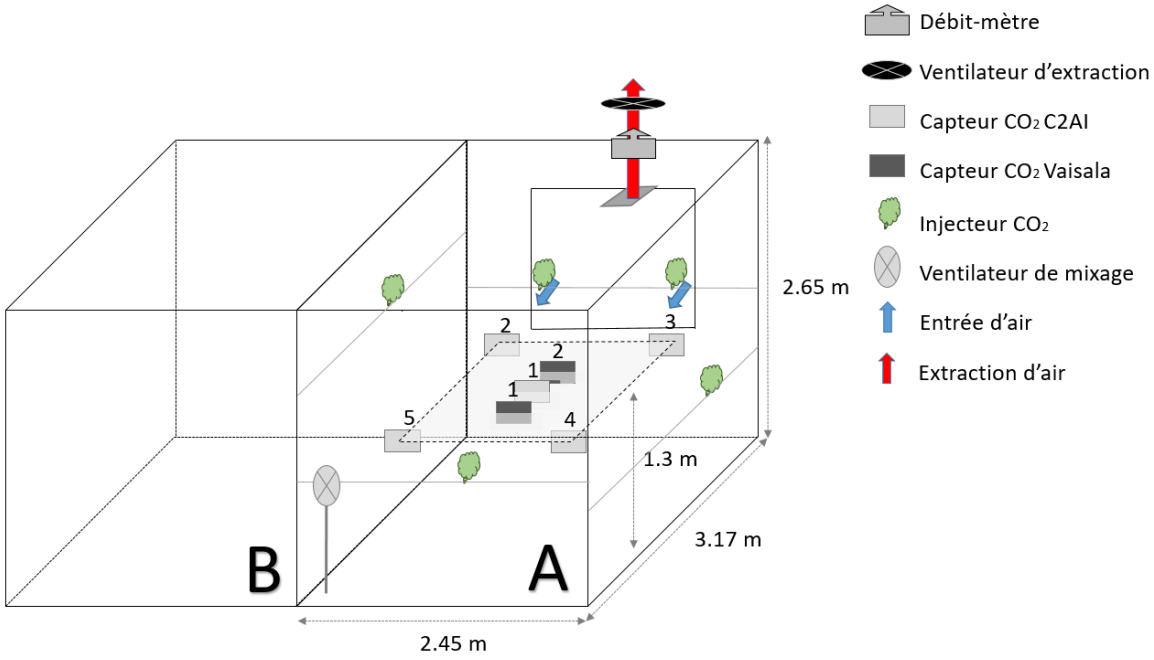


Figure 3-1 : Schéma de la cellule expérimentale HYBCELL, utilisée en monozone



Figure 3-2 : Photographies de l'extérieur et de l'intérieur de la cellule expérimentale

2.2 Instrumentation

La concentration du CO_2 a été mesurée par deux types de capteurs différents, mais basés sur la même technologie à absorption infrarouge. Les capteurs GMW115 Vaisala sont filaires, et donc moins pratiques à utiliser en expérimentation in situ. En revanche, ils ont une précision de 4% de la valeur lue, légèrement supérieure aux autres capteurs. Les enregistreurs HD35ED de C2AI, sont eux autonomes et donc mieux adaptés à une expérimentation in situ. Leur précision est de 50 ppm +/- 3% de la mesure. Autre caractéristique, leur fréquence d'acquisition ne peut être supérieure à 1 mesure toutes les 11,25 secondes, alors que celle des capteurs GMW115 Vaisala peut être supérieure à 1Hz. cinq enregistreurs C2AI, et deux Vaisala ont été installés dans la cellule Hybcell. Quatre des cinq enregistreurs HD35 sont placés au centre de quatre parallélépipèdes rectangles identiques partitionnant Hybcell. Le 5ème capteur est placé au centre de la pièce. Les deux capteurs Vaisala sont centrés et sont disposés à 1m de distance. Tous les capteurs sont donc positionnés dans un plan médian, dans le but d'inhiber l'influence de la plus grande densité du CO_2 par rapport à l'air. Ces deux types de capteurs ont été testés car l'objectif est de déterminer de combien la précision de la méthode est dégradée en utilisant des capteurs moins performants, mais plus pratiques en conditions in situ. Un capteur CO_2 Vaisala a été placé à l'extérieur mais il n'était pas adapté aux conditions extérieures. Ses valeurs ont été jugées peu fiables et nous avons opté pour une autre méthode pour estimer la valeur de C_{ext}. La méthode en question est décrite dans le paragraphe 2.4. Le débitmètre installé dans le conduit d'extraction mesure une différence de pression à l'aide de tubes de Pitot. Sa précision est estimée à 0,5% du débit par le constructeur. Cette grande précision est notamment due à la présence d'un stabilisateur de débit à forme alvéolaire. Le couple débitmètre/manomètre différentiel a été calibré à l'aide d'un Flow Finder étalonné. Le coefficient de corrélation entre les deux appareils était supérieur à 0,99.

Le Tableau 3-1 donne une synthèse des caractéristiques techniques des différents instruments utilisés lors de l'expérimentation. La documentation technique des capteurs est donnée en annexe 3.1.

	Téchnologie	**Seuil**	**Précision**	**Dérive**	**Temps de réponse**
Capteurs concentration CO2 filaire	NDIR[5]	0 – 5000 ppm	4%	5% tous les 5 ans	1 min
Capteurs concentration CO2 autonomes	NDIR	0 – 5000 ppm	50 ppm + 3%	5% tous les 5 ans	2 min
Débitmètre conduit	Tube de pitot	27,5 – 945 $m^3.h^{-1}$	0,5% du débit	0,1% du débit	-

Tableau 3-1 : Caractéristiques de l'instrumentation

[5] NDIR : Non Dispersive InfraRed sensors

2.3 Choix des profils de variation

Le choix des profils de variation du débit à imposer au ventilateur d'extraction devait répondre à plusieurs critères :

i. avoir un profil de débit en cohérence avec ce que les forces motrices naturelles pourraient engendrer. Il a été décidé de reproduire une ventilation par conduits, avec un profil de variation reflet de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. A ce stade, l'influence du vent sur la ventilation par conduits n'est pas encore considérée. La ventilation traversante a également été reproduite pour évaluer l'impact de plus grandes fluctuations de débit engendrées par le vent ;
ii. avoir une moyenne du niveau de débit équivalente entre tous les profils à 10% près, pour ne pas confondre une influence du niveau de débit avec l'influence de la variation de débit. La valeur de 10% a été fixée de manière arbitraire ;
iii. obtenir une concentration à la fin de la méthode par dose continue qui soit la concentration de départ de la méthode par décroissance de la concentration, afin d'économiser du gaz et du temps. Cela a participé à fixer le niveau moyen de débit souhaité ;
iv. permettre plus de 5 renouvellements d'air en un temps raisonnable (2h) pour avoir une période d'analyse significative pour toutes les méthodes testées (la méthode par dose continue moyenne de la concentration inverse requérant un temps de mesure minimum de 3τ) ;
v. avoir une fréquence maximale de la variation de la commande du débit à 10 secondes pour tenir compte de l'inertie du ventilateur.

2.3.1 La ventilation par conduits

Ensuite, l'objet principal de la thèse se réfère à la ventilation par conduits. Un profil de variation de débit cohérent avec la ventilation naturelle par conduit a donc été reproduit. C'est un type de ventilation naturelle dominé par le tirage thermique. L'influence du vent est négligée dans cette partie. On utilise alors la formule suivante [95]:

$$Q_{conduit}(t) = C_d \,.\, A_{eff} \,.\, \sqrt{\frac{2\,.\,|\Delta P_{int}|}{\rho_{int}}} \tag{3.1}$$

Et :

$$\Delta P_{int} = g \,.\, \rho_{ext} \,.\, H \,.\, \frac{\Delta T}{T_{int}} \tag{3.2}$$

Avec :

- P la pression [Pa] ;
- $Q_{conduit}$ le débit extrait par le conduit [m3.s^{-1}] ;
- A_{eff} la surface effective [m²] ;
- ρ la masse volumique [kg.m^{-3}] ;
- g l'accélération de la pesanteur [m.s^{-2}] ;
- H la hauteur entre deux ouvertures [m] ;
- T la température [°K].

Le calcul a été réalisé avec les données d'une station météo locale installée sur le toit de l'ENTPE située à Vaulx-en-Velin, en France. Une journée avec une amplitude importante de

variation de température a été sélectionnée. Pour le calcul, l'entrée d'air a été considérée circulaire, de rayon 10 cm, la différence de hauteur entre l'entrée et la sortie d'air fixée à 3 mètres, et le coefficient de décharge égal à sa valeur standardisée : 0,6. La température intérieure a été prise constante égale à 20 °C. Le débit a ensuite été calculé tout au long de la journée, les résultats sont présentés sur la Figure 3-3.

Deux zones ont été isolées durant lesquelles la variation de débit évoluait de manière monotone, décroissante le matin, croissante l'après-midi. Les périodes satisfaisants tous les critères sont de 10h21 à 12h21 le matin, et de 19h20 à 21h20 le soir. Les profils varient de 75 à 50 m^3/h pour le profil décroissant, et de 50 à 65 m^3/h pour le profil croissant.

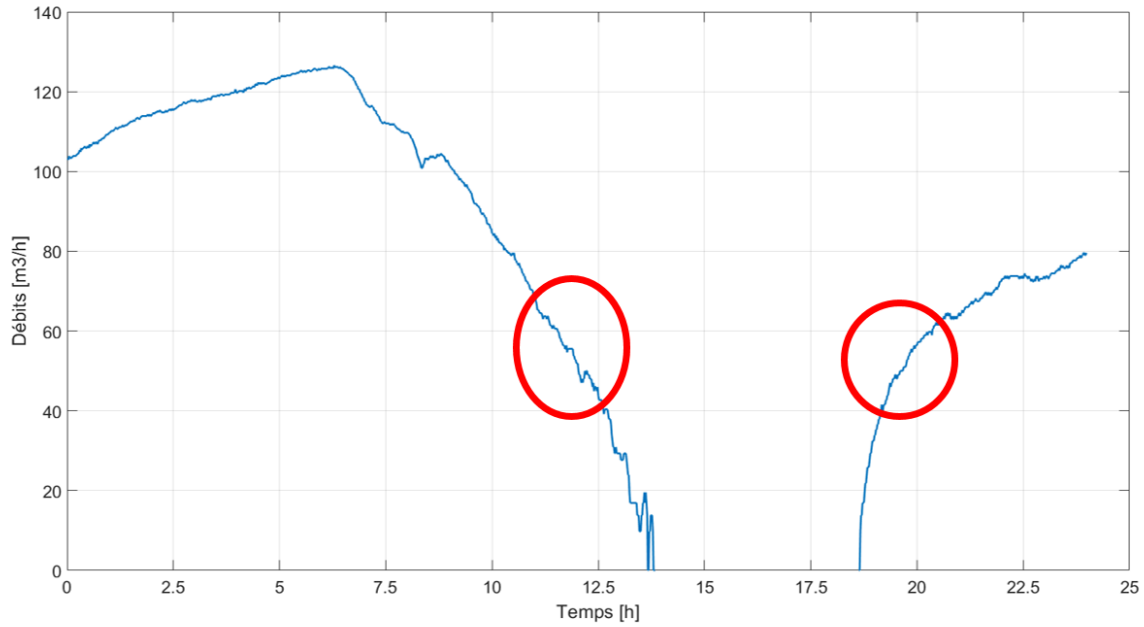


Figure 3-3 : Calcul du débit d'une ventilation naturelle par conduit

2.3.2 La ventilation traversante

Bien que n'étant pas l'objet d'étude de la thèse, l'influence de plus grandes fluctuations de débit engendrées par la ventilation traversante a été évaluée. Pour déterminer un débit cohérent avec la ventilation traversante, il a été préféré de recourir à des données expérimentales, plutôt qu'à un calcul numérique. En effet, l'impact du vent est souvent mal connu, notamment à cause de l'incertitude liée à la distribution surfacique des coefficients de pression, ou par les données incomplètes ou moyennées sur la vitesse et la direction du vent. Bien que très peu de données soient disponibles sur le sujet, Dr. James Lo [28] nous a donné accès à des données expérimentales qu'il a mesurées lors de ses travaux visant à caractériser l'effet des fluctuations du vent sur le débit de ventilation en ventilation traversante, travaux qu'il a publié en 2012. Il a mesuré directement le débit traversant les ouvertures d'un bâtiment à l'aide de grilles de tubes de Pitot à une fréquence de 5 Hz. Nous avons donc récupéré les données de l'étude [28] sur 30 minutes, pour un jour présentant de fortes amplitudes de variation. Le taux de ventilation moyen durant ces 30 minutes était de 7 $vol.h^{-1}$, avec des taux de ventilation extrêmes de 1 et 15,5 $vol.h^{-1}$. Ces données ont été dupliquées quatre fois pour atteindre le temps de test requis de 2h. A partir de celles-ci, deux profils ont été réalisés sur la base de coefficients de réduction différents. Le premier profil considéré devait répondre aux

cinq critères définis en début de paragraphe. Un coefficient de réduction de 0,35 a été appliqué pour créer ce profil. Ce profil est donné en Figure 3-4. Ensuite, un deuxième profil a été créé pour évaluer l'influence du niveau et de l'amplitude de variation du débit. Ce profil ne vérifie donc volontairement pas les critères définis ci-dessus. Le coefficient de réduction appliqué sur les données brutes a été pris égal à 0,70. Les deux profils définis ont une moyenne respective de 2,4 et 4,8 vol.h^{-1}.

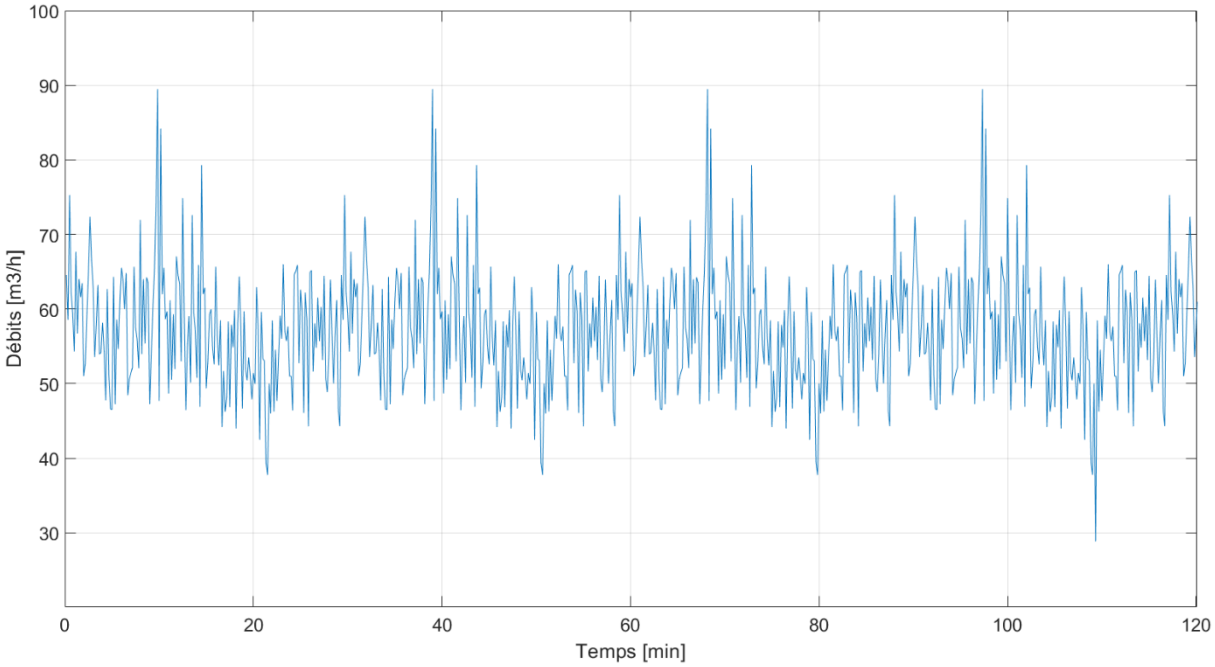


Figure 3-4 : Mesure du débit total traversant les ouvrants d'un bâtiment ventilé de manière traversante, données de J.Lo [28]

2.3.3 Synthèse sur les profils de variation testés

La Figure 3-5 montre les cinq profils de variation de débit testés. Les courbes représentent le débit d'extraction mesuré à l'aide du débitmètre installé dans le conduit d'extraction. Le Tableau 3-2 présente les statistiques des cinq profils de variation de débits.

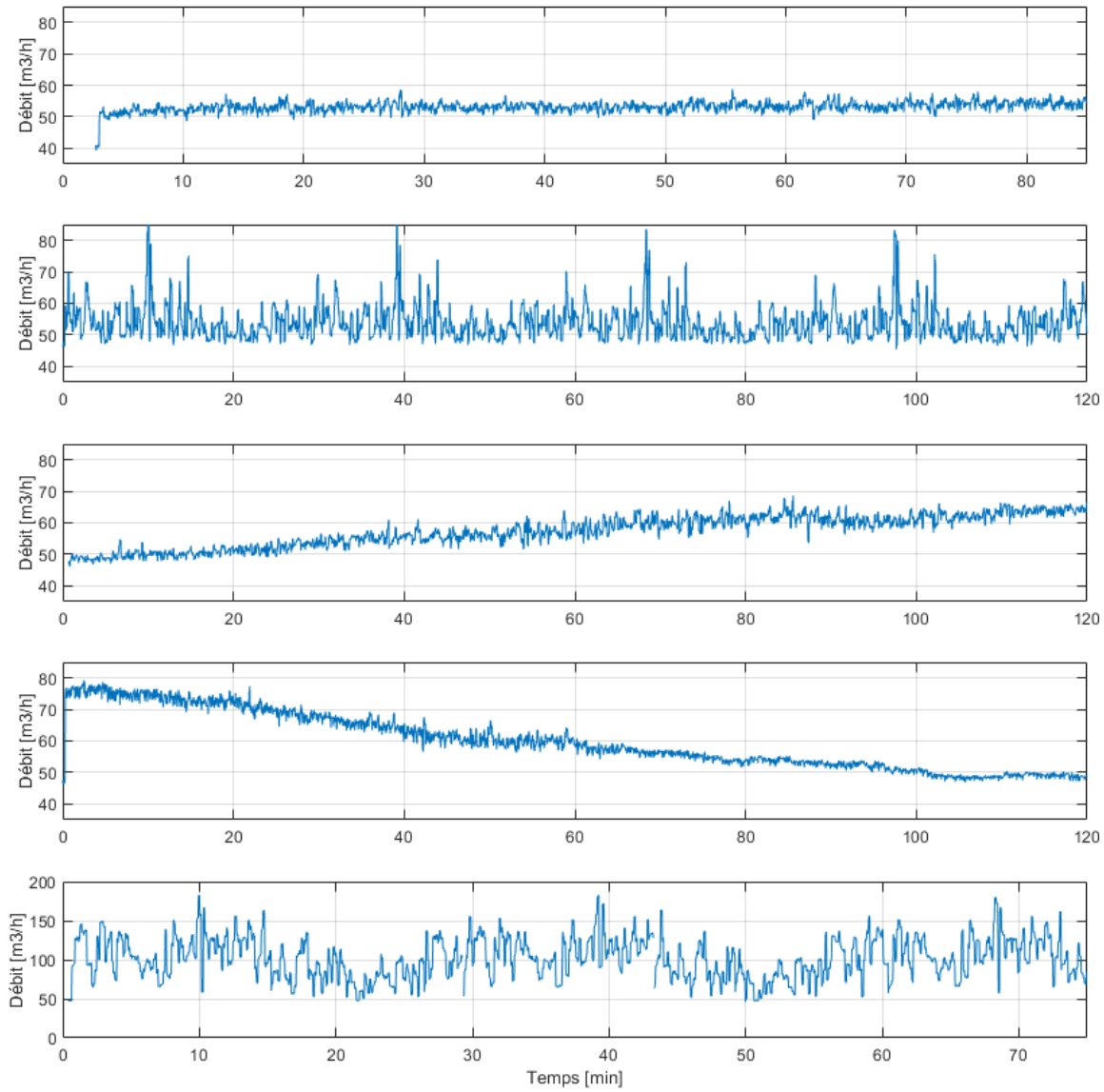


Figure 3-5 : Mesures dans le conduit d'extraction du débit des 5 profils de variations décrits ci-dessus, de haut en bas : profil stationnaire, profil traversant, profil conduits croissant, profil conduits décroissant, profil traversant hautement variable.

	Stationnaire	**Traversant**	**Croissant**	**Décroissant**	**Hautement variable**
Moyenne [$m^3.h^{-1}$]	51	54	56	62	100
Minimum [$m^3.h^{-1}$]	46	45	46	48	50
Maximum [$m^3.h^{-1}$]	55	86	69	79	183
Ecart-type [$m^3.h^{-1}$]	0,02	0,10	0,08	0,13	0,26

Tableau 3-2 : Statistiques des 5 profils de variation

2.4 Procédure pour évaluer la concentration du CO_2 extérieur

Un capteur Vaisala a été placé à l'extérieur pour mesurer la concentration extérieure de CO_2. Le capteur n'était pas adapté aux conditions extérieures et ses mesures ont été jugées peu fiables. Une procédure a donc été réalisée pour évaluer le CO_2 extérieur à partir des données expérimentales. Les valeurs caractéristiques de la décroissance exponentielle ont été utilisées. En considérant une décroissance exponentielle, on peut estimer qu'après 3τ, la concentration initiale de CO_2 a été divisée par 95%. Cela se traduit par la formule suivante :

$$C(3\tau) = (C_0 - C_{ext}) * 0.05 + C_{ext} \quad (3.3)$$

Avec :

- C la concentration intérieure [ppm] ;
- C_{ext} la concentration extérieure [ppm] ;
- τ la constante nominale de temps [h].

Mesurant le débit d'extraction dans le conduit, nous connaissons la valeur de la constante nominale de temps τ. Nous pouvons donc en déduire la valeur de C_{ext} selon l'équation 3.3.

On notera que nous avons utilisé la valeur de débit mesurée dans le conduit d'extraction. En conditions in situ, la valeur de la constante nominale de temps doit être déduite autrement (à partir des mesures de concentrations de la méthode gaz traceur). Comme l'objectif est ici de comparer la précision des méthodes gaz traceur, une incertitude sur la concentration extérieure provenant d'une incertitude sur l'évaluation de la constante nominale de temps devait être évitée. En revanche, dans le prochain chapitre, l'objectif est de développer un protocole applicable en bâtiment in situ. Cette procédure sera donc modifiée, afin d'utiliser uniquement les données expérimentales auxquelles nous aurions accès en expérimentation in situ.

2.5 Protocole expérimental

Les méthodes par dose continue ou par décroissance de la concentration ont été testées trois fois chacune pour chaque profil de variation présenté au paragraphe 2.3 à l'exception du profil stationnaire, qui a été répété cinq fois. Il a été choisi de tester les méthodes de manière cyclique. La méthode par dose continue était réalisée en première, afin de charger la cellule expérimentale en gaz traceur. Le régulateur de débit massique injectait le gaz à un taux constant de $2 L.min^{-1}$. L'injection durait plus de 5τ pour les 4 profils de débit variables, et 3,2τ pour le profil stationnaire. Le premier point de la période d'analyse de la méthode par dose continue doit avoir permis de dépasser 3τ, pour qu'au moins 95% de la concentration d'équilibre ait été atteinte. La période d'analyse peut donc durer jusque 2τ. A la fin de la méthode par dose continue, la concentration d'équilibre avoisine 2500 ppm. Cette concentration est adéquate pour démarrer la phase de décroissance de la concentration.

Après la fin de l'injection, et avant de réaliser la méthode par décroissance de la concentration, le ventilateur d'extraction est arrêté, et le ventilateur de brassage est actionné afin d'homogénéiser la concentration du gaz avant de démarrer la décroissance. Le brassage s'opère pendant une minute, puis le ventilateur de brassage est arrêté, et le ventilateur d'extraction actionné. Une période transitoire suit la mise en route du ventilateur d'extraction, pendant laquelle les mécanismes physiques se mettent en place. Cette période doit être évitée

[22]. Une concentration initiale de 2500 ppm avant la période transitoire permet que la période d'analyse observe une décroissance qui soit significative par rapport aux incertitudes de mesure des capteurs. Le premier point d'analyse de la méthode par décroissance de la concentration est placé à la fin de la période transitoire. Le point final doit être choisi au moins 1τ plus tard pour que la décroissance soit significative afin de réduire l'influence des bruits de mesure. Cependant, la concentration finale ne doit pas être trop proche de la concentration ambiante du gaz traceur, donc il ne faut pas attendre trop longtemps. 2τ ont permis d'évacuer 87% du gaz. Avec 2500 ppm de concentration initiale, cela représente une concentration après 2τ comprise entre 250 et 300 ppm au-dessus de la concentration ambiante. La concentration après 2τ reste assez éloignée de la concentration ambiante comparée aux erreurs de mesure (environ 60-70 ppm pour les capteurs C2AI). Le dernier point de mesure peut donc être choisi à 2τ du premier, ce qui permet d'avoir également une période d'analyse de 2τ. Cela permet donc la comparaison avec la méthode par dose continue. La Figure 3-6 présente le schéma expérimental d'une session dose continue & décroissance de la concentration. Les différentes étapes décrites dans ce paragraphe sont mentionnées.

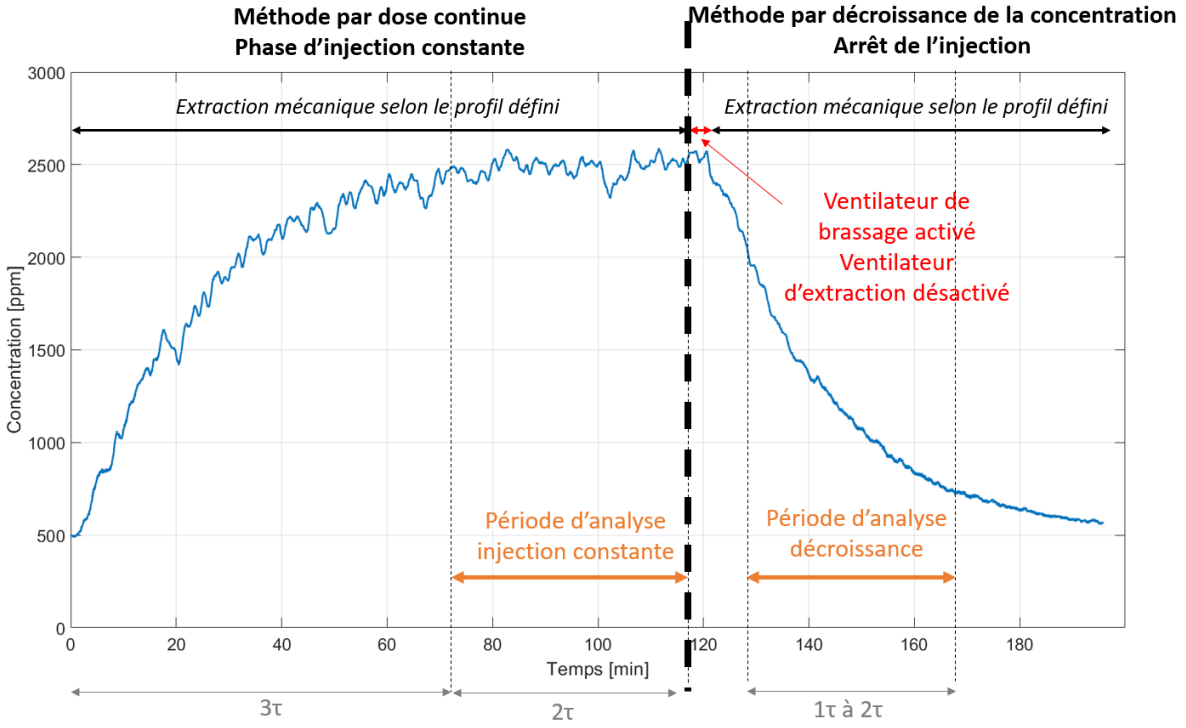


Figure 3-6 : Schéma expérimental d'une session de mesure, exemple pour le profil de ventilation traversant

Concernant maintenant la méthode par concentration constante, quatre des cinq profils ont été réalisés successivement sur une même expérience. Pendant 4h, le débit était stationnaire. Ensuite, les profils décroissant, traversant, et croissant se sont succédés toutes les 2h. Cette expérience complète a été réalisée une fois seulement. Une régulation de type Poportionnel Intégral Dérivée a permis d'asservir le régulateur de débit massique à une valeur de concentration cible de 1500 ppm. Cet asservissement s'est opéré sur la concentration moyenne des capteurs Vaisala. Les 3 paramètres du régulateur PID ont été calibrés grâce à la méthode empirique de Ziegler&Nichols. Pour l'analyse, les deux premières heures ont été écartées, comme conseillé par Chao et al. [87]. Ensuite, le rapport de l'injection par la concentration a été moyenné sur une période glissante de 30 minutes, afin d'inhiber l'inertie du système [87].

Le Tableau 3-3 présente le plan d'expérimentation réalisé dans ce chapitre. La terminologie 1.1 signifie que l'on traite le premier cycle présenté en Figure 3-6, et que c'est la période d'injection qui est analysée. La terminologie 1.2 signifie toujours que l'on traite le premier cycle, mais c'est la phase de décroissance qui est analysée.

	Méthode gaz traceur			**Profil de variation du débit**					
	Dose continue	**Decroiss-ance de la conc.**	**Conc. Const.**	**Const.**	**Croiss.**	**Dec.**	**Trav.**	**Trav. Haut**	**Rép-éti-tions**
Essai 1.1	x	-	-	x	-	-	-	-	5
Essai 6.1	x	-	-	-	x	-	-	-	3
Essai 9.1	x	-	-	-	-	x	-	-	3
Essai 12.1	x	-	-	-	-	-	x	-	3
Essai 15.1	x	-	-	-	-	-	-	x	3
Essai 1.2	-	x	-	x	-	-	-	-	5
Essai 6.2	-	x	-	-	x	-	-	-	3
Essai 9.2	-	x	-	-	-	x	-	-	3
Essai 12.2	-	x	-	-	-	-	x	-	3
Essai 15.2	-	x	-	-	-	-	-	x	3
Essai 19	-	-	x	x	x	x	x	-	1

Tableau 3-3 : Plan d'expérimentation

2.6 Analyses d'incertitude

Une analyse d'incertitude a été réalisée pour les trois méthodes gaz traceurs testées. L'incertitude des méthodes peut être divisée en plusieurs types [96].

Le premier type, ici évalué, est l'incertitude liée aux erreurs de mesure. Cette incertitude est évaluée à l'aide de la loi de propagation des écart-types (équation 3.5) [21]. Pour la méthode par décroissance de la concentration, les erreurs de mesure peuvent provenir de la mesure de la concentration, ainsi que de l'estimation de la concentration extérieure. Pour les méthodes par dose continue ou concentration constante, l'erreur associée au taux d'émission du gaz doit également être prise en compte. Par ailleurs, les méthodes par dose continue requièrent le volume du local. On prend souvent en compte le volume géométrique, déterminé à l'aide des métrés du local. Or, dans un bâtiment, le volume effectif diffère du volume géométrique [64]. Une incertitude sur la valeur du volume effectif doit donc être prise en compte dans le calcul de l'incertitude. Cela étant, compte tenu du petit volume de la cellule expérimentale, et l'absence de meubles, nous avons considéré que le volume géométrique était exempt de toute incertitude supplémentaire.

La deuxième source d'erreur provient des erreurs de modélisation. Les méthodes gaz traceur sont basées sur des hypothèses fortes, d'homogénéité du gaz traceur, de mixage parfait de l'air neuf avec l'air vicié, d'un taux de ventilation fixe pour certaines, etc. Ces sources d'erreurs sont plus difficiles à estimer et nécessitent des expériences ou des simulations pour les caractériser. Ce n'est pas l'objet de ce paragraphe.

Les équations 3.4 et 3.5 donnent la formule de propagation des écarts-types d'une fonction f avec des paramètres d'entrées $x = (x_1, \dots, x_n)$ qui représentent les différentes variables comportant les incertitudes.

$$f(x) = (x_1, \dots, x_n) \tag{3.4}$$

$$\sigma f = \sqrt{\sum_1^n \frac{\partial f}{\partial x_i}^2 . \sigma x_i^2} \tag{3.5}$$

2.6.1 Décroissance de la concentration

Les équations développées de la loi de propagation des écart-types (équations 3.4 et 3.5) associées à la méthode décroissance de la concentration 2 points sont données en annexe 3.2. La Figure 3-7 présente l'évolution de l'incertitude relative du taux de ventilation $\sigma N/N$ calculée à partir des équations de l'annexe 3.2, pour les deux types de capteurs. La Figure 3-7 propose l'évolution des incertitudes de mesure par type de capteurs pour la méthode 2 points. On remarque logiquement que les capteurs Vaisala tendent à des incertitudes de mesure inférieures à celles des capteurs autonomes. On remarque que l'incertitude est plutôt stable entre 1 et 2τ. L'écart entre les erreurs extrêmes sur cette période vaut 2%. Elle augmente considérablement si le temps de mesure n'a pas permis d'atteindre 1τ. Par ailleurs, on vérifie également que plus l'on s'éloigne de 2τ, plus l'erreur augmente. Cela illustre bien les préconisations de la norme ISO 12569 en termes de temps de mesure [22].

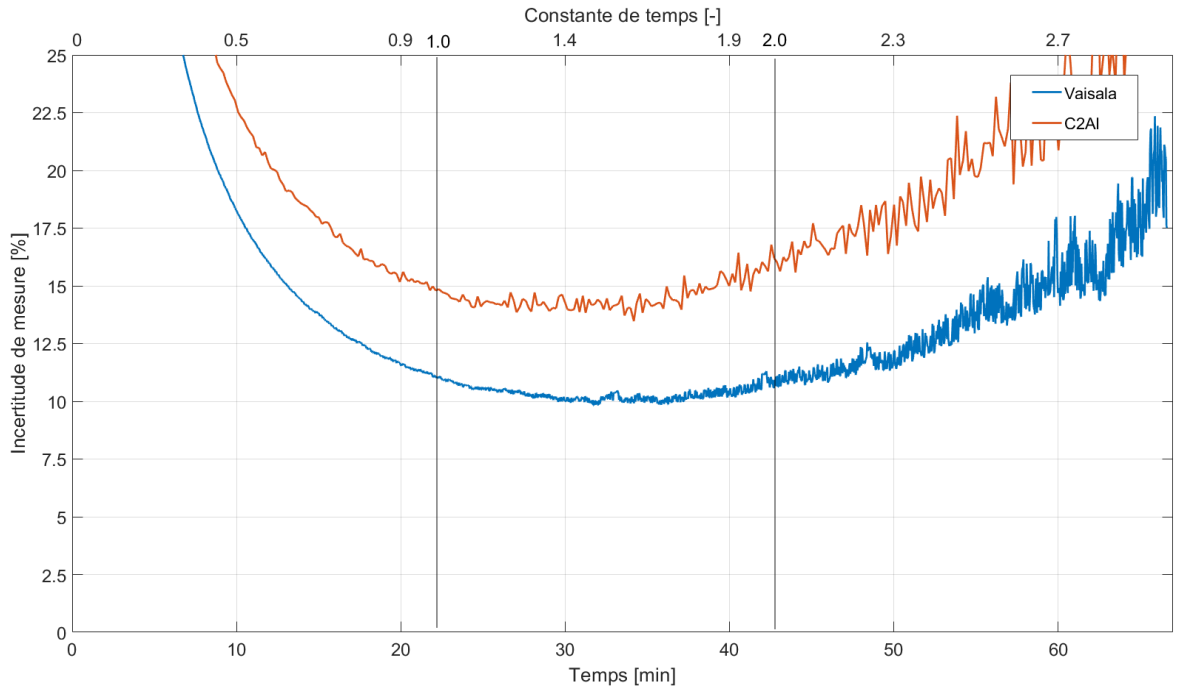


Figure 3-7 : Evolution de l'incertitude de mesure, profil traversant, méthode 2 points

Nous considérons donc l'incertitude moyenne entre 1 et 2 renouvellements d'air, pour chaque cas. Ces valeurs sont reportées dans le Tableau 3-4. Les capteurs Vaisala permettent de gagner de 5 à 7 points de précision. Les incertitudes de mesure calculées ici correspondent à l'incertitude usuelle de la méthode 2 points de 15% mentionnée dans la littérature [30]. On remarque que le profil de variation croissant tend à une incertitude supérieure aux autres profils. On peut l'expliquer par le fait que les débits sont plus faibles en début de décroissance, et donc que la décroissance exponentielle implique que la concentration du gaz sera en moyenne plus élevée que celle des autres profils. Or, la précision des capteurs est proportionnelle à la valeur de la concentration. Une concentration moyenne plus élevée implique donc une incertitude de mesure donc plus élevée.

Type de capteur	Profil stationnaire	Profil traversant	Profil décroissant	Profil croissant	Profil hautement variable
Vaisala	10%	10%	9,4%	11,7%	9,8%
C2AI	15,5%	15,0%	15,2%	18,8%	15,0%

Tableau 3-4 : Incertitudes de mesure de la méthode par décroissance de la concentration

Pour information, la méthode multi-points permet de gagner 6 points de précision par rapport à la méthode 2 points [83].

2.6.2 Dose continue

Comme pour la méthode par décroissance de la concentration, nous avons procédé à une analyse d'incertitude. Là aussi, seule l'incertitude de mesure est prise en compte. Le développement de la loi de propagation des écart-types appliquée à la sous-méthode moyenne de la concentration inverse est également disponible en annexe 3.2. La Figure 3-8 montre l'évolution de l'écart-type calculé, à partir de 3 renouvellements d'air, jusqu'à la fin de la mesure pour le profil de variation traversant. On remarque que, contrairement à la méthode 2 points, l'incertitude se stabilise, sans augmenter de nouveau. Elle se stabilise après 4τ, soit 1τ après le début de l'analyse, à l'image de la méthode 2 points. La très forte décroissance de l'incertitude dans les premières minutes montre que le choix d'arrêt de la mesure après 3τ pour le profil stationnaire n'était pas judicieux. Il faut donc attendre au moins 4τ pour que la fiabilité de la mesure soit optimale. La norme précise uniquement d'attendre au moins 3τ [22].

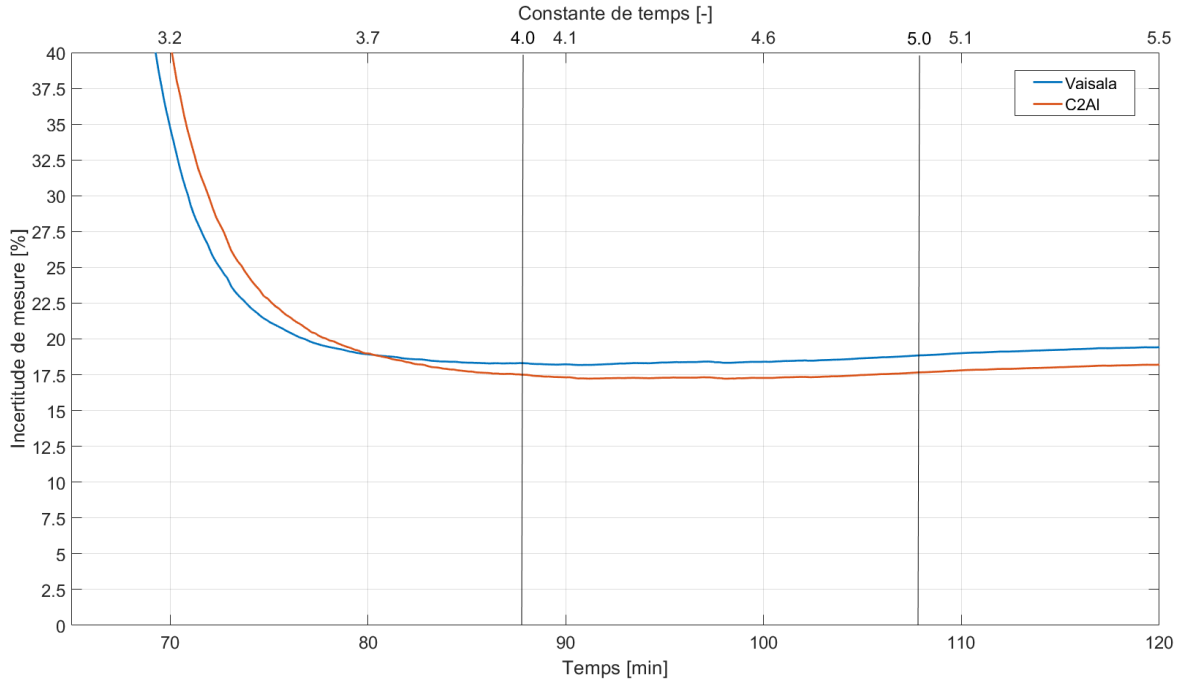


Figure 3-8 : Evolution de l'incertitude de mesure, profil traversant, méthode par dose continue moyenne de la concentration inverse

A l'image de ce qui a été réalisé pour la méthode par décroissance de la concentration, nous nous intéressons à la moyenne de l'erreur entre 4 et 5 renouvellements d'air. Le Tableau 3-5 synthétise ces erreurs pour chaque profil. Les incertitudes de mesure sont plus importantes que pour la méthode 2 points, de 8 à 15 points si l'on oublie le profil stationnaire, pour lequel

le temps de mesure attendu n'a pas été suffisant. Cette plus grande incertitude peut être attribuée à l'incertitude supplémentaire associée au taux d'émission du gaz. Celle-ci a été déterminée expérimentalement à 2%. L'incertitude de mesure varie significativement suivant les cas. Le profil décroissant entraîne une incertitude de mesure 7 à 10 points plus important que le profil traversant. Cela peut s'expliquer par le fait que le profil décroissant entraîne une concentration d'équilibre plus importante que les autres profils, ce qui accentue l'influence des erreurs de mesure qui sont dans notre cas proportionnelles à la valeur de la concentration. De plus, cet équilibre ne fait que de croître à mesure que le niveau de débit décroît, et donc il accentue l'écart entre la concentration initiale (à 3τ) et la concentration finale (à 5τ). La Figure 3-9 montre l'évolution des concentrations pour les deux profils susceptibles d'engendrer les plus grands écarts entre les concentrations extrêmes (les deux profils à variation monotone, décroissants en haut et croissant en bas). On vérifie que le profil décroissant engendre le plus grand écart entre ces concentrations extrêmes de 400 ppm entre 3 et 5τ, contre 100 ppm pour le profil croissant sur la même période. Cet écart a un impact significatif sur la dérivée partielle du débit par rapport à la concentration extérieure (cf. annexe 3.2). Même si la méthode tolère un taux de ventilation variable, on voit donc qu'une variation de taux de ventilation entraînant une forte différence entre les deux concentrations extrêmes peut avoir un impact important.

	Profil stationnaire	**Profil décroissant**	**Profil traversant**	**Profil croissant**	**Profil hautement variable**
Vaisala	27%*	25,1%	18%	18,5%	19,4%
C2AI	30%*	28,4%	18,7%	18,7%	23,8%

Tableau 3-5 : Incertitude de mesure de la méthode par dose continue

Note : *Seules 3,2τ étaient atteintes.

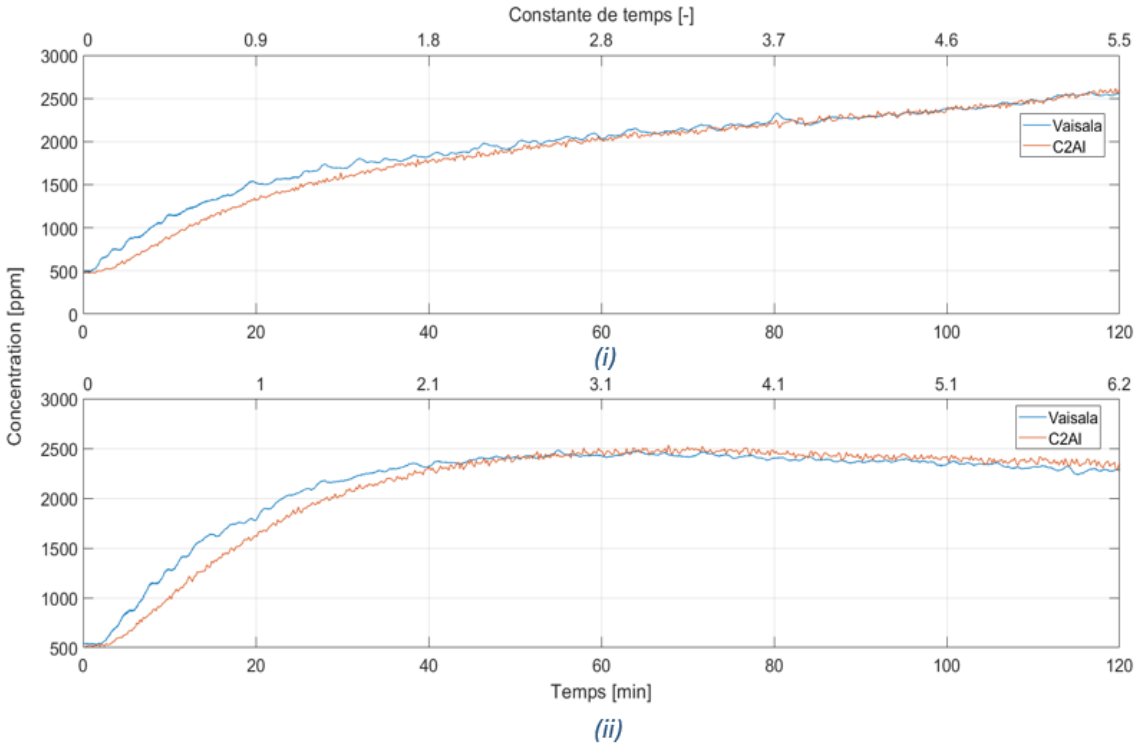


Figure 3-9 : Evolution des concentrations pendant la méthode dose continue, profil décroissant (i), profil croissant (ii)

2.6.3 Concentration constante

L'analyse d'incertitude pour la méthode par concentration constante est également présentée en annexe 3.2. Les données de concentration et d'injection du gaz sont moyennées sur une période glissante de 30 minutes. La période d'analyse a une durée fixe, et les concentrations sont quasiment fixes, donc la seule source de variation de l'incertitude se trouve dans le niveau d'injection du gaz (associée au niveau du taux de ventilation). C'est la raison pour laquelle les résultats du calcul de l'incertitude sont présentés uniquement comme une donnée globale par profil de variation, a contrario des deux autres méthodes pour lesquelles un graphique montrait l'évolution de l'incertitude pour un profil donné. Le Tableau 3-6 renseigne des incertitudes par profil de variation de débit de la méthode par concentration constante . On remarque que les capteurs C2AI tendent à des incertitudes entre 1,7 et 4% plus grandes que celles des capteurs Vaisala. Elles sont toutefois toutes inférieures à 10,3%. La méthode par concentration constante tend donc à des incertitudes de mesure plus faibles que les deux autres méthodes déjà analysées au paragraphe 2.6.

	Profil Stationnaire	**Profil Décroissant**	**Profil Traversant**	**Profil Croissant**
Vaisala	6,0 [%]	6,4 [%]	6,1 [%]	6,1 [%]
C2AI	8,5 [%]	10,3 [%]	8,8 [%]	7,8 [%]

Tableau 3-6 : Incertitude de mesure de la méthode par concentration constante

3 Mesures du taux de ventilation moyen par les méthodes par décroissance de la concentration et dose continue

3.1 Exemple de mesure du taux de ventilation

3.1.1 Méthode décroissance de la concentration

La Figure 3-10 présente un exemple de décroissance pour le profil stationnaire. La concentration tracée est la concentration moyenne provenant de chaque capteur des deux types. C'est également cette concentration qui est utilisée pour calculer le taux de renouvellement d'air. On remarque bien la période transitoire de 8 minutes environ, en début de décroissance. La période d'analyse doit commencer après cette période transitoire. On peut observer également les bruits de mesure plus importants des capteurs C2AI. L'écart entre la concentration mesurée par les capteurs C2AI et Vaisala peut s'expliquer par le plus grand temps de réponse des capteurs C2AI.

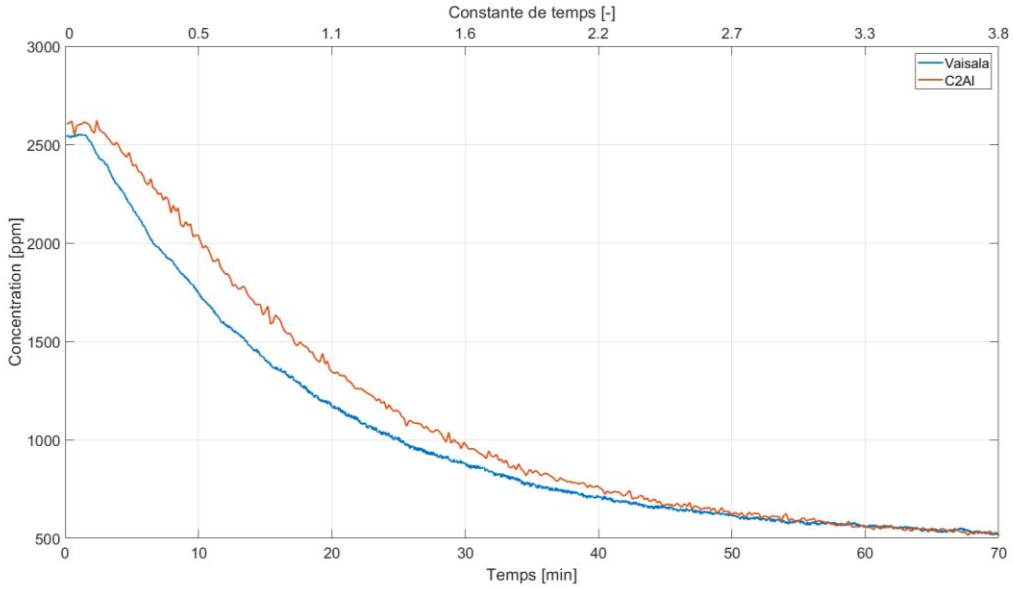


Figure 3-10 : Evolution des concentrations pendant la décroissance de la concentration, profil stationnaire

La méthode 2 points calcule ensuite le taux de renouvellement d'air moyen entre 2 points de mesure. Pour tracer la Figure 3-11, le calcul a été répété pour tous les points de mesure entre le premier point de l'analyse qui est fixe (après la période transitoire), et celui terminant la période de 3τ. Sur la figure, le temps 0 correspond donc au premier point de l'analyse. On remarque sur la figure que les résultats obtenus à partir des capteurs C2AI sont légèrement plus dispersés que ceux qui découlent des capteurs Vaisala. Cela est directement dû aux plus grandes erreurs de mesure des capteurs C2AI. A partir de 0,8τ, les résultats des deux types de capteurs sont très stables, ce qui vérifie les préconisations concernant la durée minimale d'analyse de 1 constante de temps [22]. Les résultats semblent se dégrader au bout de 2,5τ, un peu plus tard que ne l'aurait suggéré le paragraphe 2.6.1.

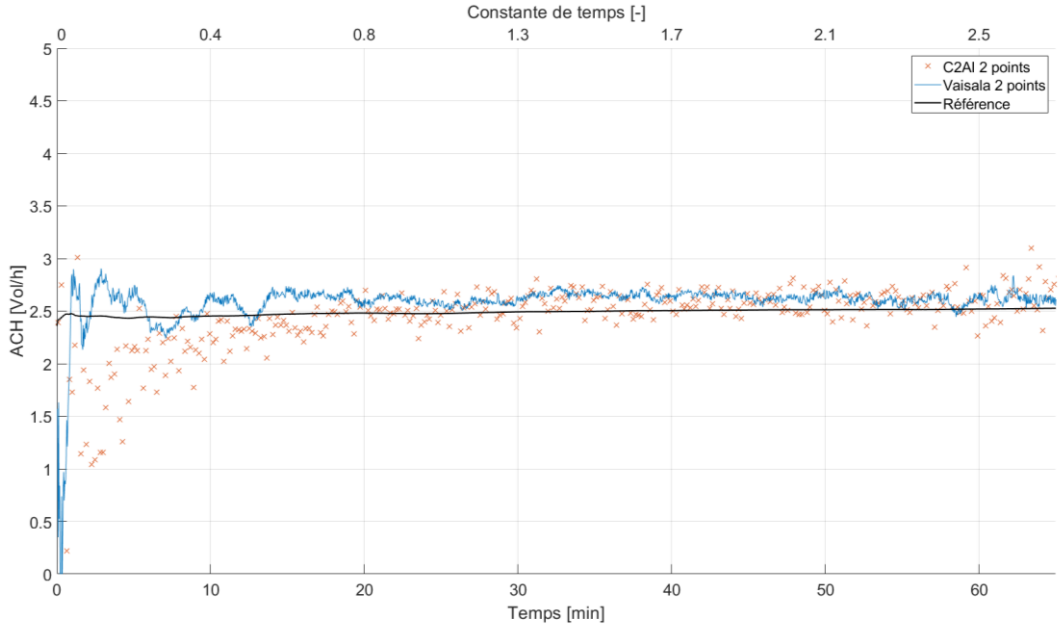


Figure 3-11 : Evolution du taux de renouvellement d'air calculé par décroissance de la concentration 2-points

3.1.2 Méthode par dose continue

La Figure 3-12 montre un exemple d'évolution de la concentration pendant l'injection constante, pour le profil de variation traversant. On comprend bien ici pourquoi le début de la période d'analyse préconisé par la norme est égal à 3τ. En effet, 95% de la concentration d'équilibre est atteinte à partir de 3τ. On observe des fluctuations après que l'équilibre soit atteint qui peuvent être imputées au profil de variation de débit qui comporte des fluctuations dues au vent.

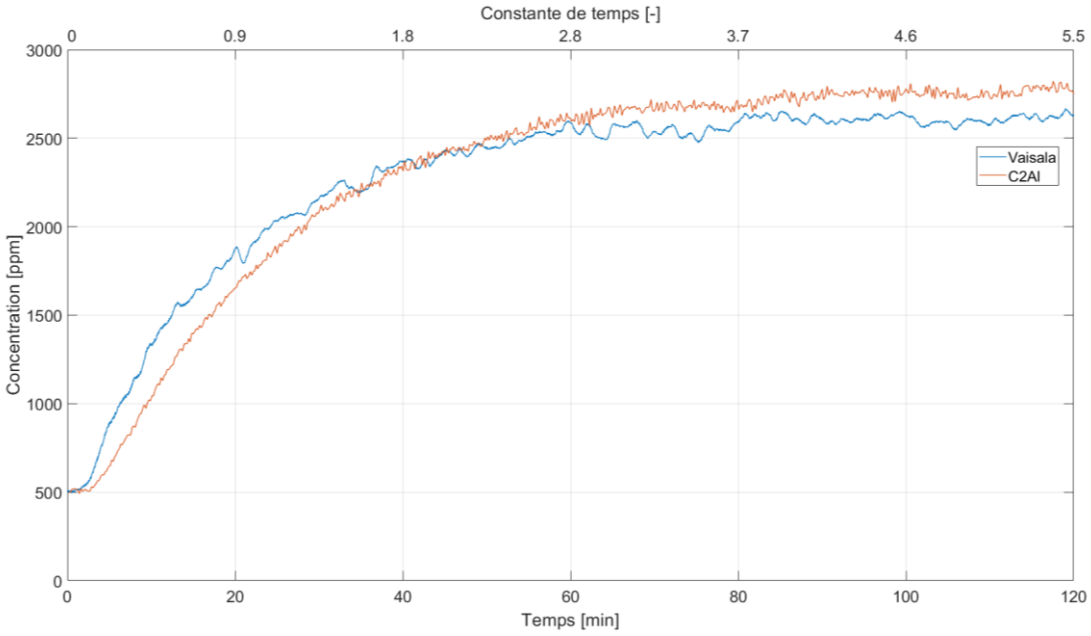


Figure 3-12 : Evolution des concentrations pendant la dose continue, pour le profil traversant

La méthode par moyenne de la concentration inverse utilise tous les points de mesure entre 3τ et le temps maximal de l'acquisition. Le calcul a donc été effectué en fixant le premier point de mesure et en glissant le dernier point de mesure jusqu'à la fin de l'acquisition. La Figure 3-13 montre l'évolution du taux de renouvellement d'air calculé par la méthode moyenne de la concentration inverse pour les deux types de capteurs. Les résultats à partir des deux types de capteurs sont très proches.

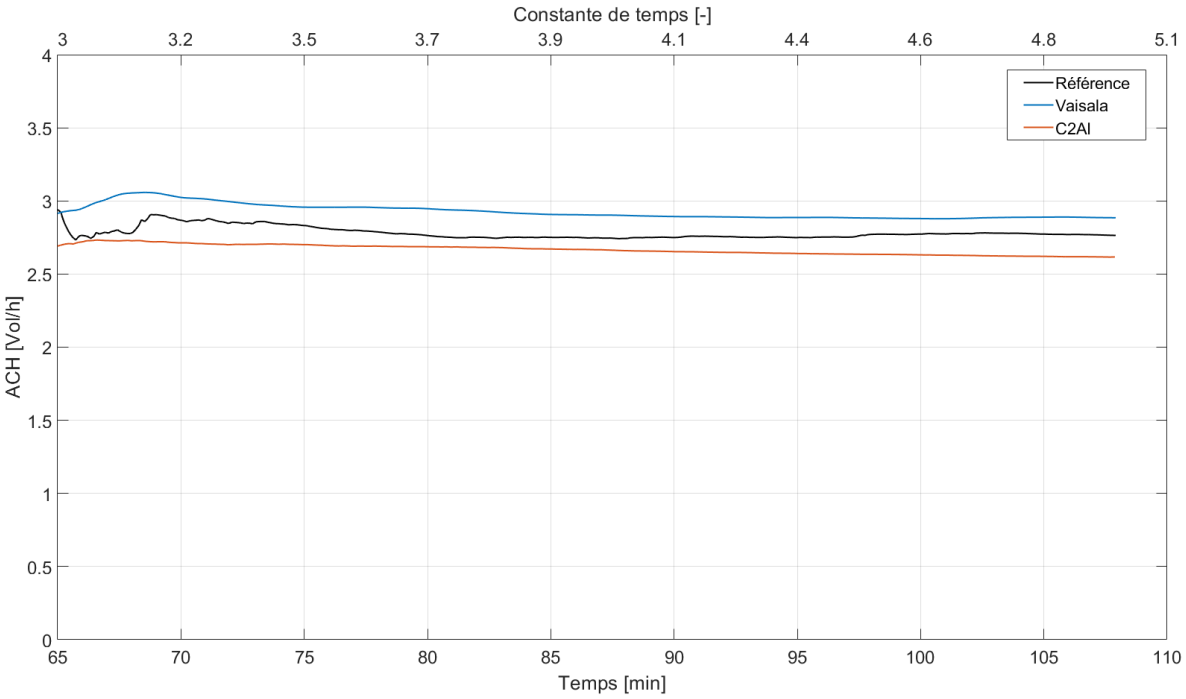


Figure 3-13 : Evolution du taux de renouvellement d'air calculé par la méthode moyenne de la concentration inverse, pour le profil traversant

3.2 Comparaison de la précision des deux méthodes de mesure

Afin de comparer les deux méthodes gaz traceur possiblement adaptées à la mesure in situ du taux de ventilation naturel, un diagramme à barres a été tracé en Figure 3-14. La méthode 2 points ainsi que la méthode par moyenne de la concentration inverse sont analysées. Les barres représentent la moyenne, sur les 3 tests de chaque cas, de l'écart entre le taux de ventilation mesuré par gaz traceur et le taux de ventilation de référence après une période de 2τ d'analyse pour les méthodes par décroissance de la concentration, et par dose continue. L'écart entre les taux de ventilation susmentionnés sera appelé « erreur expérimentale ». Les barres d'erreurs représentent l'écart-type de cette même erreur sur les 3 tests de chaque cas. Les résultats obtenus à partir des deux types de capteurs sont donnés. La concentration utilisée dans les calculs est moyennée sur l'ensemble des capteurs de chaque type (2 Vaisala, 5 C2AI). Les incertitudes de mesure calculées au paragraphe 2.6 sont tracées en pointillés sur la Figure 3-14. L'incertitude des capteurs Vaisala est tracée car elle représente la moins grande incertitude. L'analyse en est donc plus critique.

En ce qui concerne la méthode 2 points, on remarque, sur la Figure 3-14, que toutes les erreurs moyennes sont comprises dans les incertitudes de mesure. Les erreurs moyennes sont toutes inférieures à 5%. Les écart-types additionnés aux erreurs de mesure sont également tous compris dans les incertitudes de mesures. Pour rappel, le paragraphe 2.6.1 évaluait l'incertitude de mesure des capteurs C2AI autour de 15%, et celle des capteurs Vaisala autour de 10%. Les résultats observés sont donc significativement meilleurs. Il est donc vérifié que la méthode 2 points est insensible au profil de variation, et s'est montrée moins sensible qu'attendu vis-à-vis des erreurs de mesure. Les deux types de capteurs tendent à des résultats similaires.

Globalement, on remarque sur la Figure 3-14 que les résultats de la méthode par dose continue sont systématiquement moins précis que ceux de la méthode par décroissance de la

concentration. L'amélioration de la précision de la méthode 2 points est de 1% pour les capteurs Vaisala du profil hautement variable, jusque 25 et 27% pour les deux types de capteurs du profil décroissant. Pour chaque cas, les deux types de capteurs tendent, cependant, à des erreurs moyennes comprises dans les incertitudes calculées au paragraphe 2.6, à une exception près pour les capteurs Vaisala du profil décroissant dont l'erreur moyenne dépasse l'incertitude de mesure de 2 points. Les raisons de la très nette dégradation des résultats pour le profil décroissant ont déjà été discutées dans le paragraphe 2.6.2. La plus grande incertitude de mesure associée à ce profil pour la méthode par dose continue a donc effectivement été vérifiée.

De cette comparaison, on en déduit que la méthode 2 points est moins sensible vis-à-vis de la variation de débit ainsi que des erreurs de mesure. Elle est donc plus précise, et plus facile à mettre en œuvre, car elle ne requiert qu'un point de dosage, et ne requiert pas nécessairement d'avoir recours à un régulateur de débit massique pour injecter le gaz. Les capteurs C2AI se sont montrés aussi performants que les capteurs Vaisala. Cela peut s'expliquer par le fait que 5 capteurs soient moyennés pour l'analyse, ce qui permet d'atténuer les erreurs de mesure.

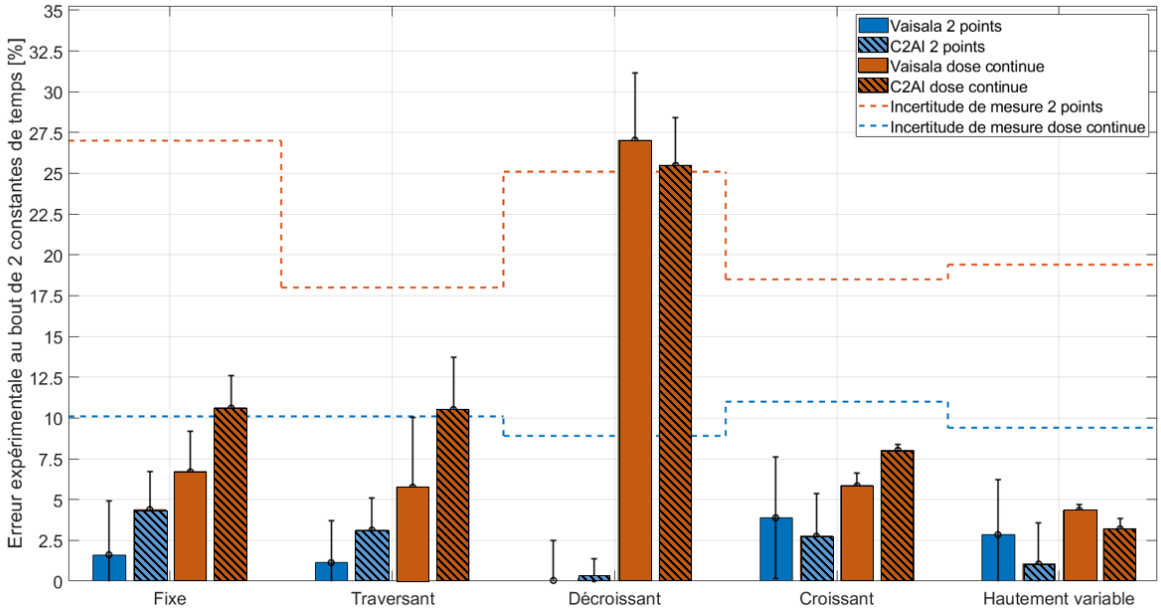


Figure 3-14 : Diagramme à barres de l'erreur expérimentale pour les méthodes 2 points et moyenne de la concentration inverse, tous capteurs

3.3 Influence de la sélection d'un seul capteur

L'influence de la sélection d'un seul capteur pour réaliser l'analyse a été évaluée, car cela pourrait faciliter l'application in situ de la méthode. Les conclusions de la revue de littérature ont montré que le capteur le plus proche de l'évacuation devait être utilisé car il est le plus représentatif [80], [83]. C'est donc ce capteur (capteurs C2AI n°3 et Vaisala n°2 cf. Figure 3-1) qui a été sélectionné pour ce paragraphe. La Figure 3-15 propose le même diagramme à barres que la Figure 3-14, mais le calcul du taux de ventilation est effectué à partir d'un seul capteur. L'analyse concernant les erreurs moyennes est identique au cas où tous les capteurs étaient utilisés. Cela montre que la sensibilité spatiale des deux méthodes au sein de la cellule expérimentale est plutôt faible, ce qui peut s'expliquer par le faible volume de la cellule. La différence avec la figure précédente se trouve dans l'analyse des écart-types, qui sont plus importants ici, notamment pour la méthode 2 points. Ils restent, pour la plupart, compris dans

les incertitudes de mesure. Seul le profil hautement variable à partir des capteurs Vaisala entraîne un écart-type largement supérieur aux incertitudes de mesure pour la méthode 2 points (de 1 point). Sélectionner un seul capteur n'a pas eu d'influence notoire sur la méthode par moyenne de la concentration inverse.

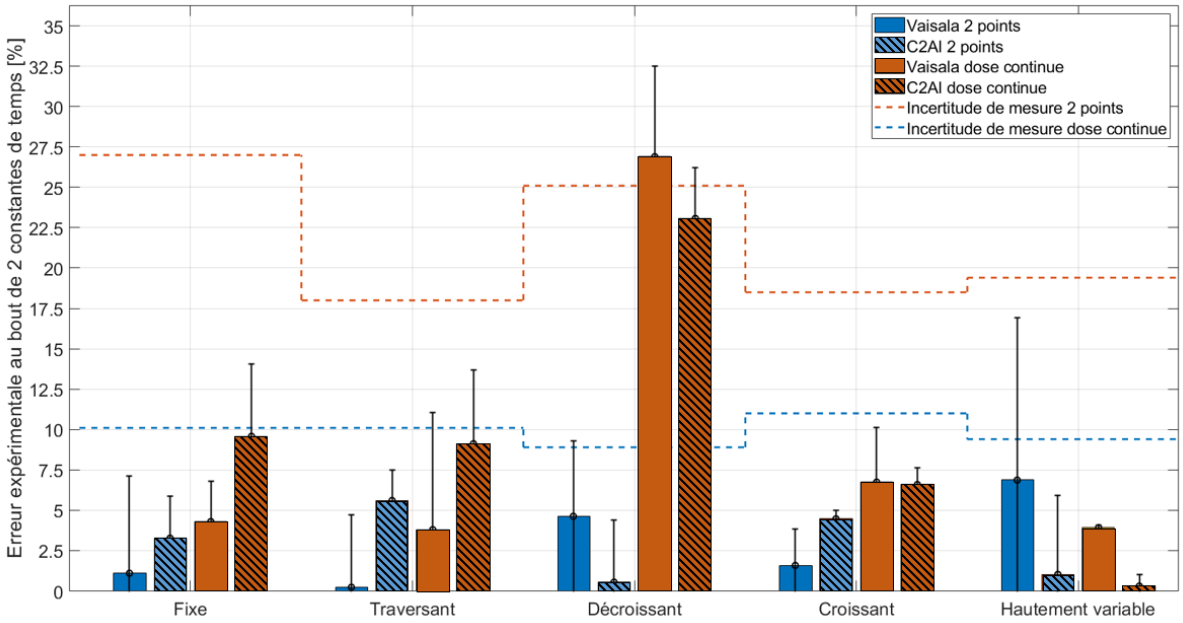


Figure 3-15 : Diagramme à barres de l'erreur expérimentale pour les méthodes 2 points et moyenne de la concentration inverse, un seul capteur

4 Mesure du taux de ventilation instantanée par la méthode concentration constante

La Figure 3-16 montre l'évolution des concentrations moyennes par type de capteurs. On remarque que la stabilisation des concentrations présente un décalage par rapport à la concentration cible de 50 ppm en moyenne pour les capteurs Vaisala, et de 100 ppm en moyenne pour les capteurs C2AI. Ce décalage est probablement dû à une surestimation du coefficient proportionnel du régulateur PID. Cela n'a pas d'influence sur le calcul du taux de ventilation car le rapport fait intervenir la concentration effective, et non la concentration cible. On remarque que le système s'équilibre en 1h. On remarque également des fluctuations autour de la concentration stabilisée. Ces fluctuations sont dues à l'inertie du système, sachant qu'il n'y a pas de ventilateur de brassage pour homogénéiser l'injection du gaz. Elles sont encore plus importantes pour le profil croissant (amplitude maximale des fluctuations des capteurs Vaisala de 300 ppm contre 150 ppm pour les autres cas). Or le profil croissant présente, en début de profil, des niveaux de débits inférieurs aux autres profils qui ralentissent la propagation du gaz dans le volume. La réponse du système étant plus lente, on observe de plus grandes fluctuations sur la concentration.

Le taux de ventilation est ensuite calculé à partir du rapport moyenné sur 30 minutes de l'injection par la concentration. Les résultats du taux de ventilation dynamique ainsi que de l'erreur expérimentale sont tous deux présentés en Figure 3-17. Les incertitudes de mesure calculées dans l'analyse de sensibilité sont représentées en pointillés. On remarque que le taux de ventilation calculé par la méthode par concentration constante est quasiment toujours

compris dans l'intervalle des incertitudes de mesure. Quelques fluctuations du calcul du taux de ventilation tendent localement à des écarts supérieurs aux incertitudes de mesure (par exemple aux alentours de 6h). Le profil croissant tend lui à des fluctuations du taux de ventilation calculé dont les extrémums sont quasiment systématiquement en dehors des incertitudes de mesure. Mise à part ces fluctuations, l'évolution du taux de ventilation est cohérente avec le taux de ventilation de référence. Le Tableau 3-7 fait état de l'erreur moyenne du taux de ventilation sur les différents profils. Concernant le profil stationnaire, seules les 2 dernières heures sont considérées. Les erreurs moyennes sont toutes inférieures à 6,2%. Elles sont toutes inférieures aux incertitudes de mesure calculées dans le paragraphe 2.6.3. Cela correspond à l'incertitude de 6% de la méthode par concentration constante estimée durant la revue de littérature [30].

La mesure du taux de ventilation dynamique, ainsi que la bonne précision de la méthode par concentration constante ont donc été vérifiées. En termes de précision, la méthode 2 points, bien que caractérisée par des incertitudes de mesure plus importantes, s'est montrée aussi précise que la méthode par concentration constante.

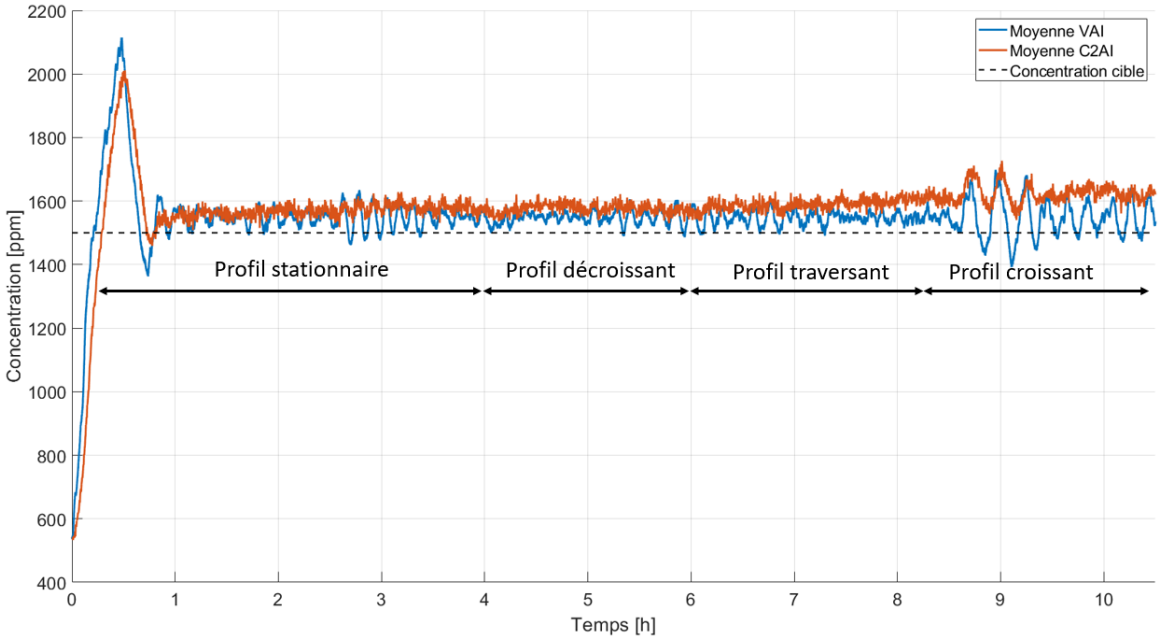


Figure 3-16 : Evolution des concentrations moyennées sur chaque type de capteurs

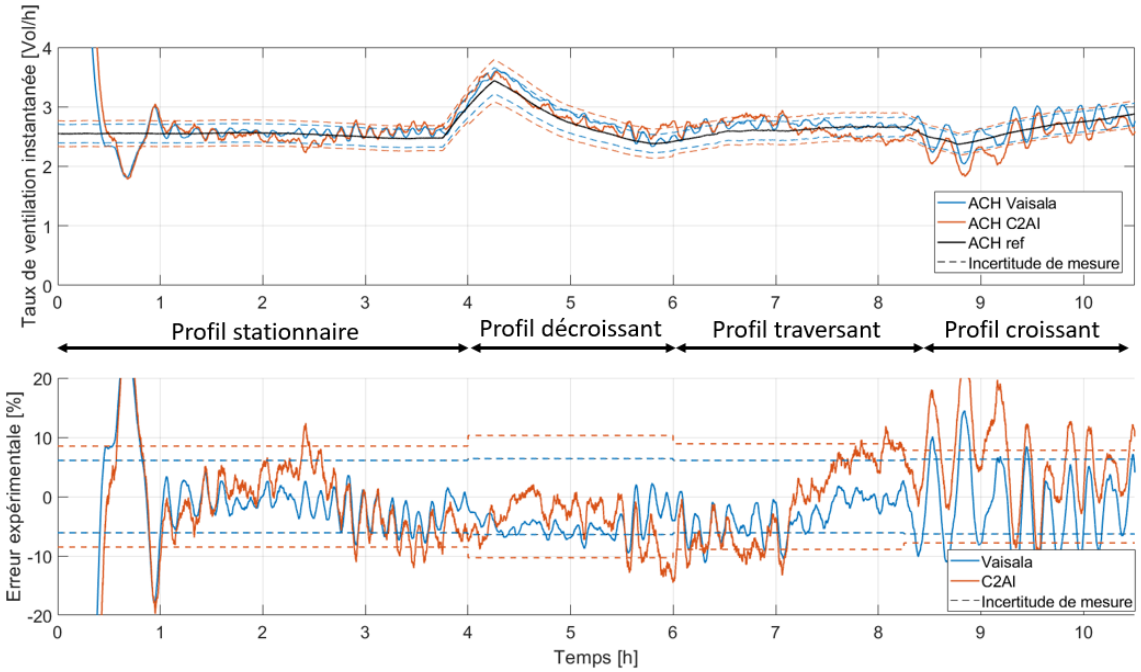


Figure 3-17 : Evolution du taux de ventilation instantanée et de l'erreur expérimentale de la méthode par concentration constante

	Profil stationnaire	**Profil décroissant**	**Profil traversant**	**Profil croissant**
Vaisala	-2,1 [%]	-4,7 [%]	-3,2 [%]	-1,7 [%]
C2AI	-1,4 [%]	-4,0 [%]	-1,5 [%]	6,2 [%]

Tableau 3-7 : Erreur expérimentale de la méthode concentration constante par profil de variation de débit

5 Discussion

Tout d'abord, l'implémentation plus facile de la méthode par décroissance de la concentration par rapport aux deux autres méthodes a été vérifiée, notamment grâce au point unique de dosage couplé à un ventilateur de brassage. Par ailleurs, il a été observé que la méthode dose continue nécessitait plutôt une période de mesure de 4τ pour être optimale en comparaison à la période de 3τ préconisée par la norme. La méthode décroissance ne nécessitant que 1 à 2τ en est d'autant plus pratique, et économe en gaz.

En ce qui concerne la précision des méthodes, la méthode par dose continue et moyenne de la concentration inverse s'est montrée systématiquement moins précise que la méthode par décroissance de la concentration. Cela s'explique par des incertitudes de mesure plus importantes de la méthode par dose continue, qui peuvent être imputées à l'incertitude supplémentaire sur le taux d'émission du gaz. L'incertitude dépend également de la stationnarité de la concentration d'équilibre. Un profil de débit qui vient modifier significativement la concentration d'équilibre de la méthode par dose continue, en plus d'empêcher l'identification de la période d'analyse (période où la concentration se stabilise), a un impact significatif sur les incertitudes de mesure. Le profil décroissant a, par exemple, engendré des incertitudes de mesure de plus de 25%, et cela s'est vérifié expérimentalement par la moyenne de l'erreur de plus de 20 points supérieurs à l'erreur de la méthode par décroissance de la concentration. Or, la concentration après 3τ du profil décroissant ne cessait de croître et n'atteignait donc jamais vraiment l'équilibre. Le profil décroissant est le profil qui

a engendré la plus grande variation de CO_2 pendant la période d'analyse, ce qui explique les plus grandes erreurs qui lui sont associées. Il aurait, par ailleurs, été impossible d'identifier visuellement la période d'analyse sans connaître au préalable le taux de ventilation. De plus, la méthode par dose continue comporte d'autres sources d'incertitude que l'expérimentation n'a pas permis de mettre en évidence. Par exemple, la différence entre le volume géométrique et le volume effectif de la pièce considérée peut valoir jusque 10% [64]. Or ce volume intervient dans le calcul de la méthode par dose continue mais n'intervient pas dans celui de la méthode par décroissance de la concentration. Sandberg et al. [70] ont, également, souligné le risque d'évacuation directe de gaz par le système de ventilation sans qu'il ne se soit mixé avec l'air de la pièce, ce qui viendrait encore dégrader le résultat. Finalement, la méthode par dose continue s'est donc montrée plus sensible, indépendamment d'autres sources d'erreurs que l'on aurait pu rencontrer. De plus, elle ne permet pas la mesure conjointe de l'âge de l'air, a contrario de la méthode par décroissance de la concentration.

La méthode par décroissance de la concentration s'est, elle, montrée précise, indépendamment du profil de variation de débit, du type de capteurs et de leur précision. Les erreurs observées ont été globalement plus faibles que les incertitudes de mesure (inférieures en moyenne à 5%). Ces dernières sont toutefois plutôt importantes, autour de 15%. Considérer un seul capteur a légèrement dégradé les résultats, notamment en termes d'écart-type de l'erreur sur les 3 tests de chaque cas. Cependant, seul le cas hautement variable évalué à partir des capteurs Vaisala entraîne une augmentation de l'écart-type qui soit réellement significative (supérieure aux incertitudes de mesure).

La méthode par concentration constante a été testée pour voir de combien la méthode gaz traceur la plus sophistiquée permettait d'améliorer les résultats de la méthode par décroissance de la concentration. Mise à part sa faculté supplémentaire à rendre compte du taux de ventilation dynamique, la méthode par concentration constante a engendré des résultats dont la précision est du même ordre de grandeur que ceux de la méthode par décroissance de la concentration. Cela conforte donc le potentiel de la méthode par décroissance de la concentration. Les incertitudes de mesure de cette dernière laissaient toutefois présager des erreurs plus importantes.

6 Conclusion

La ventilation naturelle complique la mesure du taux de renouvellement d'air à cause des faibles pressions qu'elle impose, et de la variabilité des débits. Le chapitre 2 avait permis d'identifier principalement deux méthodes comme étant adaptées à la mesure du taux de ventilation naturel. Ces deux méthodes ont été identifiées car ce sont des méthodes indirectes, relativement peu coûteuses, et adaptées au taux de ventilation variable. On retrouve la méthode gaz traceur par décroissance de la concentration 2 points, et la méthode gaz traceur par dose continue moyenne de la concentration inverse. La première (par décroissance de la concentration) requiert significativement moins d'efforts d'implémentation que la seconde et permet de réduire également le coût d'implémentation en termes de quantité de gaz et d'équipement. L'expérimentation menée ici a permis de vérifier qu'elle engendrait des résultats sur le taux de ventilation systématiquement plus précis que la méthode par dose continue, qui souffre d'un plus grand nombre de sources d'incertitudes. Elle s'est montrée insensible vis-à-vis des profils de variation, ainsi que des incertitudes de mesure. La méthode par décroissance de la concentration a engendré des résultats dont l'ordre de grandeur était similaire aux résultats

de la méthode par concentration constante, également testée dans ce chapitre. Cette dernière est la méthode gaz traceur identifiée dans la littérature comme la plus précise, mais dont le matériel et l'expérience requis empêchent d'envisager une application in situ à grande échelle.

En plus de sa précision intéressante en termes de taux de ventilation, la méthode par décroissance de la concentration est la seule qui permet également la mesure conjointe de l'âge de l'air en ventilation naturelle. Cette méthode est donc choisie pour la suite de cette thèse.

De nombreux points doivent encore être traités pour fiabiliser la méthode décroissance de la concentration 2 points:

i. les incertitudes de mesure lui étant associées sont évaluées à 15%, ce qui est plutôt important ;
ii. elle n'est pour l'instant pas adaptée à une mesure multi-zones, ce qui la rend inadaptée à une application in situ ;
iii. l'impact d'autres sources d'incertitudes comme un mauvais mixage de l'air dans la pièce n'a pas encore été caractérisé ;
iv. la concentration du gaz de l'air pénétrant dans la pièce ne doit pas varier, ce qui rend compliquée l'utilisation du CO_2, pourtant très bon candidat en vue d'une application in situ grâce à son très bon rapport coût/efficacité de mesure.

Le prochain chapitre fait l'objet du test d'un outil de traitement du signal appelé filtre de Kalman pour fiabiliser la méthode 2 points. Cet outil sera appliqué afin de réduire l'influence des bruits de mesure (i.), de la rendre adaptée à l'utilisation du CO_2 en tant que gaz traceur même avec une concentration variable de l'air pénétrant dans la pièce (iv.), et, ce faisant, de rendre la méthode adaptée à une application multi-zones (ii.). Le chapitre 5 traitera de la caractérisation des autres sources d'incertitudes (iii.).

Chapitre 4 Fiabilisation de la mesure par décroissance de la concentration par le filtre de Kalman

Mesure du taux de ventilation dynamique

Mesure du taux de ventilation multi-zones

1 Introduction

Le chapitre 2 a permis d'identifier les méthodes gaz traceur comme les mieux adaptées aux contraintes de la mesure du taux de ventilation naturelle. L'application in situ apporte de nouvelles contraintes qui encouragent plutôt à utiliser la méthode gaz traceur par décroissance de la concentration. Le chapitre 3 a vérifié qu'elle était plus pratique à mettre en place, et plus précise que la méthode par dose continue moyenne de la concentration inverse, autre méthode gaz traceur adaptée à un taux de ventilation variable. Les incertitudes de mesure de la méthode 2 points ont été évaluées expérimentalement à 15% environ, en accord avec celles identifiées préalablement dans la littérature [30]. Il reste donc une marge de progression concernant la précision de la méthode sur la mesure du taux de ventilation.

1.1 Contraintes associées à l'application in situ en bâtiment multi-zones

De plus, l'application in situ en bâtiment multi-zones apporte encore davantage de contraintes quant à l'application d'une méthode gaz traceur. Les méthodes gaz traceur réalisées à partir d'un gaz traceur unique ne permettent pas la mesure dans un bâtiment composé de plusieurs zones [22]. Dans le cas d'un logement ventilé naturellement par conduits, l'extraction d'air a lieu dans les pièces de service (cuisine, toilettes, et salles d'eau), susceptibles de contenir une source de pollution spécifique. Le principe de balayage prescrit par les réglementations de la construction vise à acheminer l'air des pièces de vie (chambres, séjour), vers les pièces de service. Le but étant de ne pas diffuser la pollution émise dans les pièces de service vers le reste du logement. Les bouches d'entrée d'air sont donc installées dans les pièces de vie et les conduits d'extraction dans les pièces de service. Pour connaître le débit total extrait, il convient de mesurer simultanément le débit : soit dans les pièces de service; soit dans les pièces de vie. Il est proposé, ici, de réaliser la mesure dans les pièces de service. Les pièces de service ont tendance à être plus petites que les pièces de vie, ce qui favorise le respect de la condition d'homogénéité du gaz dans la pièce qui est un prérequis de la méthode [22]. De plus, si la méthode était réalisée dans les pièces de vie, toute recirculation de l'air d'une pièce de vie à une autre entrainerait des erreurs significatives, car l'expérimentateur aurait fait l'hypothèse que tout l'air pénétrant dans la pièce de vie provenait de l'extérieur. Or, comme la méthode est réalisée quasi-simultanément dans les pièces de vie, la concentration en gaz traceur de la recirculation de l'air sera largement différente de la concentration atmosphérique du gaz. A l'inverse, l'air pénétrant dans les pièces de service provient du dispositif de transfert d'air installé entre la pièce de service et la pièce mitoyenne. Si le gaz est présent dans l'atmosphère, la concentration de l'air pénétrant dans la pièce de service doit être mesurée en amont de ce dispositif. Le parcours de l'air en amont de ce dispositif n'a alors plus d'influence.

Cependant, bien qu'intéressant en termes de coût, de praticité, et de réduction de l'impact carbone d'une méthode gaz traceur, le CO_2 introduit deux contraintes si la méthode est réalisée dans les pièces de service. Pour rappel, la concentration de l'air pénétrant dans la pièce dans laquelle est réalisée la mesure doit être soustraite à la concentration intérieure. Cette concentration est appelée « concentration de transit ». Les deux contraintes associées à l'application de la méthode gaz traceur dans les pièces de service sont liées à la concentration de transit :

i. Le moyen direct pour connaitre la concentration de transit associée à une pièce de service d'un logement ventilé naturellement par conduits consiste à mesurer la concentration en amont du dispositif de transfert d'air. Cette concentration mesurée sera appelée « concentration ambiante ». Or, en cas d'infiltrations, ou de présence d'autres dispositifs de transfert d'air connectés à la pièce de service, la concentration ambiante mesurée ne sera pas totalement représentative de la concentration de transit, ce qui peut conduire à des incertitudes importantes. La concentration de transit sera alors un mix de la concentration ambiante, de la concentration des infiltrations, et de la concentration de l'air provenant d'éventuels autres dispositifs de transfert d'air.
ii. La résolution de l'équation de bilan de masse implique que, si le gaz traceur est naturellement présent dans l'atmosphère, sa concentration de transit doit être invariante dans le temps [21], [22]. Or, si la méthode est réalisée dans les pièces de service, la concentration de transit est la concentration de l'air qui a circulé des pièces de vie vers la pièce de service. Cette concentration a des chances de fluctuer, notamment si le bâtiment est, ou était, occupé.

En d'autres termes, l'application in situ dans un logement nécessite de réaliser les mesures quasi-simultanément dans les pièces de service. L'air qui renouvelle l'air vicié de la pièce de service est donc l'air qui a transité des pièces de vie vers la pièce de service à l'aide d'un dispositif de transfert d'air. Le choix du gaz traceur s'étant porté vers le CO_2, la concentration de transit a de grande chance d'être variable. Cette variabilité biaise n'importe quelle méthode gaz traceur [21]. Aussi, l'air qui pénétrerait dans la pièce de service autrement que par le dispositif de transfert d'air impacterait le résultat de la méthode gaz traceur car la concentration de transit serait mal estimée.

1.2 Objectif

L'objectif de ce chapitre est de dépasser les difficultés induites par l'application in situ de la méthode en logement multi-zones tout en améliorant la précision de la méthode par décroissance de la concentration 2 points concernant la mesure du taux de ventilation. La difficulté (i.) est traitée par l'application d'une procédure basée uniquement sur la concentration intérieure, qui permet de tenir compte de la concentration de l'air qui proviendrait de n'importe quelle autre source que le dispositif de transfert d'air. Cette procédure est décrite dans le paragraphe 3.3. Concernant la difficulté (ii.) liée à la variabilité du CO_2 de transit, l'outil de traitement du signal Filtre de Kalman est introduit, et testé sur les données expérimentales. Cet outil permet de mesurer un taux de ventilation dynamique, alors que l'air pénétrant dans la pièce d'intérêt comporte une concentration variable de CO_2. En plus de traiter les points de litige apportés par l'application in situ, le filtre de Kalman donne donc une information supplémentaire par rapport à la méthode 2 points qui calcule simplement la moyenne de taux de ventilation. Cet outil permettrait donc de mesurer le taux de ventilation global, non biaisé, d'un logement in situ ventilé naturellement par conduits.

Après avoir exposé les bases théoriques du filtre de Kalman, ce chapitre présente la méthodologie de l'expérimentation proposée. Ensuite la robustesse du filtre est testée dans des cellules jumelles expérimentales ventilées par ventilation mécanique, afin de pouvoir comparer le résultat du filtre de Kalman à une mesure de référence. La répétabilité de la méthode fiabilisée par le filtre de Kalman est comparée à celle de la méthode 2 points grâce à 30 tests identiques.

Finalement une analyse paramétrique est effectuée pour tester la robustesse du filtre dans différentes configurations. Les paramètres compris dans cette analyse sont l'occupation dans la pièce de vie, la position de la porte entre la pièce de vie et la pièce de service, le niveau de CO_2 initial à injecter, ou encore le nombre de capteurs à utiliser. Le gain de précision qu'apporte la procédure qui vise à tenir compte des infiltrations dans la concentration de transit est également évalué. Cette analyse paramétrique expérimentale sera complétée dans le prochain chapitre par une analyse de sensibilité numérique.

2 Théorie du filtre de Kalman

2.1 Introduction au filtre de Kalman

Dans l'optique de pouvoir mesurer un taux de ventilation dynamique, avec variation de la concentration de transit, des outils complémentaires aux méthodes gaz traceur conventionnelles ont dû être considérés, à savoir : la méthode de régression des moindres carrés locale glissante (méthode multipoints locale glissante), la résolution dans le domaine fréquentiel, et le filtre de Kalman.

Concernant la première méthode, elle a été testée sur l'expérimentation du chapitre précédent, et les résultats sont présentés dans l'article de conférence présenté à l'AIVC [97], qui est disponible en annexe 4.1. Cette méthode est aujourd'hui implémentable, grâce au grand nombre de mesures que peuvent effectuer les capteurs. Réduisant la période de régression à une période locale (2 minutes), et glissante, le biais associé à la variabilité du taux de ventilation est également diminué. La régression glissante permet d'estimer l'évolution du taux de ventilation. Elle a donné globalement de bons résultats dans la configuration de l'expérimentation présentée au chapitre 3. Cependant, il n'est pas possible d'anticiper la fréquence de variation du taux de ventilation. Or, la régression locale nécessite un grand nombre de points de mesure, qui doivent donc s'étaler sur plusieurs minutes. Même si la ventilation par conduits est principalement induite par le tirage thermique, le vent peut, toutefois, induire des fluctuations hautes fréquences sur le taux de ventilation [12]. Cette technique reste donc biaisée [62]. Elle est encore davantage biaisée si la concentration de transit varie. Elle n'est donc pas retenue pour la suite.

La variation haute fréquence du taux de ventilation contraint également la résolution dans le domaine fréquentiel. Les bruits de mesure, souvent haute fréquence, vont se confondre avec la variation du taux de ventilation, empêchant donc de les identifier dans l'optique de filtrer les données. Les études identifiées utilisant le domaine fréquentiel pour résoudre l'équation de bilan de masse supposent que le taux de ventilation soit fixe [42], [86].

Finalement, le dernier outil à avoir été considéré est le filtre de Kalman. Le filtre de Kalman est un puissant outil de traitement du signal, utilisé dans de nombreux domaines. Il permet d'évaluer les états d'un système dynamique à partir de séries d'observations bruitées. Le système dynamique comprend, ici, les trois paramètres impliqués dans l'équation de bilan de masse, à savoir la concentration intérieure, la concentration de transit, et le taux de ventilation. Ces trois paramètres appelés paramètres d'état sont considérés comme dynamiques par le filtre. Les séries d'observations sont la mesure des concentrations intérieures et de transit. Le filtre prend en considération les caractéristiques des bruits de mesure que l'expérimentateur a préalablement renseignés à l'aide d'une matrice de covariance. Il se démarque des techniques de filtrage classiques par la possibilité de renseigner une deuxième source de bruits qui caractérisent des variations aléatoires qui ne sont pas prévues par les solutions analytiques du

système d'équations. Ce bruit est appelé bruit de processus. Dans notre cas, le bruit de processus permet de tenir compte des écarts par rapport aux hypothèses émises pour la résolution de l'équation de bilan de masse :

- un mixage parfait de l'air neuf avec l'air vicié ;
- une concentration de gaz traceur homogène ;
- une concentration fixe du CO_2 de transit ;
- un taux de ventilation fixe (même si la méthode 2 points n'est pas biaisée en cas de taux de ventilation variable).

C'est donc le bruit de processus qui permet la variation du taux de ventilation calculé par le filtre, ainsi que la variation du CO_2 de transit. Le filtre semble être l'outil optimal pour mesurer le taux de ventilation dynamique non biaisé à partir de mesures bruitées du CO_2 intérieur, et du CO_2 de transit. Cet outil a déjà été utilisé en lien avec l'évaluation du taux de ventilation [49], [98]. Brabec et Jilek ont estimé le taux d'infiltration du radon dans une maison ventilée naturellement, en utilisant le filtre de Kalman qui estimait conjointement le taux de ventilation [98]. L'évaluation de la précision de la méthode était basée sur la covariance de l'estimation du taux de ventilation, estimation calculée par le filtre, mais elle n'a pas été comparée à une valeur de référence. Duarte el al., [49] après avoir développé le principe et le développement mathématique du filtre, l'ont utilisé en application in situ dans une salle de classe. Il a été utilisé à partir de la méthode de CO_2 métabolique Transient Mass Balance Equation (cf. Chapitre 2). Une fois encore, la précision de la méthode n'a pas été comparée à une référence, mais a été évaluée à l'aide de la covariance du paramètre d'état calculée par le filtre. Il en ressort que la principale source d'incertitude, provenait de l'erreur associée à l'estimation du taux d'émission du CO_2 métabolique.

Le filtre de Kalman a déjà été testé, à l'image de la méthode de régression locale, sur les profils de variation de l'expérimentation du chapitre précédent. Ils sont également présentés dans l'article présenté à la conférence de l'AIVC [97], en annexe 4.1. Il s'est montré plus performant que la méthode conventionnelle de décroissance de la concentration 2 points.

L'expérimentation présentée ici va tester le filtre de Kalman sur des profils de variation de débit imposés et mesurés. La méthode sera donc comparée à une référence. Dans les études [49], [98], le filtre évalue également respectivement le taux d'émission du CO_2 métabolique, et le taux d'infiltration du radon. Dans l'expérimentation de ce chapitre, ces paramètres seront remplacés dans le système dynamique du filtre par la concentration de CO_2 de transit. Les paragraphes suivants présentent le principe du filtre plus en détail, et son développement mathématique. Ces deux prochains paragraphes 2.2 et 2.3 sont adaptés de l'étude de Duarte et al. [49].

2.2 Mise sous forme de la représentation d'état du modèle

L'application du filtre de Kalman requiert de formuler le système sous la forme d'une représentation d'état. Cela signifie que le système doit comporter un espace d'état (**x**), un espace de sortie (**z**), ainsi qu'un espace de commande (**u**) tels que le système s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}} = F\,\boldsymbol{x} + A\,\boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{z} = H\,\boldsymbol{x} + B\,\boldsymbol{u} \end{cases} \tag{4.1}$$

Comme il a déjà été évoqué dans les chapitres précédents, le bilan de masse sur la concentration du gaz traceur s'écrit ainsi :

$$\frac{dC}{dt} = -N(C - C_{transit}) \tag{4.2}$$

Avec :

- C la concentration [ppm] ;
- $C_{transit}$ la concentration de transit [ppm] ;
- N le taux de ventilation [Vol.h^{-1}].

Ce problème est donc a priori linéaire. En revanche, si l'on considère la variation du taux de ventilation (N), le problème n'est plus linéaire. Le problème étant non-linéaire, c'est la version non-linéaire du filtre de Kalman qui est présentée ici, à savoir le filtre de Kalman étendu. L'équation de bilan de masse se réécrit donc avec les dépendances temporelles :

$$\frac{dC(t)}{dt} = -N(t)[C(t) - C_{transit}(t)] \tag{4.3}$$

Cette écriture ne caractérise pas complétement l'évolution de la concentration que l'on peut observer en réalité. Il faut prendre également en compte les erreurs de mesure sur les concentrations, ainsi que les bruits de processus. Les bruits de processus caractérisent les écarts qu'il peut y avoir entre l'évolution réelle du système, et celle prévue par les solutions analytiques régissant le système. C'est tout l'intérêt du filtre de Kalman, qui prend en compte ces deux types de bruits, non pris en compte dans la méthode conventionnelle. Il convient donc de trouver une formulation comprenant ces deux bruits. Concernant les bruits de mesure, il suffit d'intégrer au système d'équations les mesures des concentrations intérieure et de transit :

$$\begin{cases} \frac{dC(t)}{dt} = -N(t)[C(t) - C_{transit}(t)] \\ C^* = C + v_c \\ {C_{transit}}^* = C_{transit} + v_{C_{transit}} \end{cases} \tag{4.4}$$

Avec :

- C* la concentration mesurée et bruitée [ppm] ;
- $C_{transit}$* la concentration de transit mesurée et bruitée [ppm] ;
- v_c les bruits de mesure de la concentration [ppm] ;
- $v_{C_{transit}}$ les bruits de mesure de la concentration de transit [ppm].

Il convient ensuite d'intégrer la variation du taux de ventilation (N), et celle du CO_2 de transit pour reformuler le système d'équations 4.4 sous la forme d'une représentation d'état. On définit ici les bruits de processus comme les dérivées par rapport au temps de ces variables. Cela signifie que le bruit de processus associé au taux de ventilation r_N et du CO_2 de transit $r_{C_{transit}}$caractérise leur variation temporelle. Aussi, on considère que la variation de la concentration intérieure intègre également un bruit de processus r_c relatif à un mauvais mixage de l'air, ou une mauvaise homogénéité initiale du gaz traceur :

$$\begin{cases} \frac{dC(t)}{dt} &= -N(t)[C(t) - C_{transit}(t)] + r_c \\ \frac{dN(t)}{dt} &= r_N \\ \frac{dC_{transit}(t)}{dt} &= r_{C_{transit}} \end{cases} \quad (4.5)$$

Avec :

- r_c le bruit de processus de la concentration [ppm.h^{-1}] ;
- r_N le bruit de processus du taux de ventilation [vol.h^{-2}] ;
- $r_{C_{transit}}$ le bruit de processus de la concentration de transit [ppm.h^{-1}].

Finalement, on obtient le système sous forme de représentation d'état :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \frac{dC(t)}{dt} \\ \frac{dN(t)}{dt} \\ \frac{dC_{transit}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -N & 0 & N \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} C \\ N \\ C_{transit} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} r_c \\ r_N \\ r_{C_{transit}} \\ v_c \\ v_{C_{transit}} \end{bmatrix} & (4.6a) \\ \begin{bmatrix} C^* \\ C^*_{transit} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ N \\ C_{transit} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} r_c \\ r_N \\ r_{C_{transit}} \\ v_c \\ v_{C_{transit}} \end{bmatrix} & (4.6b) \end{cases}$$

D'après l'équation 4.1, on retrouve bien les espaces :

d'état $\boldsymbol{x} = \begin{cases} C(t) \\ N(t) \\ C_{transit}(t) \end{cases}$; de sortie $\boldsymbol{z} = \begin{cases} C^* \\ C^*_{transit} \end{cases}$; et de commande $\boldsymbol{u} = \begin{cases} r_c \\ r_N \\ r_{C_{transit}} \\ v_c \\ v_{C_{transit}} \end{cases}$.

Le filtre de Kalman va utiliser les mesures provenant des capteurs de concentration, dont l'acquisition n'est pas continue. Il faut donc discrétiser ces équations en séries temporelles. On considère donc un intervalle Δt correspondant à l'intervalle de mesure de la concentration. Sur cet intervalle k, les deux variables d'état N_k et $C_{transit\,k}$ sont supposées constantes. On résout ensuite le système d'équations différentielles *4.6* sur un intervalle de temps $[k\Delta t\,;(k+1)\Delta t]$. Pour ce faire, on multiplie l'équation *4.6a* discrétisée par le scalaire de transition d'état $e^{N_k t}$ (équation 4.8):

$$\frac{d\left(C(t) - C_{transit\,k}\right)}{dt} = -N_k\left[C(t) - C_{transit\,k}\right] + r_k^c \quad (4.7)$$

$$e^{N_k t}.\frac{d\left(C(t) - C_{transit\,k}\right)}{dt} + e^{N_k t}\,.\,N_k\left[C(t) - C_{transit\,k}\right] = e^{N_k t}\,.\,r_k^c \quad (4.8)$$

On reconnaît alors la dérivée temporelle de $e^{N_k t}\,.\,N_k\left[C(t) - C_{transit\,k}\right]$ à gauche de l'équation 4.8 qui se réécrit :

$$\frac{d\left[e^{N_k t}.\left(C(t)-C_{transit\,k}\right)\right]}{dt} = e^{N_k t}\,.\,r_k^C \tag{4.9}$$

On intègre ensuite sur l'intervalle $[k\Delta t\,;(k+1)\Delta t]$:

$$e^{N_k(k+1)\Delta t}\,.\,\left[C_{k+1}-C_{transit\,k}\right]-e^{N_k k\Delta t}\left[C_k+C_{transit\,k}\right]=\int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{N_k\tau}\,r_k^c(\tau)d\tau \tag{4.10}$$

Avec :

$$C_j = C(j\Delta t)$$

Et finalement, en divisant de part et d'autre par $e^{N_k(k+1)\Delta t}$, on obtient :

$$C_{k+1}=\left(C_k-C_{transit\;k}\right)e^{-N_k\Delta t}+C_{transit\,k}+\int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{-N_k\left((k+1)\Delta t-t\right)}\,r_k^c(t)dt \tag{4.11}$$

Concernant maintenant les paramètres d'état N_k et $C_{transit\,k}$, la résolution de l'équation 4.6a discrétisée est triviale :

$$N_{k+1} = N_k+\int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} r_N\,dt \tag{4.12}$$

$$C_{transit\,k+1} = C_{transit\,k}+\int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} r_{C_{transit}}\,dt \tag{4.13}$$

En reformulant sous forme de représentation d'état, on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} C_{k+1} \\ N_{k+1} \\ C_{transit\,k+1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} f(\boldsymbol{x_k}) & 0 & 1-f(\boldsymbol{x_k}) \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix} C_k \\ N_k \\ C_{transit\,k}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix} w_k^C \\ w_k^N \\ w_k^{C_{transit}}\end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} C_k^* \\ C_{transit\,k}^*\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix} C_k \\ N_k \\ C_{transit\,k}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix} v_k^C \\ v_k^{C_{transit}}\end{bmatrix}\end{cases} \tag{4.14}$$

Avec :

$$f\left(\boldsymbol{x_k}=\left(C_k,N_k,C_{transit\,k}\right)\right)= e^{-N_k\Delta t} \tag{4.15}$$

Et :

$$\boldsymbol{w}_k=\begin{cases}\int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{-N_k\cdot[(k+1)\Delta t-t]}\,r_C\,dt \\ \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} r_N\,dt \\ \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} r_{C_{transit}}\,dt\end{cases} \tag{4.16}$$

Les vecteurs $\boldsymbol{w}_k$ et $\boldsymbol{v}_k$ sont supposés suivre une loi normale de moyenne nulle et de covariance respective *W* et *V***.**

Finalement, on obtient la représentation d'état requise par le filtre de Kalman :

$$\begin{cases} \boldsymbol{x_{k+1}} = F(\boldsymbol{x_k})\,\boldsymbol{x_k}+\boldsymbol{w_k} = F(\boldsymbol{x_k})\,\boldsymbol{x_k}+A\,\boldsymbol{u}_k \\ \boldsymbol{z_k} = H\,\boldsymbol{x_k}+\boldsymbol{v_k} = H\,\boldsymbol{x_k}+B\,\boldsymbol{u}_k\end{cases} \tag{4.17}$$

Avec :

$$\mathbf{u}_k = \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_k \\ \boldsymbol{v}_k \end{bmatrix}, \quad F(\boldsymbol{x}) = \begin{bmatrix} f(\boldsymbol{x}) & 0 & 1-f(\boldsymbol{x}) \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2.3 Principe du filtre de Kalman étendu

Le filtre de Kalman fonctionne en deux phases. La première phase peut être considérée comme la phase de prédiction. Le filtre prédit l'état k du vecteur d'état à partir de son état k-1. La notation, $\hat{x}_{k/k-1}$ signifiera l'estimation de l'état k à partir de l'état k-1 du vecteur des paramètres d'état. Ensuite la deuxième phase du filtre intervient et sera appelée phase de correction. Le filtre va donc venir corriger le vecteur d'état $\hat{x}_{k/k-1}$ à partir de sa mesure bruitée $\boldsymbol{z_k}$, et d'un gain de Kalman noté K_k, qui prend en compte les matrices de covariance des bruits de mesure *V* et de processus *W*. L'estimation de l'état k corrigé sera notée $\hat{x}_k$ et ne dépendra plus de l'état au pas de temps précédent k-1.

Le filtre prédit donc l'état k grâce à la matrice de transition F ou la fonction de transition G. Comme le bruit de processus est supposé suivre une loi normale de moyenne nulle, l'estimateur de $\boldsymbol{x_k}$ à partir de $\boldsymbol{x_{k-1}}$ est donné comme suit :

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k/k-1}} = G_k(\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}}) \stackrel{\text{def}}{=} F_k\, \hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}}, \qquad \text{avec} \qquad F_k \stackrel{\text{def}}{=} F(\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}}) \tag{4.18}$$

Ensuite le vecteur d'observation $\hat{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{k\backslash k-1}}$ est déduit à partir de la matrice *H*. Cela permet d'avoir une estimation du vecteur de mesure. Le bruit de mesure est également supposé suivre une loi normale de moyenne nulle, d'où la formule suivante :

$$\hat{\boldsymbol{z}}_{\boldsymbol{k/k-1}} = H\, \hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}} \tag{4.19}$$

Ce vecteur d'observation obtenu lors de la phase de prédiction peut ensuite être comparé au vecteur de mesures bruitées. C'est le début de la phase de correction. La comparaison entre l'estimation du vecteur d'observation et le vecteur de mesure donne lieu à l'erreur à l'instant k $\boldsymbol{\varepsilon_k}$:

$$\boldsymbol{\varepsilon_k} = \boldsymbol{z_k} - \hat{\boldsymbol{z}}_{\boldsymbol{k/k-1}} \tag{4.20}$$

C'est ici qu'intervient le gain de Kalman K_k qui va utiliser la matrice de covariance du bruit de mesure V et du bruit de processus W, et qui va achever la phase de correction pour obtenir le vecteur d'état mis à jour $\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k}}$.

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k}} = \hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k/k-1}} + K_k\, \boldsymbol{\varepsilon_k} \tag{4.21}$$

Le fonctionnement du filtre est schématisé en Figure 4-1. C'est un filtre récursif, ce qui signifie qu'il a uniquement besoin des informations du pas de temps précédent pour fonctionner. Ses paramètres d'état doivent être initialisés. Le gain de Kalman introduit en équation 4.21 intègre les matrices de covariances des bruits de mesure et des bruits de processus. Son développement mathématique est présenté en annexe 4.2.

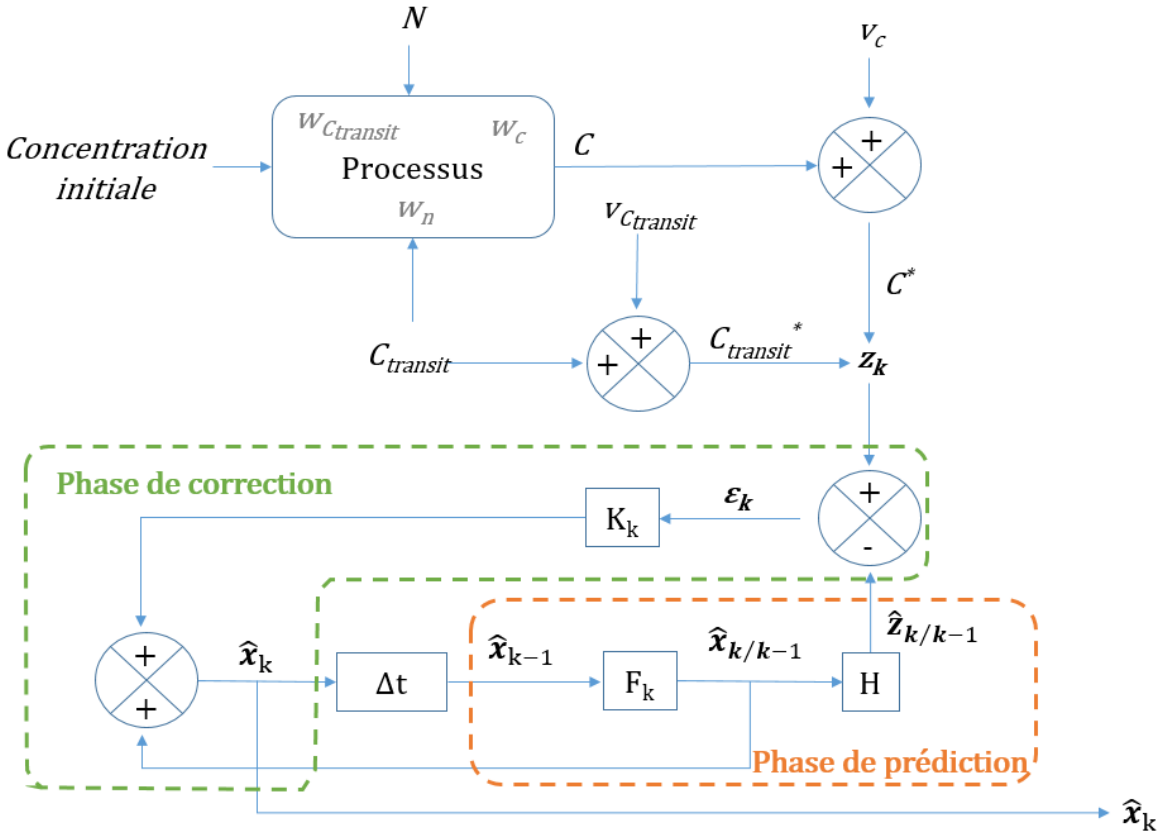


Figure 4-1 : Schéma de principe du filtre de Kalman, adapté de Réf. [49]

3 Méthodologie de l'expérimentation

3.1 Chambre expérimentale

La chambre expérimentale est identique à celle présentée dans le chapitre 3. Le détalonnage de la porte entre la salle B et la salle A n'est plus obturé. La Figure 4-2 montre une photo de l'intérieur de la cellule. La Figure 4-3 montre le schéma de la cellule, dans sa configuration multi-zones. La méthode gaz traceur a lieu dans la salle d'extraction de l'air, c'est à dire la salle A. L'entrée d'air de la salle A est obturée, afin de représenter une salle d'extraction d'air d'un logement in situ, dépourvue de bouches d'entrée d'air. L'entrée d'air est alors localisée dans la salle B uniquement. La salle B peut s'apparenter à une pièce de vie d'un logement in situ, et peut être occupée. L'impact de l'occupation sur la précision de la méthode sera analysé. Cinq capteurs de CO_2 autonomes ont été disposés dans la salle A, de manière identique à ce qui a été réalisé dans le chapitre 3. Un capteur de CO_2 autonome a également été placé en amont du détalonnage vis-à-vis du flux d'air, donc dans la salle B à proximité immédiate du détalonnage. Ce capteur renseigne de la concentration de CO_2 ambiante de l'air qui pénètre intentionnellement dans la pièce de service. Elle sera ensuite corrigée afin de prendre en compte d'autres sources d'où pourrait provenir l'air. La concentration ainsi corrigée sera appelée concentration de CO_2 de transit et sera représentative de la concentration pénétrant dans la pièce de service. Cette procédure d'estimation du CO_2 de transit est définie dans le paragraphe 3.3. Le système de ventilation de la salle A est une nouvelle fois mécanique afin de tester la robustesse de la méthode par filtre de Kalman, en comparant sa précision avec la mesure de référence réalisée dans le conduit d'extraction mécanique.



Figure 4-2 : Photo de l'intérieur de la cellule A

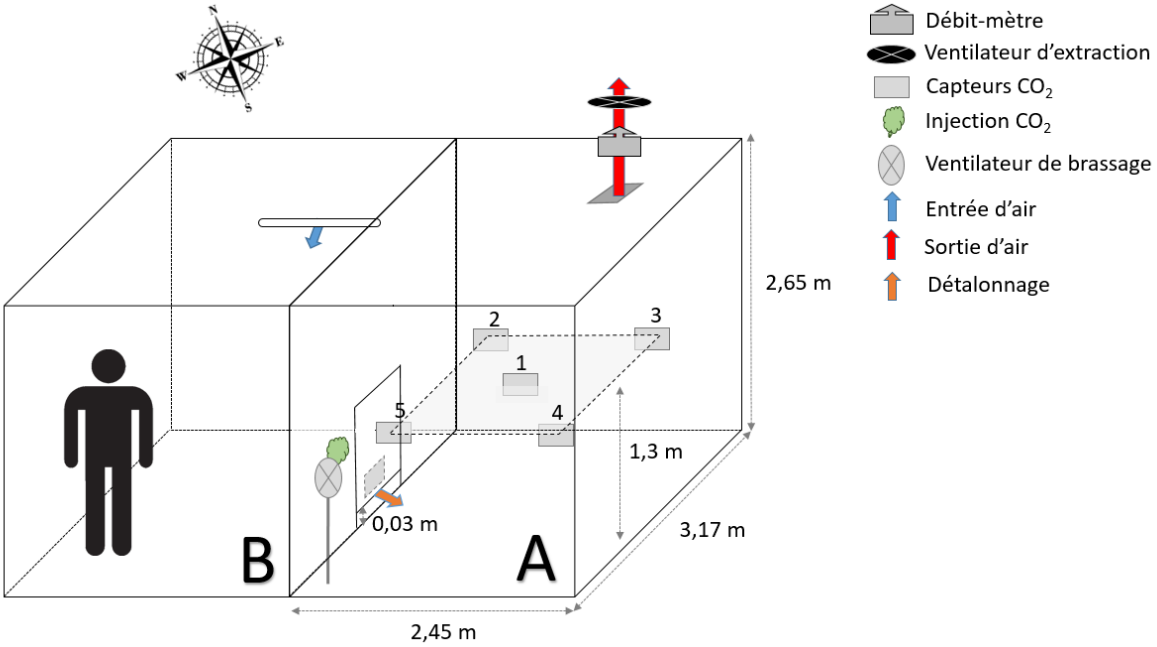


Figure 4-3 : Schéma de la chambre expérimentale en 3 dimensions, en configuration multi-zones

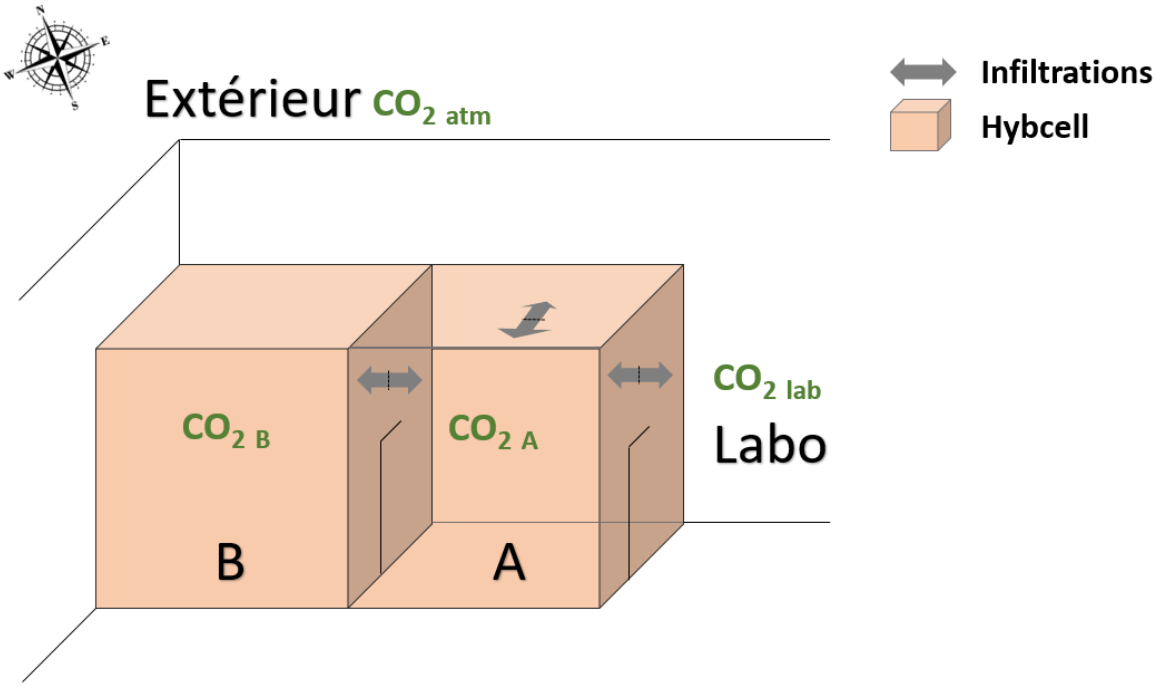


Figure 4-4 : Disposition de la cellule expérimentale dans son environnement

Les infiltrations sont toujours supposées égales à 0,14 $Vol.h^{-1}$ et extraites par le conduit d'extraction. La Figure 4-4 montre la cellule expérimentale dans son environnement. Les cellules jumelles A et B sont donc logées à l'intérieur d'une plus grande salle, appelée Labo. La cellule A est en contact avec la cellule B, avec le labo, et avec l'extérieur. Les infiltrations peuvent donc être réparties sur la façade extérieure de la salle A, orientée Nord-Est et sur les parois mitoyennes de la salle A avec le labo et la salle B.

3.2 Instrumentation

Nous avons utilisé les capteurs de concentration de CO_2 autonomes, avec une précision de 3% +/- 50 ppm, et un temps de réponse de 2 minutes. A la différence du chapitre précédent, seuls ces capteurs ont été utilisés car l'objectif est de développer un protocole applicable en conditions in situ, et que la comparaison des capteurs autonomes avec les capteurs filaires plus précis n'a pas montré de différences significatives dans le chapitre 3. Le filtre de Kalman a, par ailleurs, déjà été testé sur les tests de l'expérience précédente et les résultats sont présentés en annexe 4.1, dans un article présenté à l'AIVC [97]. Les deux types de capteurs n'ont pas non plus montré de différences significatives sur le calcul du taux de ventilation moyen. La plus grande fréquence d'acquisition que pouvait assurer les capteurs autonomes a été imposée. Suivant le niveau de batterie des capteurs pendant les tests, la fréquence d'acquisition a fluctué de 1 mesure toutes les 20 secondes, à 1 mesure toutes les 27 secondes. La concentration de CO_2 atmosphérique a été mesurée à l'aide d'une sonde de précision +/- 40 ppm, dont les caractéristiques techniques sont données en annexe 4.3.

Le débitmètre installé dans le conduit est toujours le débitmètre NZP Nozzle Pitot Series à technologie tube de pitot calibré, d'une précision de 0,5% du flux. Pour le débitmètre, l'acquisition était effectuée avec une fréquence de 100 Hz, moyennée sur 3 secondes. Le Tableau 4-1 présente les caractéristiques des capteurs.

	Technologie	**Champ de mesure**	**Précision**	**Dérive**	**Temps de réponse**
Capteur CO_2 autonomes	NDIR*	0 – 5000 ppm	50 ppm + 3%	5% par 5 an	2 min
Sonde CO_2 extérieur	NDIR*	0 – 10000 ppm	4%	+/- 60 ppm par an	<1 min
NZP1000 Series Nozzle Pitot Airflow sensor	Tube de pitot	27,5 – 945 $m^3.h^{-1}$	0,5% du flux	0,1% du flux	

Tableau 4-1 : Caractéristiques techniques de l'instrumentation

Note : * Nondispersive InfraRed sensors

3.3 Procédure d'estimation du CO_2 de transit

3.3.1 Objectif de la procédure

La concentration ambiante désigne la concentration mesurée en amont du dispositif de transfert d'air vers la pièce de service. La concentration intérieure désigne la concentration mesurée à l'intérieure de la pièce de service. La concentration de transit désigne la concentration moyenne de l'air pénétrant dans la pièce de service. Cette dernière est un mélange de la concentration ambiante et de la concentration des infiltrations.

L'utilisation du CO_2 est très pratique pour l'application in situ de la méthode, mais sa présence dans l'atmosphère et au sein des bâtiments introduit une contrainte majeure. La concentration de transit, correspondant à la concentration de l'air qui pénètre dans la pièce de service où est effectuée la méthode gaz traceur, doit être soustraite à la concentration mesurée à l'intérieur de ladite pièce. Dans un cas idéal, avec un bâtiment parfaitement étanche, et avec une seule pièce comportant un dispositif de transfert d'air vers la pièce de service, la concentration de l'air y pénétrant est totalement décrite par la concentration ambiante mesurée en amont du dispositif de transfert d'air. En réalité, l'air qui pénètre dans la pièce de service peut également provenir des défauts d'étanchéités avec les pièces mitoyennes, ainsi qu'avec l'extérieur. La concentration de transit est donc un mélange à la répartition inconnue de la concentration de l'air provenant du dispositif de transfert d'air, et des défauts d'étanchéité. On remarquera que si l'air provient de plusieurs dispositifs de transferts d'air d'une pièce de vie à la pièce de service en question, la problématique est similaire. Considérer uniquement la concentration ambiante engendrerait une erreur croissante avec le rapport de la concentration des infiltrations sur la concentration ambiante.

Nous proposons donc une procédure qui permet d'estimer la concentration de transit moyenne à partir de la mesure de la concentration intérieure, et de corriger la concentration ambiante mesurée en fonction de cette estimation. La concentration ambiante ainsi corrigée tient alors compte d'une pluralité de sources potentielles de l'air pénétrant dans la pièce de service, qu'elles soient intentionnelles ou non, identifiées ou inconnues. Cette procédure sera appelée « procédure d'estimation de la concentration de transit ».

3.3.2 Principe de la procédure

La procédure proposée repose sur l'hypothèse qu'en fin de décroissance, la concentration intérieure de la pièce de service doit être égale à la concentration de transit, car le gaz initialement introduit a été entièrement évacué. Après suffisamment de temps (à partir de 5τ durée à partir de laquelle 99% du gaz a été évacué), l'intégralité du gaz injecté a été évacuée. La dérivée de la concentration intérieure doit donc être égale à celle de la concentration ambiante mesurée. Si c'est le cas, alors la concentration ambiante mesurée doit être corrigée proportionnellement pour que sa concentration finale soit égale à la concentration intérieure.

Si la décroissance n'est pas intégrale, la procédure doit se baser sur les valeurs caractéristiques d'une décroissance exponentielle. Pour une décroissance exponentielle, la quantité de gaz perdue est directement décrite par le nombre de constantes de temps qu'a duré la décroissance. La connaissance de la quantité perdue à un temps $x^*\tau$, permet alors d'estimer l'écart théorique entre la concentration intérieure et la concentration de transit à cet instant $x^*\tau$ (équation 4.27). La concentration de transit moyenne au temps $x^*\tau$ peut être estimée à partir de la concentration intérieure à cet instant (équation 4.28). La concentration ambiante mesurée est ensuite corrigée proportionnellement pour que sa moyenne sur le temps $x^*\tau$ soit égale à la concentration de transit ainsi estimée (équation 4.29).

L'explication est donnée ci-après. On repart de l'équation de conservation de la masse (équation 4.22) :

$$V\frac{dC(t)}{dt} = -Q(t).\left(C(t) - C_{transit}(t)\right) \tag{4.22}$$

En reformulant, on obtient :

$$\frac{dC(t)}{dt}\frac{1}{C(t)-C_{transit}(t)} = -N(t) \tag{4.23}$$

On considère ensuite la moyenne sur une période $\Delta T = t_f - t_0$:

$$\frac{1}{t_f-t_0}.\int \frac{dC(t)}{dt}\frac{1}{C(t)-C_{transit}(t)}dt = -\frac{1}{t_f-t_0}.\int N(t).dt \tag{4.24}$$

On reconnaît l'expression de la moyenne temporelle du taux de ventilation à droite de l'équation. Dans l'intégrale de gauche, on cherche à faire apparaître du/u afin de reconnaître la dérivée du logarithme de u. On procède donc à l'approximation de remplacer $C_{transit}(t)$ par sa moyenne temporelle sur ΔT $\overline{C_{transit}}$. On peut donc ajouter ce terme au numérateur, car il est invariant sur la période ΔT. En revanche, considérer la moyenne temporelle plutôt que la concentration instantanée va impacter le dénominateur, et biaiser cette procédure en cas de concentration de transit variable. On a donc :

$$-\overline{N(t)} \cong \frac{1}{t_f-t_0}\int \frac{d\left(C(t)-\overline{C_{transit}}\right)}{\left(C(t)-\overline{C_{transit}}\right)}\,dt \tag{4.25}$$

On vérifie, par ailleurs, l'expression biaisée de la méthode deux points avec une approximation liée à l'utilisation du CO_2 dont la concentration de transit est variable et non nulle :

$$-\overline{N(t)} \cong \frac{1}{t_f-t_0} ln\left(\frac{C_f-\overline{C_{transit}}}{C_0-\overline{C_{transit}}}\right) \tag{4.26}$$

Pour rappel, le taux de ventilation *N* est l'inverse de la constante de temps τ. En considérant l'exponentielle de l'équation 4.26, et en remplaçant *N* par τ, on obtient :

$$C_f - \overline{C_{transit}} \cong (C_0 - \overline{C_{transit}}) \,.\, exp\left(-\frac{t_f - t_0}{\tau}\right) \quad (4.27)$$

Si l'on connaît la valeur de τ, on peut alors décomposer $(t_f - t_0)$ en $x*\tau$, et on obtient la concentration de transit moyenne sur la période $x*\tau$:

$$\overline{C_{transit}} \cong \frac{C_f - C_0 \,.exp(-x)}{1 - exp(-x)} \quad (4.28)$$

La concentration ambiante mesurée est ensuite corrigée proportionnellement pour que sa moyenne sur la période $x*\tau$ soit égale à la concentration de transit théorique calculée par l'équation 4.28:

$$C_{amb}(t) = C_{amb}(t) * \left(1 - \frac{\overline{C_{amb}} - \overline{C_{transit}}}{\overline{C_{amb}}}\right) \quad (4.29)$$

La procédure repose à partir de l'équation 4.28 sur un calcul préalable du taux de ventilation moyen afin d'obtenir une estimation de τ et de pouvoir décomposer la période de mesure en un facteur *x* multiplié par τ. Le calcul du taux de ventilation moyen est réalisé par la méthode par décroissance de la concentration 2 points. Nous proposons de calculer le taux de ventilation sur une période de 2τ, période qui doit être identique à la période de calcul de la concentration de transit moyenne pour que les constantes de temps s'annulent dans l'équation 4.28. Cette période permet au calcul du taux de ventilation d'être fiable tout en observant une décroissance significative de la concentration (cf. Chapitre 3). Pour identifier la période de 2τ (ce qui est en fait le cheminement inverse de la décomposition de la période $(t_f - t_0)$ en $x*\tau$), l'inverse du taux de ventilation multiplié par 2 pourrait être utilisée, mais l'erreur sur le taux de ventilation se répercuterait linéairement sur l'estimation des 2τ. La période de 2τ est donc plutôt identifiée à l'aide d'un critère basé sur la dérivée de la concentration théorique à l'instant 2τ, qui permet de réduire l'influence d'une erreur sur le taux de ventilation.

3.3.3 Opération de la procédure

Après initialisation de la première constante de temps, la procédure décrite en Figure 4-5 est itérée jusque convergence du calcul du taux de ventilation par la méthode 2 points. En effet, la correction de la concentration ambiante modifie le résultat de la méthode 2 points, qui modifie l'estimation de la période de 2τ, qui modifie elle-même la concentration ambiante.

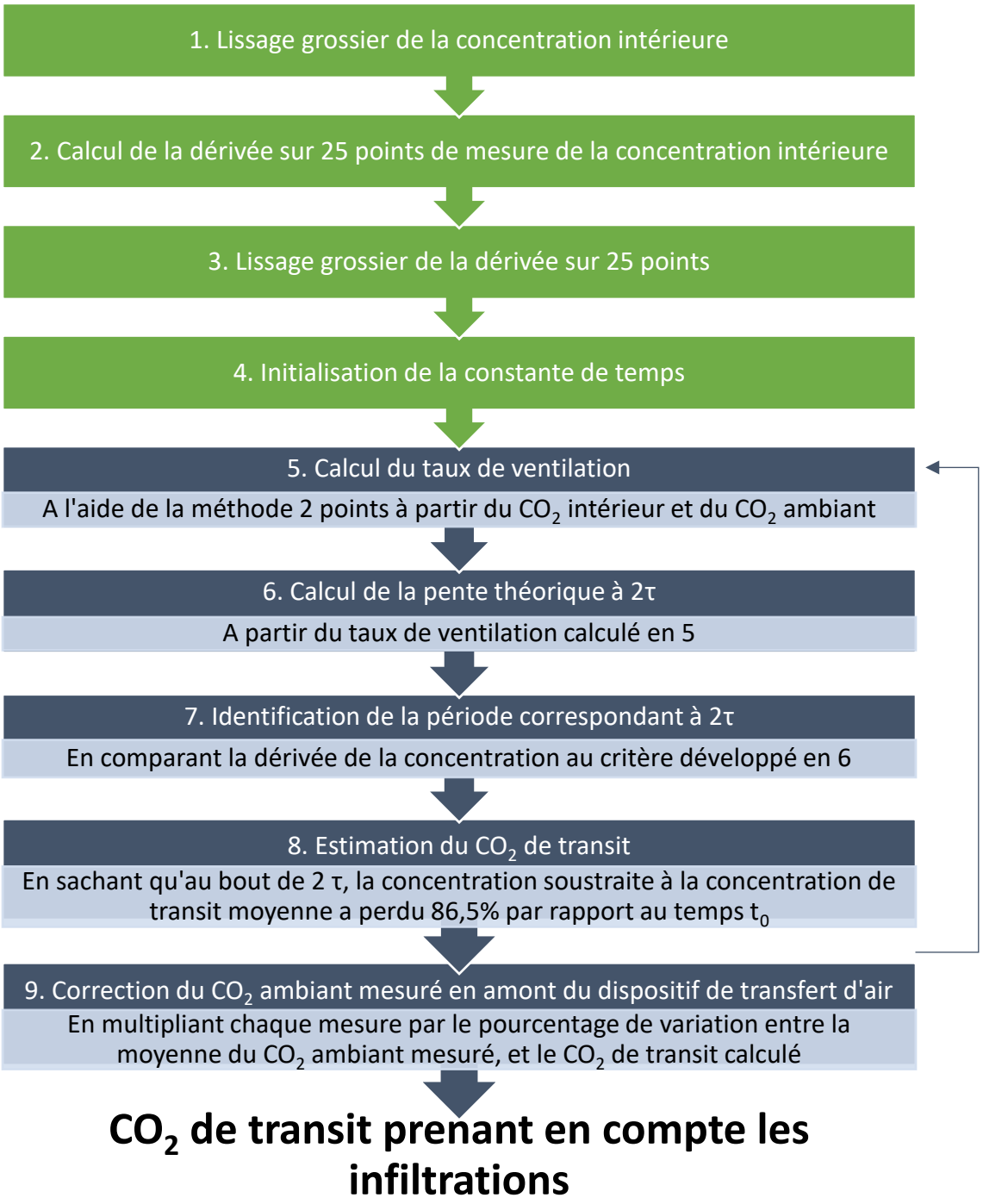


Figure 4-5 : Procédure d'estimation du CO_2 de transit

Cette procédure permet d'améliorer considérablement les résultats (cf. 4.3.2), et d'utiliser directement un gaz présent dans l'atmosphère dont la concentration à l'intérieur du bâtiment sera différente de la concentration atmosphérique. La méthode est biaisée si le CO_2 de transit varie comme le montre l'équation 4.25, sauf si la période de mesure permet de faire l'hypothèse que la décroissance est terminée. A titre d'exemple, la Figure 4-6 montre l'évolution des concentrations avant (concentration ambiante mesurée) et après correction (concentration de transit) pour un des tests avec occupation. L'erreur du taux de ventilation calculé par le filtre de Kalman vaut 55% avant correction et 5% après correction.

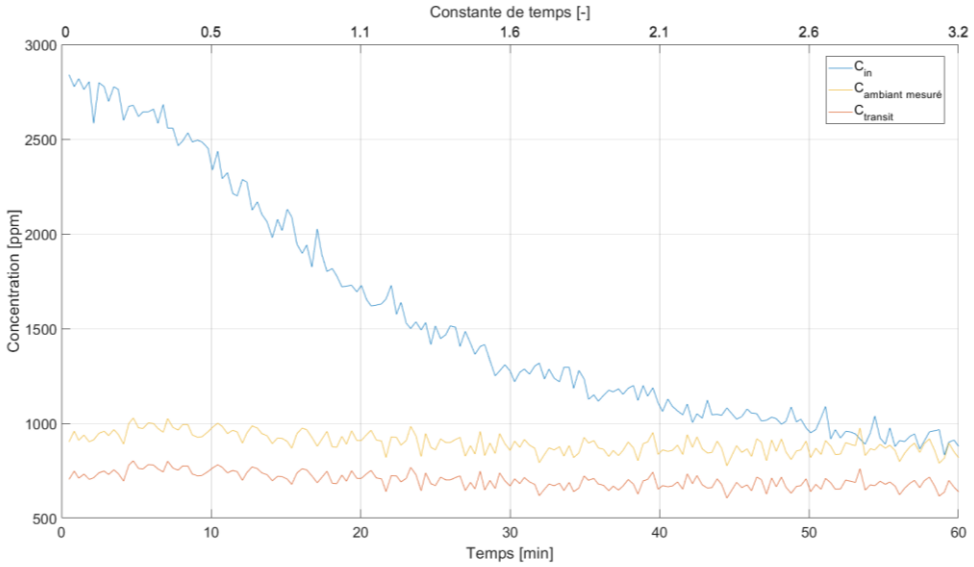


Figure 4-6 : Exemple d'évolutions des concentrations avant (i), et après (ii) correction

3.4 Choix du profil de variation

A l'image de ce qui a été réalisé dans le chapitre 3, des profils de variation de débit synthétiques ont été imposés à l'aide du ventilateur d'extraction à débit variable et contrôlable. Seul un profil assimilable au débit induit par la ventilation par conduits a été reproduit dans ce chapitre, mais l'influence du vent a été ajoutée par rapport aux profils conduit (décroissant et croissant) du chapitre 3. Le calcul du profil à reproduire comprend donc une partie induite par la différence de température u_{tt} et une partie induite par le vent u_{vent}. Dépendant de l'orientation des entrées d'air et de l'extraction d'air vis-à-vis du vent, celui-ci peut renforcer les débits, ou les combattre [12], [99]. Il a été choisi de renforcer les débits pour observer davantage de fluctuations. Les données météorologiques utilisées proviennent de la station météo localisée sur le toit du bâtiment accueillant la cellule expérimentale. La période choisie est identique à celle utilisée pour le calcul des profils conduits du chapitre 3, en prenant en plus la vitesse du vent en considération. La vitesse de vent moyen sur la période est de 3,7 $m.s^{-1}$, ce qui peut être considéré comme un vent fort [100].

Pour le calcul des profils synthétiques, on utilise la formule approximative suivante [12]:

$$Q = A_{eff} \cdot \sqrt{u_{tt}^2 + u_{vent}^2} \quad (4.30)$$

$$u_{tt} = \sqrt{\frac{2 \cdot |\Delta P_{int}|}{\rho_{int}}} \quad (4.31)$$

$$u_{vent} = U \cdot \sqrt{\Delta C_p} \quad (4.32)$$

Avec :

- A_{eff} l'aire effective équivalente qui comprend le coefficient de décharge [m^2] ;
- U la vitesse du vent [$m.s^{-1}$] ;
- U_{vent} la vitesse de l'air insufflée par le vent [$m.s^{-1}$] ;
- U_{tt} la vitesse de l'air insufflée par le tirage thermique [$m.s^{-1}$] ;
- ΔC_p égal à 1.

Un profil décroissant et un profil croissant, relatif respectivement à la matinée, et à la fin d'après-midi, sont donnés dans la Figure 4-7:

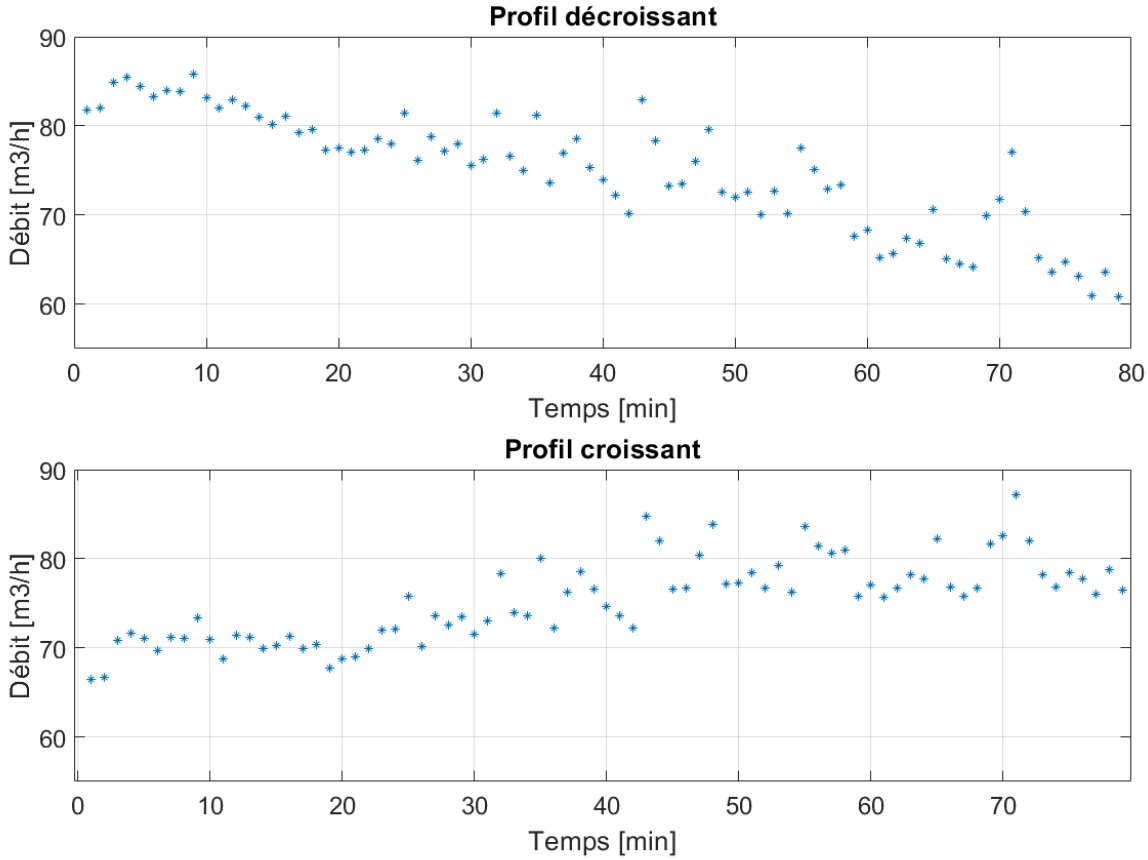


Figure 4-7 : Profils de débits synthétiques calculés analytiquement

Les débits sont imposés avec une fréquence de variation à la minute.

3.5 Protocole expérimental

L'expérimentation qui a été menée a permis de tester l'influence de plusieurs paramètres sur la précision de la méthode, pour affiner le protocole expérimental en vue d'une application in situ. Les paramètres testés sont les suivants :

- **le profil de variation** avec 3 niveaux (fixe, croissant, décroissant) afin de tester la capacité du filtre à suivre l'évolution du taux de ventilation dynamique sur plusieurs profils ;
- **l'occupation** dans la pièce de vie avec 2 niveaux (occupé, non-occupé) pour vérifier, que le résultat du filtre n'est pas biaisé en cas de concentration de CO_2 de transit variable, à la différence de la méthode conventionnelle ;
- **la position de la porte** avec 2 niveaux (ouverte, fermée) entre les deux pièces afin de connaître l'impact du fait de laisser les portes d'un logement dans leur position usuelle lors d'une mesure in situ;
- **le niveau initial de CO_2 injecté dans la pièce de service** avec 3 niveaux (1500, 2500, 3500 ppm) pour connaître l'impact d'une quantité inadéquate de gaz injectée. Pour une application in situ de la méthode par décroissance de la concentration, l'injection du gaz

se fera plutôt par percussion d'une bouteille de gaz. Le niveau initial de CO_2 sera directement fonction du rapport du grammage sur le volume de la pièce. L'influence d'une incertitude sur le niveau initial de CO_2 doit donc être estimée.

Le Tableau 4-2 présente le niveau des paramètres testés pour chaque cas. La terminologie employée par la suite y est décrite. Chaque cas comporte la répétition de 3 tests sauf le cas de base (DFN) qui comporte 30 tests avec profil décroissant, porte fermée entre la zone A et B, la pièce B non occupée, et avec une concentration initiale de 2500 ppm. Les 30 répétitions permettent de considérer que la distribution des erreurs suit une loi normale. Cela permet donc d'aller plus loin dans le calcul statistique avec un calcul de l'incertitude globale, qui comprend l'écart-type de l'erreur, et la moyenne de l'erreur sur les 30 tests. En général, le plan d'expérimentation fait varier les paramètres un par un sauf pour le test DOO pour lequel la porte est ouverte, et la pièce de vie est occupée.

Cas de référence*	Profil	Porte	Occupation	CO_2 initial	Nombre de tests
DFN	Décroissant	Fermée	Non-occupé	2500	30
FFN	Fixe	Fermée	Non-occupé	2500	3
CFN	Croissant	Fermée	Non-occupé	2500	3
DFO	Décroissant	Fermée	Occupé	2500	3
DOO	Décroissant	Ouverte	Occupé	2500	3
DON	Décroissant	Ouverte	Non-occupé	2500	3
DFNB	Décroissant	Fermée	Non-occupé	1500	3
DFNH	Décroissant	Fermée	Non-occupé	3500	3

Tableau 4-2 : Plan d'expérimentation

Note : *La terminologie utilisée pour désigner les expériences est définie comme suit : La première lettre représente le type de profil (D décroissant, C croissant, F fixe) ; la deuxième lettre est relative à la position de la porte (O ouverte, F fermée) ; la troisième lettre concerne l'occupation (O occupée, N non occupée) ; si quatrième lettre il y a, elle concerne le niveau de CO_2 initial (H haut, B bas).

Les conditions expérimentales en termes de concentration de CO_2 extérieure, et de températures intérieure et extérieure sont données en annexe 4.4.

3.6 Analyse de sensibilité sur les paramètres de filtrage

3.6.1 Paramètres de l'analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité sur les paramètres du filtre de Kalman a été réalisée car c'est un filtre sophistiqué qui requiert que l'expérimentateur renseigne les matrices de covariance des bruits de mesure, et des bruits de processus. Seuls les bruits de processus ont été testés, car les bruits de mesures ont été déterminés à l'aide des caractéristiques techniques des capteurs. L'objectif est de connaître la sensibilité de l'erreur moyenne du taux de ventilation, vis-à-vis des paramètres de filtrage que nous avons choisis, en particulier des bruits de processus.

La problématique concernant les bruits de processus est différente selon que les paramètres d'états font également partie du vecteur d'observation (s'ils ont été mesurés) ou non. Le bruit de processus permet les variations aléatoires des paramètres d'état qui ne sont pas

décrites par les équations analytiques. L'objectif du bruit de processus est donc de permettre au filtre de suivre l'évolution réelle du paramètre lui étant associé. Si le bruit de processus associé à un paramètre est sous-estimé, alors le filtre va introduire une inertie qui l'empêchera de suivre l'évolution réelle de ce paramètre. En revanche, si le bruit de processus est surestimé, alors les variations du paramètre d'état estimé seront trop importantes par rapport à son évolution réelle.

Or, pour les paramètres d'état faisant partie du vecteur d'observation (paramètres mesurés), la corrélation entre les paramètres mesurés et paramètres filtrés permet de déceler si le filtre a introduit une inertie par rapport à l'évolution réelle, et donc si le bruit de processus est sous-estimé. Une sous-estimation du bruit de processus est alors décelable graphiquement. Par ailleurs, le gain de Kalman permet de corriger le paramètre d'état estimé après comparaison avec la mesure qui lui est associée. C'est l'action que réalise le filtre durant la phase de correction qui suit la phase de prédiction ((cf. Figure 4-1). Si le bruit de processus est surestimé, la variation du paramètre d'état estimé pendant la phase de prédiction sera supérieure à ses variations réelles. Le filtre, pendant la phase de correction, contraindrait alors les variations du paramètre estimé pour qu'il corresponde aux mesures. Dans notre cas, les paramètres d'état faisant également partie du vecteur d'observation sont la concentration intérieure et la concentration de transit. La sous-estimation du bruit de processus leur étant associée peut donc être évitée graphiquement. Pour vérifier l'insensibilité du filtre vis-à-vis d'une surestimation de leur bruit de processus, nous avons sélectionné des variances parmi respectivement les trois et quatre premières puissances de 10.

En revanche, concernant les paramètres d'état qui ne font pas l'objet d'une mesure (le taux de ventilation), il n'est à la fois pas possible graphiquement de vérifier si la variance est sous-estimée, et le gain de Kalman ne corrige pas l'estimation du paramètre si la variance est surestimée. Une attention particulière est donc portée sur la sensibilité du taux de ventilation calculé par le filtre vis-à-vis de la variance du bruit de processus lui étant associée. Une plage de variance de 0,01 à 1 $vol^2.h^{-2}$ a été testée sur 50 niveaux. Cela correspond à un bruit de processus de 0,1 à 1 $vol.h^{-1}$. Le Tableau 4-3 récapitule les plages et le nombre de niveaux des trois variances du bruit de processus associées aux paramètres d'états.

Variance du bruit de processus	**Plage**	**Niveaux**
Taux de ventilation [$Vol^2.h^{-2}$]	[0,01 : 0,02 : 1]*	50
CO_2 intérieur [ppm^2]	[1, 10, 100]	3
CO_2 transit [ppm^2]	[1, 10, 100, 1000]	4

Tableau 4-3 : Paramètres de l'analyse de sensibilité

Note : * Les deux extrémités entre les deux points indiquent la plage de mesure, et le chiffre du milieu indique le pas.

3.6.2 Influence des bruits de processus des paramètres mesurés sur le filtrage

Le cas avec occupation et porte fermée DFO est considéré pour l'analyse de sensibilité car on recherche un cas pour lequel la concentration de transit est variable. La Figure 4-8 montre le filtrage des concentrations du cas DFO pour toutes les valeurs du bruit de processus associées aux concentrations intérieure et de transit. L'objectif est de déceler les variances sous-estimées qui engendrent une inertie. Concernant le filtrage de la concentration intérieure, les trois variances du bruit de processus de 1, 10 et 100 ppm^2 ont donné exactement la même courbe (en noir). La concentration intérieure est le seul paramètre d'état dont la variation n'est pas

seulement caractérisée par le bruit de processus. Le mixage imparfait de l'air, et l'inhomogénéité du gaz caractérisés par le bruit de processus, n'ont pas entraîné de variations qui ne soient pas déjà décrites par les équations. Cela peut s'expliquer par le petit volume de la cellule. On s'attend alors à une faible sensibilité vis-à-vis de ce paramètre. Aucune des variances ne semble donc sous-estimée.

En revanche, les quatre niveaux de variances du bruit de processus de la concentration de transit ont eu une influence sur son filtrage. Les courbes bleue et rouge associées aux variances de respectivement 1 et 10 ppm² entraînent une inertie qui empêche une bonne corrélation entre les concentrations filtrées et les concentrations mesurées. Cela prouve la sous-estimation du bruit de processus. Ensuite, la courbe jaune et la courbe violette sont quasiment confondues, mais la courbe violette présente tout de même plus de fluctuations. Elles correspondent, respectivement, à des variances de 100 et 1000 ppm². Les deux courbes semblent filtrer adéquatement la concentration de transit. Il faut alors vérifier que les variances associées à la courbe jaune et violette tendent à un résultat de taux de ventilation similaire, afin de valider l'adaptation graphique des bruits de processus de la concentration intérieure et de la concentration de transit.

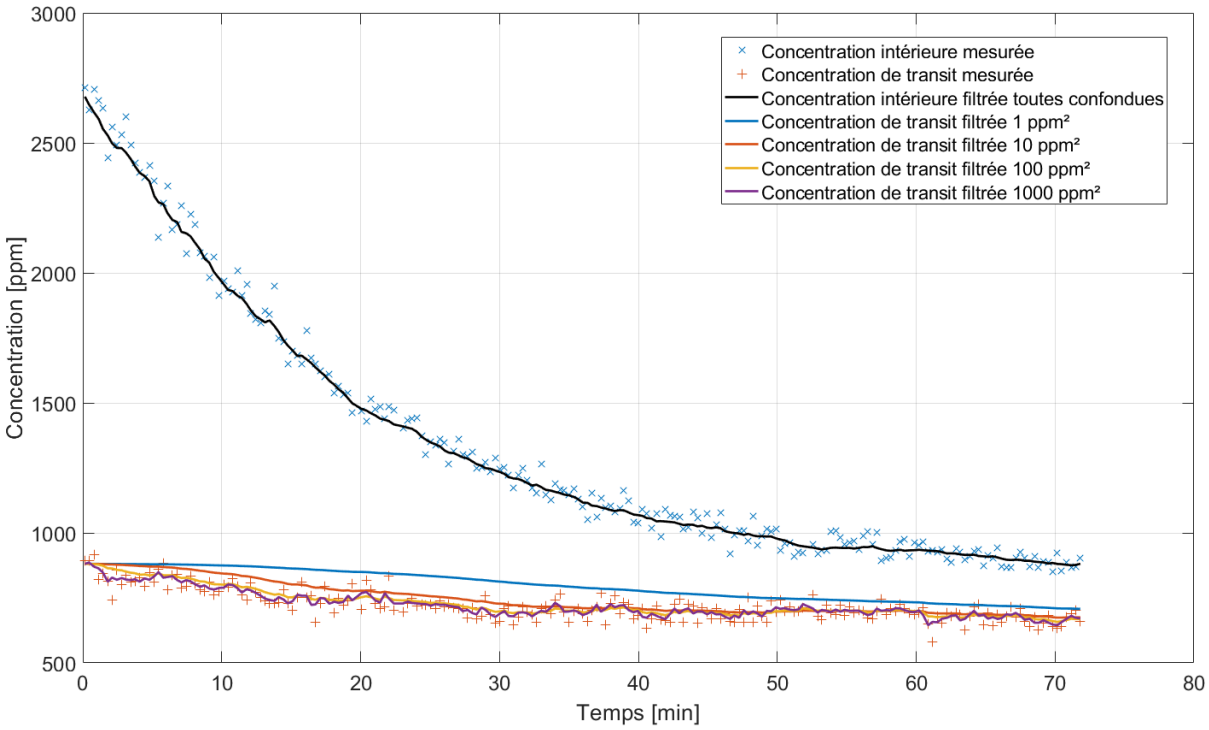


Figure 4-8 : Filtrage des concentrations

3.6.3 Influence des bruits de processus sur le calcul du taux de ventilation

La Figure 4-9 présente l'influence de la variance des bruits de processus sur l'erreur expérimentale du taux de ventilation, toujours pour le cas DFO. L'erreur expérimentale correspond à l'erreur moyenne du taux de ventilation sur 2τ calculé par le filtre de Kalman. La mesure de référence est la mesure réalisée par le débitmètre dans le conduit d'extraction. Cette figure propose trois sous-graphiques qui correspondent de haut en bas aux trois variances du bruit de processus du CO_2 intérieur de 1, 10 et 100 ppm² ; les courbes de couleurs sur chaque

sous-graphiques correspondent à celles du CO_2 de transit de 1, 10, 100 et 1000 ppm² ; et finalement l'abscisse correspond à la variance du taux de ventilation, discrétisée en 50 niveaux de 0,01 à 1. L'insensibilité du taux de ventilation vis-à-vis du bruit de processus du CO_2 intérieur est vérifiée par la similitude importante des 3 sous-graphiques.

Concernant le bruit de processus du CO_2 de transit, on remarque effectivement que les variances qui permettaient une bonne corrélation avec les concentrations mesurées (courbes jaune pour 100 ppm² et violette pour 1000 ppm²) tendent à des résultats très proches. Les deux autres variances qui tendaient à de moins bonnes corrélations ont une erreur moyenne de 3,5 et 10 points supérieure. Cela confirme qu'à partir de la variance permettant une bonne corrélation graphique entre paramètres mesurés et simulés, les résultats en deviennent insensibles.

Il a été vérifié sur la concentration intérieure et la concentration de transit que le gain de Kalman permet effectivement d'inhiber l'influence d'une surestimation du bruit de processus sur les paramètres d'états qui font également partie du vecteur d'observation. Cela valide la procédure d'adaptation graphique des variances du bruit de processus associées aux concentrations.

Concernant l'influence de la variance du bruit de processus du taux de ventilation, on remarque sur chaque courbe une sensibilité vis-à-vis des très faibles variances. A partir de 0,1 vol.h^{-1}, l'erreur du taux de ventilation moyen se stabilise ce qui marque une faible sensibilité vis-à-vis de la variance lui étant associée. Il convient uniquement de ne pas sous-estimer la variance du taux de ventilation.

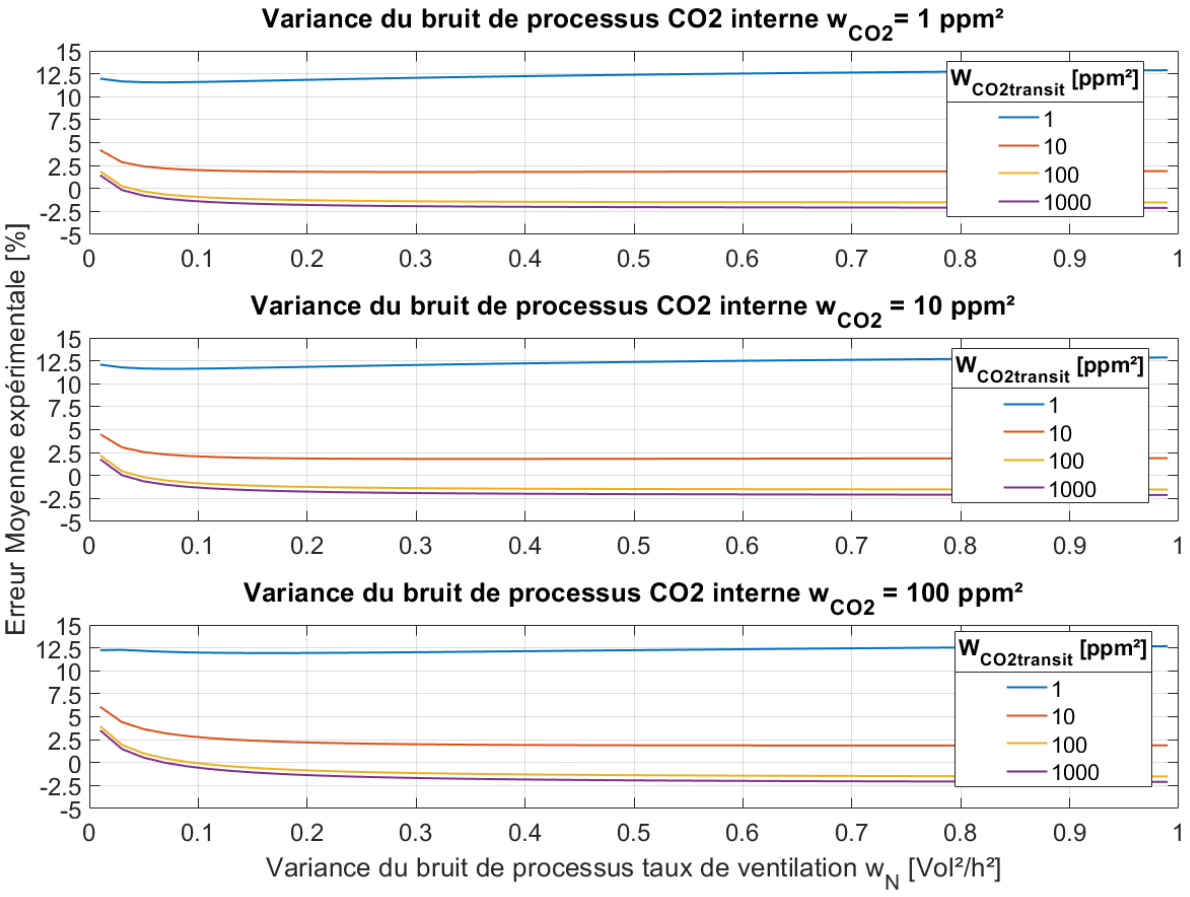


Figure 4-9 : Analyse de sensibilité des variances du bruit de processus sur le calcul du taux de ventilation moyen

A la lecture de ce graphique, il serait tentant de considérer une haute variance du taux de ventilation. Or, sans mesure de comparaison, a contrario des concentrations, le gain de Kalman n'est pas en mesure de contraindre les fluctuations de l'estimation du taux de ventilation. Augmenter la variance augmente donc nécessairement les fluctuations du taux de ventilation instantané que le filtre calcule. La Figure 4-10 propose la comparaison du taux de ventilation instantané calculé par le filtre de Kalman avec le taux de ventilation de référence pour une variance de 1 $vol^2.h^{-2}$. On remarque des fluctuations à amplitudes trop importantes comparées au taux de ventilation de référence.

Afin de maintenir des fluctuations raisonnables dans le but de pouvoir observer les variations instantanées du taux de ventilation, nous retenons la valeur de 0,1 $vol^2.h^{-2}$ pour la variance du bruit de processus du taux de ventilation. Ce choix est permis par la connaissance du débit de référence. Comment peut-on estimer une variance du bruit de processus du taux de ventilation adéquate en conditions in situ, sans mesure de référence ? La Figure 4-11 montre un test avec la variance de 0,1 $Vol^2.h^{-2}$. On observe des fluctuations hautes fréquences à faibles amplitude dans le calcul du taux de ventilation instantané. Ces fluctuations hautes fréquences justifient que l'évolution calculée par le filtre est assez rapide pour suivre l'évolution réelle. Même si les amplitudes de variation du taux de ventilation réel peuvent être plus importantes, ces fluctuations hautes fréquences prouvent que le filtre n'introduit pas une inertie trop importante. A noter que si l'on recherche uniquement le taux de ventilation moyen, et non son évolution, il vaut mieux considérer une grande variance de l'ordre de 1 $vol^2 .h^{-2}$ pour être certain de ne pas inhiber certaines variations de grandes amplitudes du taux de ventilation.

A contrario, la Figure 4-12 montre un test avec une variance du bruit de processus du taux de ventilation faible de 0,01 $vol^2.h^{-2}$. On remarque une courbe lissée qui peine à suivre l'évolution du taux de ventilation. Ce lissage montre qu'il y a un risque que l'évolution calculée ait une trop grande inertie pour suivre l'évolution réelle. On se trouve dans la zone de la Figure 4-9 des petites variances, où l'erreur moyenne est dégradée car la variance du bruit de processus du taux de ventilation est sous-estimée.

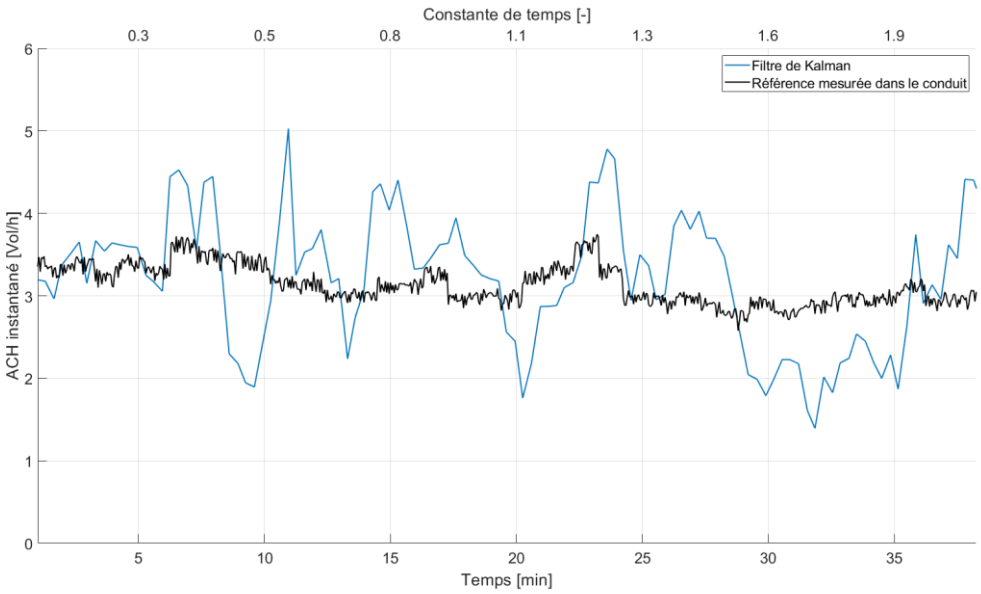


Figure 4-10 : Exemple d'une variance du bruit de processus de taux de ventilation trop élevée (1 $Vol^2.h^{-2}$)

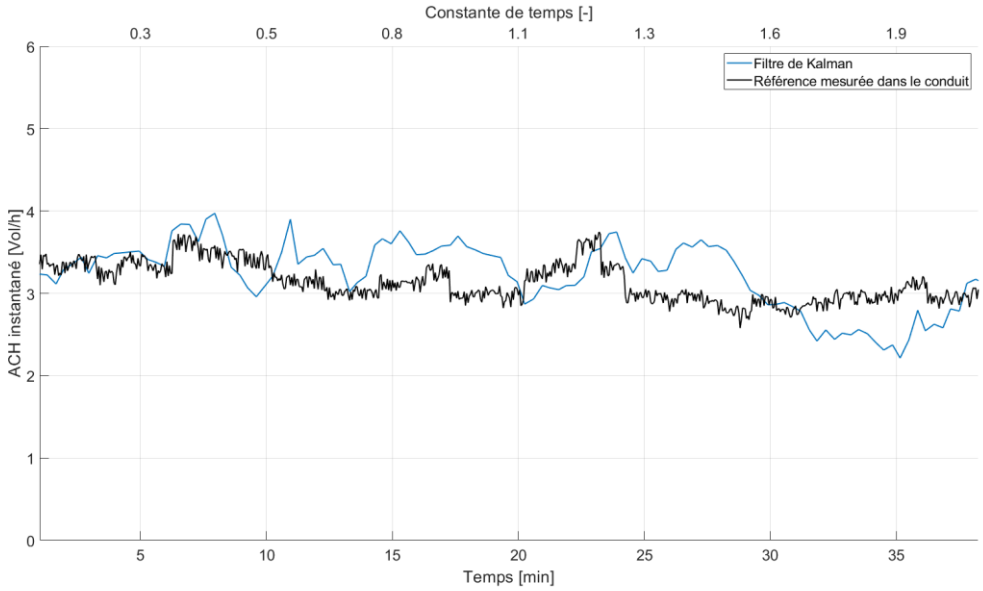


Figure 4-11 : Exemple d'une variance du bruit de processus du taux de ventilation adéquatement choisie (0.1 Vol²/h²)

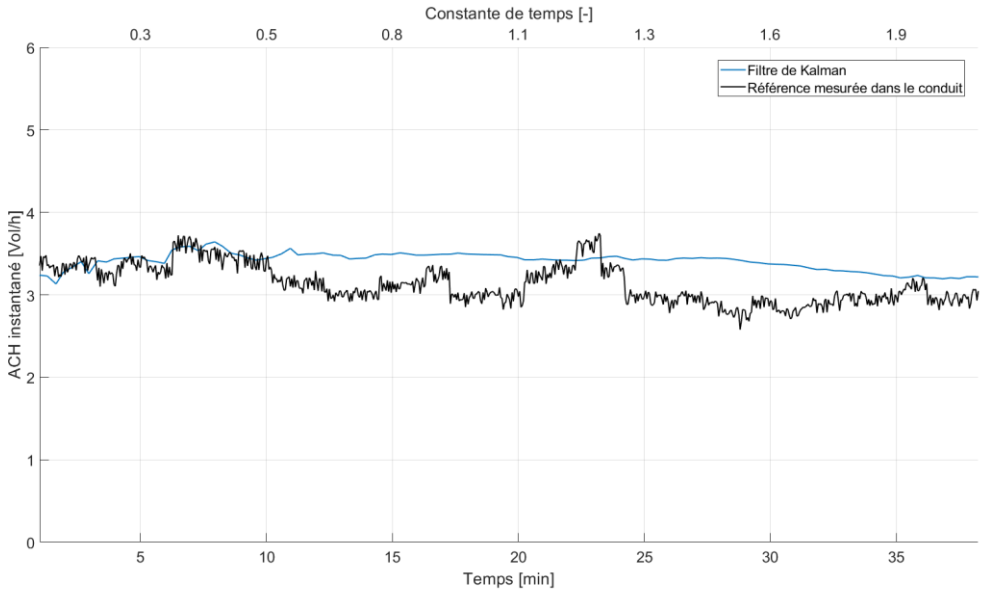


Figure 4-12 : Exemple d'une variance du bruit de processus du taux de ventilation trop faible (0.01 Vol².h⁻²)

3.7 Paramètres de calculs

Pour le calcul du taux de ventilation, la technique proposée utilisant le filtre de Kalman sera comparée à la méthode par décroissance de la concentration 2 points dans le paragraphe 4. Les deux méthodes sont analysées entre le premier point de la décroissance utilisable (après 8 minutes environ), et la fin de période ayant permis d'atteindre 2τ.

Pour le filtre de Kalman, les paramètres suivants seront utilisés en accord avec les conclusions de l'analyse de sensibilité effectuée au paragraphe 3.6. Comme expliqué dans le paragraphe, les variances du bruit de processus des 2 concentrations ont été définies graphiquement.

$$W = \begin{cases} w_{Cin} = 10\ ppm^2 \\ w_N = 0{,}1\ Vol^2/h^2 \\ w_{C_{transit}} = 100\ ppm^2 \end{cases}$$

Les covariances des bruits de mesure sont calculées à partir des caractéristiques fabriquant des capteurs disponibles en annexe 4.3.

$$V = \begin{cases} v_{Cin} = (\frac{3\% + 50}{\sqrt{n_{capteur}}})^2\ ppm^2 \\ v_{C_{transit}} = (3\% + 50)^2\ ppm^2 \end{cases}$$

Les paramètres d'état du filtre (concentration intérieure, taux de ventilation, concentration de transit) doivent être initialisés. Pour les concentrations intérieures, et de transit, les valeurs initiales sont la moyenne des trois premiers points pour les deux séries de mesure. Concernant le taux de ventilation, l'initialisation est donnée par le résultat de la méthode 2 points sur 2τ.

4 Mesure du taux de ventilation en configuration multi-zones

4.1 Répétabilité des méthodes de mesure sur le taux de ventilation moyen

La performance du filtre de Kalman a été comparée sur les 30 tests du cas de base à la précision de la méthode à fiabiliser : la méthode 2 points. La Figure 4-13 représente, pour un des tests du cas de base, les taux de ventilation calculés par les deux méthodes ainsi que celui de référence mesuré dans le conduit d'extraction. Une moyenne temporelle glissante sur 5 points de mesure de la méthode 2 points est également tracée (courbe « 2 points lissée »). Les résultats de la figure sont calculés à partir du capteur placé proche de l'évacuation. La méthode 2 points calcule la moyenne du taux de ventilation entre les deux points extrêmes considérés. Dans notre cas, le premier point de mesure est fixe, et la moyenne est ensuite calculée entre ce premier point et tous les points de mesure jusque 2 τ. Les taux de ventilation de référence et calculé par le filtre de Kalman sont donc moyennés sur les mêmes périodes afin de tracer la Figure 4-13. On remarque sur cette figure que la méthode 2 points tend à des résultats plus dispersés que le filtre de Kalman. Après 1 τ, qui est le temps minimal préconisé par les normes, les écarts, d'un point à l'autre peuvent valoir jusque quasiment 1 vol.h^{-1} (juste après 1,1 τ) alors que le filtre est très stable à partir du début de la période d'analyse.

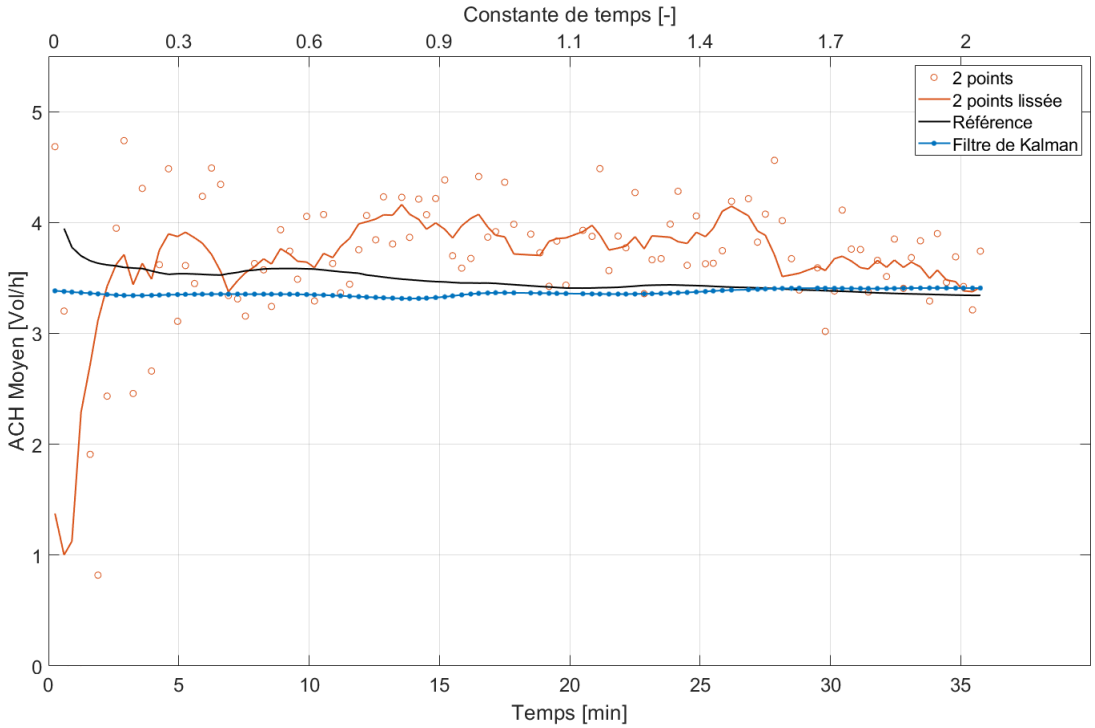


Figure 4-13 : Exemple du calcul de l'ACH sur un des tests DFN

L'incertitude globale de la méthode peut être calculée car le nombre de 30 répétitions du cas de base permet d'émettre l'hypothèse que la distribution des erreurs suit une loi normale. On peut considérer l'incertitude globale σ_N comme faisant intervenir l'erreur systématique $\sigma_{N_{mean}}$ dite de justesse, ainsi que l'erreur aléatoire $\sigma_{N_{std}}$ dite de répétabilité (équation 4.33). L'erreur systématique et l'erreur de répétabilité sont respectivement la moyenne (équation 4.35) et l'écart-type (équation 4.36) sur les 30 tests des erreurs ε_i définies en équation 4.34.

$$\sigma_N = \sqrt{\sigma_{N_{mean}}^2 + \sigma_{N_{std}}^2} \tag{4.33}$$

$$\varepsilon_i = N_{i\,mes} - N_{i\,ref} \tag{4.34}$$

$$\sigma_{N_{mean}} = \frac{1}{n} * \sum_i \frac{\varepsilon_i}{\overline{N_{i\,ref}}} * 100 \tag{4.35}$$

$$\sigma_{N_{std}} = \frac{1}{n * \overline{N_{i\,ref}}} * \sum_i (\varepsilon_i - \overline{\varepsilon_i}) * 100 \tag{4.36}$$

Avec :

- σ_N l'incertitude globale [%] ;
- $\sigma_{N_{mean}}$ l'erreur systématique [%] ;
- $\sigma_{N_{std}}$ l'incertitude de répétabilité [%] ;
- n le nombre d'expérience [-] ;
- ε_i l'erreur entre la mesure et la référence pour un test i [vol.h^{-1}].

L'incertitude spatiale a également été calculée pour évaluer la sensibilité spatiale de la méthode. Elle se réfère à la moyenne de l'écart-type de l'erreur entre les cinq capteurs, et elle est calculée comme suit :

$$\sigma_{N_{spatial}} = \frac{1}{n * \overline{N_{i\,ref}}} * \sum_i \frac{1}{n_{capteur}} \sum_j (\varepsilon_{j,i} - \overline{\varepsilon_{j,i}}) * 100 \quad (4.37)$$

Avec :

- $\sigma_{N_{spatial}}$ l'incertitude spatiale [ppm] ;
- $n_{capteur}$ le nombre de capteur [-] ;
- $\varepsilon_{j,i}$ l'erreur entre la mesure et la référence du capteur j du test i [vol.h^{-1}].

On obtient donc finalement l'incertitude globale par capteur, et par méthode qui sont données dans le Tableau 4-4, ainsi que l'incertitude spatiale. L'annexe 4.5 présente les erreurs systématiques (erreur moyenne) et les erreurs aléatoires (écart-type) qui ont permis de calculer les incertitudes globales. La méthode 2 points est, sans surprise, la méthode qui tend à la plus grande incertitude globale, qui vaut en moyenne 10,6%, avec 4 capteurs sur 5 tendant à la plus grande incertitude. Le filtre de Kalman permet de réduire l'incertitude globale de 2,3%. La méthode lissée est la méthode qui permet de diminuer le plus l'incertitude globale par rapport à la méthode conventionnelle, de 3,2%.

En termes d'incertitude spatiale, le lissage de la méthode 2 points et le filtre de Kalman réduisent la sensibilité de respectivement 2,4 et 4,1 points. Le filtre de Kalman présente donc la plus faible incertitude spatiale. On remarque que les 3 incertitudes spatiales sont inférieures (à 0,1% près) aux incertitudes globales moyennes, ce qui indique une faible sensibilité spatiale. Il faut toutefois noter la dégradation significative des résultats du capteur 5 du filtre de Kalman par rapport aux autres capteurs. Il tend à une incertitude globale de 11,2% alors que tous les autres tendent à des résultats très proches, compris entre 6,6 et 8,2%. Le capteur 5 était situé hors des lignes probables de courant de l'air entre le détalonnage de porte et l'évacuation de l'air. Ce capteur semble davantage impacter le filtre de Kalman que les deux autres méthodes. Cela peut s'expliquer par le fait qu'un mauvais mixage temporellement localisé ait pu perturber le filtrage. Or, les deux autres méthodes reposant sur les deux points extrêmes sont moins sensibles à un mauvais mixage qui serait temporellement localisé.

Le filtre de Kalman et la méthode 2 points lissée permettent donc d'améliorer l'incertitude globale et l'incertitude spatiale de la méthode. La méthode 2 points lissée tend à des résultats légèrement meilleurs. Cette observation sera également questionnée dans la section 4.3 car, comme il a été précisé dans l'introduction, un des buts du filtre de Kalman est de permettre la variation du CO_2 de transit, induit par une occupation par exemple. Or, la concentration du CO_2 de transit était fixe pour ce test de répétabilité. Permettre la variation du CO_2 de transit est d'une importance capitale en vue d'une application in situ de la méthode.

Méthode	**Incertitude globale σN [%]**						**Incertitude spatiale**
	Capteur 1	**Capteur 2**	**Capteur 3**	**Capteur 4**	**Capteur 5**	**Moyenne**	
Filtre de Kalman	6,6	8,2	7,8	**7,6**	11,2	8,3	**5,8**
2 points lissée	**6,4**	**5,3**	**7,6**	7,8	**9,9**	**7,4**	7,5
2 points	9,4	6,2	11,8	11,7	13,7	10,6	9,9

Tableau 4-4 : Incertitude globale et incertitude spatiale

4.2 Mesure du taux de ventilation dynamique par le filtre de Kalman

Le filtre de Kalman, à la différence de la méthode 2 points, permet de mesurer le taux de ventilation dynamique. Comme il a été expliqué dans le paragraphe 2.3, le filtre calcule le taux de ventilation à partir des concentrations bruitées intérieures et de transit. Il permet donc, après filtrage des concentrations, de calculer le taux de ventilation dynamique correspondant à leur évolution. La Figure 4-14 montre un exemple de filtrage des concentrations pour le test avec occupation et porte fermée DFO1. On remarque, par ailleurs, que la concentration de transit varie de 875 ppm à 750 ppm en 20 minutes. Cette variation de la concentration de transit s'explique par la présence d'un occupant dans la salle B.

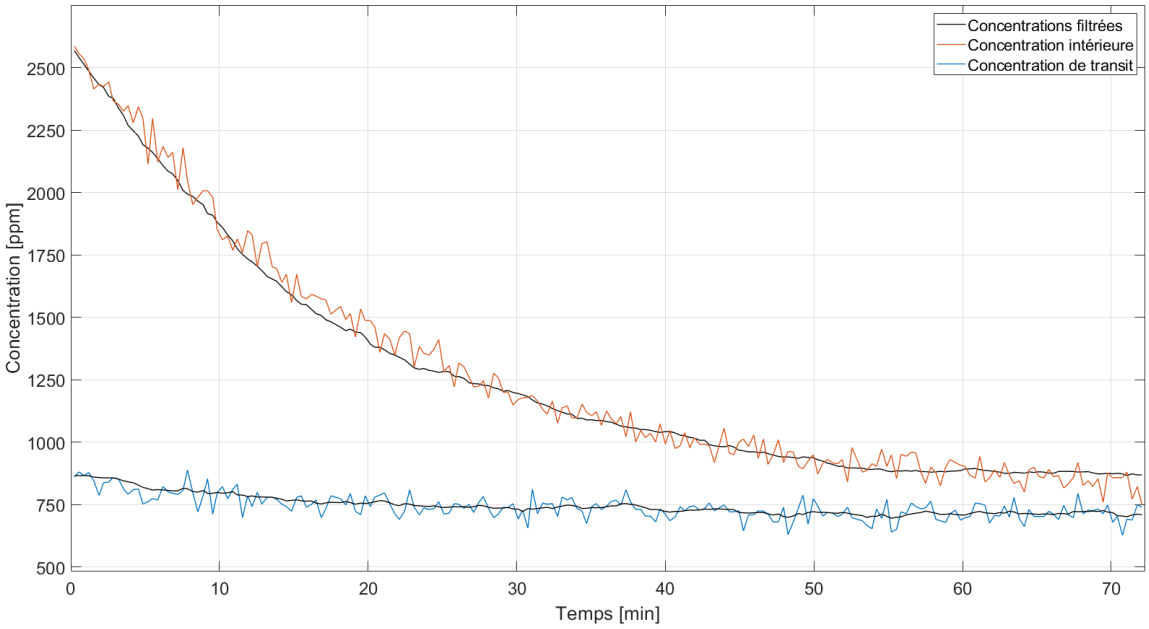


Figure 4-14 :Exemple de filtrage des concentrations par le filtre de Kalman, DFO1

Comme il a été expliqué dans le paragraphe 3.6.3, la qualité du suivi de l'évolution du taux de ventilation dynamique est dépendante de l'adéquation entre la variance du bruit de processus du taux de ventilation renseignée dans le filtre et l'amplitude de fluctuation du taux de ventilation réel. Plus la variance du bruit de processus du taux de ventilation sera importante par rapport à l'amplitude de fluctuation du débit, plus grande sera l'erreur moyenne quadratique. La qualité de suivi de l'évolution du taux de ventilation dynamique est également extrêmement dépendante du mixage de l'air. A titre d'exemple, la Figure 4-15 montre un cas pour lequel l'évolution du taux de ventilation calculée est relativement fidèle (i), et un autre cas avec des écarts significatifs (ii). En termes d'erreur moyenne, ces deux exemples tendent toutefois à une erreur inférieure à l'incertitude globale de la méthode par filtre de Kalman (0,8% pour (i) et -7,3% pour (ii)). Le cas le plus critique correspond au cas où la position de la porte entre les deux salles est ouverte, avec occupation de la salle B (DOO). Le mixage de l'air dans cette configuration est sujet à être moins bien maîtrisé que dans le cas de base, ce qui peut expliquer les plus grands écarts. On remarque notamment une surestimation importante du taux de ventilation calculé de plus d'1 vol.h^{-1} pendant 5 à 10 minutes en début de décroissance. A noter que le mixage imparfait de l'air a été amplifié par l'ouverture de la porte. Cependant, le mixage de l'air dans un bâtiment in situ a peu de probabilités d'être parfait [83].

Au vu de ces observations, l'évolution du taux de ventilation donne une information intéressante, mais doit être considérée avec prudence.

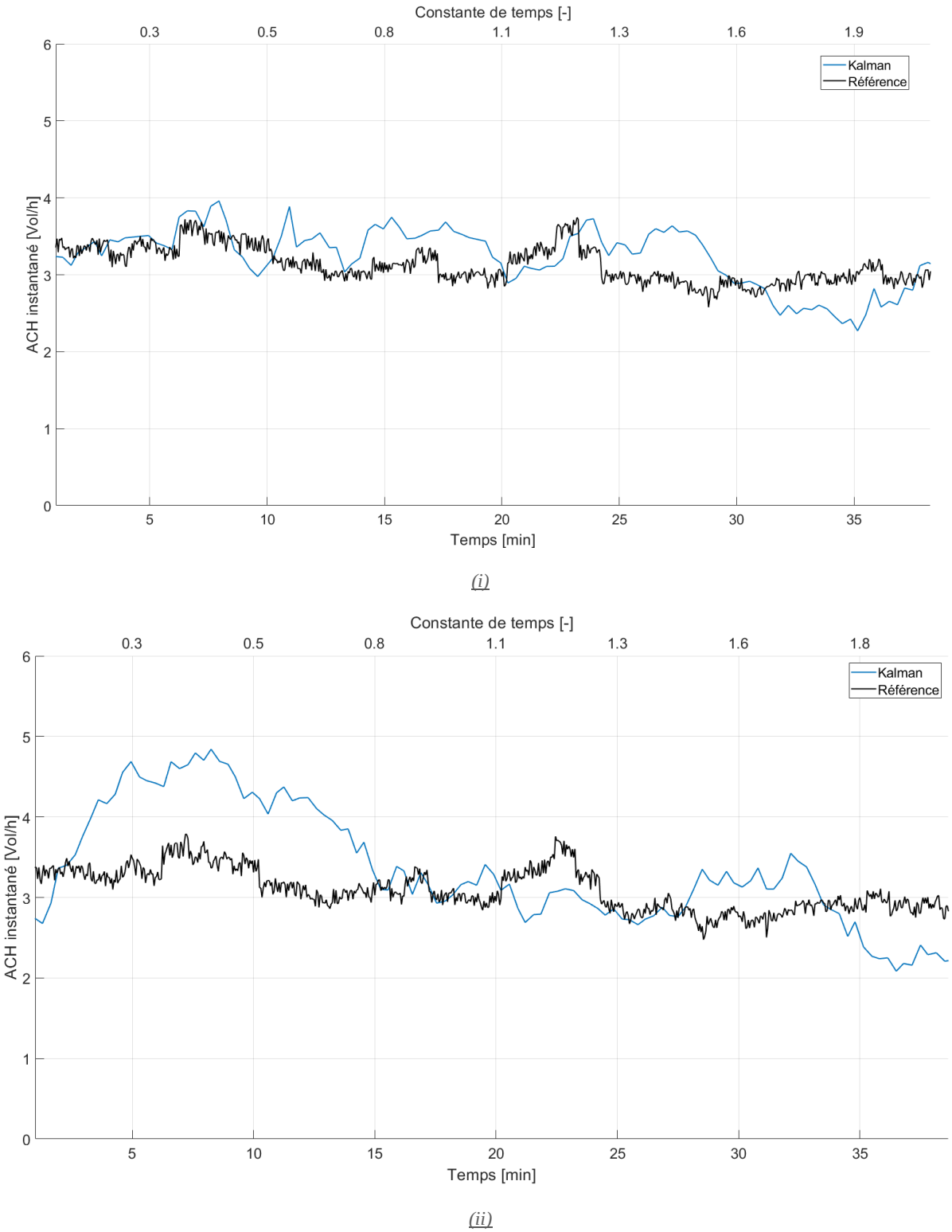


Figure 4-15 : ACH instantanés de référence, et calculé par le filtre de Kalman pour les tests (i) DFN, et (ii) DOO

4.3 Analyse paramétrique expérimentale

4.3.1 Comparaison entre les 3 méthodes sur le taux de ventilation moyen

L'analyse paramétrique vise à remettre en question la comparaison des méthodes gaz traceur réalisée au paragraphe précédent en perspective des contraintes que l'application in situ pourrait apporter. Le test de répétabilité sur le cas de base a permis d'approcher l'incertitude globale de chaque méthode. L'erreur pour chaque cas de l'analyse paramétrique peut donc être comparée à l'incertitude globale calculée au paragraphe précédent, afin d'évaluer l'influence de tel ou tel paramètre. Pour que la comparaison soit davantage robuste, il aurait fallu calculer l'incertitude globale de chaque cas de l'analyse paramétrique. Cependant, le nombre de 3 tests pour chaque cas a été jugé trop faible pour calculer l'incertitude globale (en comparaison des 30 tests du paragraphe 4.1). La Figure 4-16 présente le diagramme à barres de l'erreur expérimentale des trois méthodes. Les barres représentent la valeur absolue de la moyenne de l'erreur entre la mesure par les méthodes gaz traceur et la mesure de référence, sur les 3 répétitions de chaque cas. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type de l'erreur. Ces deux indicateurs sont donc comparés individuellement à l'incertitude globale, ce qui donne une indication sur la sensibilité vis-à-vis d'un paramètre, sans que l'on puisse dresser de conclusions définitives. Pour cette analyse, seul le capteur numéro 3 est considéré pour le calcul, capteur situé sous la bouche d'extraction d'air comme préconisé dans deux articles de la littérature [80], [83]. Le cas DFN a été ré-exécuté 3 fois, indépendamment du fait que 30 tests aient déjà été réalisés pour le paragraphe 4.1.

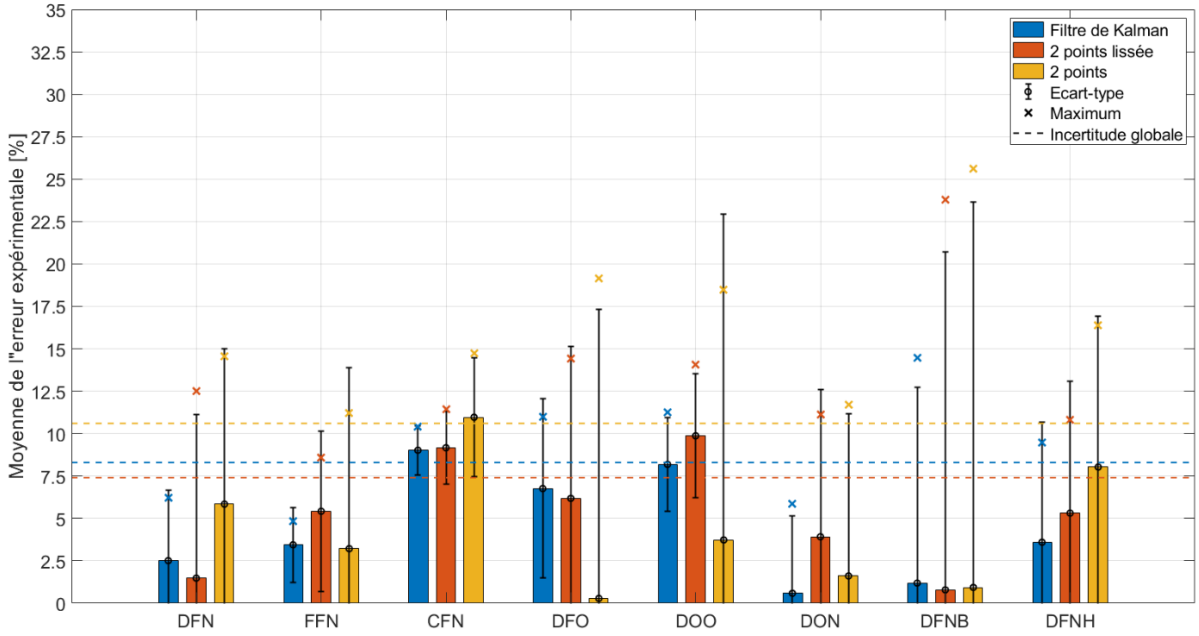


Figure 4-16 : Diagramme à barres de l'erreur expérimentale moyenne pour les 3 méthodes

Méthodes 2 points lissée, et 2 points conventionnelle

On remarque dans un premier temps que la méthode 2 points classique (barres jaunes) présente des écarts-type supérieurs à son incertitude globale de 10,6% pour les cas FFN, DFO, DOO, et DFNB. Il vaut respectivement 1,7%, 17%, 19,2% et 22,7%. Hormis le cas FFN dont l'écart-type est très proche de l'incertitude globale, on remarque que les deux cas avec occupation (DFO & DOO), et le cas avec injection basse (DFNB) augmentent considérablement

l'écart-type. Concernant les deux cas avec occupation, c'est un résultat qui était attendu car la méthode 2 points est biaisée en cas de variation du CO_2 de transit. Concernant le cas avec injection basse, le poids supérieur des incertitudes de mesure à 1500 ppm plutôt qu'à 2500 ppm, ainsi que la plus rapide proximité avec la concentration de transit peuvent expliquer ces écarts. En termes d'erreur moyenne, seul le cas avec un profil croissant (CFN) tend à une erreur moyenne supérieure à l'incertitude globale, de 0,4%. Pour rappel, l'analyse d'incertitude réalisée dans le chapitre 3 pour la méthode par décroissance de la concentration avait calculé une incertitude de mesure supérieure du profil croissant par rapport aux autres cas testés, à cause possiblement de la plus haute valeur moyenne de concentration. Or, l'incertitude globale calculée ici a été calculée sur le profil décroissant. Il serait donc logique de penser que l'incertitude globale calculée à partir d'un profil croissant aurait été légèrement supérieure. La méthode deux points semble donc sensible vis-à-vis de l'occupation, et du niveau initial d'injection de CO_2.

Le lissage de la méthode tend nécessairement à des écarts-type plus faibles que ceux de la méthode conventionnelle. Cependant, le cas de base (DFN), le cas avec occupation et porte fermée (DFO), le cas avec porte ouverte (DON), et le cas avec injection basse de CO_2 (DFNB) tendent à un écart-type supérieur à l'incertitude globale de la méthode 2 points lissée, de respectivement, 1,6, 1,5, 1,3, et 12,5 points. Concernant les trois premiers cas, le cas DFN et le cas DON n'engendraient pas une sensibilité particulière de la méthode 2 points. Or les deux méthodes doivent présenter les mêmes sensibilités vis-à-vis des paramètres autres que les incertitudes de mesure. Le faible écart de l'écart-type par rapport à l'incertitude globale peut donc être attribué au faible nombre de tests ayant permis de calculer l'écart-type. En revanche, le cas DFO présentait déjà un écart-type important pour la méthode 2 points, ce qui conforte dans l'idée que l'occupation est un paramètre dont la méthode 2 points est sensible. Le cas DFNB est, lui, sans équivoque compte tenu des écarts-types supérieurs à 20% qu'il entraîne. En ce qui concerne les erreurs moyennes, le cas avec profil de variation croissant (CFN), et le cas avec occupation et porte ouverte (DOO) tendent à des erreurs moyennes supérieures à l'incertitude globale de respectivement 1,8 points et 2,5 points. Concernant l'erreur du profil croissant, elle peut être attribuée au plus grand poids des incertitudes de mesure, non comprises dans le calcul de l'incertitude globale (cf. Chapitre 3). Concernant le cas DOO, la méthode 2 points présentait déjà une sensibilité vis-à-vis de ce cas, sensibilité donc vérifiée par la méthode lissée. Pour résumer, les méthodes 2 points semblent donc sensibles vis-à-vis de l'occupation, que la porte soit ouverte ou fermée. Elles sont également particulièrement sensibles vis-à-vis du niveau d'injection de CO_2. Une injection jusque 1500 ppm dégrade significativement les résultats.

Filtre de Kalman

Erreur [%]	Profil de variation			Occupation			Niveau initial CO_2	
					Porte ouverte			
	DFN	FFN	CFN	DFO	DOO	DON	DFNB	DFNH
Test 1	6,2	-4,9	-10,4	-11,0	-11,3	2,2	-6,7	-5,6
Test 2	3,3	-0,9	-7,5	-8,5	-7,3	-5,9	-4,2	4,2
Test 3	-1,9	-4,6	-9,1	-0,8	-6,0	1,9	14,4	-9,5
Moyenne	2,5	-3,5	-9,0	-6,8	-8,2	-0,6	1,2	-3,6
Ecart-type	4,1	2,2	1,4	5,3	2,7	4,6	11,5	7,1

Tableau 4-5 : Erreur du taux de ventilation calculé par le filtre de Kalman pour chaque test

Le Tableau 4-4 renseigne des erreurs du taux de ventilation pour le filtre de Kalman par tests. Ces résultats ont, en partie, permis de tracer la Figure 4-16. Au regard de la Figure 4-16, le filtre de Kalman permet systématiquement d'améliorer la précision par rapport aux deux autres méthodes. La considération des erreurs moyennes cumulées avec les écarts-type est toujours inférieure à celles des deux autres méthodes. Les erreurs moyennes sont toutes inférieures à l'incertitude globale de 8,2%, sauf pour le cas CFN qui entraîne une erreur légèrement supérieure de 0,8 points. L'explication possible est la même que précédemment. Si l'on regarde plus précisément les erreurs de chaque test (cf. Tableau 4-4), on remarque que 2 tests DFO sur 3 entraînent une erreur de 0,3 et 2,8 points supérieures à l'incertitude globale. Cependant, l'erreur moyenne et l'écart-type sont tous deux inférieurs à l'incertitude globale donc le filtre ne semble pas sensible vis-à-vis du paramètre occupation porte fermée. Parmi les autres cas, un test des cas DOO et DFNB tend également à une erreur supérieure à l'incertitude globale. Pour le cas DOO, la moyenne de l'erreur ainsi que l'écart-type sont inférieurs à l'incertitude globale. En revanche, l'écart-type du cas DFNB est largement supérieur à l'incertitude globale de 3,2 points. Cela dénote d'une sensibilité vis-à-vis de l'injection basse de CO_2. Cela peut être dû au fait que la procédure de correction du CO_2 de transit explicitée dans le paragraphe 3.3 fait intervenir la méthode 2 points qui s'est montrée particulièrement sensible vis-à-vis de ce paramètre. Les écarts-type des méthodes 2 points pour le cas DFNB étaient toutefois supérieurs de 8,4 et 11,5% à celui du filtre de Kalman.

L'analyse des erreurs maximales représentées par des croix sur le diagramme à barres de la Figure 4-16 conforte également la meilleure performance du filtre de Kalman par rapport aux autres méthodes. L'erreur maximale est toujours plus faible que celle des deux méthodes 2 points. Par exemple, pour les deux cas avec occupation (DFO et DOO), l'erreur maximale sur les 3 répétitions est diminuée de 2,7 à 4,4% et de 8,5 à 9,2%, respectivement comparés à la méthode 2 points lissée, et la méthode 2 points classique.

4.3.2 Influence de la procédure d'estimation du CO2 de transit

L'amélioration des résultats par l'application de la procédure d'estimation du CO_2 de transit a été évaluée en calculant l'erreur de chaque test si la procédure n'avait pas été effectuée. Le Tableau 4-6 synthétise les résultats pour le filtre de Kalman. Le capteur sous l'évacuation est considéré. La quasi-totalité des erreurs est significativement dégradée. Seul 1 test (CFN1) tend à un résultat plus précis qu'avec application de la procédure (Cf. Tableau 4-5). Pour le reste, la précision est dégradée de 6 (DFNH1) à 194 points (DON1). Le cas de base (DFN) ainsi que le cas avec un profil de variation fixe (FFN) engendrent une dégradation de 16 à 29 points. La Figure 4-17 présente la corrélation entre la dégradation de l'erreur quand la procédure d'estimation du CO_2 de transit n'est pas appliquée, et le niveau moyen de la concentration de CO_2 dans la pièce de vie. On remarque que plus la concentration de CO_2 dans la pièce de vie est élevée, donc différente de la concentration des infiltrations, plus l'erreur est importante, jusqu'à atteindre 194% pour une concentration ambiante moyenne de 1050 ppm. C'est un résultat logique. Les cas avec occupation présentent logiquement une concentration ambiante élevée. Concernant le test avec ouverture de porte sans occupation DON1, la concentration ambiante est élevée alors qu'il n'y avait pas occupation. L'ouverture de la porte à la fin de l'injection a pu créer une turbulence locale qui a perturbé la mesure du CO_2 ambiant, car le capteur était placé proche de l'ouverture. Le calcul en est particulièrement dégradé (+194%) mais l'application de la procédure permettait d'inhiber cette perturbation.

Certains tests ont une concentration ambiante moyenne, a priori, proche de la concentration atmosphérique car il n'y a pas d'occupation, et que la concentration ambiante mesurée est entre 400 et 500 ppm. Or, même pour ces tests, la dégradation de l'erreur peut avoisiner les 30-35%. Cela peut s'expliquer par un écart de calibration entre les capteurs de concentration intérieure, et concentration ambiante dans la pièce de vie. Il faut noter que la technologie à absorption infrarouge des capteurs de CO_2 est sujette à dériver fortement dans le temps. Les capteurs autonomes peuvent être dotés d'une procédure interne de calibration. Cette procédure interne de calibration est pratique mais peut engendrer des écarts de calibration. Elle a été utilisée pour la réalisation des expérimentations de la thèse. Tout écart de calibration est inhibé par la procédure d'estimation du CO_2 de transit car elle adapte l'estimation de la concentration de transit par rapport au capteur de concentration intérieure. Or, pour la méthode décroissance de la concentration, c'est la variation de la concentration intérieure par rapport à la concentration de transit qui importe et non la valeur absolue des concentrations. Comme la concentration de transit est adaptée à la concentration intérieure, la procédure inhibe l'influence d'un écart de calibration que ce soit sur le capteur intérieur ou sur le capteur situé en amont du dispositif de transfert d'air. Pour illustrer l'indépendance de la méthode, avec application de la procédure d'estimation du CO_2 de transit, vis-à-vis de la calibration des capteurs, le diagramme à barres des erreurs des 3 méthodes présenté en Figure 4-16 a été retracé en Annexe 4.6. Seule la calibration du capteur 3 a été majorée artificiellement de 5%, capteur utilisé pour la mesure de la concentration intérieure. Les résultats sont identiques à ceux présentés en Figure 4-16.

La procédure a donc permis d'améliorer significativement les résultats. En plus de tenir compte des infiltrations, elle permet également d'inhiber l'influence de la calibration des capteurs, ce qui est très intéressant pour l'utilisation de capteurs CO_2, sujets à dériver dans le temps. A noter que la procédure était biaisée en cas de variation du CO_2 de transit. Or, si la décroissance est terminée, et donc que tout le gaz a été évacué, alors la procédure n'est plus biaisée. Cette procédure est l'étape essentielle pour réaliser une méthode gaz traceur, pour un gaz présent dans l'atmosphère, dans un bâtiment composé de plusieurs pièces.

Erreur [%]	**Profil de variation**			**Occupation**			**Niveau initial CO_2**	
					Porte ouverte			
	DFN	**FFN**	**CFN**	**DFO**	**DOO**	**DON**	**DFNB**	**DFNH**
Test 1	35,3 (+29)	21,2 (+16)	7,4 (-3)	49,8 (+40)	142,5 (+130)	195,7 (+194)	16,0 (+9)	22,1 (+17)
Test 2	30,2 (+27)	20,7 (+20)	15,6 (+8)	26,7 (+18)	186,4 (+180)	23,3 (+17)	18,3 (+14)	34,8 (+31)
Test 3	22,6 (+20)	20,1 (+16)	16,1 (+7)	54,1 (+53)	179,4 (+173)	47,5 (+46)	47,7 (+33)	15,4 (+6)

Tableau 4-6 : Erreur du filtre de Kalman pour chaque test sans procédure d'estimation du CO_2 de transit

Note : les valeurs entre parenthèses représentent la différence de la valeur absolue de l'erreur entre les tests avec et sans application de la procédure d'estimation du CO_2 de transit.

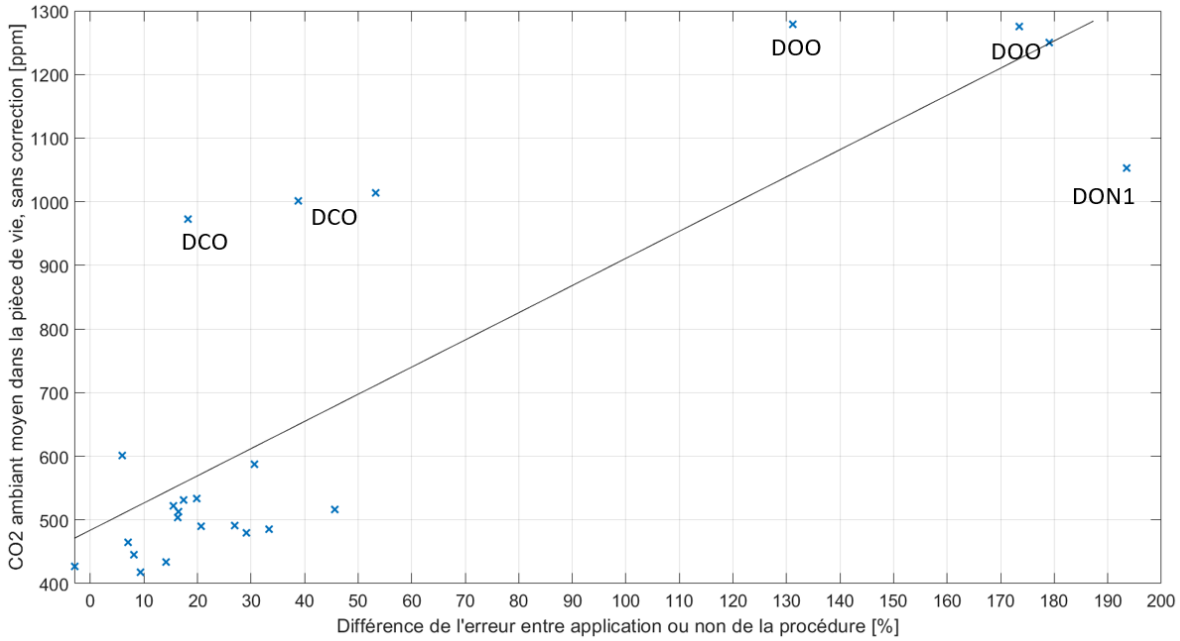


Figure 4-17 : Corrélation entre dégradation de l'erreur sans application de la procédure et CO2 ambiant moyen

4.3.3 Sensibilité spatiale de la méthode

Nous avions sélectionné le capteur numéro 3 pour l'analyse des résultats. Ce choix a été effectué en accord avec les conclusions de deux articles scientifiques [80], [83]. L'analyse sur les 30 tests identiques effectuée au paragraphe 4.1 avait montré que les résultats de ce capteur étaient sensiblement identiques aux autres capteurs (excepté le capteur 5 présentant une dégradation des résultats). Dans ce paragraphe, la sensibilité spatiale de la méthode va être réévaluée pour compléter l'analyse paramétrique. Certains paramètres, comme l'ouverture de la porte, pourraient accroître la sensibilité spatiale de la méthode. La meilleure représentativité du capteur 3 placé sous l'évacuation doit également être vérifiée [80], [83].

Le Tableau 4-7 présente l'incertitude spatiale déjà définie dans le paragraphe 4.1. L'erreur provenant de la moyenne des concentrations mesurées par les capteurs a aussi été calculée. Les tests pour lesquels l'incertitude spatiale est supérieure à celle calculée dans le paragraphe 4.1 (5,8%) ont été représentés en rouge. Cela permet d'identifier les tests pour lesquels le paramètre testé augmente la sensibilité spatiale. Concernant l'erreur provenant de la moyenne des capteurs, cela permet théoriquement de réduire l'influence d'un mixage imparfait de l'air sur le résultat [69]. L'objectif est donc de percevoir si, considérer la moyenne des concentrations plutôt que la concentration du capteur situé sous l'évacuation, permet d'augmenter la précision. Les valeurs en rouge représentent une erreur supérieure à l'incertitude globale, couplée à une augmentation de l'erreur par rapport au capteur numéro 3 considéré seul. Les valeurs en vert représentent une amélioration du résultat, alors que le résultat à partir du capteur 3 était supérieur à l'incertitude globale.

Sept tests présentent une incertitude spatiale supérieure à l'incertitude spatiale du test de répétabilité. Cela représente 27% des tests. Parmi eux, quatre concernent les tests avec ouverture de la porte parmi les 5 (DON, DOO), avec une augmentation de l'incertitude spatiale de 1,8 à 3,5 points. Cela paraît plutôt logique car l'ouverture de la porte va engendrer un mixage particulier de l'air, moins contrôlé que si la porte était fermée. L'ouverture de la porte semble donc augmenter sensiblement la sensibilité spatiale du filtre de Kalman. On peut l'observer sur

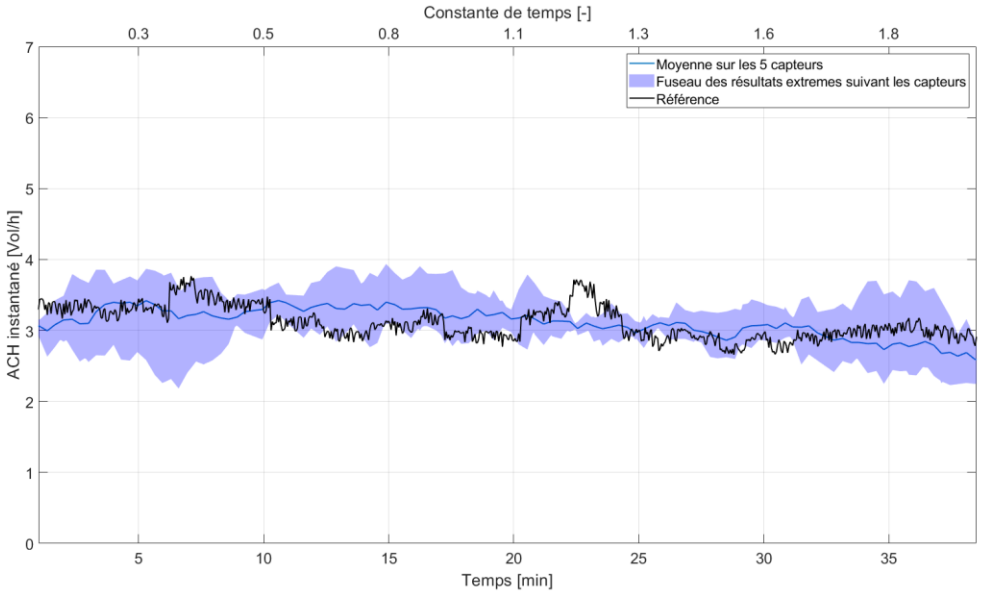
la Figure 4-18 qui montre un test (DFN1) présentant une faible incertitude spatiale, et le test DON1 qui présente à l'inverse une forte incertitude spatiale. Cette Figure 4-18 montre les taux de ventilation minimum et maximum calculés par le filtre de Kalman à partir des différents capteurs. Même si la valeur moyenne des capteurs (courbe en bleu) suit l'évolution du taux de ventilation de référence, le test DON1 présente un écart maximum de 3 vol.h^{-1} environ entre les taux de ventilation extrêmes provenant des différents capteurs, écart qui est considérable. Les trois autres tests concernés par une incertitude spatiale supérieure à l'incertitude spatiale du test de répétabilité sont les tests CFN2, DFO1 et DFNH1. Ces tests présentent une incertitude spatiale supérieure de respectivement 0,8, 0,9, et 1,2 points. En revanche, la moyenne sur les 3 tests de cette incertitude spatiale est inférieure à celle calculée au paragraphe 4.1. La méthode semble donc peu sensible spatialement vis-à-vis de ces paramètres mais cela nécessiterait d'être confirmé par un plus grand nombre de tests.

Concernant l'erreur en considérant la moyenne des capteurs, par rapport à la considération du capteur 3 seul, les résultats ont été dégradés sur les trois tests CFN, sur un test DFO, et sur 2 tests DOO. L'erreur moyenne sur ces 3 cas est d'ailleurs supérieure à l'incertitude globale alors qu'elle ne l'était pas pour les 2 derniers cas considérés avec le capteur 3 seul. Concernant le cas DFO, la moyenne de l'erreur est 0,4 points supérieur à l'incertitude globale, et seul un test a été dégradé. Il est difficile de conclure quant à une sensibilité spatiale augmentée par l'occupation. Le test avec occupation et ouverture de porte avait déjà montré une sensibilité accrue dans l'analyse de l'incertitude spatiale. Elle est confirmée par l'analyse de l'erreur provenant de la moyenne des concentrations. Autrement, seuls 3 tests ont permis une meilleure précision à partir de la moyenne des concentrations : le test DFO1, le test DOO1, et le test DFNB1, de respectivement 3,9%, 0,1% et 3,2%. Les deux derniers tests mentionnés tendent toujours à une erreur supérieure à l'incertitude globale. En moyenne, les résultats à partir d'un seul capteur situé sous l'évacuation d'air comparés à ceux à partir des concentrations moyennes entre les 5 capteurs se sont montrés plus précis.

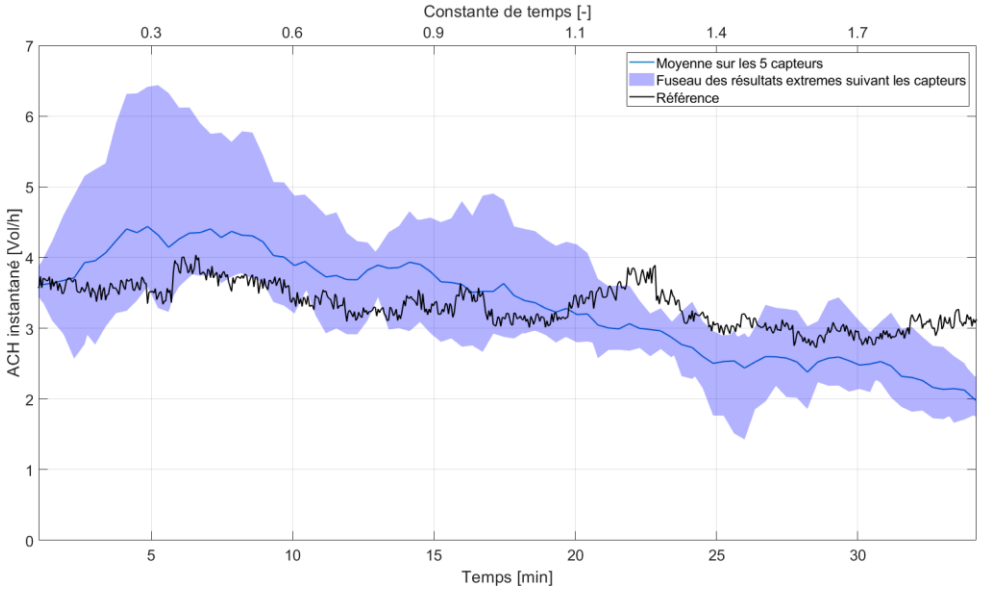
		DFN	FFN	CFN	DFO	DOO	DON	DFNB	DFNH
Incertitude spatiale [%]	*Test 1*	2,7	2,6	3,7	6,7	8,3	9,3	2,1	7,2
	Test 2	2,1	3,8	6,6	4,4	4,0	7,8	5,0	4,6
	Test 3	3,4	2,8	4,3	2,9	7,6	Na	4,0	5,2
	Moyenne	2,7	3,1	4,9	4,7	6,6	8,6	3,7	5,7
Erreur provenant de la moyenne des capteurs [%]	*Test 1*	2,4	-1,6	-13,0	-7,1	-11,2	-1,8	-5,7	5,5
	Test 2	0,0	-1,7	-12,6	-13,3	-10,8	-5,3	-8,2	4,5
	Test 3	1,3	-3,6	-9,7	-5,3	-15,2	3,6	11,2	-6,1
	Moyenne	1,2	-2,3	-11,8	-8,6	-12,4	-1,2	-0,9	1,3

Tableau 4-7 : Incertitude spatiale et erreur à partir de la moyenne des capteurs

Note : Concernant l'incertitude spatiale, les nombres en rouge représentent les tests pour lesquels l'incertitude spatiale est supérieure à celle calculée dans le paragraphe 4.1 de 5,8%. Concernant l'erreur provenant de la moyenne des capteurs, les nombres en rouge représentent une augmentation de l'erreur par rapport au capteur 3 considéré seul, qui soit supérieure à l'incertitude globale de 8,2%. Les valeurs en vert représentent une diminution de l'erreur par rapport au capteur 3 considéré seul, pour les tests qui présentaient une erreur supérieure à l'incertitude globale.



(i)



(ii)

Figure 4-18 : Fuseaux représentants les taux de ventilation instantané extrêmes calculés depuis les capteurs, (i) DON2, (ii) DFN2

Pour aller plus loin dans l'analyse de la sensibilité spatiale, il est intéressant d'analyser quels capteurs tendent aux erreurs maximales et minimales. Le Tableau 4-8 fait état des capteurs provoquant les erreurs minimales et maximales. Ces chiffres sont à remettre en perspective des tests présentant une sensibilité spatiale accrue, que ce soit en termes d'incertitude spatiale, ou de dégradation de l'erreur de la concentration moyenne par rapport au capteur 3 considéré seul. Les chiffres surlignés représentent donc, soit les tests pour lesquels l'incertitude spatiale était supérieure à celle du test de répétabilité, soit les tests présentant une dégradation significative de l'erreur en moyennant les capteurs. Parmi ces 11 tests, le capteur 5 représente l'erreur maximale dans 55% des cas, en accord avec la conclusion établie au paragraphe 4.1, quant à la position non adéquate de ce capteur. Ensuite, bien qu'éloigné de l'entrée et de l'évacuation de l'air, le capteur 4 est le capteur le plus précis dans 27% des cas, exæquo avec le capteur 3. En

revanche, il est aussi le moins précis dans 18% des cas. Ce capteur est à proximité de la gaine technique, identifiée qualitativement à l'aide d'un test à la fumée comme étant une source principale d'infiltrations. Perturbées par les infiltrations, il est cohérent que les performances de ce capteur, quant au calcul du taux de ventilation, soient variables. A contrario, le capteur 3 n'est jamais, parmi les tests sélectionnés, le capteur avec le moins bon résultat. Conjugué au fait que le calcul à partir des concentrations moyennées n'a pas permis d'améliorer les résultats par rapport au capteur 3 considéré seul, la meilleure représentativité du capteur placé l'évacuation d'air a bien été vérifiée, en accord avec les conclusions tirées de la littérature.

		DFN	FFN	CFN	DFO	DOO	DON	DFNB	DFNH
Capteur relatif à l'erreur minimum	Test 1	1	2	2	5	1	3	4	2
	Test 2	1	1	4	4	4	3	5	2
	Test 3	3	2	5	1	3	3	2	5
Capteur relatif à l'erreur maximum	Test 1	3	3	5	4	5	5	1	5
	Test 2	3	5	2	1	5	4	4	5
	Test 3	1	4	1	4	5	2	3	4

Tableau 4-8 : Capteurs tendant aux erreurs minimales et maximales

4.4 Influence de la fréquence d'acquisition

La fréquence d'acquisition suivant les différents tests pouvait varier de 1 mesure toutes les 20 secondes à 1 mesure toutes les 27 secondes, suivant le niveau de batterie des capteurs. Les tests effectués pour évaluer la répétabilité sont les tests ayant servi à évaluer l'influence de la fréquence d'acquisition, car il n'y a priori pas d'interaction entre la fréquence d'acquisition et les autres paramètres testés : le niveau moyen de débit est identique pour chaque cas. Dans ce paragraphe, six dégradations de la fréquence d'acquisition ont été testées en sélectionnant 1 points de mesure sur 3, 6, 9 12, 15, et 20 points de mesure. Le nombre de points de mesure moyen pour la fréquence d'acquisition non dégradée est de 105 points sur 2τ. La fréquence la plus dégradée tend à un nombre de points de mesure égal à 5 sur 2τ.

Le Tableau 4-9 présente la moyenne de l'erreur sur les 30 répétitions, l'écart-type et l'incertitude globale pour chaque fréquence d'acquisition. Les indicateurs présentés sont moyennés sur les 5 capteurs. On remarque que l'incertitude globale est comprise entre 6,6 et 9% sans pouvoir dégager de lien particulier avec le nombre de points de mesure disponibles. La fréquence d'acquisition ne semble donc pas impacter la justesse du filtre de Kalman.

Nb de points sur 2τ	**Moyenne [%]**	**Ecart-type [%]**	**Incertitude globale [%]**
105	4,6	6,8	8,2
35	3,9	7	8,0
17	0,7	6,6	6,6
11	-1,4	7,3	7,4
8	4,7	6,5	8,0
7	-5,1	7	8,7
5	-5	7,5	9,0

Tableau 4-9 : Influence de la fréquence d'acquisition sur l'incertitude globale

Note : τ est la constante nominale de temps

5 Discussion

Globalement, le filtre de Kalman s'est montré performant pour les différents cas. Le test de répétabilité a permis de comparer les 3 méthodes (le filtre de Kalman, la méthode 2 points lissée, et la méthode 2 points conventionnelle) sur un nombre significatif de décroissances. L'incertitude globale, comprenant l'erreur moyenne, et l'écart-type de l'erreur a permis de montrer que le lissage de la méthode 2 points ainsi que le filtre de Kalman permettaient d'augmenter la précision de la méthode classique de respectivement 3,2 et 2,3%. A ce stade, la méthode 2 points lissée se comportait donc légèrement mieux que le filtre de Kalman au niveau de l'incertitude globale. L'incertitude spatiale du filtre de Kalman était, toutefois, meilleure que celle de la méthode 2 points lissée, de 1,7 points.

L'analyse paramétrique a montré que le filtre était significativement moins sensible que les méthodes 2 points. Il a systématiquement amélioré les résultats, en termes d'écart-type et d'erreur maximale. La totalité des erreurs moyennes du filtre de Kalman était inférieure à l'incertitude globale (à 0,8% près pour le cas avec un profil de variation croissant). Les méthodes 2 points ont présenté une sensibilité supérieure vis-à-vis de l'occupation, et du niveau d'injection de CO_2. Le filtre de Kalman appliqué au cas avec occupation et porte fermée a, par exemple, permis d'améliorer l'écart-type de l'erreur sur 3 répétitions, ainsi que l'erreur maximale de respectivement 4,7 et 2,7 points par rapport à la méthode 2 points lissée. Concernant le niveau d'injection de CO_2, le filtre a réduit l'écart-type du cas avec injection basse de 8,5 points par rapport à la même méthode. Le panel de paramètres a été choisi en accord avec les incertitudes que l'application in situ pourrait apporter, notamment en termes de niveau d'injection de CO_2, ou de variabilité de la concentration de CO_2 de transit. La variabilité du CO_2 de transit était induite par l'occupation. Il faut, toutefois, noter que la variation du CO_2 de transit n'est pas forcément liée à une occupation pendant la mesure: même si les occupants quittent le logement pendant la mesure, la concentration de CO_2 ambiant du logement diminuera au cours de la mesure. La variation du CO_2 de transit qui pourrait avoir lieu aurait des chances d'être plus importante que la variation de 125 ppm sur 2τ observée durant cette expérience. Le niveau initial d'injection de CO_2 est lui aussi susceptible d'être moins bien maîtrisé en conditions in situ, avec la percussion d'une bouteille par exemple. En conclusion, la moins grande sensibilité du filtre sur ces deux paramètres justifie pleinement son intérêt en vue d'une application in situ, et donc son potentiel de fiabilisation de la méthode 2 points. Ces résultats doivent être confirmés par des variations de CO_2 de transit plus importantes, ainsi que sur un plus grand nombre de tests. Cela sera permis par la modélisation numérique réalisée dans le prochain chapitre.

La sensibilité spatiale de la méthode a d'abord été questionnée sur les tests de répétabilité. Une incertitude spatiale moyenne de 5,8% a été calculée, meilleure de 1,7 et de 4,1 points par rapport aux méthodes 2 points lissée, et 2 points conventionnelle. La méthode était alors peu sensible spatialement. Un paramètre de l'analyse, en particulier, a augmenté la sensibilité spatiale de la méthode: l'ouverture de la porte entre les deux salles. Le capteur sous l'évacuation tendait à des résultats moyens inférieurs à l'incertitude globale. En revanche, l'incertitude spatiale ainsi que l'erreur à partir de la concentration moyennée sur tous les capteurs ont été largement dégradées pour la plupart des tests avec ouverture de porte, ce qui témoigne d'une sensibilité spatiale accrue. Cela a été également vérifié en traçant les fuseaux des valeurs minimales et maximales des taux de ventilation calculés à partir des différents capteurs. Ce résultat est logique, car l'écoulement de l'air est moins bien maîtrisé. En règle

générale les capteurs non situés sur les lignes de courant probables, ainsi que ceux situés proches des infiltrations, sont sujets à être moins représentatifs que le capteur proche de l'évacuation de l'air. Le capteur proche de l'évacuation d'air a, dans la plupart des cas, inhibé l'influence des disparités spatiales engendrées par un moins bon mixage de l'air. Il est le plus représentatif car tout le CO_2 injecté va logiquement passer par ce capteur. C'est cette position de capteur qui doit être privilégiée si un seul capteur n'est disponible. Les préconisations lues dans l'état de l'art quant à la position optimale des capteurs sont donc vérifiées. L'analyse de sensibilité numérique du prochain chapitre doit confirmer cette conclusion.

La sensibilité vis-à-vis du nombre de points disponibles pendant la période de mesure a été questionnée dans le paragraphe 4.4. Cette notion est liée au rapport entre le niveau du taux de ventilation et la fréquence d'acquisition des capteurs. Aucun lien entre la dégradation des résultats et la dégradation de la fréquence d'acquisition n'a été identifié. C'est important en vue d'une application in situ dans des petits volumes dans lesquels l'air est renouvelé très rapidement, comme dans les toilettes par exemple.

Il est important d'émettre une discussion sur la sensibilité des paramètres utilisés dans le filtre de Kalman, notamment sur la matrice de covariance du bruit de processus. Concernant la concentration de transit et la concentration intérieure, il peut être vérifié graphiquement que la variance du bruit de processus leur étant associée n'est pas sous-estimée, en vérifiant que les concentrations filtrées sont bien corrélées avec les concentrations mesurées. L'analyse de sensibilité sur ces paramètres a montré qu'une surestimation des bruits de processus des concentrations n'avait pas d'influence sur le résultat. Il n'y a, a priori, pas de raisons pour que d'autres conditions remettent en question ce résultat. Concernant maintenant la variance du taux de ventilation, il convient également de ne pas trop la sous-estimer. A partir de 0,1 $Vol^2.h^{-2}$, nous avons trouvé une faible sensibilité sur la valeur de l'erreur moyenne. Augmenter la variance augmente les oscillations du calcul instantané du taux de ventilation, mais n'influe quasiment pas sur la moyenne, paramètre qui nous intéresse davantage pour la caractérisation de la performance des systèmes de ventilation naturelle. En conditions in situ, quand un débit de référence n'est pas connu, il est donc conseillé d'observer des fluctuations hautes fréquences sur le calcul du taux de ventilation instantané. Ces fluctuations prouvent que l'évolution du taux de ventilation calculé est assez rapide pour suivre le taux de ventilation réel. Il n'y a pas de risque de dégrader l'erreur moyenne en surestimant la variance du bruit de processus taux de ventilation. A l'inverse, si la variance est trop faible, l'inertie de la variation du taux de ventilation est trop importante et est caractérisée par une courbe lissée. Cette courbe lissée présente le risque de ne pas varier suffisamment vite pour suivre l'évolution du taux de ventilation réel. Le taux de ventilation peut alors être globalement sous-estimé ou surestimé. On comprend ici la très nette corrélation entre variance du bruit de processus du taux de ventilation, et capacité à suivre finement l'évolution du taux de ventilation. Celle-ci ne doit donc pas être considérée comme une évolution précise, mais plutôt comme une information subsidiaire.

6 Conclusion

L'application in situ de la méthode gaz traceur par décroissance de la concentration dans un logement pour mesurer le taux de ventilation global requiert de la réaliser simultanément dans les pièces de service. L'application in situ à coût raisonnable d'une méthode gaz traceur encourage à utiliser le CO_2 comme gaz traceur, gaz présent dans l'atmosphère et produit par les

occupants d'un logement. La mesure simultanée dans les pièces de service requiert de mesurer la concentration en CO_2 de l'air qui y pénètre. Cette mesure est donc logiquement réalisée en amont du dispositif de transfert d'air vers la pièce de service. La concentration de l'air qui peut pénétrer dans la pièce de service par les défauts d'étanchéité n'est donc pas comprise dans la mesure réalisée en amont du dispositif de transfert d'air, ce qui perturbe le calcul. Aussi, toute variation de la concentration de l'air pénétrant dans la pièce de service biaise les méthodes gaz traceur conventionnelles.

Une procédure a été mise en place pour que la mesure de la concentration de l'air qui pénètre intentionnellement dans la pièce de service tienne compte des éventuelles infiltrations qui perturberaient le calcul. La procédure a été nommée « procédure d'estimation du CO_2 de transit ». Ces infiltrations peuvent avoir lieu entre la pièce de service et les pièces mitoyennes, ainsi qu'entre la pièce de service et l'extérieur. La procédure s'est avérée robuste et a permis de réduire significativement les erreurs, notamment de plus de 150% pour certains tests. Elle a également l'avantage d'inhiber l'influence de la calibration des capteurs. Compte tenu du gain de précision qu'elle apporte, elle représente une étape nécessaire pour adapter une méthode gaz traceur utilisée avec un gaz présent dans l'atmosphère, dans un bâtiment multi-zones.

Le filtre de Kalman s'est avéré être un très bon outil pour lever les autres verrous de la méthode gaz traceur par décroissance de la concentration, vis-à-vis d'une application in situ en bâtiment multi-zones, ventilé naturellement par conduit. Il a permis de réduire la sensibilité de la méthode 2 points vis-à-vis de la variation du CO_2 pénétrant dans la pièce de service, notamment. Le bâtiment peut donc être occupé dans les pièces autres que les pièces de service. Ce point est très intéressant, car même si les occupants quittent le logement pendant la mesure, la concentration en CO_2 va diminuer, et donc impacter la méthode 2 points classique. Le filtre s'est également montré moins sensible concernant le niveau d'injection initial de CO_2. L'application in situ par percussion d'une bouteille de gaz rendrait ce niveau moins bien maitrisé, d'où l'intérêt du filtre. Le capteur situé sous l'évacuation a globalement tendu à des résultats meilleurs que la moyenne des mesures de tous les capteurs. Il a, dans la plupart des cas, inhibé l'influence d'un mixage imparfait exacerbé par l'ouverture de la porte communicante entre les deux salles par exemple. Même si ce capteur y a été moins sensible, il est conseillé de garder les portes dans leur position fermée afin de ne pas perturber le mixage de l'air. Dans ces conditions, avec un capteur placé sous l'évacuation d'air, une précision de 10% peut être attendue.

La méthode d'analyse de la décroissance de la concentration incluant le filtre de Kalman et la procédure d'estimation du CO_2 de transit a montré son important potentiel de fiabilisation en vue d'une application in situ de la méthode gaz traceur dans un logement. Nous appellerons cette méthode « méthode Kalm'Air », ce qui comprend le protocole d'injection de la méthode par décroissance de la concentration, et la méthode d'analyse par filtre de Kalman et procédure d'estimation du CO_2 de transit. Ces résultats intéressants doivent être confirmés par simulation numérique. Le protocole d'injection par décroissance de la concentration doit être modélisé afin d'effectuer une analyse de sensibilité de la méthode Kalm'Air sur un plus grand nombre de paramètres, et de conditions climatiques. Le prochain chapitre sera donc consacré à la confirmation du potentiel de fiabilisation de la méthode Kalm'Air développée dans ce chapitre, à l'aide d'une analyse de sensibilité numérique.

Chapitre 5 Analyse de sensibilité numérique de la méthode Kalm'Air

Modélisation de la méthode Kalm'Air

Analyse de sensibilité

1 Introduction

Le chapitre précédent a permis d'apprécier le potentiel de fiabilisation que pouvait offrir la méthode Kalm'Air par rapport à la méthode par décroissance de la concentration conventionnelle. La méthode Kalm'Air a été définie dans la conclusion du chapitre 4, et inclue le protocole d'injection du gaz et de mesure, associé à l'analyse par le filtre de Kalman et la procédure d'estimation du CO_2 de transit. Il a notamment été démontré que le filtre de Kalman permet de réduire la sensibilité de la méthode 2 points, notamment vis-à-vis de l'occupation dans la pièce de vie. L'objectif de ce chapitre est de confirmer ce potentiel en testant numériquement la sensibilité de la méthode Kalm'Air. Les conclusions de l'analyse paramétrique du dernier chapitre vont donc être vérifiées, et complétées. L'analyse de sensibilité qui va être réalisée permettra de définir une formulation de l'incertitude de la méthode Kalm'Air. Cela sera également l'occasion de vérifier que le filtre de Kalman permet effectivement de réduire l'incertitude de la méthode par décroissance de la concentration 2 points (pour laquelle la procédure d'estimation du CO_2 de transit sera également réalisée), ainsi que sa sensibilité.

Dans un premier temps, les équations du modèle numérique permettant la réalisation de l'analyse de sensibilité sont décrites. Le choix du modèle s'est porté sur un modèle à discrétisation zonale en code en pression. La cellule expérimentale utilisée dans les chapitres précédents est adaptée pour être ventilée naturellement par conduits, et on utilisera, à présent, la dénomination NATCELL. La cellule NATCELL est modélisée à l'aide du modèle en code en pression. L'injection du gaz est également modélisée. Ce modèle est validé sur la base d'une comparaison avec les données expérimentales incluant la mesure du débit extrait par anémomètre, ainsi que les mesures des concentrations. Une fois validé, le modèle est utilisé pour procéder à l'analyse de sensibilité, dont la conclusion sera la formulation de l'incertitude du filtre de Kalman. L'analyse de sensibilité est réalisée à l'aide d'un plan factoriel d'expérience complet, impliquant six paramètres à deux niveaux.

2 Présentation du code en pression

2.1Modèle aéraulique

2.1.1 Choix du modèle

Le choix du modèle s'est tourné vers le modèle HYBCELL, développé dans les travaux de thèse de Mohamed El Mankibi [101]. C'est un modèle à discrétisation zonale en code en pression. Il a été confronté numériquement aux modèles COMIS [102], AIOLOS [103]. Il a été validé expérimentalement en utilisant les expérimentations menées sur la cellule expérimentale HYBCELL de l'ENTPE. L'écart-moyen pendant ces tests a été de 0,3 $Vol.h^{-1}$. Or, les écarts les plus importants (1 $vol.h^{-1}$) ont été obtenus pour les simulations avec une fenêtre ouverte couplée à un vent de forte intensité. Ces conditions de validation sont plus contraignantes que celles de l'expérience qui va être menée dans ce chapitre, car le système de ventilation est ici un système de ventilation naturelle par conduit, ne comportant donc pas de fenêtre ouverte, et où l'impact du vent est moins important. Les résultats du modèle HYBCELL ont également été confrontés à des données expérimentales récoltées dans un prototype de cheminée solaire à échelle réelle, avec des matériaux à changement de phase incorporés à la paroi [104]. L'erreur moyenne du taux de ventilation en fonction de la densité de matériaux à changement de phase, était de 3,5% avec une erreur maximale sur une des densités à 13,3%.

La modélisation par discrétisation zonale en code en pression est intéressante en vue d'une analyse de sensibilité. Elle offre des temps de calculs significativement réduits par rapport à une modélisation CFD, tout en permettant de discrétiser spatialement une pièce pour enrichir le panel de résultats. Ce maillage grossier est pratique pour évaluer la précision d'une méthode gaz traceur car une zone du maillage peut directement être assimilée à une zone couverte par un capteur de concentration du gaz traceur. Il peut toutefois s'avérer trop grossier pour rendre compte de manière fiable de la distribution de l'air au sein de la cellule expérimentale. L'impact d'un mixage imparfait de l'air, identifié dans la littérature comme une source majeure d'incertitude sur les méthodes gaz traceur [80], [83] sera donc traité autrement dans ce chapitre (cf. paragraphe 5.2.3.3). De plus, l'inconvénient des modèles zonaux réside souvent dans la prise en compte du vent, à cause de l'utilisation de coefficients de pression standardisés, et de moyennes temporelles des paramètres liés au vent [25], [26]. Or, dans l'étude présentée ici, une attention particulière est portée sur les coefficients de pression (cf. paragraphe 4.2.2). Aussi, les paramètres liés au vent ne sont pas moyennés.

La modélisation par discrétisation zonale en code en pression apparaît donc tout à fait adaptée à l'objet de ce chapitre. Plus précisément, le modèle HYBCELL a été développé sur l'environnement Matlab/Simulink qui offre une flexibilité importante sur les données d'entrées, et de sorties. Le niveau de paramétrage offert par cet environnement est remarquable. L'outil de traitement du signal filtre de Kalman testé dans le chapitre précédent est directement intégré dans l'environnement ce qui facilite grandement l'analyse.

2.1.2 Principe du code en pression

Le principe général de la modélisation aéraulique de code en pression repose sur un réseau de zones idéalisées connectées entre elles par des lois caractéristiques des composants aérauliques. Les paramètres d'états dans chaque zone sont supposés homogènes. Les pressions représentent les nœuds du réseau et les ouvertures représentent les résistances, comme présenté en Figure 5-1. Le modèle permet alors de calculer les débits entre chaque zone, ainsi que les débits échangés entre une zone et l'extérieur. Les débits sont calculés à l'aide des équations de conservation de la masse combinées aux équations de Bernoulli. Les conditions aux limites sont les paramètres climatiques comme le vent, la direction du vent, ou la température extérieure. Chaque composant est caractérisé par une loi débit/pression de la forme ci-dessous [105], [106]:

$$Q = C_Q \,.\, (\Delta P)^n \tag{5.1}$$

Avec :

- C_Q un coefficient qui caractérise la résistance de l'ouverture [-];
- n un coefficient décrivant la nature du flux aéraulique. Il vaut 1 pour un flux laminaire et 0,5 pour un flux turbulent.

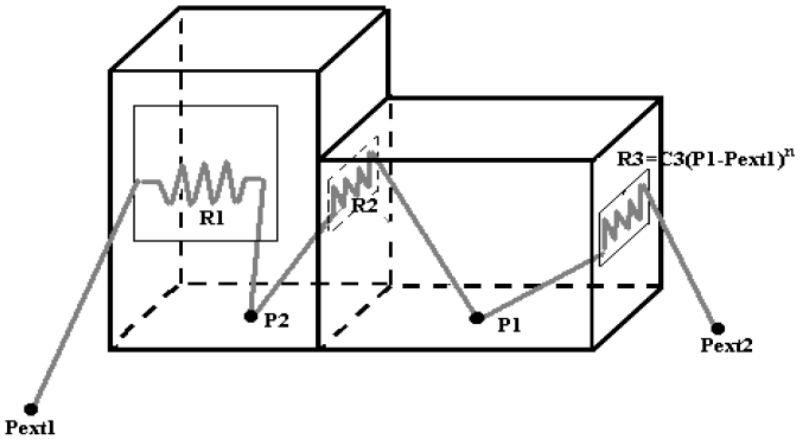


Figure 5-1 : Principe d'un code en pression, [101]

Les différentiels de pression entre chaque zone sont calculés par les équations de Bernoulli (équation 5.2). Les densités sont calculées à l'aide de la distribution des températures, en appliquant l'approximation de Boussinesq (équation 5.3):

$$\Delta P_{1,2} = P_1 - P_2 - (\rho_1 - \rho_2) g z - P_w \quad (5.2)$$

$$\rho_i = \rho_0 \frac{T_0}{T_0 + T_i} \quad (5.3)$$

Avec :

- P la pression [Pa] ;
- ρ la masse volumique [kg.m^{-3}] ;
- g l'accélération de la pesanteur [m.s^{-2}] ;
- z la hauteur [m] ;
- P_w la pression dynamique [Pa] ;
- T la température [°C].

2.1.3 Loi débit/pression à travers les petites ouvertures

Dans les logements ventilés naturellement par conduits, les lois débit/pression vont caractériser: les bouches d'entrée d'air, les bouches d'extraction, les composants aérauliques de transfert d'air (détalonnage des portes ou grilles de transit), le conduit shunt, l'extracteur statique, ainsi que les infiltrations. Les lois sont catégorisées en trois sous-groupes suivant la nature du composant aéraulique [105], [106] :

- la loi **orifice** qui caractérise les bouches d'entrées d'air, les bouches d'extraction, les infiltrations, le détalonnage des portes (équation 5.4). A noter que les infiltrations peuvent être caractérisées autrement, en considérant une longueur et une largeur de fissure [101]. La loi orifice a été préférée pour sa simplicité d'utilisation conjointe avec la surface équivalente de fuite (ELA) décrite dans la norme ISO 9972 [107] ;

$$Q = A_{eff} \,.\, Cd * \sqrt{\frac{2\,|\Delta P|}{\rho}} \tag{5.4}$$

- la loi caractérisant les **pertes dynamiques** qui sont dues à des points singuliers dans un conduit (équation 5.5). Les points singuliers peuvent être: un coude, la jonction d'un conduit individuel avec le collecteur commun d'un conduit shunt, un T etc. L'extracteur va également induire une perte dynamique, dont la valeur est mentionnée dans les avis techniques. L'ouvrage Handbook of Fundamentals de l'ASHRAE propose des valeurs standardisées pour les coefficients de pertes de charge dynamiques (ξ) ;

$$Q = A_{eff} \,.\, \xi * \sqrt{\frac{2\,|\Delta P|}{\rho}} \tag{5.5}$$

- la loi caractérisant les **pertes de charge linéiques**, qui sont les pertes de charge par friction à l'intérieur du conduit (équation 5.6). Cette loi dépend du coefficient de friction (f) dont la valeur peut être comprise entre 0,01 et 0,05 en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement dans le conduit. Une valeur intermédiaire de 0,03 proposée par Axley [105] a été choisie pour la présente étude.

$$Q = A_{eff} \cdot \sqrt{\frac{D_h}{f \,.\, L}} \sqrt{\frac{2 \,.\, |\Delta P|}{\rho}} \tag{5.6}$$

Les équations 5.4 à 5.6 ci-dessus font intervenir les termes suivants :

- Cd le coefficient de décharge [-] ;
- ξ le coefficient de pertes de charge dynamique [-] ;
- A_{eff} la surface effective [m²] ;
- D_h le diamètre hydraulique [m] ;
- f le coefficient de friction [-].
- L la longueur caractéristique [m].

2.1.4 Loi débit/pression à travers les grandes ouvertures

Les grandes ouvertures sont plus difficiles à prendre en compte car le flux à travers l'ouverture peut être multidirectionnel. Elles peuvent se référer à une porte ou une fenêtre ouverte. Il a été mentionné dans le paragraphe 2.1.1 que la modélisation zonale en code en pression pouvait permettre de discrétiser une pièce en plusieurs sous-zones. Il convient alors de définir des parois fictives. Ces parois sont également régies par une loi grande ouverture. Seules les grandes ouvertures verticales sont traitées ici car toutes les ouvertures du modèle de NATCELL qui sera présenté au paragraphe 4.1 seront verticales.

La loi grande ouverture caractérisera ici uniquement les échanges à travers les parois fictives des sous-zones. Feustel et al. [102] proposent deux solutions pour traiter les grandes ouvertures:

- assimiler la grande ouverture à plusieurs petites ouvertures caractérisées par la formule décrivant le flux traversant un orifice (équation 5.4). Le flux est monodirectionnel dans chaque petite ouverture ;

- intégrer un débit élémentaire dq décrit en équation 5.7 entre deux hauteurs.

La deuxième méthode est plus rapide, mais induit une plus grande complexité d'intégration dans le modèle, car le flux d'une même ouverture peut être multidirectionnel [102]. C'est la méthode qui est choisie ici. Elle a été premièrement décrite par Brown et Solvason [108]. On considère le débit élémentaire traversant un élément de surface vertical W.dz :

$$dq = V(z) \,.\, W \,.\, dz \tag{5.7}$$

Avec :

- *dq* le débit élémentaire [$m^3.h^{-1}$] ;
- *V(z)* la vitesse à une hauteur z [$m.h^{-1}$] ;
- *W* la largeur de l'ouverture [m] ;
- *dz* la hauteur élémentaire [m].

L'équation de Bernoulli se traduit par :

$$V(z) = C_d \,.\, \sqrt{\frac{2\,.\Delta P}{\rho}} \tag{5.8}$$

En combinant les deux équations, on obtient :

$$Q = \; C_d \,.\, W \,.\, \int_0^H \sqrt{2\,.\frac{\Delta P}{\rho}} \,.\, dz \tag{5.9}$$

Avec :

- H la hauteur de l'ouverture [m].

Ce débit est monodirectionnel. Or si le plan neutre Zn se trouve à une hauteur comprise dans l'ouverture, comme indiqué sur la Figure 5-2, le flux sera bidirectionnel. On calcule donc la hauteur du plan neutre pour séparer les flux de sens opposés :

$$Z_n = \frac{\Delta P_0}{g\,.\,(\rho_i - \rho_j)} \tag{5.10}$$

On peut ensuite calculer les deux débits de part et d'autre du plan neutre :

$$Q_{inf} = \; C_d \,.\, W \,.\, \int_0^{Z_n} \sqrt{2\,.\frac{\Delta P}{\rho}} \,.\, dz \tag{5.11}$$

$$Q_{sup} = \; C_d \,.\, W \,.\, \int_{Z_n}^H \sqrt{2\,.\frac{\Delta P}{\rho}} \,.\, dz \tag{5.12}$$

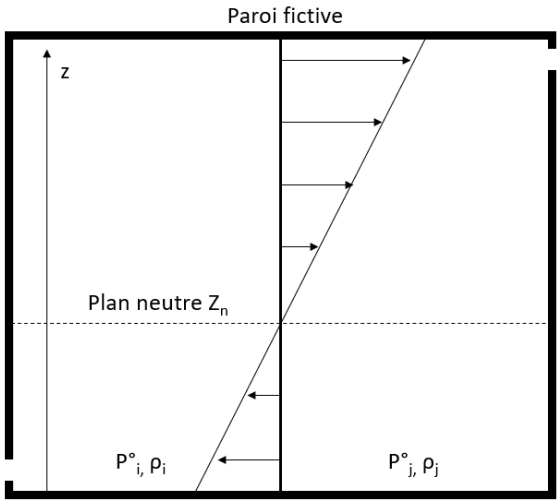


Figure 5-2 : Position du plan neutre pour une grande ouverture

2.1.5 Résolution mathématique

Les nœuds de pression définissent les zones du modèle. Pour chaque zone i comportant p ouvertures, l'équation de conservation de la masse se traduit sous la forme suivante :

$$\sum_{k=1}^{p} \rho_i \, . \, Q_{ik} \; = 0 \tag{5.13}$$

Avec :

- ρ_i la masse volumique de la zone i [kg.m^{-3}] ;
- Q_{ik} le débit de la zone traversant l'ouverture k de la zone i [m^3.s^{-1}].

Cette équation est appliquée à toutes les zones, ce qui forme un système d'équations non linéaires. La résolution de ce système se fait grâce à la méthode itérative de Newton-Raphson. La méthode requiert une initialisation des pressions pour chaque zone. Chaque itération va venir corriger la valeur des pressions pour résoudre le système d'équations induit par l'équation 5.13, en minimisant son résidu. La pression à l'itération u+1, est donc corrigée comme suit :

$$\boldsymbol{P_{u+1} = P_u + X_u} \tag{5.14}$$

Avec :

- $\mathbf{P_{u+1}}$ le vecteur des pressions à l'itération u+1 [Pa] ;
- $\mathbf{P_u}$ le vecteur des pressions à l'itération u [Pa] ;
- $\mathbf{X_u}$ le vecteur de correction du vecteur des pressions à l'itération u [Pa].

Le vecteur **X** est obtenu à l'aide du vecteur **F** des résidus du système d'équation induit par l'équation 5.13, et de la matrice J qui est la Jacobienne du vecteur **F** en fonction des pressions de chaque zone :

$$\boldsymbol{F = J \, . \, X} \tag{5.15}$$

Un coefficient de relaxation est introduit pour alléger les calculs :

$$Relax = \frac{1}{1 - \frac{X_u}{X_{u+1}}} \tag{5.16}$$

2.2 Modèle de transfert de polluants

Le modèle de transfert de polluants provient directement de l'équation de bilan de masse utilisée également par les méthodes gaz traceur pour calculer le taux de ventilation. En plus de l'équation déjà mentionnée plusieurs fois dans le manuscrit, on va retrouver dans l'expression la notion d'efficacité de filtration de l'ouverture $\eta_{i,j,k}$, et de réactivité du polluant $K_{r\,im}$:

$$\frac{d(V_i\,.\,C_{i,m})}{dt} = \sum_{j=0}^{P}\left[\sum_{k=1}^{P_{i,j}}\left(Q_{i,j,k}\,.\,\left(1-\eta_{i,j,k}\right).C_{i,m}\right)\right] - \sum_{j=0}^{P}\left[\sum_{k=1}^{P_{i,j}}\left(Q_{i,j,k}\,.C_{i,m} + K_{r\,im}.C_{i,m}\right)\right] + S_{i,m} \qquad (5.17)$$

Avec :

- $Q_{i,j,k}$ le débit volumique de la zone entre la zone i et j à travers l'ouverture k [$m^3.s^{-1}$] ;
- $\eta_{i,j,k}$ l'efficacité de filtration de l'ouverture k entre la zone i et la zone j [-] ;
- Kr_i la réactivité du gaz i [-] ;
- $S_{i,m}$ le débit de production du gaz m dans la zone i [$m^3.s^{-1}$].

Le gaz traceur ne doit pas être réactif ce qui explique que ce terme n'ait pas été introduit précédemment (c'est le cas du dioxyde de carbone). Les bouches d'entrées d'air utilisées ne comportent pas de filtre. On retrouve donc bien l'expression décrite précédemment dans la thèse dans le cas de plusieurs zones i et j séparées par les ouvertures k.

2.3 Couplage des modèles & conditions aux limites

La Figure 5-3 présente un schéma du couplage des modèles aéraulique et de transfert de polluants définis précédemment. Les modèles sont couplés par la procédure Ping Pong [101]. Elle consiste à attendre la convergence du modèle aéraulique avant d'envoyer les sorties du modèle aéraulique aux entrées du modèle de transfert de polluant. La convergence du modèle de transfert de polluants est, ensuite, attendue avant de passer au pas de temps suivant. Les sorties du modèle aéraulique qui transitent vers le modèle de transfert de polluants sont, notamment, les débits d'air.

Les conditions aux limites des modèles ainsi couplés comprennent les données mesurées par la station météorologique (vitesse, direction du vent, température extérieure, et concentration extérieure), la configuration de la cellule expérimentale ou du bâtiment, ainsi que les scenarios d'injection du gaz. La distribution de la température de chaque zone constitue également une condition aux limites qui permet de ne pas perturber la validation du modèle aéraulique par une incertitude de modélisation sur les températures.

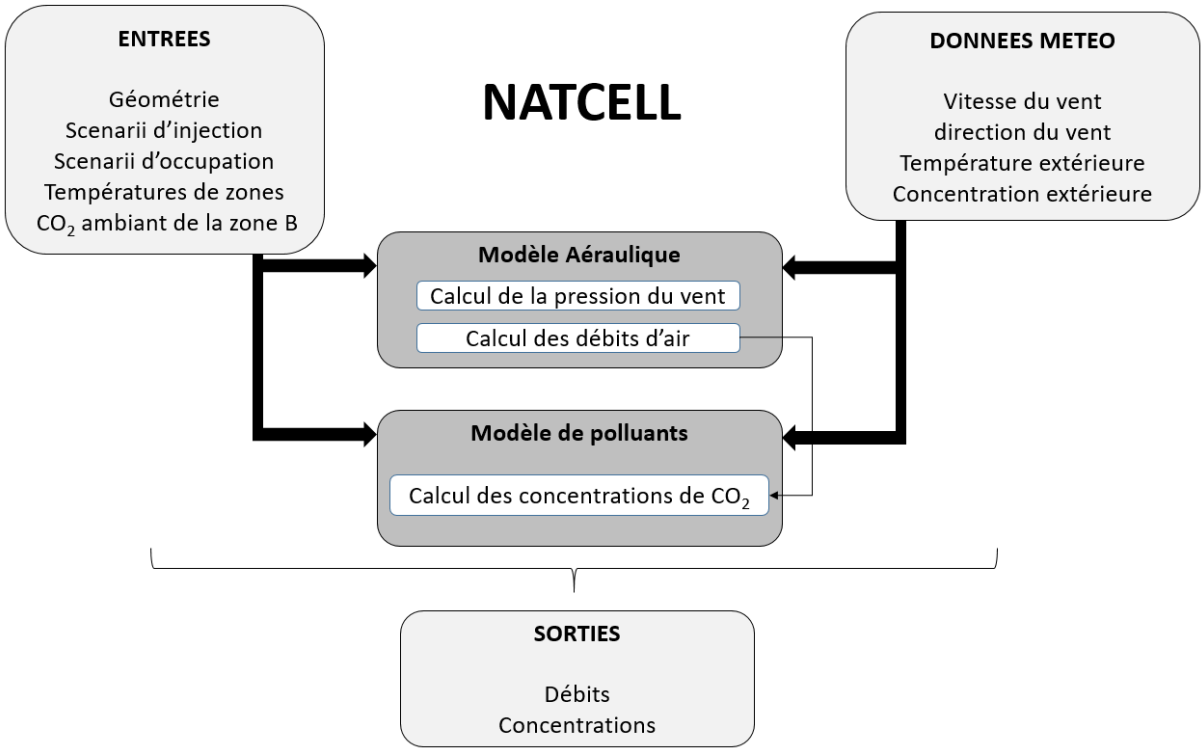


Figure 5-3 : Couplage du modèle aéraulique avec le modèle de polluants

3 Présentation du dispositif expérimental de validation du modèle

3.1 Adaptation expérimentale de HYBCELL

A la différence des deux chapitres précédents, la cellule HYBCELL a été réaménagée et adaptée à un système de ventilation naturelle par conduit. Dans la suite de ce mémoire, nous utiliserons l'appellation NATCELL pour faire référence à cette cellule adaptée. Le système de ventilation mécanique a été obturé. Un conduit isolé s'élevant à 3 mètres au-dessus de l'entrée d'air a été installé depuis la fenêtre. La Figure 5-4 et la Figure 5-5 montrent l'installation du conduit d'extraction. Sur la Figure 5-5 sont identifiés la bouche d'entrée d'air, l'extracteur statique, ainsi que le conduit de ventilation.

Une station météorologique a été installée à 1m au-dessus du toit de la cellule. Celle-ci mesure la vitesse et la direction du vent par des capteurs ultrasoniques, la température de l'air, l'humidité de l'air et les rayonnements courtes longueurs d'ondes. Les caractéristiques techniques des capteurs sont décrites dans le Tableau 5-1, ainsi qu'en annexe 5.1.

Un anémomètre à fil chaud a été placé dans le conduit d'extraction à 1m du début de conduit. Celui-ci permet d'estimer le débit d'air dans le conduit, mesure nécessaire pour tester le modèle.

Hormis ces aménagements, le montage expérimental de la cellule est sensiblement identique à celui du chapitre 4. La cellule B comporte les bouches d'entrée d'air sur la fenêtre (Cf. Figure 5-4). La cellule A est toujours la cellule d'où l'air est extrait. Un radiateur est disposé dans chaque cellule. Ceux-ci sont régulés à l'aide d'un régulateur PID afin de maintenir une température ou un différentiel de température de consigne. La température de consigne est

identique pour les deux cellules, et variera selon les séquences de mesure (cf. paragraphe 3.2). Un capteur CO_2 est toujours placé en amont du flux d'air par rapport à la cellule A, et cinq capteurs sont placés de manière identique par rapport au chapitre 4 dans la cellule A. Ces capteurs mesurent également les températures, qui serviront de données d'entrées pour le modèle aéraulique (Cf. paragraphe 2.3). La Figure 5-6 montre le schéma du montage expérimental.



Figure 5-4 : Mise en place du conduit de ventilation naturelle



Figure 5-5 : Façade extérieure de la Cellule NATCELL, avec le conduit d'extraction

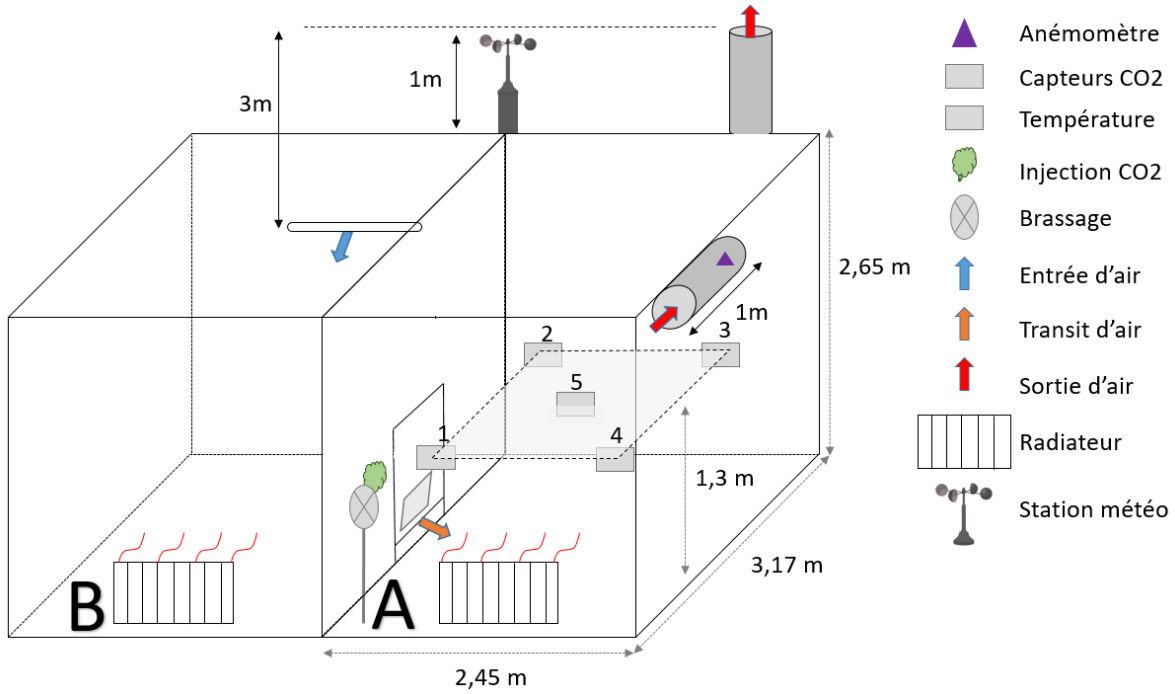


Figure 5-6 : Schéma de l'instrumentation de NATCELL

	Technologie	Plage de mesure	Précision	Dérive
C2AI HD35ED *CO2 intérieur*	NDIR	0 – 5000 ppm	50 ppm + 3% de la lecture	5% par 5 ans
C2AI HD35ED *Température intérieure*	Pt100	-40 - +105 °C	0,2°C	0,05°C par an
Vaisala GMP252 *CO2 extérieur*	NDIR	0 – 10000 ppm	4%	+/- 60 ppm par an
C2AI HD52.3D *Vitesse du vent*	Ultrason	0 – 60 m/s	0-2% de la lecture	-
C2AI HD52.3D *Direction du vent*	Ultrason	0 – 360 °	+-2°	-
C2AI HD52.3D *Température extérieure*	Pt100	-40 - +60 °C	0,15°C + - 0,1% de la lecture	-
HD403TS *Vitesse air conduit*	Fil chaud	0,1 – 5 m/s	+-0,2 m/s + 3% de la lecture	-

Tableau 5-1 : Caractéristiques de l'instrumentation

3.2 Protocole expérimental

Le protocole expérimental inclue six séquences de mesure, dont quatre de trois jours et demie, et deux de trois jours. Quatre scenarii de température ont été imposés sur ces six séquences. Le Tableau 5-2 présente les consignes de température imposées associées aux six séquences, les dates correspondants au début de chaque séquence, et leur durée. Deux séquences relatives à un différentiel fixe de 20°C (S1_2) et 10°C (S2_1) entre la température intérieure et extérieure ont été utilisées dans la phase de calibrage du modèle. L'objectif de ce différentiel

fixe est d'isoler l'effet du vent, censé être plus critique pour la modélisation que l'effet du tirage thermique. Ensuite le modèle a été testé sur quatre autres séquences dont deux soumises aux mêmes scenarii que les séquences utilisées pour la calibration (S1_2, S2_2), une soumise à une température intérieure fixe de 20°C (S3), et une dernière soumise à une évolution libre (S4). Deux injections de CO_2 par jour sont réalisées. Ces injections sont également recréées dans le modèle, ce qui permet de tester la fiabilité de la simulation de la méthode Kalm'Air.

Séquence	**S1_1**	**S1_2**	**S2_1**	**S2_2**	**S3**	**S4**
Température imposée	ΔT = 20°C	ΔT = 20°C	ΔT = 10°C	ΔT = 10°C	Tin = 20°C	Evolution libre
Début de la séquence [jj/mm/aa]	04/02/20	07/02/20	27/02/20	30/02/20	02/03/20	05/03/20
Durée [j]	3,5	3,5	3	3	3,5	3,5
Calibration/Validation	Calib.	Valid.	Calib.	Valid.	Valid.	Valid.

Tableau 5-2: Protocole expérimental

3.3 Données climatiques

La Figure 5-7 présente les roses des vents, et la Figure 5-8 présente l'évolution des températures intérieures et extérieures pour les six séquences. Concernant les roses des vents, on remarque que la direction du vent est similaire pour les six séquences. L'orientation de la cellule, représentée par une flèche, est de 72°C au Nord-Est. On remarque également que le vent est majoritairement latéral par rapport à la façade. C'est une donnée cohérente car le bâtiment de l'ENTPE se trouve derrière NATCELL et s'élève à près de 4 mètres au-dessus du toit de la cellule, ce qui réduit considérablement la probabilité que le vent frappe NATCELL de face. La séquence S2_2 a conduit aux vents dont l'intensité moyenne était la plus grande, avec une majeure partie des vents supérieure à 2 $m.s^{-1}$. Ensuite, les séquences S1_2 et S2_2 ont une répartition similaire de la vitesse des vents, avec quelques rafales entre 2 et 4 $m.s^{-1}$. Pour les trois séquences en question, les vents supérieurs à 3 $m.s^{-1}$ provenaient systématiquement d'une orientation de 150° par rapport au Nord, parallèlement à la façade de la cellule. Pour les autres séquences, la vitesse du vent était quasi-systématiquement inférieure à 2 $m.s^{-1}$.

Concernant maintenant l'évolution de la température, on remarque que les quatre séquences S1_1, S1_2, S2_1, S2_2 tendent effectivement au différentiel de température attendu, ce qui montre que le régulateur PID était fiable. La séquence S3 engendre un écart maximal de 18°C et un écart minimal de 0°C. Les fluctuations du différentiel de température sont donc importantes, et l'écart moyen de température vaut 9,6°C. Pour la séquence S4, la température intérieure a diminué jusque 15°C en 1 jour. L'écart minimal de température vaut 2°C, et l'écart moyen vaut 6,8°C.

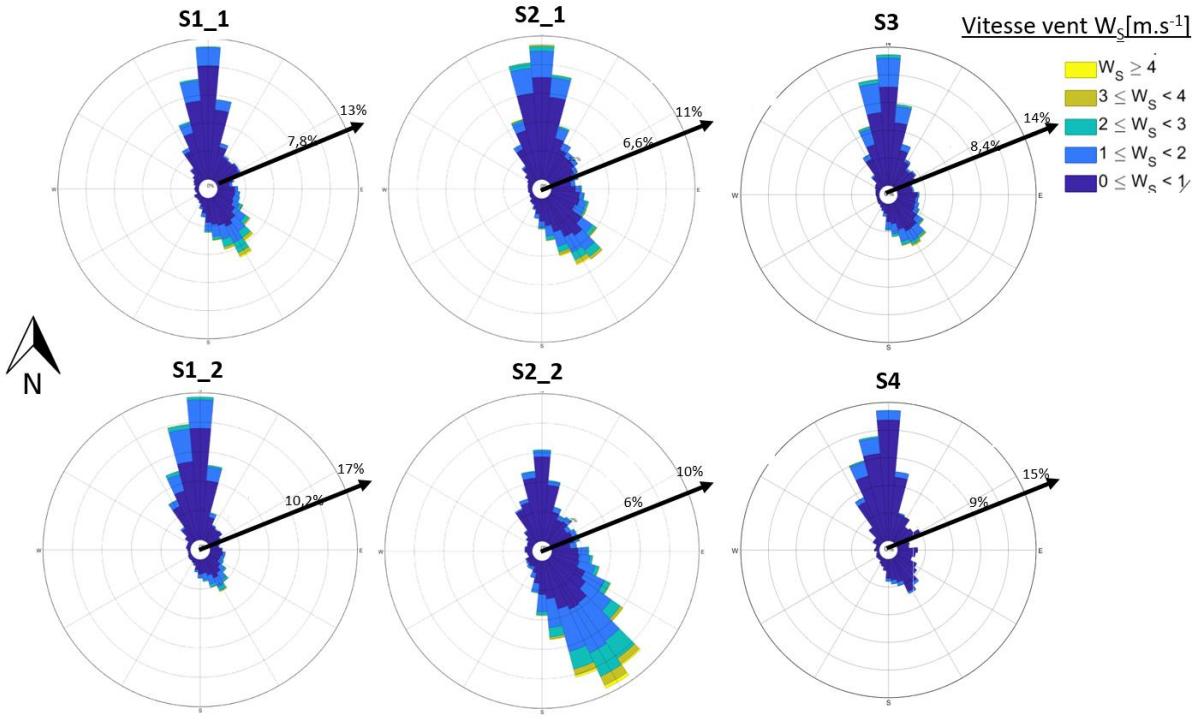


Figure 5-7 : Rose des vents pour les six séquences de tests

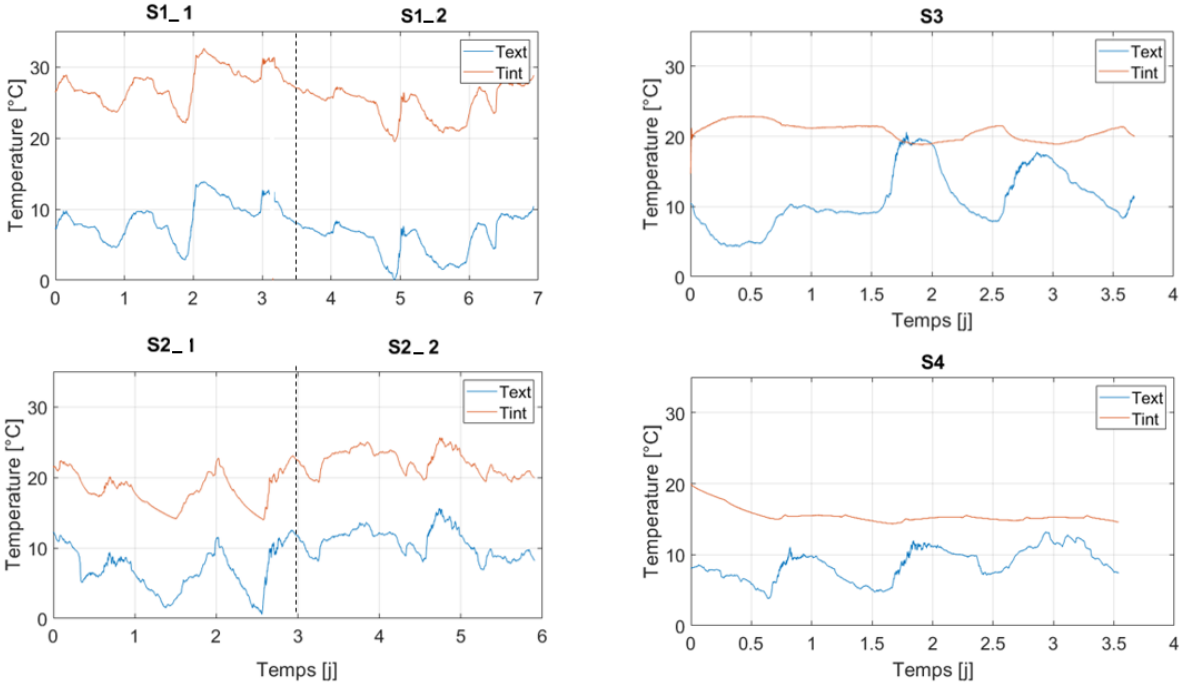


Figure 5-8 : Evolution de la température pour les six séquences

4 Modélisation de NATCELL

4.1Configuration et liens aérauliques

La Figure 5-9 présente la configuration de la modélisation de la cellule expérimentale. La disposition des capteurs est identique aux chapitres précédents. La cellule A est donc discrétisée en quatre zones de volumes équivalents répartis dans un plan horizontal, afin de correspondre à l'emplacement des capteurs. Comme les capteurs sont disposés dans un même plan horizontal pour inhiber l'influence de la plus grande densité du CO_2 par rapport à l'air, et que les températures sont des données d'entrées, la cellule A n'est pas discrétisée verticalement. Les liens aérauliques retenus pour caractériser chaque composant sont récapitulés en Figure 5-9. On retrouve l'intégralité des liens aérauliques définis dans les paragraphes 2.1.3 et 2.1.4.

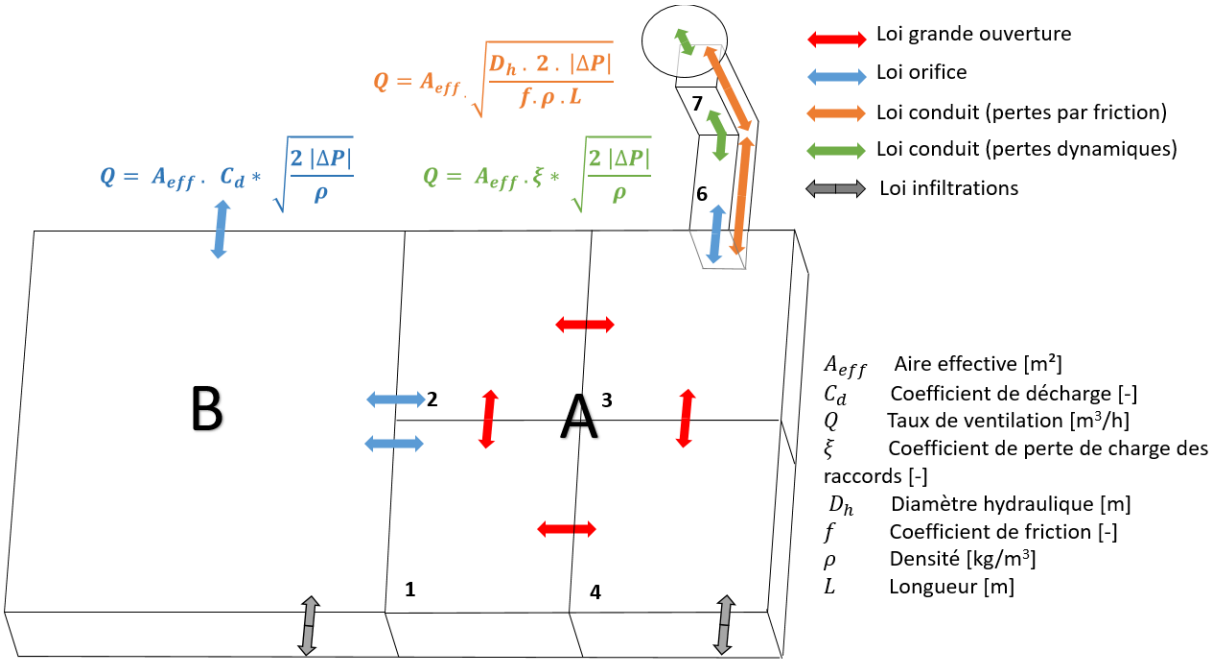


Figure 5-9 : Schéma du zonage et des liens aérauliques de la cellule NATCELL

4.2 Calibration de la modélisation aéraulique de NATCELL

4.2.1 Pertes de charges

Les coefficients de pertes de charge utilisés sont donnés dans le Tableau 5-3.

Lien aéraulique	Coefficient de perte de charge	Référence
Entrée d'air	Cd = 0,7	Ventilation des bâtiments, CSTB [109]
Transit	Cd = 0,8	Non sourcé
Grande ouverture	Cd = 0,6	Thèse de Mohamed El Mankibi [101]
Entrée conduit	Cd = 0,7	ASHRAE Handbook of fundamentals
Coude conduit	ξ = 0,7	ASHRAE Handbook of fundamentals
Extracteur statique	ξ = 0,9	Extracteur artisanal non documenté
Infiltrations	Cd = 1	Car la surface utilisée est déjà la surface effective au sens de la norme ISO 9972 [107]

Tableau 5-3 : Coefficient de pertes de charge

4.2.2 Coefficient de pression

4.2.2.1 Contexte

Les coefficients de pression sont identifiés comme étant la principale source d'incertitude des modèles aérauliques autres que les modèles CFD [110]. Ils représentent une source d'incertitude importante car ils dépendent d'un grand nombre de paramètres comme : la géométrie du bâtiment, les particularités de la façade (balcon, occultations…), la position sur la façade, les obstacles environnants, la direction du vent, et l'intensité des turbulences. Ils sont directement liés à l'action du vent par la formule suivante :

$$C_p = \frac{P_x - P^\circ}{P_{vent}} = \frac{P_x - P^\circ}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (5.18)$$

Avec :

- *Cp* le coefficient de pression [-] ;
- *Px* la pression statique [Pa] ;
- *V* est la vitesse du [m.s^{-1}] ;
- *P°* la pression de référence [Pa] ;
- P_{vent} la pression du vent [Pa].

Feustel et al. [102] proposent quatre méthodes pour déterminer les coefficients de pression :

i. mesures à échelle réelle ;
ii. mesures à échelle réduite en soufflerie ;
iii. modélisations numériques par CFD ;
iv. modélisations analytiques (base de données) à partir de résultats en soufflerie.

Costola et al. [110] ont réalisé un état des lieux des connaissances sur les coefficients de pression et ils classent ces quatre méthodes en deux types : les sources primaires (mesures à échelle réelle (i.), à échelle réduite (ii.) et modélisation CFD (iii.)) et les sources secondaires qui représentent des bases de données constituées à partir des sources primaires (iv.). Ils procèdent ensuite à une analyse comparative des différentes sources. Parmi les sources

principales, bien que coûteuse, l'expérimentation en soufflerie est la plus pratique à mettre en place parce que le vent y est maîtrisé. Les fluctuations hautes fréquences de la direction du vent peuvent impacter considérablement les résultats en cas de mesure sur bâtiment réel [100]. Les bases de données sont intéressantes si les façades du bâtiment étudié sont planes, et sans trop de disparités. Elles sont souvent développées à partir de résultats en soufflerie. Costola et al. [110] ont identifié trois bases de données : celle de l'AIVC [95], celle de l'ASHRAE et, plus récemment celle développée par les japonais de l'université TPU [111]. Cette dernière est la plus aboutie car elle donne la distribution surfacique des coefficients de pression pour les murs et les toits, sur une discrétisation de l'angle d'incidence du vent plus importante que celles de l'AIVC et de l'ASHRAE (tous les 15° contre tous les 45° pour l'AIVC et l'ASHRAE).

Pour la calibration de la modélisation aéraulique de NATCELL, le coefficient exercé sur l'entrée d'air est déterminé à l'aide de la base de données TPU. Celui exercé sur l'extracteur statique est mesuré en soufflerie car il n'est pas répertorié dans les bases de données.

4.2.2.2 *Coefficient de pression exercé sur l'entrée d'air*

Pour déterminer le coefficient de pression exercé sur l'entrée d'air, la base de données japonaise TPU a été utilisée, car elle a été jugée plus aboutie que les données de l'AIVC par Costola et al. [110]. Les données sont en accès libre sur internet.

Nous avons dû estimer grossièrement le rapport entre la largeur et la hauteur de la cellule dans le processus de récupération des données. Le rapport le plus fidèle était de considérer que la hauteur de la cellule était deux fois plus petite que sa largeur (en réalité, elle est 1,85 fois plus petite). Nous nous sommes intéressés au coefficient de pression localisé au niveau de l'ouverture (entrée d'air) de la zone B de la cellule NATCELL. La Figure 5-10 montre la représentation de la face avant de la cellule NATCELL utilisée pour récupérer les données dans la base de données.

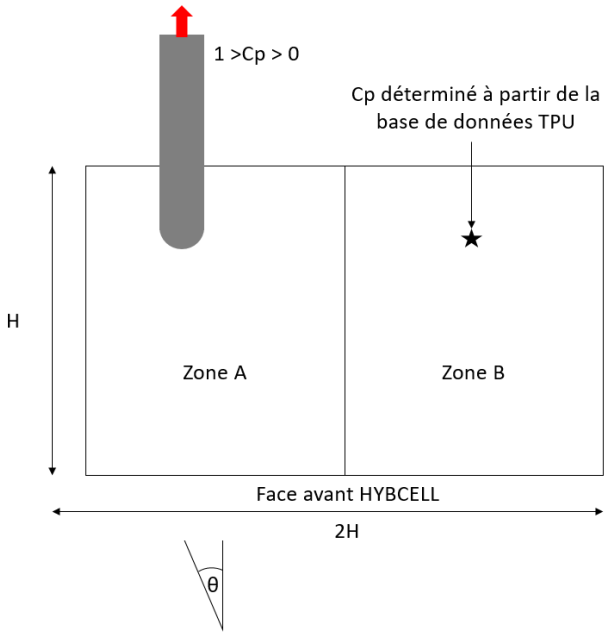


Figure 5-10 : Représentation de la face avant de la cellule NATCELL

La Figure 5-11 donne l'évolution du coefficient de pression Cp en fonction de l'angle d'incidence du vent, obtenue à l'aide de la base de données TPU :

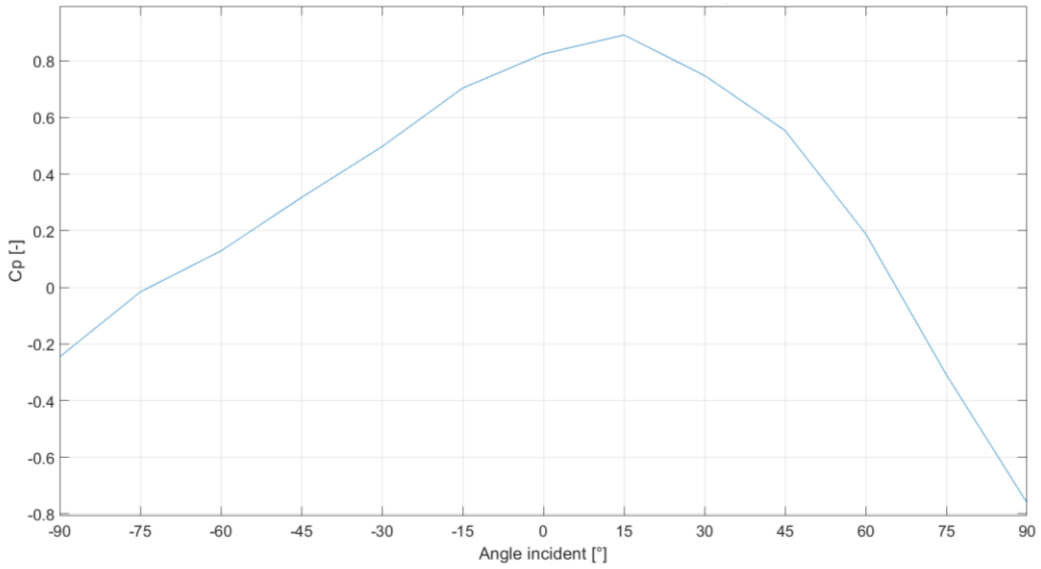


Figure 5-11 : Evolution des Cp par rapport à l'angle d'incidence du vent

La cellule expérimentale se trouve en environnement semi-protégé par rapport à la façade extérieure et elle est de faible hauteur. Par ailleurs, la cellule est partiellement logée dans le bâtiment de l'ENTPE qui présente une hauteur beaucoup plus importante. De plus, la façade avant d'Hybcell présente des masques triangulaires, comme on peut le distinguer en Figure 5-5. Ces trois éléments perturbent la valeur du coefficient de pression, et cette configuration réelle ne peut pas être décrite par la base de données utilisée. Nous gardons donc la cohérence de l'ordre de grandeur du coefficient de pression obtenu grâce à la base de données. En revanche, la phase de calibration a amené à augmenter légèrement sa valeur. La photographie grand angle présentée en Figure 5-12 nous montre les coefficients Cp retenus en fonction de l'incidence du vent. A partir de l'incidence de 60° en valeur absolue, la valeur du coefficient de pression a notamment été fixée à 0 en raison des masques triangulaires visibles sur la Figure 5-12.

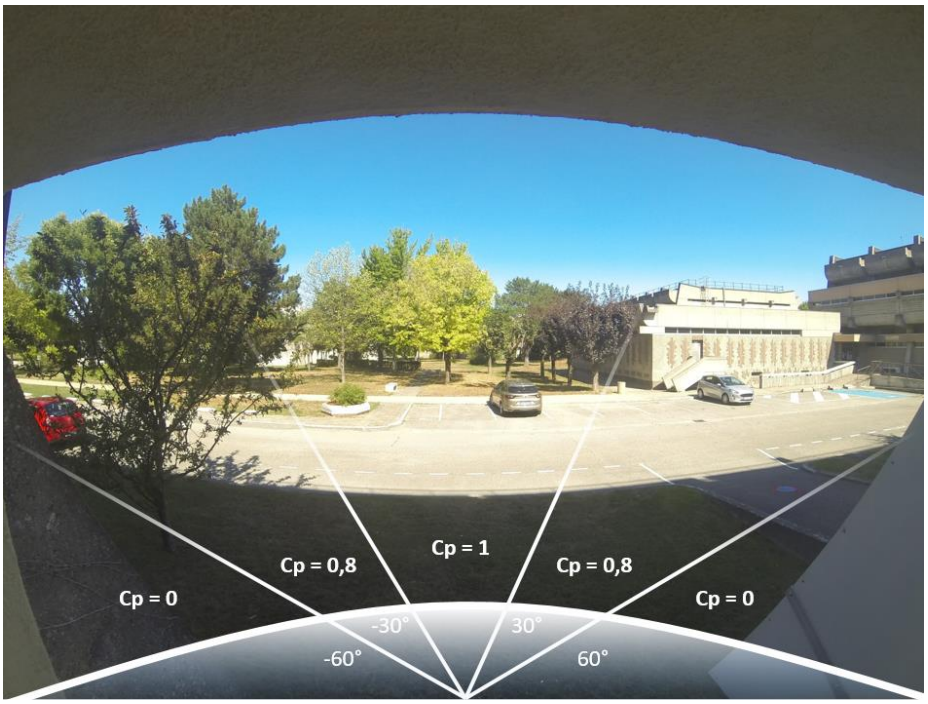


Figure 5-12 : Coefficients de pression exercé sur l'entrée d'air en fonction de l'angle d'incidence du vent

4.2.2.3 Coefficient de pression exercé sur l'extracteur statique

Concernant l'extracteur statique, le caractère artisanal de l'extracteur ne permettait pas d'obtenir une valeur de coefficient de pression à l'aide d'une base de données. Nous avons donc procédé à plusieurs tests en soufflerie afin d'avoir un ordre de grandeur concernant ce coefficient Cp. La soufflerie utilisée est basée à l'ENTPE.

Le coefficient Cp est défini par l'équation 5.18. Nous avons donc reproduit à échelle réduite le conduit d'extraction avec l'extracteur statique. La norme EN 13141-5 décrit la mesure des performances des extracteurs statiques [112]. La mesure décrite permet d'obtenir un facteur de pression qui comprend également l'effet de la vitesse de l'air aspirée par le conduit. Il fait donc intervenir, dans l'équation 5.18, la pression dynamique dans le conduit à la place de la pression statique *Px*. Pour ce faire, un plénum ventilé doit être connecté à la base du conduit, hors de la soufflerie. Or, nous cherchons uniquement le coefficient de pression qui fait intervenir la pression statique dans le conduit. Nous avons donc bouché la base du conduit pour qu'il n'y ait pas d'air qui puisse y circuler. Autrement, les recommandations de la norme ont été suivies. Le schéma décrivant le dispositif expérimental est présenté en Figure 5-13. La pression du vent, la pression de référence, la pression statique, et la pression dynamique exercée sur l'extracteur statique (bout de conduit) sont représentées. On peut donc retrouver l'expression du coefficient de pression de l'équation 5.18 par un équilibre en pression entre la pression de référence, la pression statique dans le conduit, et la pression dynamique exercée sur l'extracteur statique.

La sortie du conduit a été placée à 70 cm de la base de la soufflerie, afin qu'elle soit hors de la couche limite, et que la longueur du conduit soit au moins cinq fois plus grande que le diamètre de l'ouverture [112]. Le conduit a été fixé hermétiquement sur le support horizontal prévu à cet effet. La pression statique du conduit a été mesurée à la base intérieure du conduit, afin d'éviter qu'elle ne soit perturbée par les phénomènes de turbulences à la surface du conduit. La pression du vent a été calculée à l'aide de la vitesse du vent, et de la température de l'air mesurées dans la soufflerie. La pression statique de référence dans le soufflerie est mesurée en amont du conduit vis-à-vis de la direction du vent, à 3cm du sol. Une photo du test en soufflerie est présentée en Figure 5-14.

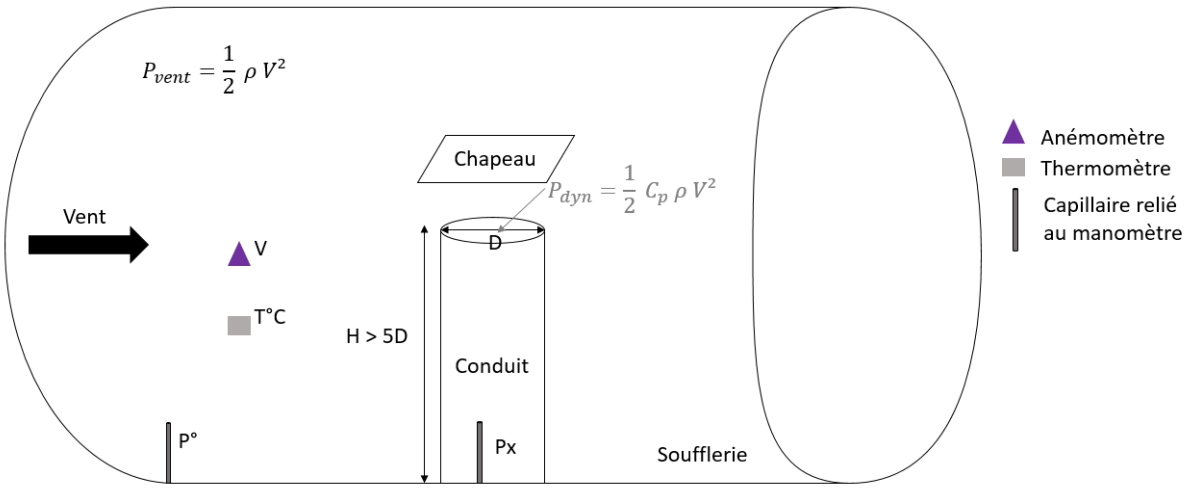


Figure 5-13 : Schéma du dispositif expérimental

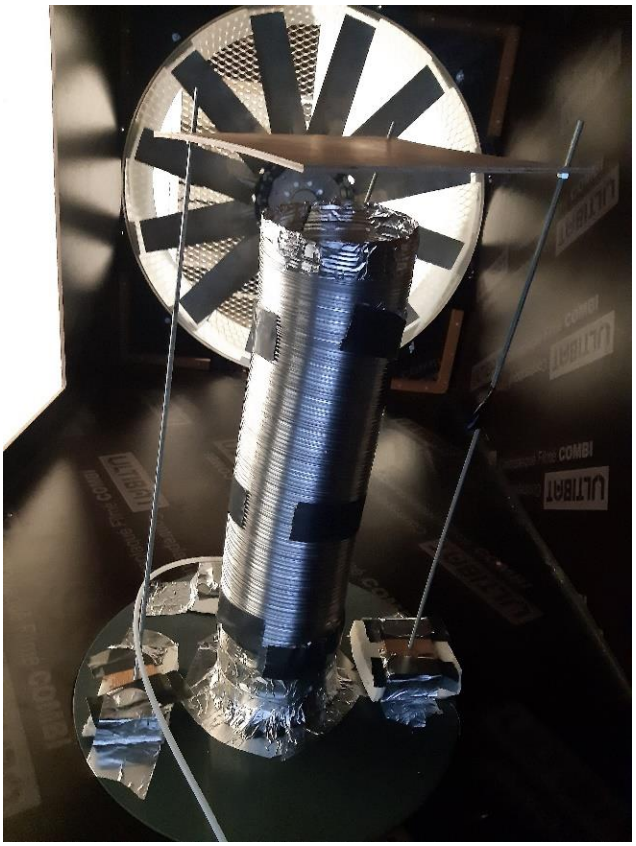


Figure 5-14: Détermination du Cp exercé sur l'extracteur statique en soufflerie

Ensuite, six paliers de vitesse du vent de 2 minutes ont été réalisés entre 0 et 5 $m.s^{-1}$ (représentatifs des vitesses observées pendant l'expérimentation). La moyenne sur les six paliers a été considérée. Les graphiques des pressions du vent et pressions statiques sont en annexe 5.2.

Le conduit de ventilation installé sur la cellule NATCELL n'est pas exactement vertical, mais légèrement penché vers l'avant. Pour les vents latéraux par rapport à la façade avant, la surface de l'ouverture de l'extracteur statique est parallèle à l'incidence du vent. En revanche, pour les vents de face, elle ne l'est plus. Deux tests ont donc été réalisés, avec une surface de l'ouverture de l'extracteur statique horizontale, puis une surface légèrement inclinée vers l'avant par rapport au vent. Les coefficients de pression obtenus par l'équation 5.18 pour la surface horizontale, ainsi que pour la surface inclinée valent respectivement -0,75, et -0,5 (cf. annexe 5.2). Il est logique que, pour un vent de face, la dépression induite par le vent soit moindre puisque la surface est légèrement inclinée vers l'avant.

Le masque arrière que représente le bâtiment de l'ENTPE par rapport à la cellule n'a, une nouvelle fois, pas pu être pris en compte dans la caractérisation du coefficient de pression. La phase de calibration a poussé à légèrement modifier les valeurs mesurées tout en restant cohérent. Les valeurs de -0,75 et -0,5 mesurées par la méthode décrite ci-dessus ont été diminuées de -0,25 afin d'accentuer les effets du vent. Pour les vents latéraux ($|\theta| > 30°$ avec θ l'angle d'incidence du vent par rapport à l'orientation de la façade), le coefficient de pression est donc égal à -1. Pour les vents de face ($|\theta| < 30°$), le coefficient de pression est égal à -0,75.

4.2.3 Infiltrations

Le choix de modélisation pour les infiltrations s'est porté sur une modélisation par surface équivalente de fuite (Effective Leakage Area) réparties équitablement à z=0 et z=2H/3. Les infiltrations de NATCELL ont été mesurées à 0,14 Vol/h^{-1} à l'aide de la méthode gaz traceur. Or, la norme ISO 9972 [107] relative à la perméabilité des bâtiments, permet de convertir cette valeur d'infiltrations en surface équivalente d'infiltrations (ELA). La formule est donnée comme suit :

$$ELA = \frac{1}{3600} * C_L * \left(\frac{\rho_0}{2}\right)^{0.5} * (\Delta p)^{n-0.5} \quad (5.19)$$

Avec :

$$C_L = \frac{Q}{\Delta P^{\,n}} \quad (5.20)$$

Avec :

- Q le débit d'infiltration en [m^3.h^{-1}] ;
- ΔP la différence de pression pendant la mesure entre l'intérieur et l'extérieur en [Pa] ;
- n le coefficient relatif à la nature du flux, pris égal à 2/3.

A ce stade, nous devons faire une hypothèse, car la différence de pression n'a pas été mesurée pendant la méthode gaz traceur. Nous faisons l'hypothèse que l'intégralité des infiltrations proviennent du laboratoire (cinq façades sur six sont en contact avec le labo). La différence de pression entre NATCELL et le laboratoire a été estimée à 0,5 Pa. On obtient donc une surface équivalente de 8,7 cm² par cellule.

Afin que la pression calculée par le modèle au niveau des infiltrations soit réaliste, le laboratoire dans lequel est logée la cellule NATCELL a été modélisé par un grand volume, de 5 mètres de hauteur. La température du laboratoire a été fixée à 21°C, et la concentration de CO_2 fixée à 500 ppm. Une ouverture à 4m du sol dans le laboratoire a été modélisée pour créer un appel d'air, et prendre en compte la mauvaise étanchéité de la porte de garage, ainsi que des fenêtres. Le schéma ci-après montre la configuration retenue pour les infiltrations.

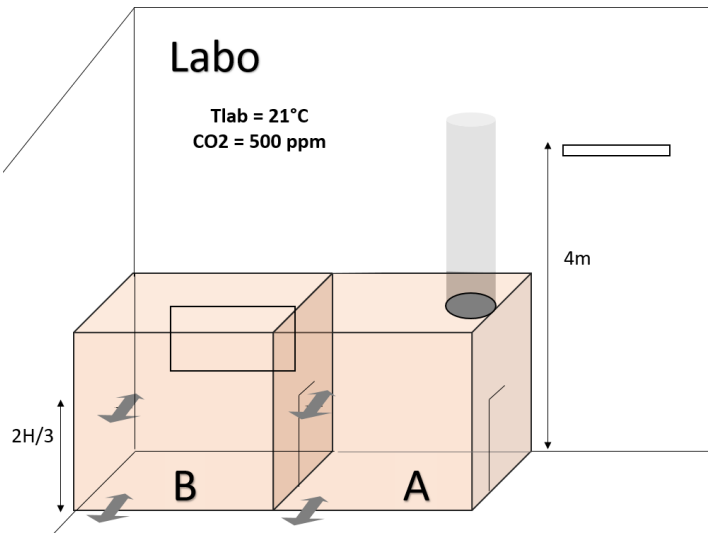


Figure 5-15 : Configuration des infiltrations

4.3 Validation du modèle

4.3.1 Critère de validation

Deux grandeurs associées au taux de ventilation permettent de confronter le modèle aux résultats expérimentaux: le débit extrait, et le taux de ventilation calculé pas la méthode Kalm'Air à partir des décroissances de concentration. Le débit extrait calculé par le modèle est comparé au débit mesuré par l'anémomètre dans le conduit d'extraction. Concernant le taux de ventilation calculé à partir des décroissances de la concentration, le modèle a recréé les injections de CO_2 réalisées expérimentalement, ce qui permet une confrontation entre le résultat de la méthode Kalm'Air appliquée aux concentrations mesurées, et simulées.

Une analyse d'incertitude a été réalisée sur les deux grandeurs permettant la confrontation. Concernant l'anémomètre placé dans le conduit d'extraction, la norme ISO 12599 [113], qui décrit la mesure des installations de ventilation, spécifie qu'avec un point de mesure de la vitesse d'air dans la section, et en estimant à 10% la variation de vitesse sur un radius, l'incertitude liée à la mesure du débit extrait vaut 15,2% (cf. annexe 5.3). Pour une variation de vitesse de 20% sur un radius, l'incertitude vaudrait 23,4% (cf. annexe 5.3). Ajouté à la précision des capteurs de 3%, la loi de propagation des écarts-types donne une incertitude globale de 15,5 et 23,6% suivant la variation de vitesse sur un radius respectivement de 10% ou de 20%.

Analysons maintenant l'incertitude de la confrontation des résultats de la méthode Kalm'Air appliquée aux concentrations mesurées et simulées. Il faut savoir que, le but de la modélisation étant de recréer la méthode Kalm'Air de la manière la plus réaliste possible, les concentrations simulées ont été artificiellement bruitées à hauteur des bruits de mesure des capteurs utilisés expérimentalement. L'incertitude globale de la méthode Kalm'Air $\sigma_{N_{Kalm'Air}}$ avait été estimée dans le chapitre 4 à 8,3%. L'incertitude de la comparaison des deux taux de ventilation calculés à partir de la concentration mesurée et simulée est alors calculée à l'aide de la loi de propagation des écarts-types appliquée à deux méthodes Kalm'Air (une appliquée aux concentrations mesurées, et une aux concentrations simulées), et vaut 11,7%. L'incertitude associée à la comparaison des taux de ventilation calculés par la méthode Kalm'Air est donc plus basse que l'incertitude de la mesure de l'anémomètre.

La validation du modèle est donc davantage robuste par la comparaison des taux de ventilation de la méthode Kalm'Air. Pour définir le critère de validation, il faut estimer l'erreur admissible associée à la modélisation. Par exemple, le guide 14 de l'ASHRAE (Measurement of Energy and Demand Savings) propose une incertitude admissible de modélisation de 10%. Nous sélectionnons donc cette valeur pour l'erreur admissible de modélisation, et calculons le critère de validation à partir de la loi de propagation des écarts-types (équation 5.21):

$$Critère = \sqrt{\sigma^2_{N_{Kalm'Air}} + \sigma^2_{N_{Kalm'Air}} + \sigma^2_{Modélisation}} \tag{5.21}$$

Le critère de validation vaut 15,4%.

4.3.2 Confrontation du modèle avec les données expérimentales

4.3.2.1 Confrontation du modèle sur les taux de ventilation calculés par la méthode Kalm'Air

Les taux de ventilation sur les six ou sept décroissances par séquence sont calculés par la méthode Kalm'Air appliquée aux concentrations mesurées et simulées. L'erreur entre les deux taux de ventilation pour chaque décroissance est calculée. Ensuite, l'erreur globale représentant la somme quadratique de l'erreur moyenne et de l'écart-type de l'erreur sur le nombre de décroissances disponibles est calculée. (L'erreur globale est calculée comme l'incertitude globale préalablement définie dans le chapitre 4 mais se nomme différemment pour ne pas confondre avec l'incertitude globale de la méthode Kalm'Air calculée à partir de l'écart entre la méthode Kalm'Air et une mesure de référence). Les erreurs globales sont calculées par zone, et présentées dans la Figure 5-16. Les zones de 1 à 4 correspondent aux zones définies dans le schéma Figure 5-9. La zone 5 se réfère aux résultats provenant du capteur central comparés à ceux provenant des concentrations simulées de la zone 3, zone d'évacuation de l'air. Seules six ou sept décroissances sont disponibles suivant les séquences ce qui est, a priori, trop peu pour considérer que la distribution des erreurs suit une loi normale, et donc que l'erreur globale ainsi calculée est pleinement représentative. Or, les résultats sont comparés sur cinq capteurs, ce qui permet d'obtenir par séquence entre trente et trente-cinq comparaisons des taux de ventilation. Comparer l'erreur globale de chaque capteur au critère défini au paragraphe 4.3.1 permet donc de pouvoir tirer des conclusions sur la fiabilité du modèle.

Les séquences S1_2, S2_2, et S3 tendent à des erreurs globales par capteur inférieures au critère (sauf le capteur 4 pour la séquence S1_2 et S3 de respectivement 2 et 1,5%). Le capteur 4 est proche de la gaine technique source d'infiltrations importantes, qui peuvent expliquer ces écarts. En revanche, pour la séquence S4, la totalité des capteurs présente une erreur globale quasiment deux fois supérieure au critère. Le modèle semble donc fiable pour les conditions de S1_2, S2_2 et S3. En revanche, le modèle n'est pas fiable sur le cas le plus critique relatif à l'évolution libre de la température.

La Figure 5-17 présente les corrélations entre concentrations mesurées et simulées. Les séquences S1_2, S2_2, et S3 montrent une bonne corrélation entre les concentrations simulées et mesurées (coefficient de corrélation égal à 0,99). En revanche, les points sont très dispersés autour de la courbe médiane pour la séquence S4, qui présente une faible corrélation de 0,96. Ces observations sont donc en accord avec celles établies grâce à la comparaison des taux de ventilation calculés pas la méthode Kalm'Air.

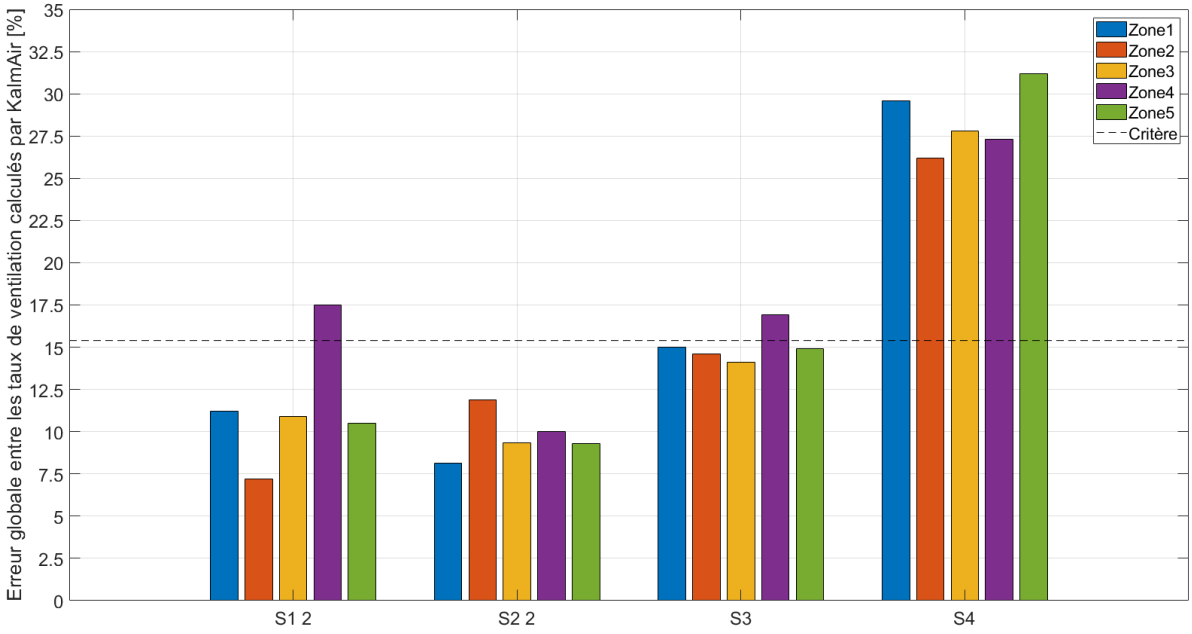


Figure 5-16 : Erreurs globales, validation du modèle

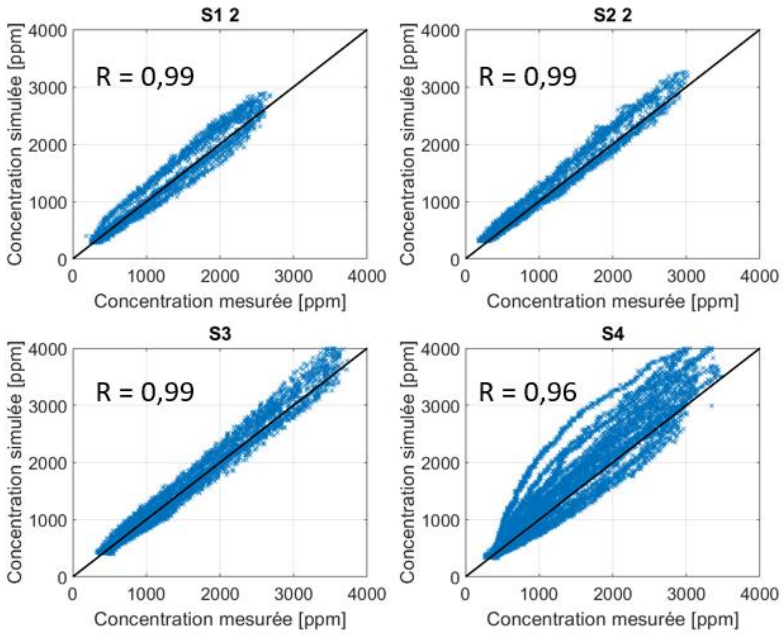


Figure 5-17 : Corrélations entre concentration mesurée et simulée pour les 4 séquences

4.3.2.2 Confrontation du modèle sur les débits extraits

Il est intéressant de confronter les débits extraits mesurés et simulés car ils fournissent une information continue, contrairement à la confrontation des taux de ventilation calculés par la méthode Kalm'Air. Les Figure 5-18,Figure 5-19, Figure 5-20, et Figure 5-21 montrent la confrontation des débits extraits simulés et mesurés, ainsi que la vitesse du vent sur les quatre séquences S1_2, S2_2, S3, S4. Les fuseaux délimitant les intervalles de confiance des débits extraits mesurés et simulés sont tracés à titre indicatif. L'erreur maximale de modélisation tolérée a été fixée à 10% (cf. 4.3.1). Pour calculer l'intervalle de confiance du débit mesuré,

l'écart de vitesse sur le radius de la section du conduit a été arbitrairement pris égal à 20% (cf. annexe 5.3).

Globalement, on remarque de la Figure 5-18 à la Figure 5-21 que plus le différentiel de température entre l'intérieur et l'extérieur est bas (graduellement des séquences S1_2 à S4, ou respectivement des Figure 5-18 à Figure 5-21), plus les écarts entre les débits extraits simulés et mesurés sont importants. Si l'on observe la vitesse du vent en parallèle de la corrélation entre les débits extraits, on observe sur les quatre figures que les périodes où la vitesse du vent est supérieure à 1 $m.s^{-1}$ tendent la plupart du temps à un débit extrait mesuré corrélé avec le débit extrait simulé. Les fluctuations dues au vent sont bien corrélées. A l'inverse, mise à part pour la séquence S1_2 pour laquelle le débit simulé correspond au débit mesuré sur la quasi-totalité de la période, les vents dont la vitesse est inférieure à 1 $m.s^{-1}$ tendent majoritairement à une surestimation du débit par le modèle entre 10 $m^3.h^{-1}$ et 20 $m^3.h^{-1}$.

Or, le modèle a été préalablement validé sur la base des taux de ventilation calculés par Kalm'Air. Cela signifie que des séquences S1_2 à S3, le modèle est fiable dans l'évolution des concentrations, mais il ne l'est pas pour les débits extraits alors qu'ils sont directement liés par le couplage des modèles aérauliques et de transferts de polluants présenté dans le paragraphe 2.3. Deux raisons peuvent expliquer ces observations différentes suivant la nature du paramètre confronté. Soit l'incertitude de mesure de l'anémomètre placé dans le conduit a été sous-estimée ; soit l'air n'est, en réalité, plus évacué exclusivement par le conduit quand le vent faible ne créé pas un tirage éolien suffisant dans le conduit, et que la température du conduit est inférieure à celle du labo avec lequel les infiltrations sont échangées (cf. paragraphe 4.2.3). Il y aurait alors un tirage parasite entre NATCELL et le labo. Cette deuxième possibilité aurait moins d'impact sur la méthode Kalm'Air, car les méthodes gaz traceur mesurent le taux de ventilation effectif, qui inclut les infiltrations. Cette deuxième hypothèse est étayée par deux observations :

- les écarts sur le débit extrait sont observés pour les faibles vitesses de vent, et ils sont d'autant plus fréquents que la température est faible ;
- deux décroissances de la séquence S4 ont montré une recirculation de l'air de la salle A à la salle B avec annulation du débit extrait mesuré pour une température de conduit inférieure à 15°C et un faible vent. La seule explication de cette recirculation de l'air de A vers B serait que l'air soit entré par le conduit, partiellement extraite par les infiltrations de la cellule A vers le labo, partiellement transféré à la cellule B (recirculation de A vers B), puis extrait par les infiltrations de la cellule B vers le labo. Cette recirculation de l'air a été observée par l'augmentation soudaine de la concentration de la salle B qui suit l'annulation localisée du débit mesuré dans le conduit. La recirculation de l'air pour une des deux décroissances est présentée en annexe 5.4.

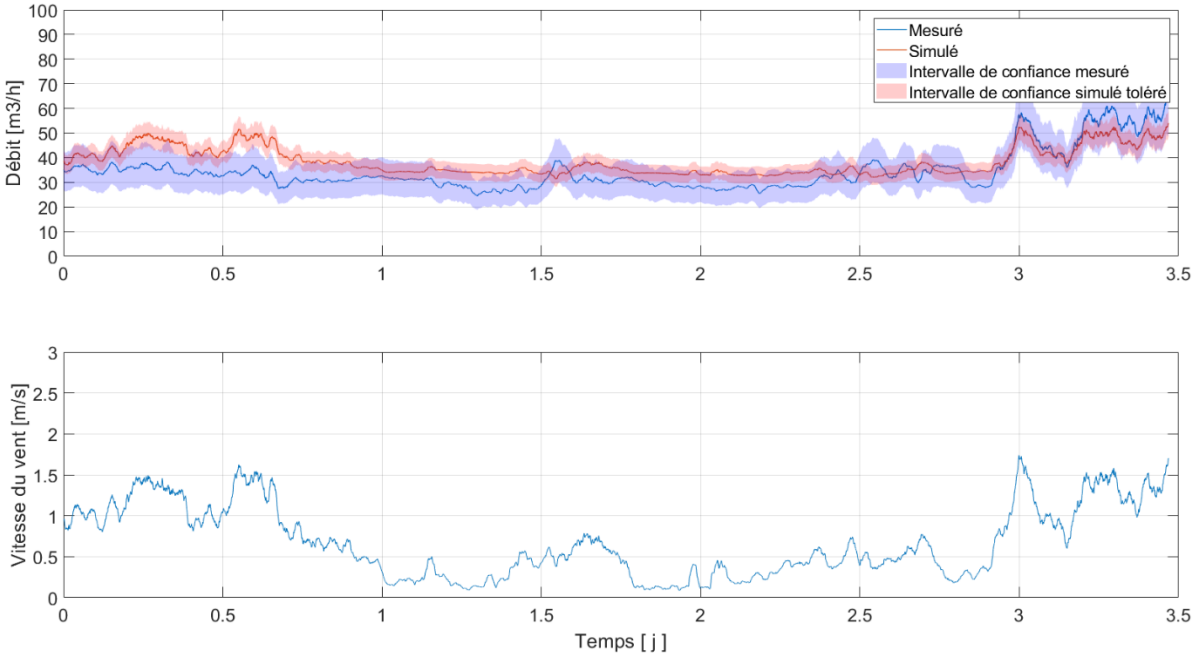


Figure 5-18 : Débits extraits simulés et mesurés associés à la vitesse du vent, S1_2

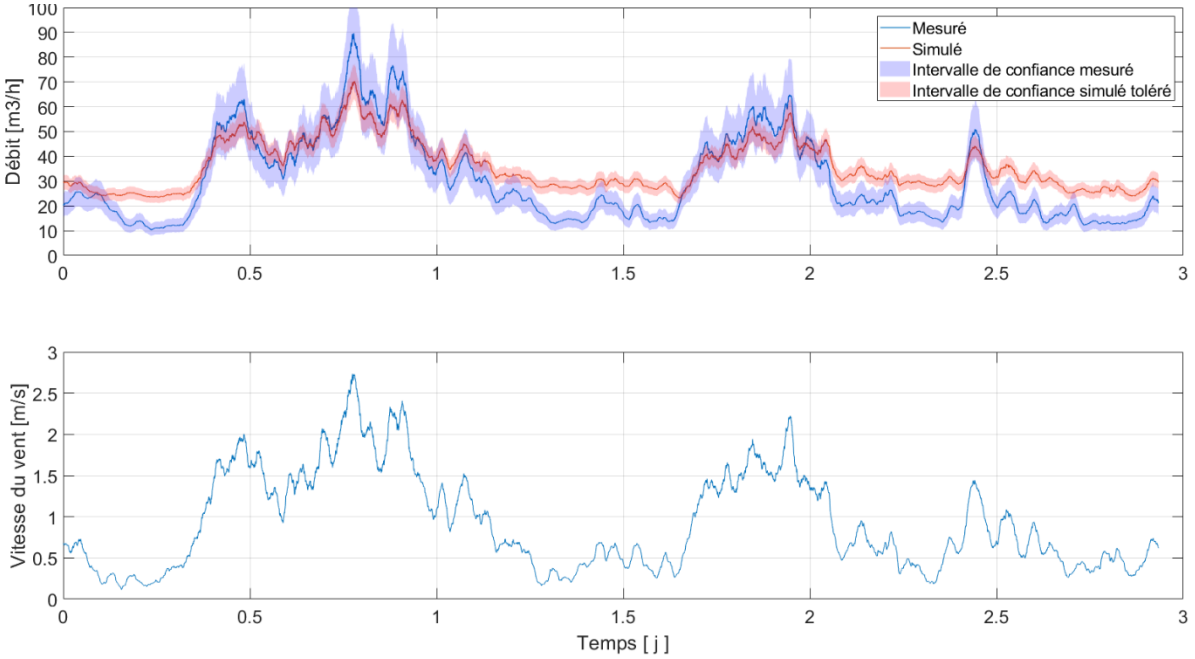


Figure 5-19 : Débits extraits simulés et mesurés associés à la vitesse du vent,,S2_2

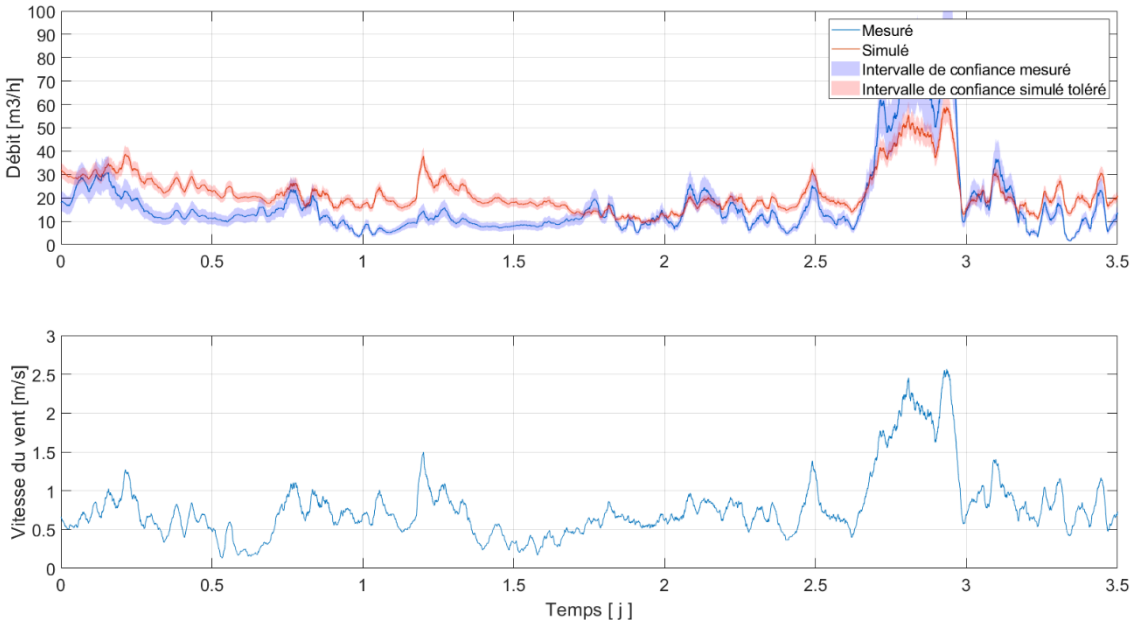


Figure 5-20 : Débits extraits simulés et mesurés associés à la vitesse du vent, S3

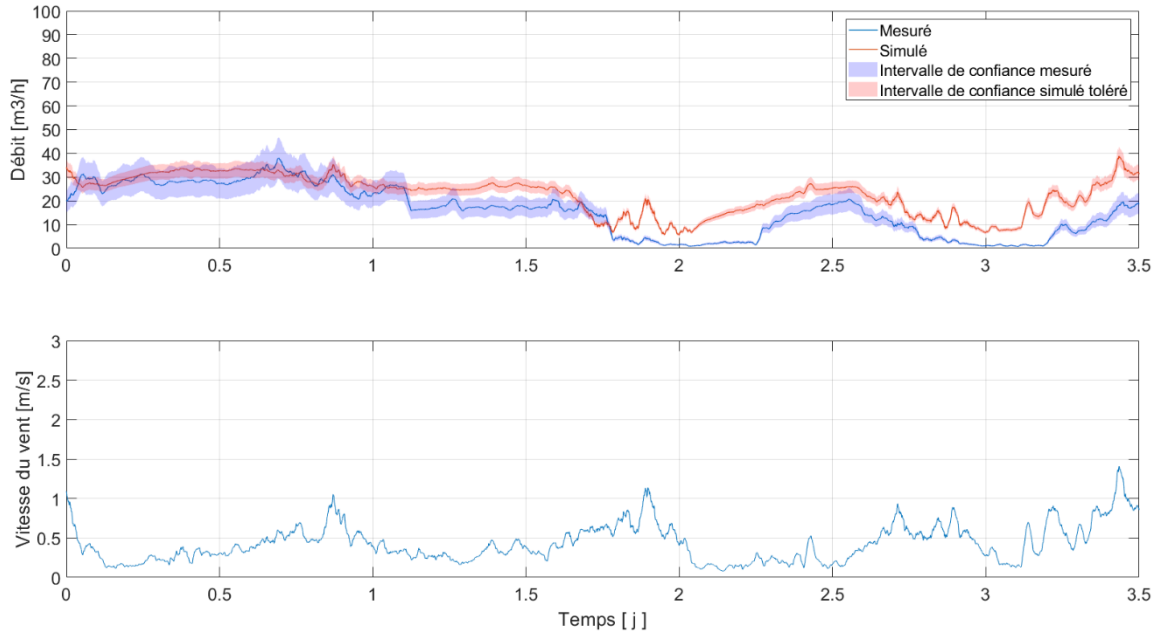


Figure 5-21 : Débits extraits simulés et mesurés associés à la vitesse du vent, S4

4.3.3 Conclusion sur la validation du modèle

La confrontation des taux de ventilation calculés par la méthode Kalm'Air a livré des résultats inférieurs au critère de validation pour les capteurs 1, 2, 3, et 5 sur les séquences S1_2, S2_2, et S3. La séquence S4 a, elle, donné à des résultats supérieurs au critère. Ces observations ont été confirmées par analyse de la corrélation des concentrations mesurées et simulées. La confrontation des débits extraits a montré une bonne corrélation pour les vents supérieurs à 1 $m.s^{-1}$. Pour les périodes pendant lesquelles la vitesse de vent était inférieure à 1 $m.s^{-1}$, avec une température intérieure basse, des observations ont permis d'émettre l'hypothèse d'un tirage parasite entre NATCELL et le labo. Ce tirage parasite a eu moins d'impact sur la méthode Kalm'Air car elle mesure le taux de ventilation effectif et non le débit extrait par un dispositif.

L'évolution et l'amplitude de fluctuations du débit extrait restaient toutefois cohérentes par rapport au débit mesuré.

L'objectif de la modélisation est de réaliser une analyse de la sensibilité sur la précision de la méthode Kalm'Air. Le vent et ses fluctuations sont susceptibles de davantage dégrader la précision de la méthode qu'un écart de débit stable d'une dizaine de $m^3.h^{-1}$ induit par un tirage parasite. Or, l'évolution du débit extrait simulé est cohérente, en termes d'amplitude et de vitesse de variation, justifiant une bonne prise en compte de l'effet du vent.

Nous concluons des deux confrontations détaillées ci-dessus que la précision de la méthode Kalm'Air peut être estimée de manière fiable jusqu'aux conditions de température de la séquence S3. Cette séquence présentait un écart moyen de 9,6 °C. En revanche, malgré une évolution des débits extraits également cohérente, le tirage parasite supposé a eu trop d'influence sur la séquence S4 pour pouvoir l'intégrer dans la validation, y compris sur les concentrations. Nous avons notamment décelé une recirculation de l'air de la cellule A vers la cellule B, qui semble confirmer l'existence de ce tirage parasite.

5 Analyse de sensibilité

5.1 Objectif de l'analyse de sensibilité

Le paragraphe 3 a permis de justifier que le modèle NATCELL est fiable pour reproduire la méthode de mesure Kalm'Air si les écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur sont, en moyenne, supérieurs ou égaux à 10°C. L'objectif est à présent de caractériser l'incertitude de la méthode à l'aide d'un modèle de logement réduit comprenant une pièce de vie connectée à une pièce de service. Pour ce faire, nous procédons à une analyse de sensibilité sur les paramètres susceptibles d'influencer la méthode. Certains paramètres ont déjà fait l'objet d'une attention particulière pendant l'analyse paramétrique du chapitre 4. Cette analyse de sensibilité vient compléter l'analyse paramétrique déjà effectuée. Elle doit permettre de calculer l'incertitude de la méthode réalisée sur site, après que l'expérimentateur ait rentré la valeur des paramètres que l'analyse de sensibilité aura identifié comme facteurs influents. L'objectif n'est pas de calculer exactement l'incertitude, mais plutôt d'en proposer une majoration. Aussi, il n'est pas souhaité que l'expérimentateur ait à procéder à des mesures supplémentaires pour calculer l'incertitude de la méthode. Ces deux dernières raisons justifient que l'on opte pour des niveaux de facteurs « tout-ou-rien ». Par exemple, il y a du vent, ou il n'y en a pas ; le logement est fuyard, ou il est étanche, etc. Ce choix va participer à déterminer la méthode d'analyse de sensibilité utilisée par la suite.

La finalité recherchée de l'analyse de sensibilité est une équation décrivant l'incertitude du type :

$$\sigma_{N_{KalmAir}} = \mu + E_1 \,.\, \delta_{x1} + E_2 \,.\, \delta_{x2} + \cdots + E_{1\ldots n} \,.\, \delta_{x1} \ldots \delta_{xn} \qquad (5.22)$$

Avec :

- μ *l'erreur moyenne [%];*
- δ les symboles de Kronecker associé aux paramètres influents ;
- E_i les effets de chaque facteur calculé à partir des réponses du système [%];
- x_i les facteurs influents.

5.2 Méthode de l'analyse de sensibilité

5.2.1 Plan d'expérience factoriel complet

S'est posé le choix de la méthode d'analyse de sensibilité. Plusieurs méthodes d'analyse de sensibilité ont été identifiées comme la méthode de Sobol, la méthode par régression, la méthode de Morris, et la méthode par plan d'expérience.

Parmi les méthodes d'analyse de sensibilité identifiées, la méthode par plan d'expérience a été jugée mieux adaptée aux objectifs de cette étude présentés au paragraphe 5.1. La première raison concerne sa capacité à traiter des facteurs qualitatifs de type « tout-ou-rien », a contrario de la méthode de Sobol ou de la méthode par régression. Ce choix avait été établi pour faciliter l'application in situ de la méthode. La deuxième raison concerne l'équation souhaitée définie en équation 5.22. La méthode de Morris permet uniquement de classer les facteurs par ordre d'influence, mais ne permet pas d'aboutir à l'expression de l'incertitude.

Le plan d'expérience permet d'évaluer l'influence d'un certain nombre de facteurs sur la réponse d'un système. L'expérimentateur définit au préalable les facteurs vis-à-vis desquels il veut tester la sensibilité du système, ainsi que leurs niveaux. Le plan d'expérience donne ensuite une méthode proposant les tests à réaliser (nombre de tests et niveaux de chaque facteur pour chaque test) pour définir la sensibilité de la méthode.

Parmi les plans d'expérience, les plans factoriels complets sont les plus aboutis car ils permettent de connaître l'effet de chaque facteur, et de chaque interaction entre facteurs. L'effet d'un facteur correspond à l'écart que ses différences de niveaux engendrent sur la réponse $\boldsymbol{y}$ d'un système par rapport à la réponse moyenne [114]. La réponse $\boldsymbol{y}$ du système représente ici l'incertitude globale de la méthode.

5.2.1.1 *Construction du plan, et matrice du modèle*

La méthode est décrite en détail dans la littérature [115]. Le plan d'expérience complet requiert 2^n tests pour n facteurs à 2 niveaux. Le modèle associé au plan d'expérience 2^3, par exemple, peut s'écrire sous la forme suivante [115]:

$$y = \mu + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3 \qquad (5.23)$$

Avec :

- y la réponse du système (ici l'incertitude globale [%]) ;
- μ la moyenne des réponses ;
- a_i les coefficients du modèle ;
- x_i sont les facteurs centrés réduits.

La matrice d'expériences P définit le plan d'expérience assurant que toutes les combinaisons possibles des niveaux de chaque facteur soient testées. La ième colonne de la matrice P est associée au facteur i et décrit les niveaux de ce facteur i pour chaque simulation. Une ligne représente donc la combinaison de chaque facteur pour une simulation. Par exemple, pour le cas de 3 facteurs à 2 niveaux -1 et 1, on aurait la matrice d'expérience suivante :

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \tag{5.24}$$

L'équation 5.23 représentant le modèle du plan d'expérience peut être exprimée sous forme matricielle :

$$\boldsymbol{y} = M \,.\, \boldsymbol{a} \tag{5.25}$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \tag{5.26}$$

Avec :

- $\boldsymbol{y}$ le vecteur des réponses ;
- M la matrice du modèle ;
- **a** le vecteur comprenant la moyenne μ et les coefficients a_i du modèle de l'équation 5.23.

La matrice M est de dimension $m = 2^n$, elle peut donc être considérée comme une matrice de Hadamard telle que $M \,.\, M^t = m \,.\, I_m$. On a donc :

$$\boldsymbol{a} = \frac{1}{m} \,.\, M^t \,.\, \boldsymbol{y} \tag{5.27}$$

On obtient les coefficients du modèle a_i en multipliant le vecteur des réponses par la transposée de la matrice du modèle. La première colonne de la matrice *M* correspond à la moyenne. Les colonnes d'après correspondent à la matrice d'expérience *P* et donc aux facteurs individuels, puis les colonnes suivantes se réfèrent aux interactions. Par exemple la colonne de la matrice M correspondant à l'interaction entre le facteur i et le facteur j s'obtient en multipliant termes à termes les colonnes i et j de la matrice *P*.

Les effets E_i des facteurs et interactions de l'équation 5.23 représentent le changement de réponse du système quand un facteur passe du niveau -1 au niveau 1 (écart de niveau de 2). Comme les coefficients a_i sont associés à des facteurs centrés réduits, dont l'écart de niveau vaut 1 par définition, il convient de les multiplier par 2 pour obtenir les effets *Ei*.

5.2.1.2 Analyse de la variance

L'analyse de la variance permet de déterminer si un effet E_i est significatif ou non, en comparant la variance de la réponse ***y*** calculée à partir de l'effet E_i à la variabilité naturelle de la réponse y. Si ces deux variances sont similaires, cela indique que l'effet n'est pas significatif. Si au contraire, la variance calculée à partir de l'effet *Ei* est significativement supérieure à la variabilité naturelle de la réponse ***y***, on peut conclure que l'effet est significatif. L'analyse de la variance repose sur l'hypothèse que la variabilité naturelle de la réponse suit une loi normale. Deux méthodes sont envisagées pour estimer la variabilité naturelle de la réponse [114]:

- Répéter au moins trente fois une simulation au centre du domaine d'expérience ;
- Assimiler la variance des résidus, donc la variance calculée à partir des effets des facteurs qui ne sont pas significatifs, à la variabilité naturelle. Cette méthode risque de surestimer la variabilité naturelle [114].

La première méthode sera retenue pour ne pas risquer de surestimer la variabilité naturelle de la méthode, et donc d'inhiber l'effet de certains facteurs. Il conviendra de vérifier la normalité de cette variabilité naturelle par un test de Kolmogorov Smirnov, ce qui est un prérequis de la méthode d'analyse des variances. Trente répétitions de la combinaison de chaque facteur dans leur niveau « rien » ont été réalisées pour obtenir la variabilité naturelle. Si la variabilité naturelle suit une loi normale, on peut obtenir une relation entre celle-ci, et la variance de l'effet E_i à l'aide du théorème des variances [115] :

$$V(E_i) = \frac{V(y)}{2^n} \tag{5.26}$$

Avec :

- $V(E_i)$ la variance associée à l'effet E_i ;
- V(y) la variabilité naturelle de y.

Le principe de la méthode des variances repose ensuite sur un test statistique qui consiste à déterminer si le rapport de la variance associée à l'effet d'un facteur E_i par la variabilité naturelle suit une loi normale centrée. Si l'effet d'un facteur est non nul, alors ce rapport ne suivra pas une loi normale centrée. Shimmerling et al. [114] proposent d'utiliser le test du Chi-2 si la variabilité naturelle est connue. Soit deux hypothèses :

- Hypothèse H_0 : l'écart de variance est négligeable, l'effet n'est pas significatif ;
- Hypothèse H_1 : l'écart de variance est significatif, le facteur est influent.

Soit α le risque de première espèce de rejeter H_0 alors que celle-ci est vraie et β=1- α le risque de deuxième espèce de rejeter H_1 alors que celle-ci est vraie. Le test du Chi-2 calcule la probabilité critique p, qui est le plus grand risque de rejeter H_0 à tort. Si p est supérieur à α, l'hypothèse H_0 est vérifiée. Si p est inférieur à α, l'hypothèse H_0 est rejetée. Pratiquement, Shimmerling et al. [114] proposent de procéder en complétant un tableau comme suit :

- Colonne 1 : On renseigne l'effet de chaque facteur;
- Colonne 2 : On calcule la variance associée à l'effet d'un facteur en multipliant par 2^n l'effet au carré du facteur;
- Colonne 3 : On renseigne le degré de liberté qui désigne le nombre d'observations aléatoires moins le nombre de relations qui les lie ;

- Colonne 4 : On renseigne la moyenne quadratique en divisant la variance par le degré de liberté correspondant ;
- Colonne 5 : On calcule la statistique du Chi-2 en divisant la moyenne quadratique par celle de la variabilité naturelle ;
- Colonne 6 : On calcule la contribution d'un effet en considérant le pourcentage de sa moyenne quadratique par rapport à la moyenne totale.

Pour savoir si l'effet d'un facteur est significatif ou non, il faut comparer la statistique calculée dans la colonne 5 au fractile de la loi Chi-2. Le fractile de la loi Chi-2 est égal à 49,6 pour $\alpha = 0{,}01$, et pour un degré de liberté de la variabilité naturelle de 29 (30 -1). Si le rapport calculé en colonne 5 est supérieur au fractile de 49,6, alors le rapport ne suit pas une loi normale centrée, et le facteur est prépondérant. Tous les effets qui tendent à une statistique du Chi-2 inférieure à 49,6 sont intégrés dans le résidu. Calculer l'effet global du résidu permet d'évaluer sa contribution à la variance totale. Pour calculer l'effet des résidus, et la variance résiduelle, on utilise les formules suivantes, avec b l'indice du premier résidu :

$$E_R = \frac{\sum_{b+1}^{2^n} E_j}{2^n - b - 1} \tag{5.27}$$

$$Var(R) = 2^n \sum_{b+1}^{2^n - 1} E_j^2 \tag{5.28}$$

Avec :

- E_R l'effet des résidus ;
- b l'indice du premier résidu ;
- $Var(R)$ la variance résiduelle.

5.2.2 Configuration du modèle de l'analyse

La configuration du modèle utilisé dans l'analyse de sensibilité est schématisée en Figure 5-22. C'est un modèle de logement fictif réduit avec une pièce de vie connectée à une pièce de service. On peut considérer, par exemple, qu'une chambre est connectée à une cuisine via le détalonnage d'une porte mesurant 3 cm de haut. Toutes deux ont une surface 10 m², avec une hauteur sous plafond de 2,7m. Les volumes sont modiques. Cela peut réduire l'influence du mixage imparfait de l'air et augmenter la vitesse de décroissance. Or, l'influence de la vitesse de décroissance sera traitée en faisant varier la fréquence d'acquisition. Le petit volume n'a donc pas d'influence sur l'analyse à ce niveau-là. Concernant le mixage imparfait, augmenter le volume n'aurait pas pu permettre d'augmenter les disparités spatiales de débits d'air, à cause de la discrétisation horizontale de la pièce, et du type de modèle utilisé. Cette question sera traitée dans le paragraphe 5.2.3.4.

A l'image de la modélisation de NATCELL, la pièce d'extraction du modèle de l'analyse est discrétisée en 4 zones identiques, réparties dans un plan horizontal. Le transit d'air est positionné entre la chambre et la zone 1 de la cuisine. L'air est extrait en zone 3. Les deux salles sont maintenues à une température de 20°C. Le logement réduit est localisé au sein d'un grand volume caractérisant un palier. Sa température est fixée à 17°C, et sa concentration en ppm est fixée à 600 ppm.

Chaque simulation représente le comportement du logement réduit sur une semaine, avec un pas de temps de 20 secondes. Ce pas de temps a été choisi afin de correspondre au pas

de temps des capteurs de CO_2 utilisés durant la thèse. Trente injections de CO_2 sont équitablement réparties sur cette semaine. Ces trente injections permettent de calculer l'incertitude globale de la méthode, qui représente l'indicateur de l'analyse de sensibilité.

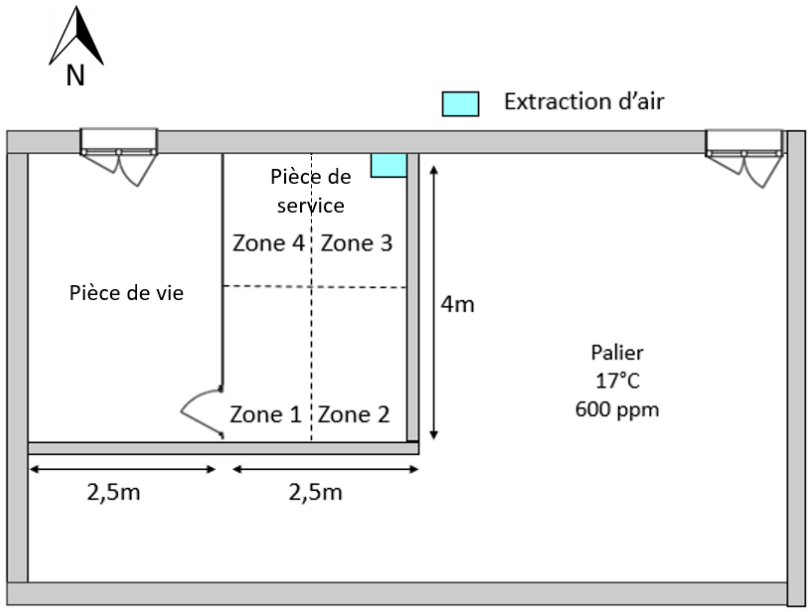


Figure 5-22 : Configuration du modèle utilisé pour l'analyse de sensibilité

5.2.3 Choix des paramètres

Six paramètres pouvant avoir une influence sur le filtre de Kalman ont été sélectionnés pour réaliser l'analyse de sensibilité. Ces paramètres doivent être rapides et simples à estimer. C'est pourquoi seuls deux niveaux de type « tout-ou-rien » ont été définis pour chaque paramètre. Les paramètres suivants sont impliqués dans l'analyse de sensibilité :

- **le niveau des infiltrations**, qui peut influer sur le résultat. Deux niveaux ont été testés, correspondant aux exigences RT2012 de 0,6 $m^3.h^{-1}.m^{-2}$, et à un niveau moyen d'étanchéité dans le bâti existant de 1,2 $m^3.h^{-1}.m^{-2}$ [116], bâti existant dans lequel la ventilation naturelle par conduit est très représentée. Les niveaux d'infiltrations ont été convertis en surface équivalente de fuite au sens de la norme ISO 9972 à l'aide des équations 5.18 et 5.19 [107] ;
- **la répartition des infiltrations**, qui peut affecter la prise en compte de la concentration de transit par la procédure d'estimation de cette concentration explicitée au chapitre 4. La répartition des infiltrations est classifiée en deux cas selon que ces infiltrations sont exclusivement réparties entre la pièce testée et l'extérieur, ou qu'elles peuvent également provenir du palier. L'objectif est de voir si une pluralité des sources d'infiltrations impacte la procédure de correction du CO_2 de transit ;
- **le différentiel de température** a également été évalué, pour voir si les niveaux de débits peuvent influer sur la précision du filtrage. La température intérieure était supposée constante égale à 20°C. Les deux profils de température extérieure utilisés sont des sinusoïdes d'amplitude de 5°C oscillant respectivement autour de 10°C et de 0°C, pour une température intérieure de 20°C. L'écart-moyen est supérieur ou égal à 10°C et l'écart minimal est égal à 5°C, ce qui vérifie bien les restrictions établies au paragraphe 4.3;

- **le vent**, dont l'amplitude de variation peut affecter la qualité du filtrage ;
- **le mixage de l'air**, qui a déjà montré son influence dans le chapitre 4 ;
- **l'occupation**, qui engendre une variation du CO_2 de transit.

Les trois derniers paramètres qui ont été cités requièrent une attention particulière. Leurs niveaux respectifs sont décrits dans les trois prochains paragraphes. Ces paramètres influent directement sur la matrice de covariance du bruit de processus du filtre de Kalman. Le Tableau 5-4 propose les deux niveaux des six paramètres.

N°	Paramètre	Niveau « Rien » ou -1	Niveau « Tout » ou 1
1	Niveau d'infiltrations [$m^3.h^{-1}.m^{-2}$]	0,6	1,2
2	Répartition des infiltrations	Extérieur	Extérieur/Palier (50%/50%)
3	Occupation	Sans occupation dans la pièce de vie	Avec occupation dans la pièce de vie
4	Vent	Faible vent	Fort vent
5	Température extérieure	Sinusoïdale moyenne 10°C amplitude 5°C	Sinusoïdale moyenne 0°C amplitude 5°C
6	Mixage de l'air (âge)	Ecart de l'âge de l'air de 0%	Ecart de l'âge de l'air de 10%

Tableau 5-4 : Récapitulatif des 2 niveaux des 6 paramètres de l'analyse de sensibilité

5.2.3.1 L'occupation

L'objectif du paramètre occupation est d'engendrer une variation du CO_2 de transit importante pour être certain de majorer la variation que l'on peut rencontrer en bâtiment réel. L'occupation a donc lieu dans la pièce de vie, où n'est pas réalisée la méthode gaz traceur. Comme le modèle comporte uniquement une pièce de vie et une pièce de service, il a été décidé de considérer une occupation de deux personnes, en référence à un couple qui dormirait dans une chambre. Un taux de génération de CO_2 métabolique de 0,01 l/s a donc été défini. Ensuite, pour analyser l'influence d'une croissance du CO_2 de transit ou d'une décroissance pendant la mesure, le profil d'occupation a répété un cycle calé sur les injections. Trente injections étaient réalisées sur la semaine. Le scenario d'occupation simule une entrée des occupants dans le logement au début de la première injection et une évacuation du logement à la troisième injection. Ce schéma est répété sur les 30 injections. La Figure 5-23 montre l'évolution des concentrations pour le cas avec occupation. On remarque bien, en observant l'évolution de la concentration de transit, le cycle du profil d'occupation calé sur 3 injections. Ce profil permet, à la fois, d'étudier l'impact d'occupants qui rentreraient et resteraient dans le logement (cf. injection 1 de la Figure 5-23), et d'étudier l'impact des occupants qui quitteraient le logement au début de la mesure pour aller travailler par exemple (cf. injection 3 de la Figure 5-23). La variation du CO_2 de transit pendant une mesure peut avoir une amplitude de 1000 ppm, ce qui est considérable.

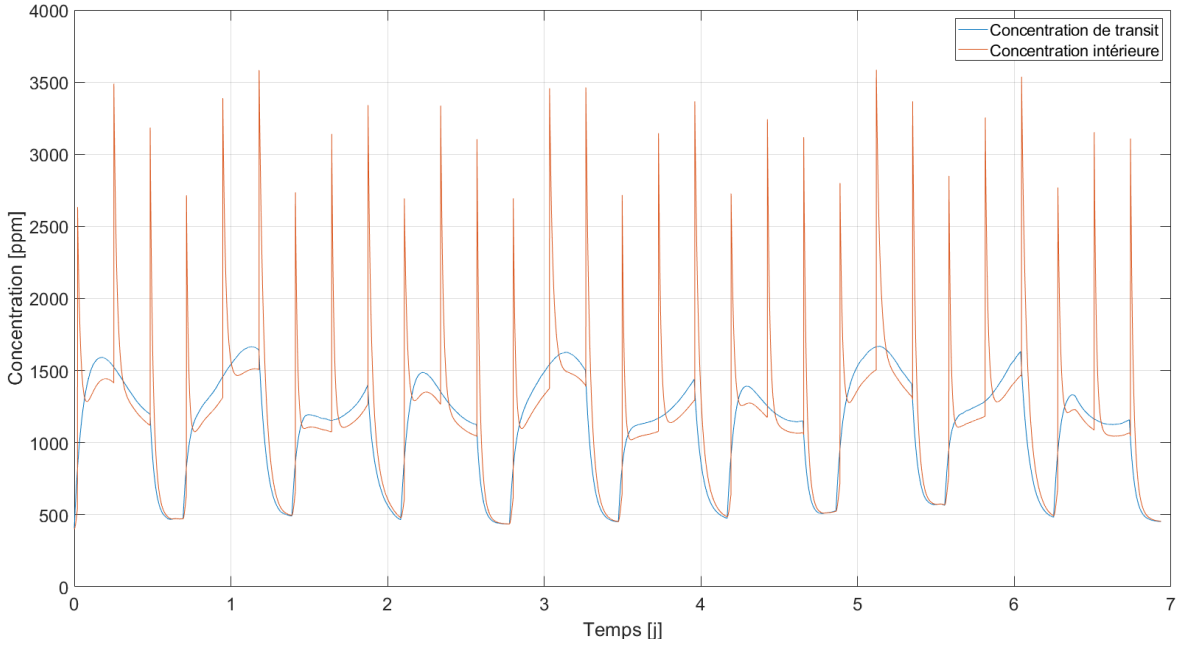


Figure 5-23 : Evolutions des concentrations pour le cas avec occupation

5.2.3.2 Le vent

Comme les autres paramètres, l'objectif n'est pas ici de renseigner précisément la vitesse du vent pendant la mesure car c'est une mesure difficile à obtenir précisément. L'objectif est donc plutôt de dire si les conditions sont venteuses, ou non. Park et al. [100] ont estimé l'impact des fluctuations du vent sur la ventilation traversante. Ils ont mesuré l'impact du vent pendant près d'un an sur une cellule expérimentale située sur le toit d'un gratte-ciel à Seoul, en Corée du Sud. Les seuls obstacles vis-à-vis de la cellule sont situés à 30 et 50m au Nord et à l'Ouest. Les autres façades ne font face à aucun obstacle. Leurs travaux les ont amenés à catégoriser le vent en 3 groupes, les vents faibles, les vents moyens, et les vents forts. Ils ont défini le vent instantané comme suit :

$$U(t) = \overline{U(t)} + \widetilde{U(t)} \tag{5.29}$$

Avec :

- $\overline{U(t)}$ le vent moyen ;
- $\widetilde{U(t)}$ les fluctuations du vent par rapport au vent moyen.

Les vents faibles sont en moyenne inférieurs à 1 $m.s^{-1}$ et les vents fort sont en moyenne supérieurs à 2,5 $m.s^{-1}$. Park et al. [100] ont ensuite caractérisé la distribution des vitesses instantanées de ces types de vents. Concernant les vents faibles, le ratio des fluctuations du vent sur le vent moyen suit une loi normale de moyenne 0,4, et d'écart-type 0,2. Le même ratio pour les vents forts suit une loi normale de moyenne 1,2 et d'écart-type 0,5. Nous avons donc sélectionné un vent faible de 0,5 $m.s^{-1}$ et un vent fort moyen de 3,5 $m.s^{-1}$. La loi normale définie par Park et al. permet ensuite de construire les profils de vent. La Figure 5-24 propose les deux profils de vent utilisés dans l'analyse de sensibilité. Le profil haut comporte des rafales allant jusque 8 $m.s^{-1}$.

En ce qui concerne la direction du vent, nous avons également considéré une loi normale centrée vers le nord et d'écart-type de 45°. Comme une seule façade orientée nord comporte l'entrée d'air (cf. Figure 5-22), cette distribution de la direction du vent permet de favoriser l'action du vent, d'autant plus que les coefficients de pression sont d'autant plus élevés que l'incidence du vent est normale à la façade (cf. paragraphe 4.2.2.2). La rose des vents du profil haut est donnée en Figure 5-25.

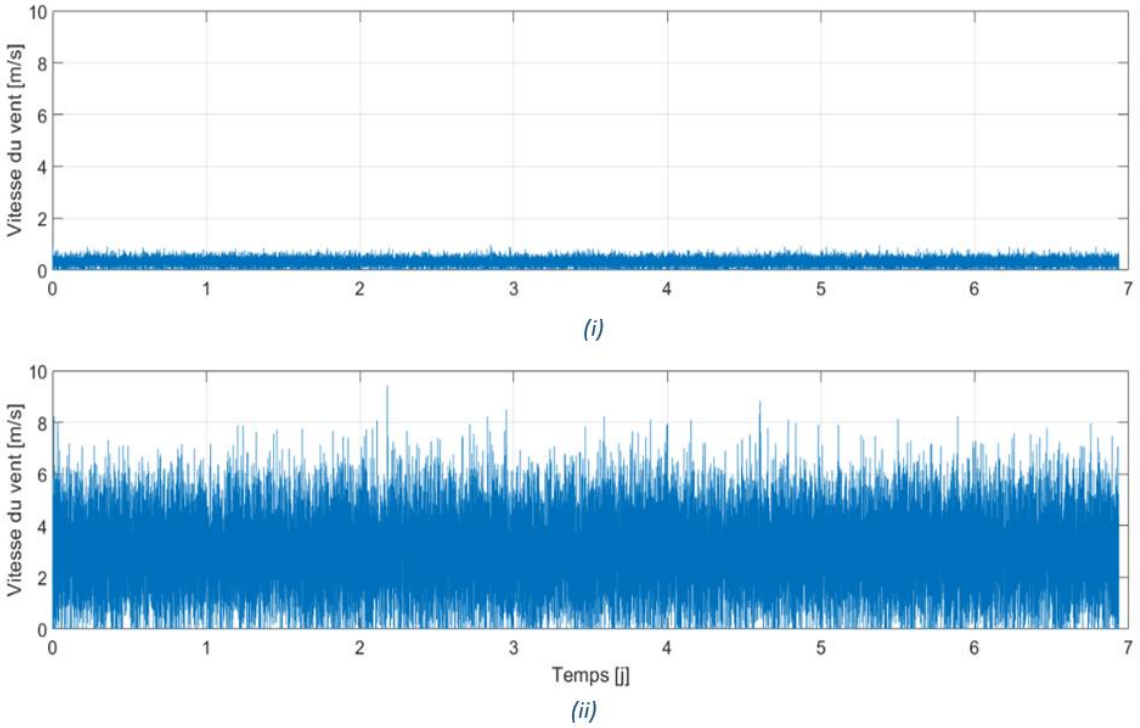


Figure 5-24 : Niveau bas (i) et niveau haut (ii) des profils de vent

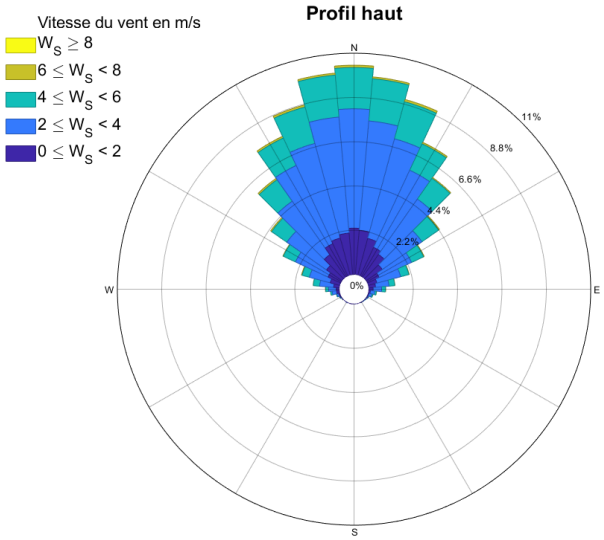


Figure 5-25 : Rose des vents pour le profil haut

5.2.3.3 Le mixage de l'air

La discrétisation spatiale de la cellule présentée au paragraphe 3.1 et le type de modélisation choisi ne permettent pas de simuler un mixage imparfait. Autrement dit, même en imposant des températures différentes dans chaque zone, le modèle simule des débits de ventilation entre les zones très homogènes, ce qui est logique pour les deux raisons susmentionnées. Or, le mixage imparfait de l'air est identifié comme étant une des premières sources d'incertitudes des méthodes gaz traceur [9], [80]. Un artefact de modélisation est proposé pour forcer un mixage de l'air imparfait. L'indicateur de suivi du mixage imparfait sera l'écart maximal de l'âge de l'air entre les 4 zones du modèle NATCELL. Cela signifie que, malgré le caractère artificiel de ce qui est présenté dans ce paragraphe, il sera possible en expérimentation terrain de vérifier réellement, par la mesure de l'âge de l'air en plusieurs points, que l'on se trouve plutôt en mixage parfait, ou plutôt en mixage imparfait. Les conclusions produites par l'artefact seront donc réalistes.

Le zonage d'une pièce implique d'introduire des parois fictives. L'artefact de modélisation proposé consiste à remplacer ces parois fictives totalement ouvertes par des parois présentant une surface d'ouverture égale à 30% de la paroi fictive la plus petite. La surface de ces ouvertures reste 20 fois supérieure à la bouche d'extraction qui est la plus grande ouverture du modèle. Elles ne réduisent donc pas les débits globaux. En réduisant davantage la surface d'une de ces ouvertures, nous introduisons artificiellement une résistance dans le flux d'air pour une des zones, qui sera logiquement moins ventilée que les autres zones, ce qui forcera un mixage imparfait.

Les travaux sur la mesure de l'âge de l'air des bâtiments ventilés naturellement sont rares [83]. Roulet et al. [65] ont mesuré l'âge de l'air dans plusieurs endroits d'une cellule expérimentale de 37,8 m^3 ventilée mécaniquement. Huit points d'un plan central horizontal ont engendré un écart-type de 3%. Cui et al. [83] estiment qu'une pièce d'un bâtiment ventilé naturellement peut atteindre 10% de disparité spatiale vis-à-vis du mixage de l'air. Pour simuler cette disparité spatiale, la surface de l'ouverture choisie pour être réduite (entre la zone 1 et la zone 2 dans notre modélisation) a donc été réduite itérativement jusqu'à atteindre, en moyenne sur les trente décroissances d'une simulation, un écart maximal de 10% sur l'âge de l'air entre les zones. Cette ouverture a dû être réduite de 80% par rapport aux autres ouvertures inter-zones (ouvertures déjà réduites dans les parois fictives).

La Figure 5-26 montre l'évolution des concentrations pour le mixage imparfait forcé (i), et pour le mixage parfait (ii). On remarque bien une plus grande disparité dans les décroissances de la concentration sur la figure (i). La zone 2 tend logiquement à la décroissance la plus lente. Le Tableau 5-5 rend compte de l'écart maximal moyen de l'âge de l'air entre les quatre zones sur les trente décroissances. L'écart moyen maximal de l'âge de l'air calculé à partir des concentrations non bruitées est de 11%, alors qu'il est de 0% pour le cas avec mixage parfait. Cela respecte donc l'estimation de Cui et al.. Avec les concentrations bruitées, l'écart entre les âges extrêmes pour les cas avec mixage parfait (8%) et mixage imparfait (14%) est plus faible. Cela met en évidence l'influence du bruit de mesure sur le calcul de l'âge de l'air. On peut faire l'approximation que si l'écart maximal entre l'âge de l'air mesuré dans les différentes zones est inférieur à 10%, on peut considérer que le mixage est parfait. Si l'écart maximal est supérieur à 10%, le mixage est imparfait. Si l'expérimentateur ne peut pas faire de mesure de l'âge de l'air, nous pouvons considérer, par défaut, que le mixage est imparfait.

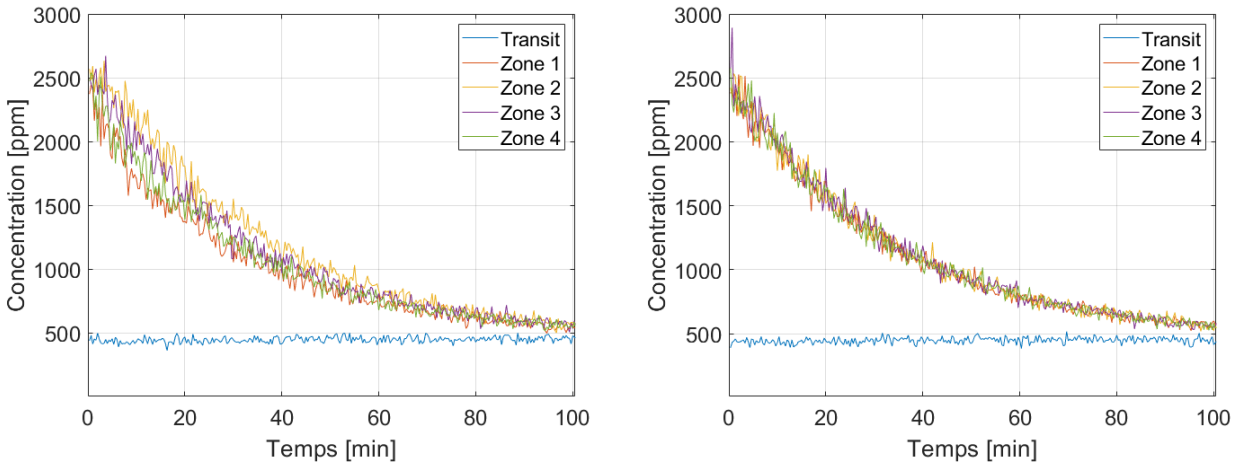


Figure 5-26 : Evolutions des concentrations pour le mixage imparfait forcé (i), et pour le mixage parfait (ii)

	Ecart maximal moyen de l'âge de l'air mixage parfait	**Ecart maximal moyen de l'âge de l'air mixage imparfait**
Concentrations non bruitées	0%	11%
Concentrations bruitées	8%	14%

Tableau 5-5 : Ecart maximal moyen de l'âge de l'air entre les zones

5.2.3.4 Autres paramètres indépendants des simulations

Le cas de base se réfère au plan d'expérience complet défini dans le paragraphe 5.2.3, avec la méthode Kalm'Air appliquée avec la procédure non biaisée d'estimation du CO_2 de transit (cf. Chapitre 4), un pas de temps de 20 secondes, et des concentrations artificiellement bruitées à 5%. Plusieurs autres facteurs ont fait partie de l'analyse de sensibilité, et ont pu être testés sans avoir recours à de nouvelles simulations :

- la dégradation de la précision des capteurs de 5 à 10% ;
- la dégradation de la fréquence d'acquisition à 1 mesure par minute (un pas de temps sur trois). L'objectif est d'évaluer l'impact du nombre de points de mesure disponible pendant 2 τ. Cet impact a déjà été évalué expérimentalement dans le chapitre 4, et s'est montré négligeable. Cependant, la sensibilité de la méthode 2 points, qui est impliquée dans l'initialisation du taux de ventilation requise par le filtre de Kalman pourrait remettre en question les observations du chapitre 4.
- l'application de la procédure biaisée d'estimation du CO_2 de transit développée dans le chapitre 4 qui doit être appliquée si la durée de 5τ n'est pas atteinte. En l'occurrence, la durée optimale était atteinte, ce qui explique que le cas de base ait appliqué la procédure non biaisée qui consiste à corriger la concentration ambiante pour que sa valeur finale soit égale à la concentration intérieure. Il est intéressant d'évaluer l'influence de l'application biaisée de la procédure, qui s'est toutefois montrée robuste dans le chapitre 4.

5.3 Sensibilité du filtre de Kalman

5.3.1 Analyse des variances

Les effets de chaque facteur, et de chaque interaction ont été calculés. L'analyse de variance présentée au paragraphe 5.2.1.2 a ensuite été effectuée afin d'identifier les facteurs prépondérants. La variabilité naturelle a été calculée à partir de trente répétitions du test avec tous les facteurs pris dans leur niveau « rien ». Le Tableau 5-6 montre les facteurs et effets identifiés comme prépondérants par l'analyse de la variance réalisée pour la zone 3, zone d'évacuation d'air. Les numéros des facteurs et interactions correspondent à ceux définis dans le Tableau 5-4. Les tableaux montrant l'analyse de la variance concernant les autres zones sont disponibles en annexe 5.5. Seuls 8 facteurs et interactions sont prépondérants. On remarque que la contribution de la variabilité résiduelle est très importante : plus de 10 fois plus importante que celle de la variabilité naturelle. Cela illustre le risque associé à la variance résiduelle de surestimer la variabilité naturelle [114]. Cependant, une telle contribution à la variance totale peut témoigner d'une distribution chaotique des résidus, qui rendrait l'analyse de la variance peu fiable [114]. Un test de Kolmogorov Smirnov a été effectué pour tester la normalité de la distribution des résidus, ainsi que des trente tests ayant servi à calculer la variabilité naturelle, comme préconisé par Shimmerling et al. [114]. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5-7. Le test a largement validé la distribution normale des résidus et des tests de variabilité naturelle (p-value largement supérieure à 0,01). L'analyse de la variance est donc fiable. La haute contribution des résidus s'explique alors par le fait que les facteurs prépondérants n'entrainent pas un effet très important. L'effet maximal est celui de l'occupation (3). Son effet ne vaut que 2,41% et contribue déjà à hauteur de 46% à la variance totale. Cela témoigne d'une faible sensibilité vis-à-vis des paramètres testés.

Facteurs & Interaction	Effet	Somme des carrés	Ddl	Variance	Fexp	Contrib. somme des carrés [%]
3	2,41	372,09	1	372,09	1037,8	46,03
35	-1,00	64,18	1	64,18	179,02	7,94
34	-1,00	63,71	1	63,71	177,71	7,88
5	-0,95	57,94	1	57,94	161,60	7,17
45	0,75	35,83	1	35,83	99,94	4,43
2	-0,72	32,81	1	32,81	91,50	4,06
6	-0,70	31,52	1	31,52	87,91	3,90
36	0,61	23,69	1	23,69	66,09	2,93
Variabilité Résiduelle	-0,02	126,65	55	2,30	0,00	15,67
Variabilité Naturelle	0,00	10,40	29	0,36	0,00	1,27

Tableau 5-6 : Analyse de variance zone 3

Note : Les numéros font référence aux paramètres introduits au Tableau 5-4

	Variabilité	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
Ddl	**Résiduelle**	45	47	55	54
	Naturelle	29	29	29	29
Kolmogorov test p-value	**Résiduelle**	0,38	0,88	0,26	0,91
	Naturelle	0,67	0,8	0,45	0,36
Distribution normale ?	**Résiduelle**	Oui	Oui	Oui	Oui
	Naturelle	Oui	Oui	Oui	Oui

Tableau 5-7 : Test de Kolmogorov Smirnov pour vérifier la normalité des résidus, et de la variabilité naturelle

On remarque dans le Tableau 5-6 des facteurs à effets positifs et des facteurs à effets négatifs (lignes du tableau grisées). Les facteurs à effets négatifs entraîneraient donc une augmentation de la précision de la méthode par rapport à l'erreur moyenne. Il a été choisi pour l'analyse de négliger ces facteurs car l'objectif est de majorer l'incertitude de la méthode. Un exemple clair de l'augmentation de la précision de la méthode que l'on cherche à inhiber est l'interaction entre 3 et 4 et l'interaction entre 3 et 5 que l'on peut observer dans le Tableau 5-6. Le facteur occupation (3) entraîne une variabilité du CO_2 de transit. Il provoque donc une augmentation de l'incertitude. Or, l'interaction entre ce paramètre et le vent (4) ou entre ce paramètre et l'augmentation de la différence de température (5) vient augmenter la précision de la méthode. Le vent et l'augmentation de la différence de température entraînent une augmentation des niveaux de débits, qui diminuent donc le temps de mesure. En moins de temps, l'amplitude de variation du CO_2 de transit sera moindre, et donc l'impact de l'occupation sera moindre également.

Le Tableau 5-8 concatène les effets prépondérants de chaque zone. La dernière ligne précise l'effet moyen pour chaque zone. On remarque que la zone 3 et la zone 4 entraînent significativement moins de facteurs prépondérants que la zone 1 et la zone 2 (respectivement 3 et 4 contre 12 et 12). La zone 1 représente la zone d'entrée d'air, et la zone 2 représente la zone volontairement moins ventilée. On retrouve parmi les facteurs prépondérants de ces zones qui ne le sont pas pour les zones 3 et 4, notamment des interactions avec le mixage de l'air (6), et avec les infiltrations (1).

Il n'est pas surprenant que la zone 2 soit plus sensible à un mauvais mixage de l'air. De plus, les infiltrations sont distribuées entre les zones 3 et 4, qui sont en contact avec l'extérieur. Elles peuvent être directement évacuées par le conduit d'extraction localisé dans la zone 3, sans transiter par les zones 1 et 2, ce qui peut expliquer que cela impacte la méthode évaluée dans les zones 1 et 2. Par ailleurs, Van buggenhout et al. [80] avaient observé expérimentalement que le capteur placé proche de l'entrée d'air entrainait les erreurs les plus importantes. Les résultats sont donc cohérents.

Le Tableau 5-8 révèle, une fois de plus, que la zone 3 d'évacuation d'air est la zone la plus représentative. Elle n'est pas du tout impactée par le paramètre mixage de l'air (6), présente la plus faible erreur moyenne (μ), et le plus faible nombre de facteurs prépondérants. Comme cela corrobore les conclusions du chapitre précédent, et de deux articles scientifiques identifiés dans l'état de l'art, l'analyse est maintenant différenciée suivant la possibilité ou non de placer le capteur proche de l'évacuation [80], [83]. S'il n'y a pas la possibilité, ou que l'objectif est de mesurer le taux de ventilation d'une zone particulière de la pièce, l'effet maximal rencontré

parmi les zones sera considéré dans l'expression de l'incertitude, toujours dans le but de la majorer.

Interaction	Effet zone 3	Effet zone 4	Effet zone 2	Effet zone 1	Effet max
3	2,41	3,38	0,65	2,93	3,38
6	-0,70	0,98	1,58	3,16	3,16
36	0,61	1,91	-0,73	0,87	1,91
46			1,88	1,42	1,88
16			1,45	0,58	1,45
4			1,20	0,78	1,20
1			1,16	0,71	1,16
345		1,15	0,85	0,90	1,15
56			1,09	0,67	1,09
45	0,75	1,04	0,90	1,04	1,04
14			0,74		0,74
15			0,61	0,65	0,65
146			0,63		0,63
123				0,46	0,46
1234				-0,47	-0,47
13				-0,52	-0,52
2	-0,72	-0,61	-1,26	-1,37	-0,61
346				-0,70	-0,70
34	-1,00	-1,04	-0,75	-1,88	-0,75
35	-1,00	-0,94	-0,75	-1,00	-0,75
5	-0,95	-0,89			-0,89
μ	5,79	6,45	6,70	7,83	7,83

Tableau 5-8 : Sélection des paramètres influents et effet correspondant

5.3.2 Sensibilité du filtre pour le capteur placé sous l'évacuation

Ce paragraphe traite, à la fois du cas de base, mais également des trois autres cas associés aux paramètres qui ne font pas partie intégrante du plan d'expérience complet : augmentation de l'incertitude de mesure, dégradation de la fréquence d'acquisition, application de la procédure biaisée d'estimation de la concentration de transit. Les tableaux concaténants les effets dans chaque zone, pour les trois cas mentionnés ci-dessus sont disponibles en annexe 5.6. La Figure 5-27 présente les effets des facteurs prépondérants pour la zone placée sous l'évacuation, pour chacun des cas.

Globalement, on remarque une faible sensibilité du filtre de Kalman vis-à-vis de chaque facteur. Les quatre cas entraînent des effets inférieurs à 3,2%. L'occupation (3) est le facteur le plus influent pour trois cas sur quatre, avec un effet compris entre 2,5% et 3,2%. Le CO_2 de transit variable, engendré par l'occupation, est un paramètre d'état du filtre de Kalman. Il est donc logique que l'amplitude de variation de ce paramètre ait une influence sur la qualité du filtrage. Le cas de base est sensible vis-à-vis de deux autres facteurs, mais leur effet est inférieur à 0,75%.

Le cas avec précision des capteurs dégradée n'a que l'occupation comme facteur prépondérant, mais l'effet moyen est dégradé de 3 points par rapport au cas de base.

Concernant le cas avec l'application de la procédure de correction, on remarque une sensibilité accrue vis-à-vis des facteurs vent (4), infiltrations (1), et température (5). L'effet correspondant est respectivement de 3%, 2% et 1,3%. Il est logique de retrouver ces facteurs car ce sont eux qui vont directement influer sur le niveau d'infiltrations, phénomène que la procédure veut prendre en compte. L'effet moyen de 15,8% est largement supérieur à l'effet moyen des autres cas. Il est étonnant de ne pas retrouver l'occupation parmi les facteurs prépondérants car on sait qu'elle biaise la procédure en biaisant la méthode 2 points. Cette augmentation de l'incertitude montre donc l'importance de poursuivre la mesure le plus longtemps possible, pour maximiser les chances d'avoir atteint 5τ et que la procédure ne soit plus biaisée. Nous reviendrons sur l'impact supérieur de la procédure biaisée par rapport au chapitre 4 dans le paragraphe 5.3.4 qui questionne la sensibilité de la méthode 2 points.

Finalement, la fréquence dégradée a été testée. On remarque sur la Figure 5-27 que ce cas tend à une erreur moyenne 2 points supérieure à celle du cas de base. On remarque également un plus grand nombre de facteurs prépondérants comparé aux autres cas. Ces facteurs impliquent systématiquement le vent (4), et/ou la température (5) et/ou les infiltrations (1). Ces trois facteurs sont les facteurs qui augmentent le niveau des débits, et qui réduisent donc le nombre de points de mesure disponibles sur 2τ. Une influence du nombre de points de mesure disponibles sur 2τ sur le résultat est effectivement observée. Comme chaque simulation tend à un nombre différent de points de mesure, il n'est pas possible d'intégrer cette analyse dans l'expression de l'incertitude. Le paragraphe 5.3.5 traite donc de la prise en compte de l'influence de nombre de points de mesure dans l'estimation de l'incertitude.

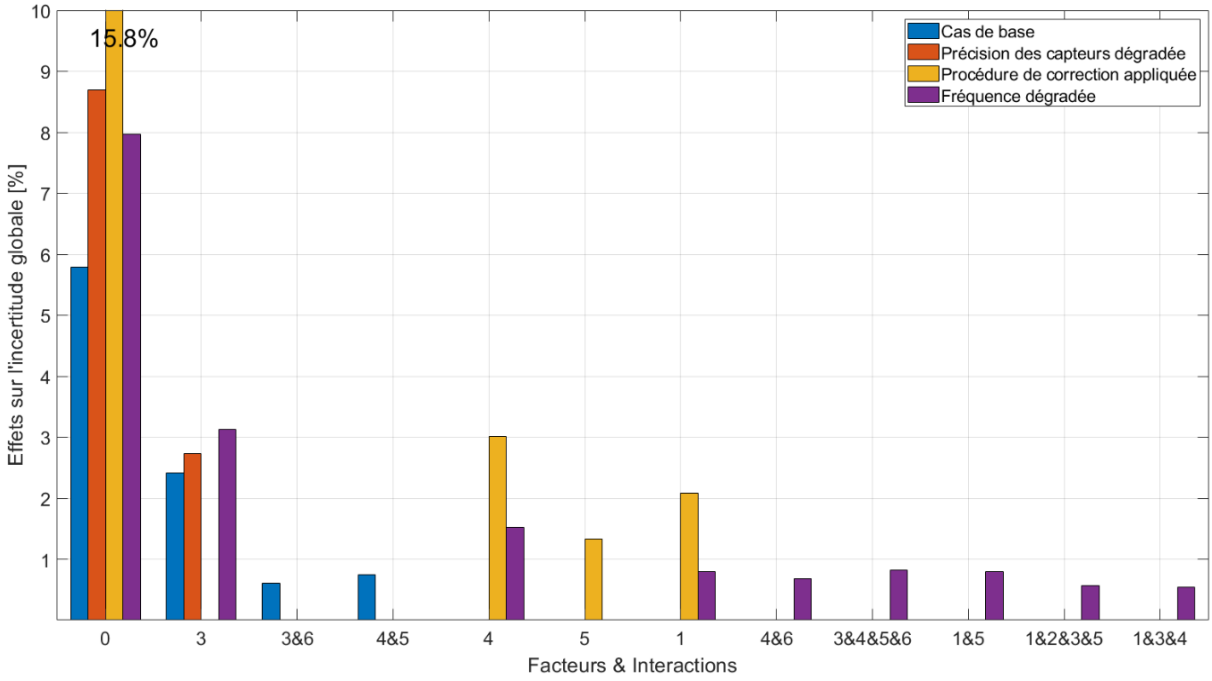


Figure 5-27 : Diagramme à barres des effets pour le capteur placé sous l'évacuation

5.3.3 Sensibilité du filtre concernant une autre position de capteur

Si le capteur ne peut pas être placé sous l'évacuation, l'effet maximal pour chaque facteur prépondérant pour au moins une zone a été considéré. Ce choix a été réalisé pour ne pas donner trop d'importance au mixage de l'air prévu par le modèle, car ce mixage a été forcé par l'introduction de l'artefact défini au paragraphe 5.2.3.3. La Figure 5-28 propose les effets

maximums pour les 4 cas. La première observation concerne l'effet moyen. Celui-ci est entre 2 et 3 points supérieur à celui de la zone placée sous l'évacuation. Ensuite, on retrouve l'influence du mixage de l'air (6) auquel la zone placée sous l'évacuation était quasiment insensible. Ici, le mixage de l'air est le facteur le plus influent, et ce pour les 4 cas, avec entre 2,5 et 3,2% d'effet sur l'incertitude. Son interaction avec d'autres paramètres comme l'occupation (3), le vent (4) et les infiltrations (1), ou la température (5) entraîne également des effets importants (> 1%) pour la plupart des cas. C'est un élément important car on voit que cela affecte considérablement la précision de la méthode, alors que la zone placée sous l'évacuation y était quasiment insensible. Par exemple pour le cas de base, un mauvais mixage de l'air cumulé à du vent entraîne une erreur supplémentaire relativement considérable de 8,3% comparé à la zone placée sous l'évacuation. Les infiltrations (1) sont prépondérantes pour les 4 cas avec des effets supérieurs à 1%. Les infiltrations sont situées sur les parois en contact avec l'extérieur, donc les parois des zones 3 et zones 4. Elles sont susceptibles d'être directement évacuées par le conduit d'extraction en zone 3, sans transiter par les zones 1 et 2, ce qui peut expliquer la sensibilité supplémentaire vis-à-vis de ce facteur. La différence de température (5) entraîne un effet significatif de 3%. C'est sûrement dû à l'augmentation du débit d'infiltrations qu'elle entraîne.

Globalement, la précision de la méthode est dégradée si le capteur n'est pas placé sous l'évacuation. Le mixage de l'air a une influence considérable. Ensuite, les infiltrations, et les paramètres influents sur celles-ci comme le vent et la température augmentent la sensibilité de la méthode. Le mixage de l'air et les infiltrations sont responsables des disparités spatiales d'homogénéité du gaz. Ces observations sont donc logiques. La meilleure représentativité de la zone située sous l'évacuation a une nouvelle fois été vérifiée. L'amélioration de la précision et la réduction de la sensibilité qu'offre cette zone sont considérables.

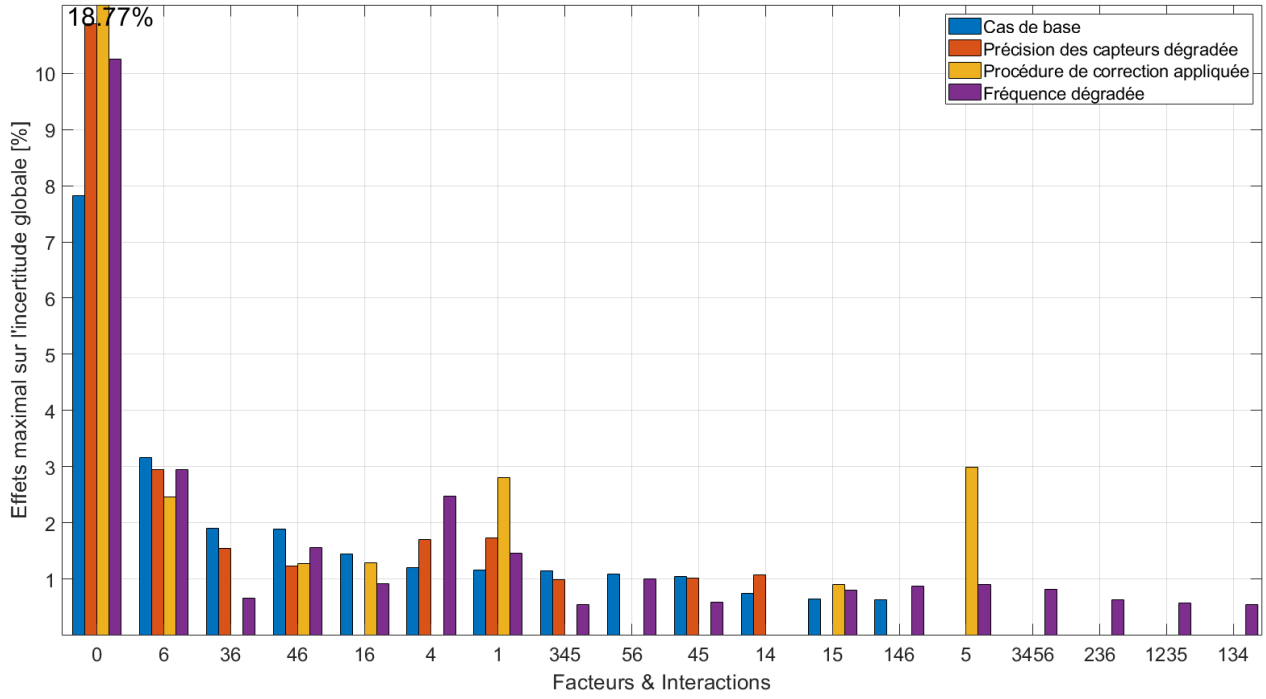


Figure 5-28 : Effets pour le capteur placé de manière indifférente

5.3.4 Réduction de la sensibilité par rapport à la méthode 2 points

Le tableau qui concatène les résultats des effets par zone pour le cas de base est présenté en annexe 5.6. La Figure 5-29 montre le diagramme à barres des effets pour la méthode 2 points et pour le filtre de Kalman concernant le cas de base. L'effet maximal, et l'effet de la zone sous l'évacuation sont mentionnés. Les effets moyens de la méthode 2 points sont plus de 2 fois supérieurs aux effets moyens du filtre de Kalman. Ils valent 17,8% pour l'effet maximal, et 13.2% pour la zone d'évacuation. Ensuite, l'occupation (3) tend à des effets considérables, respectivement de 23 et 17%. On sait que la méthode 2 points est biaisée si la concentration de transit varie. On a donc vérifié qu'elle y est extrêmement sensible. C'est déjà l'observation qui avait été faite dans le chapitre 4, mais l'impact sur la méthode était moindre. La variation de la concentration de transit imposée ici par le profil d'occupation est largement supérieure à celle imposée dans le chapitre 4, ce qui explique le plus grand impact (1000 ppm de variation pendant la mesure environ, contre 150 ppm dans le chapitre 4).

On note également une plus grande sensibilité spatiale par le grand nombre de facteurs qui sont prépondérants pour une des zones, alors qu'ils ne sont pas pour la zone située sous l'évacuation (20 contre 10 pour le filtre de Kalman). La sensibilité vis-à-vis du mixage imparfait (6) est d'ailleurs plus de deux fois supérieure à celle du filtre de Kalman.

La grande sensibilité de la méthode 2 points explique que la procédure biaisée d'estimation du CO_2 de transit ait eu plus d'influence dans ce chapitre que dans le chapitre 4.

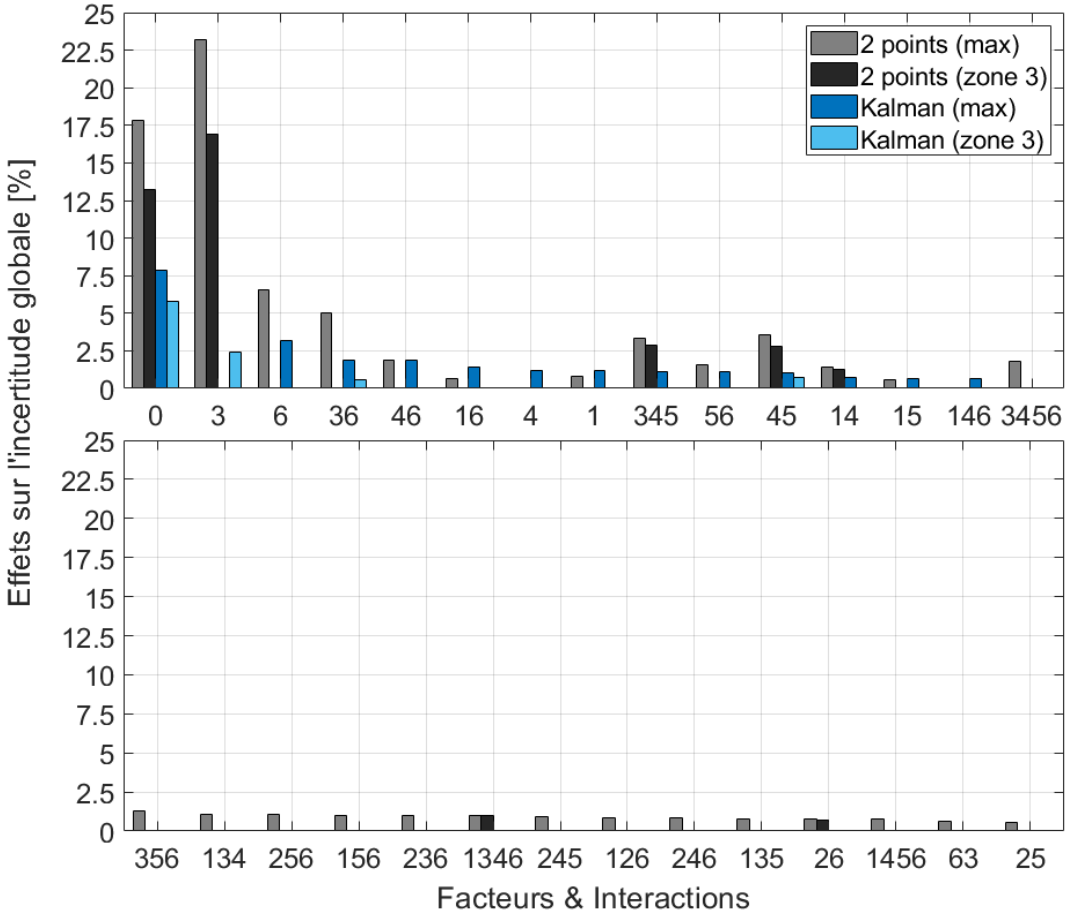


Figure 5-29 : Effets de la méthode 2 points et du filtre de Kalman pour le cas de base

5.3.5 Prise en compte du nombre de points de mesure sur 2 τ

Le paragraphe 5.3.2 avait montré qu'il y avait un lien entre la fréquence d'acquisition et la dégradation des résultats. En revanche, le nombre de points différents qu'engendrait chaque simulation empêchait de pouvoir intégrer directement cette observation dans la formulation de l'incertitude. L'influence du nombre de points de mesure est associée à l'erreur de l'initialisation du taux de ventilation évaluée par la méthode 2 points. Afin de déterminer l'influence du nombre de points de mesure, on choisit une simulation engendrant une forte sensibilité de la méthode 2 points, et on dégrade la fréquence d'acquisition. Cela permet d'estimer l'influence de la fréquence d'acquisition pour le cas le plus critique, et donc de majorer l'incertitude associée. Le paragraphe 5.3.4 avait montré la grande sensibilité de la méthode 2 points vis-à-vis de l'occupation et du mixage de l'air. On choisit donc la simulation pour laquelle ces facteurs prennent leur niveau « tout ». Le nombre de points disponibles sur 2τ vaut 160 avant dégradation de la fréquence. On sélectionne ensuite un point sur 3, sur 4, sur 6, et sur 9.

La Figure 5-30 met en évidence le lien entre le nombre de points de mesure disponibles sur 2τ, et l'incertitude globale. L'incertitude globale est calculée sur les trente décroissances du cas avec occupation et mixage imparfait de l'air. L'incertitude globale de la zone 3, ainsi que celle de la zone présentant l'incertitude maximale sont données. De 160 à 55 points de mesure, il n'y a pas d'influence de la dégradation du nombre de points de mesure. Ensuite, de 55 points de mesure à 20 points de mesure, l'incertitude maximale rencontrée parmi les zones a augmenté quasi exponentiellement de 7 points. L'incertitude de la zone sous l'évacuation est quasiment stable jusqu'à 40 points de mesure. En revanche, de 40 points de mesure à 20 points de mesure, l'incertitude globale est dégradée, pour cette même zone, de 6 points. La dégradation est donc similaire, en ordre de grandeur, pour l'incertitude maximale, et l'incertitude de la zone située sous l'évacuation. On choisit donc de sélectionner la dégradation la plus critique pour en tenir compte dans la formulation de l'incertitude. Il est proposé d'additionner l'augmentation de l'incertitude maximale à l'incertitude résultante de l'analyse de sensibilité, en fonction du nombre de points disponibles. Par exemple, si 45 points de mesure sont disponibles, alors l'incertitude est majorée de 2%. Si 22 points sont disponibles, elle est majorée de 7%. A partir de 20 points de mesure, le calcul de l'incertitude ne sera plus réalisé, car il dépend trop de l'incertitude de la méthode 2 points, et les conclusions de l'analyse de sensibilité deviennent caduques.

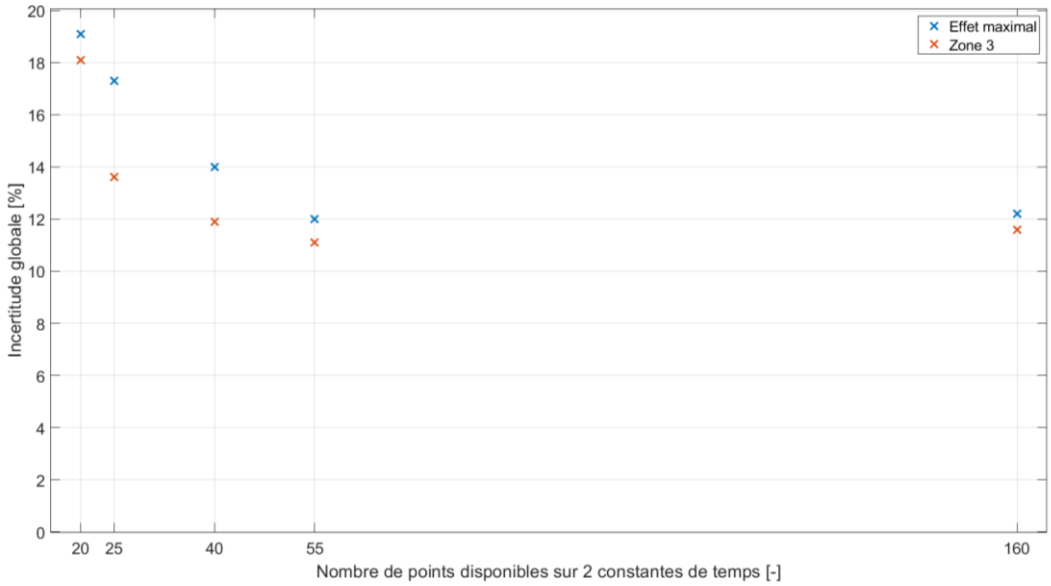


Figure 5-30 : Lien entre la précision et le nombre de points disponibles pour le cas avec occupation, et mixage imparfait

5.4 Définition de l'incertitude

L'analyse de sensibilité a permis d'évaluer l'impact des facteurs sur la précision de la méthode. Elle permet donc de formuler l'incertitude de la méthode en fonction des différents paramètres. La démarche de l'analyse de sensibilité a amené à développer 6 formules, suivant la position du capteur, la précision des capteurs, ou l'application de la procédure biaisée de correction du CO_2 de transit. Par ailleurs, l'influence du nombre de points de mesure est également prise en compte.

La Figure 5-31 montre l'arbre de décision qui permet de déterminer quelle équation utiliser pour calculer l'incertitude. Les équations de 1 à 6 définissant les incertitudes sont données en annexe 5.7. Par exemple, si le capteur peut être placé sous la zone d'évacuation, que la procédure biaisée d'estimation du CO_2 de transit n'a pas été appliquée, et que la précision des capteurs est inférieure ou égale à 5%, on peut s'attendre à une incertitude comprise entre 6% et 9,5% suivant la valeur de l'occupation, du mixage de l'air, du vent ou de la différence de température. L'équation 1 donnée en annexe 5.7 doit alors être utilisée pour calculer plus précisément l'incertitude majorée. Si le capteur a pu être placé sous l'évacuation, et que la procédure biaisée d'estimation du CO_2 de transit a dû être appliquée, l'incertitude sera estimée entre 16 et 22% suivant la valeur des paramètres tels que le vent, les infiltrations, et la différence de température. L'équation 3 de l'annexe 5.7 doit être utilisée. L'incertitude maximale correspond au cas où le capteur est placé de manière indifférente, et que la procédure biaisée de correction du CO_2 de transit a dû être effectuée. L'incertitude peut alors aller jusque 36,4% suivant la valeur des paramètres mentionnés. L'équation 6 de l'annexe 5.7 doit être utilisée.

Dans le chapitre 4, la procédure biaisée d'estimation du CO_2 de transit était appliquée car les 5τ n'étaient pas atteints. Le cas avec ouverture de porte et occupation considéré à partir du capteur sous l'évacuation engendrait une erreur de 16%. Pour le reste, et toujours avec le capteur sous l'évacuation, les erreurs étaient inférieures à 12%. Si l'on suit l'arbre de décision présenté en Figure 5-31, la valeur minimale obtenue si le capteur est placé sous l'évacuation, et que la procédure d'estimation du CO_2 de transit a dû être appliquée, vaut 16%. Les valeurs sont donc cohérentes.

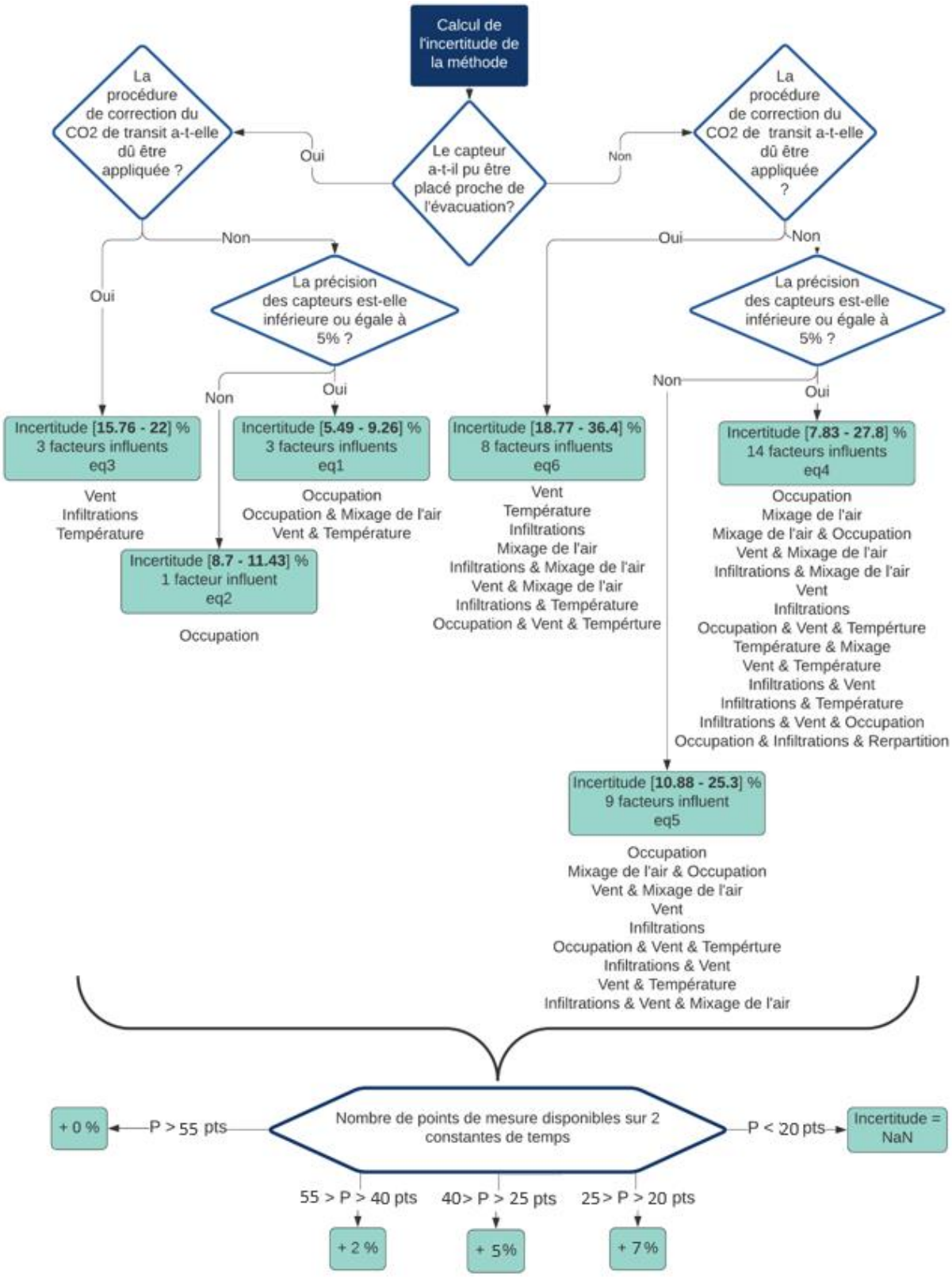


Figure 5-31 : Arbre de décision pour le calcul de l'incertitude du filtre de Kalman

6 Conclusion

Dans ce chapitre, la double cellule expérimentale Hybcell qui était ventilée mécaniquement a été transformée pour être ventilée naturellement par conduit (cellule NATCELL). Une modélisation aéraulique à discrétisation zonale en code en pression de la double cellule expérimentale NATCELL a été réalisée à l'aide d'un code en pression. Ce modèle a ensuite été validé sur la base d'une comparaison des taux de ventilation calculés par la méthode Kalm'Air à partir des décroissances des concentrations mesurées, et simulées. Il a ensuite été utilisé pour réaliser une analyse de sensibilité sur six paramètres à deux niveaux. Ces paramètres sont de types « tout-ou-rien » afin de pouvoir estimer rapidement leur valeur, et que le calcul de l'incertitude ne requiert pas de mesures annexes. L'influence de trois autres paramètres indépendants du plan d'expérience a également été évaluée.

L'analyse de sensibilité a permis de montrer que le filtre de Kalman apporte une très nette diminution de la sensibilité comparée à la méthode 2 points, notamment en termes de mixage de l'air (6-7% environ) et d'occupation dans la pièce de vie (15% environ). L'erreur moyenne était également nettement plus basse pour le filtre de Kalman, d'environ 10%. Le potentiel de fiabilisation du filtre a donc été clairement confirmé.

Concernant la sensibilité de la méthode Kalm'Air, six équations ont été définies pour calculer l'incertitude de la méthode en fonction de dix paramètres. Un arbre de décision a été créé pour guider l'expérimentateur vers l'équation appropriée. La zone située sous l'évacuation d'air s'est montrée significativement moins sensible que les autres. Pour cette zone, seule l'occupation engendre une dégradation significative de la précision, de 2 à 3%. En revanche, si le capteur n'est pas proche de l'évacuation, l'impact d'un mixage imparfait de l'air, ou des infiltrations augmente significativement les incertitudes. Quelle que soit la zone de mesure, un lien a été observé entre dégradation de la précision et diminution du nombre de points de mesure. Par ailleurs, l'application de la version biaisée de la procédure du chapitre 4 pour corriger la valeur du CO_2 de transit a dégradé les résultats de 10% en moyenne. Il est alors conseillé d'attendre le maximum de temps pour maximiser les chances que la décroissance de concentration ait été complète, afin que la version non biaisée de la procédure soit appliquée.

Globalement, dans le meilleur des cas (le capteur placé sous l'évacuation, durée de 5τ atteinte, précision des capteurs inférieure ou égale à 5%, et logement inoccupé), l'incertitude globale est évaluée à 5,8%. En revanche, dans le pire des cas (capteur non placé sous l'évacuation, procédure biaisée devant être appliquée), l'incertitude peut valoir jusqu'à 36,4% suivant la qualité du mixage de l'air, la force du vent, les infiltrations et l'occupation.

Nous consacrerons le prochain chapitre à transcrire le protocole développé durant la thèse dans un protocole technique et une application numérique pouvant être opérés en conditions in situ, par un expérimentateur non expert. Le protocole d'injection et de mesure sera complétement décrit. Par ailleurs, l'outil numérique Kalm'Air sera développé afin d'automatiser l'analyse de la méthode Kalm'Air. Il procédera donc à la correction du CO_2 de transit, au calcul du taux de ventilation par filtre de Kalman, de l'âge de l'air et à l'estimation de l'incertitude associée à la mesure résultant de ce chapitre. Il permet véritablement à tout expérimentateur de s'approprier la méthode de mesure du taux de ventilation d'un logement ventilé naturellement par conduits, sans nécessiter de connaissances en traitement du signal, ou en méthode gaz traceur.

Chapitre 6 Application in situ automatisée de la méthode Kalm'Air

Elaboration du protocole d'injection et de mesure

Développement de l'outil Kalm'Air

1 Introduction

Afin de répondre aux objectifs présentés dans le Chapitre 1, la méthode de mesure développée durant cette thèse doit être :

i. précise;
ii. adaptée à une application in situ ;
iii. applicable par un plus grand nombre d'opérateurs ;
iv. relativement bon marché.

La méthode par décroissance de la concentration utilisée avec le CO_2 comme gaz traceur permet de réduire considérablement les coûts par rapport à la méthode cadrée par la norme ISO 12569 [53]. Le développement sur le marché de capteurs CO_2 autonomes présentant un bon rapport précision/coût, ainsi que la percussion d'une bouteille de gaz permettent de s'affranchir d'un régulateur de débit massique ainsi que d'un analyseur de gaz, souvent onéreux (50k€). Le choix de cette méthode gaz traceur associée au CO_2 a permis d'assurer un coût maîtrisé (iv.).

Le chapitre 4 a permis de fiabiliser la méthode par décroissance de la concentration à l'aide du filtre de Kalman et d'une procédure de prétraitement des données de concentration. Cette méthode intégrant les deux éléments cités associés à un protocole d'injection et de mesure est appelée méthode Kalm'Air. Elle a permis de traiter conjointement les points (i.) et (ii.) en adaptant la méthode par décroissance de la concentration aux contraintes apportées par un logement multi-zones. Le chapitre 5 a caractérisé l'incertitude de la méthode Kalm'Air, et a montré l'amélioration significative de la précision par rapport à la méthode originelle. En revanche, le filtre de Kalman est un filtre sophistiqué qui nécessite la maîtrise de notions de traitement du signal. Cela rentre en contradiction avec le point (iii.).

L'objectif de ce chapitre est donc de rendre la méthode Kalm'Air applicable par un opérateur qui n'aurait pas à avoir de connaissances en traitement du signal ni en méthodes gaz traceur. Un protocole d'injection et de mesure est proposé, ainsi qu'un outil automatisé effectuant toute l'analyse développée durant la thèse. L'outil automatisé se nomme « outil Kalm'Air ». L'expérimentateur n'aura qu'à suivre le protocole d'injection et de mesure proposé dans ce chapitre, et à renseigner les valeurs de concentrations du gaz traceur ainsi qu'un certain nombre de paramètres dans Kalm'Air. L'analyse du taux de ventilation par filtre de Kalman développée durant cette thèse est ensuite automatisée.

L'outil Kalm'Air intègre le calcul de l'estimation de l'incertitude caractérisée dans le chapitre 5. Il intègre également le calcul de l'âge de l'air qui permet, conjointement avec le taux de ventilation, de calculer l'efficacité locale de renouvellement d'air. Cette notion est essentielle dans la caractérisation de la performance aéraulique des systèmes de ventilation. Ce chapitre est le dernier maillon qui permet de concrétiser le développement théorique et expérimental réalisé durant ces travaux en une méthode de mesure in situ concrète. Un opérateur non expert pourra alors mesurer les performances aérauliques, avec une marge d'incertitude connue, d'un système de ventilation naturelle par conduit installé dans un logement.

Ce chapitre présentera le protocole. Il exposera ensuite le développement de l'outil automatisé de l'analyse de la méthode Kalm'Air. Finalement, le protocole complet de la méthode Kalm'Air sera testé sur un cas d'étude.

2 Protocole d'injection et de mesure de la méthode Kalm'Air

2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental pour la méthode réalisée dans une pièce requiert :

- une bouteille de gaz au grammage adéquat ;
- un percuteur ;
- des gants pour tenir le percuteur ;
- deux capteurs CO_2 minimum (un dans la pièce, un dans la pièce d'où provient l'air) ;
- un ventilateur de brassage ;
- un ordinateur pour le post-traitement des données.

Pour un logement entier, comme les mesures sont réalisées quasi-simultanément dans les deux ou trois pièces de service, il faut alors doubler ou tripler le nombre de capteurs (quatre ou six capteurs minimum), ainsi que le nombre de bouteilles de gaz (deux ou trois bouteilles). La Figure 6-1 montre une photo du matériel requis en nombre unitaire.



Figure 6-1 : Matériel requis dans le dispositif expérimental,

Le chapitre 4 avait montré que la méthode Kalm'Air était sensible à une injection basse de CO_2 (inférieure à 2500 ppm). Le grammage de la bouteille de gaz percutée doit donc permettre d'atteindre une concentration homogène de 2500 ppm dans la pièce testée. En considérant une valeur limite de 5000 ppm, qui est le seuil maximal de mesure des capteurs, et en prenant la masse volumique du CO_2 égale à 1,87 $kg.m^{-3}$, on obtient les grammages adéquats en fonction du volume de la pièce d'étude, synthétisés en Tableau 6-1. Quand plusieurs grammages sont possibles, il convient, pour des raisons environnementales, de sélectionner la bouteille au plus faible grammage adéquat. Pour calculer la concentration théoriquement obtenue à partir d'une bouteille d'un certain grammage, il suffit d'utiliser la formule définie

dans l'équation 6.1. La percussion de la bouteille de gaz dure une minute environ. Nous faisons l'hypothèse, pour calculer la concentration C_0, que l'évacuation du gaz par le système de ventilation pendant cette courte période n'affecte pas le niveau atteint de CO_2 à la fin de l'injection:

$$C_0 = C_{pièce} + \frac{p}{\rho_{CO_2} \cdot V} \quad (6.1)$$

Avec :

- p le grammage de la bouteille de CO_2 [g];
- V le volume de la pièce [m^3] ;
- C_0 la concentration initiale après vidage complet de la bouteille [ppm] ;
- $C_{pièce}$ la concentration dans la pièce avant injection [ppm].

Volume de la pièce	**[5 – 10] m^3**	**[10 – 15] m^3**	**[15 – 20] m^3**	**[20 – 25] m^3**	**[25 – 30] m^3**	**[30 – 35] m^3**	**[35 – 40] m^3**	**[40 – 45] m^3**	**[45 – 50] m^3**
Grammage de gaz [g]	40	60	100	100 150	150 200	150 200 250	200 250 300	200 250 300 350	250 300 350 400

Tableau 6-1 : Grammage des bouteilles à percuter en fonction du volume de la pièce

Concernant la précision des capteurs de CO_2, la norme ISO 12569 [22] préconise une incertitude maximale tolérée de 5% pour la méthode par décroissance de la concentration conventionnelle. Le filtre de Kalman est peu sensible vis-à-vis des erreurs de mesure comme a pu le montrer le chapitre 5. Le calcul de l'incertitude proposé dans le chapitre 5 prend en compte des incertitudes de mesure de concentration jusque 10%. Cette valeur d'incertitude de mesure est donc proposée comme valeur maximale tolérée.

2.2 Le protocole d'injection et de mesure de la méthode Kalm'Air

Le protocole d'injection et de mesure est présenté en Figure 6-2.

3 bouteilles de gaz, 6 capteurs de concentrations, un percuteur, un ventilateur de brassage, du scotch, des gants

- Choisir le grammage de gaz adéquat pour chaque pièce de service

Volume de la pièce	[5 – 10] m³	[10 – 15] m³	[15 – 20] m³	[20 – 25] m³	[25 – 30] m³	[30 – 35] m³	[35 – 40] m³	[40 – 45] m³	[45 – 50] m³
Grammage de gaz [g]	40	60	100	100, 150	150, 200	150, 200, 250	200, 250, 300,	200, 250, 300, 350	250, 300, 350, 400

- Vérification fonctionnelle des composants aérauliques:
  Etat des bouches, détalonnage des portes de 1,5 cm et 3 cm pour la cuisine

- Disposition des capteurs dans les pièces de service dans un plan médian
  Au moins un par pièce de service situé proche de l'évacuation d'air ou au centre si ce n'est pas possible



- Placer un capteur en amont de chaque transit
  Pas juste devant le transit pour ne pas perturber le flux d'air



- Pénétrer dans une pièce de service (l'ordre n'importe pas) et fermer la porte
- Actionner le ventilateur de brassage
- Mettre ses gants et percuter la bouteille de CO_2



- Brasser l'air pendant encore 1 minute après que la bouteille se soit vidée
- Sortir de la pièce, refermer la porte, et recommencer rapidement dans une autre pièce de service jusqu'à avoir fait les 3.

- Récupérer le matériel si possible après 5 constantes de temps, mais au minimum après 2 constantes de temps. La concentration intérieure a perdu respectivement 100 ou 87% de sa concentration initiale.

Taux de ventilation [Vol/h]	0,3	0,8	1	2	5	10
2 constantes de temps [h]	6,7	2,5	2	1	0,4	0,2
5 constantes de temps [h]	16,7	6,25	5	2,5	1	0,5

Figure 6-2 : Protocole d'injection et de mesure

3 Développement de l'outil automatisé 'Kalm'Air'

3.1 Introduction à l'outil Kalm'Air

L'outil Kalm'Air a été développé à l'aide de l'application App Designer de l'environnement matlab. Il peut s'exporter en fichier matlab (.mat) ou en fichier exécutable (.exe). Il peut donc être installé sur tout ordinateur. Il est complémentaire avec le protocole d'injection et de mesure présenté au paragraphe 2.2. Le protocole et l'outil représentent, à eux deux, la méthode Kalm'Air. Cela signifie que, sans connaître les méthodes gaz traceur, ni le filtre de Kalman, un opérateur peut réaliser une mesure des performances aérauliques d'un système de ventilation naturelle par conduit installé dans un logement. L'outil Kalm'Air va guider l'expérimentateur afin d'adapter les paramètres du filtre de Kalman, notamment les bruits de processus, sans avoir recours aux bases théoriques.

Comme il a été mentionné dans le chapitre 2, l'âge de l'air et le taux de ventilation doivent être évalués conjointement pour caractériser la performance aéraulique d'un système de ventilation. Cela faisait d'ailleurs partie des raisons pour lesquelles la méthode par décroissance de la concentration avait été choisie. Cette évaluation conjointe est proposée par l'outil Kalm'Air. La Figure 6-3 présente succinctement les entrées, et les sorties de l'outil Kalm'Air. Des interactions avec l'expérimentateur au cours du processus de calcul permettent d'adapter les paramètres intrinsèques au filtre de Kalman. Le fonctionnement du filtre est davantage détaillé dans le prochain paragraphe.

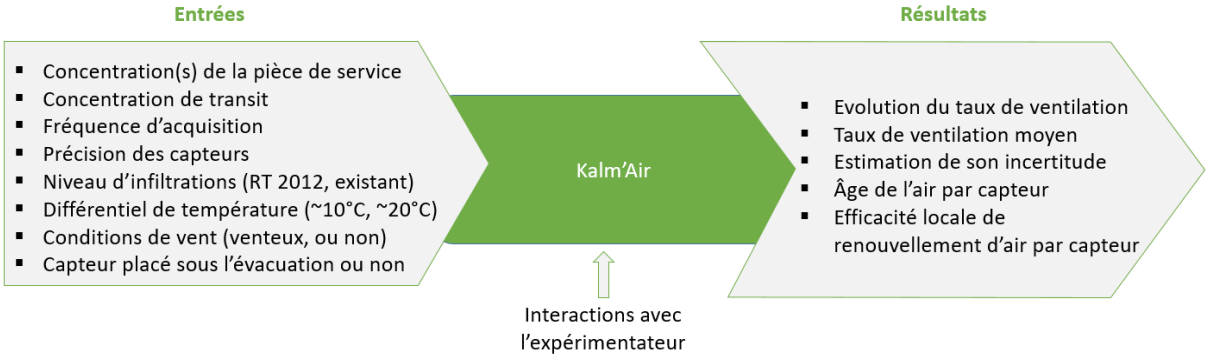


Figure 6-3 : Schéma des entrées et sorties de l'outil Kalm'Air

3.2 Fonctionnement de l'outil Kalm'Air

La Figure 6-4 présente l'organigramme du fonctionnement de l'outil Kalm'Air. Les boites blanches correspondent à des actions que l'expérimentateur doit réaliser. Les boites grises, quant à elles, représentent les calculs automatisés que réalise l'outil. Une fenêtre d'aide est disponible pour guider l'expérimentateur dans les actions que l'outil lui demande d'exécuter. Le protocole d'analyse de l'outil Kalm'Air est disponible en annexe 6.1. La procédure complète peut se diviser en trois phases.

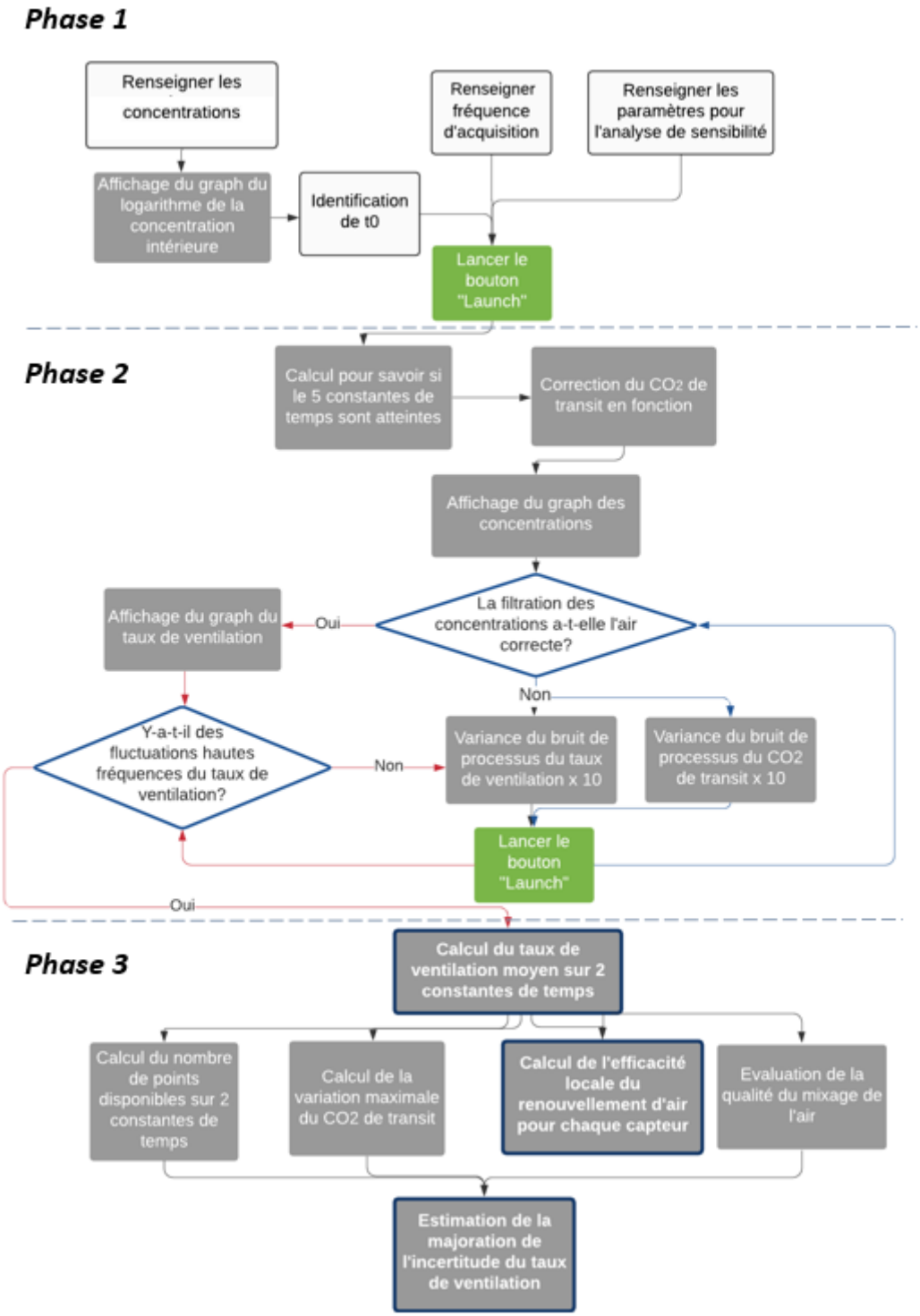


Figure 6-4 : Logigramme de la procédure de Kalm'Air

3.2.1 Phase 1

La première phase est une phase impliquant l'expérimentateur. Il doit renseigner les concentrations du gaz traceur dans l'outil. Les concentrations doivent être renseignées sous le format excel, avec en première colonne la concentration de transit, en deuxième colonne la concentration dans la pièce de service qui sera utilisée pour le calcul du taux de ventilation (capteur situé proche de l'évacuation d'air ou au centre de la pièce). Si d'autres capteurs ont été installés dans la pièce de service, leurs concentrations doivent être spécifiées dans les colonnes suivantes. Après chargement des concentrations, l'outil cherche le maximum de la concentration intérieure qui correspond à la fin de la phase d'injection du gaz. Ensuite, un graphique apparaît présentant le logarithme de la concentration sur le début de la décroissance. L'expérimentateur doit alors définir le point initial t0 qui correspond à un point d'inflexion du logarithme de la concentration, représentant la fin de la période transitoire à éviter, durant laquelle la concentration est fluctuante. Ce point t0 correspond au premier point utilisé pour l'analyse. Durant cette même phase, l'expérimentateur renseigne la fréquence d'acquisition, ainsi que les paramètres influents sur l'incertitude. Quand tous ces paramètres sont renseignés, l'expérimentateur peut lancer un premier calcul en appuyant sur « launch & refresh ». La première phase est terminée.

3.2.2 Phase 2

La deuxième phase correspond à l'interaction avec l'expérimentateur, afin d'adapter le bruit de processus des paramètres d'état du filtre de Kalman (cf. Chapitre 4) aux données expérimentales. L'interaction se réalise par le biais de questions fermées posées à l'expérimentateur d'abord quant au filtrage des concentrations, et ensuite quant à la présence de fluctuations hautes fréquences observées sur le calcul du taux de ventilation.

En amont de ces interactions, un calcul est réalisé pour savoir si les 5τ sont atteintes. Cela permet de savoir si la procédure d'estimation du CO_2 de transit explicitée au chapitre 4 doit être réalisée dans sa version biaisée ou non. Afin de vérifier si les 5τ sont atteintes, Kalm'Air compare la dérivée du CO_2 de transit et du CO_2 intérieur. Si les deux dérivées finissent par s'égaliser (à 1 ppm par pas de dérivation près), cela signifie qu'il n'y a plus d'accumulation de gaz dans la pièce de service, car les variations du CO_2 de la pièce de service sont uniquement reflets des variations du CO_2 de transit. On remarquera qu'avec des variations importantes du CO_2 de transit à proximité des 5τ, l'inertie des mécanismes physiques empêchera aux deux dérivées de s'égaliser. En revanche, les deux dérivées ne s'égaliseront jamais si les 5τ ne sont pas atteintes. Ce critère marque donc une condition nécessaire mais pas suffisante pour vérifier que la période optimale est atteinte. Le risque, si la variation de CO_2 de transit à proximité des 5τ est importante, est de réaliser la procédure de correction dans sa version biaisée alors qu'elle n'était pas nécessaire, et donc d'augmenter l'incertitude de la mesure, ainsi que son estimation. Ce risque reste limité.

Après correction des concentrations, le graphique montrant les concentrations mesurées et filtrées s'affiche, et l'expérimentateur doit juger la qualité de leur corrélation. Afin de ne pas compliquer l'interaction entre l'outil et le mesureur, la concentration de transit et la concentration intérieure sont traitées par la même question. Pour rappel (cf. Chapitre 4), une faible corrélation entre les concentrations mesurées et simulées est engendrée par une sous-estimation du bruit de processus leur étant associée, sous-estimation qui introduit une inertie dans l'estimation des paramètres. En revanche, une surestimation du bruit de processus des

concentrations est inhibée par le filtre à l'aide du gain de Kalman qui contraint les variations du paramètre estimé en les comparant à celles du paramètre mesuré. Le risque est donc uniquement de sous-estimer le bruit de processus des concentrations, et donc d'observer une inertie sur les concentrations filtrées. Si la corrélation est jugée faible par le mesureur sur l'une ou l'autre des concentrations, alors les variances des trois bruits de processus (associés aux deux concentrations et au taux de ventilation) sont multipliés par 10. Le bruit de processus du taux de ventilation est également multiplié par 10 car une erreur d'initialisation du taux de ventilation par la méthode 2 points, associée à une variance trop faible, peut aussi entraîner une inertie sur les concentrations filtrées. Le chapitre 4 avait également montré que surestimer le bruit de processus du taux de ventilation n'affectait pas le calcul du taux de ventilation moyen. En revanche, les fluctuations du taux de ventilation estimé sont amplifiées. La procédure est réitérée tant que le mesureur juge que la corrélation n'est pas assez élevée.

Ensuite, le graphique de l'évolution du taux de ventilation s'affiche. Le mesureur doit alors juger si le taux de ventilation présente des fluctuations hautes fréquences. Pour rappel, ces fluctuations hautes fréquences permettent de faire l'hypothèse que la variance du bruit de processus du taux de ventilation n'est pas sous-estimée (cf. chapitre 4). Si ces fluctuations ne sont pas observées, alors seul le bruit de processus du taux de ventilation est multiplié par 10 jusqu'à ce que ces fluctuations soient observées. Cela marque la fin de la deuxième phase.

3.2.3 Phase 3

Durant la troisième phase, le filtre fonctionne en autonomie complète pour calculer l'évolution du taux de ventilation, le taux de ventilation moyen sur 2 τ, l'âge de l'air, l'efficacité du taux de ventilation, certains paramètres servant au calcul de l'incertitude résultante du chapitre 5, et finalement l'estimation de l'incertitude de la mesure du taux de ventilation. Les calculs sont réalisés dans l'ordre chronologique suivant :

1. Une fois le taux de ventilation calculé, le nombre de points de mesure disponibles sur 2 τ est obtenu, afin d'en tenir compte dans le calcul de l'incertitude.

2. Le paramètre occupation a été identifié dans le chapitre 5 comme étant le facteur le plus influent de l'analyse de sensibilité. Or, comme il a déjà été mentionné, ce n'est pas directement à l'occupation que la méthode Kalm'Air est sensible, mais plutôt à la variation du CO_2 de transit. L'outil va donc évaluer l'écart maximal observé entre les valeurs de la concentration de transit sur 2τ. Dans le chapitre 4, la méthode Kalm'Air s'était montrée peu sensible vis-à-vis de la variation du CO_2 de transit. Or, la variation maximale du CO_2 de transit engendré par l'occupation de la pièce de vie de la cellule expérimentale était de 100 ppm sur 2τ. La variation du CO_2 de transit imposée dans le chapitre 5 était de 1000 ppm sur 2τ, ce qui dégradait la précision du filtre. Nous fixons donc le seuil de 100 ppm sur l'écart maximal du CO_2 de transit rencontré sur 2τ, en deçà duquel le calcul de l'incertitude n'intègre pas celle liée à la variation du CO_2 de transit.

3. L'âge de l'air est ensuite calculé.

4. Le mixage de l'air a également été particulièrement influent sur la précision de la méthode, notamment si le capteur n'a pas pu être placé proche de l'évacuation. La qualité du mixage est évaluée à partir de l'écart maximal de l'âge de l'air provenant des différents capteurs. Par défaut, si un seul capteur est utilisé, Kalm'Air considérera que le mixage de l'air

est imparfait (cela n'a pas d'influence si le capteur est placé proche de l'évacuation). L'analyse de sensibilité du chapitre 5 avait montré qu'avec des concentrations bruitées à hauteur de l'incertitude usuelle des capteurs de concentration, l'écart maximal sur l'âge de l'air entre les 5 zones valait 14% pour un mixage volontairement dégradé, et 8% pour un mixage parfait. Pour simplifier ces critères, si l'écart maximal de l'âge de l'air entre les différents capteurs vaut plus de 10%, Kalm'Air considère que le mixage est imparfait.

5. Le calcul de l'âge de l'air sert ensuite à calculer l'efficacité locale de renouvellement d'air pour chaque capteur. Calculer l'efficacité globale de renouvellement d'air nécessiterait d'avoir recours à un grand nombre de points de mesure, ou de les disposer judicieusement dans la pièce à différentes hauteurs, pour pouvoir ensuite modéliser la distribution de l'âge de l'air à partir de différents points de mesure [117]. Cela pourra faire partie d'une amélioration de l'outil Kalm'Air mais ce n'est pas l'objectif, à ce stade.

6. Finalement, l'incertitude liée au taux de ventilation est calculée à partir des paramètres renseignés dans la première phase, du nombre de points de mesure disponibles sur 2 τ (1), de la variation du CO_2 de transit (2), et de la qualité du mixage (3).

3.3 Interface

Les figures de la Figure 6-5 à la Figure 6-10 présentent l'interface de Kalm'Air aux différentes étapes décrites dans la Figure 6-4. La Figure 6-5 montre l'interface de départ. Les concentrations sont renseignées en appuyant sur « load concentrations », ce qui lance directement le graphique du logarithme de la concentration de la Figure 6-6, servant à définir le temps initial t0 de l'analyse. Une fenêtre d'aide est disponible (cf. annexe 6.1). Quand l'expérimentateur renseigne le temps t0 identifié, le graphique disparaît. La Figure 6-7 correspond à la première fois que le bouton « launch&refresh » est activé et lance la deuxième phase. La totalité des paramètres a été préalablement renseignée. La plupart de ces paramètres sont de type « tout-ou-rien ».

A l'étape de la Figure 6-7, l'expérimentateur doit renseigner si les concentrations sont correctement filtrées, ce qui constitue la deuxième interaction entre l'outil et l'expérimentateur. Ce dernier peut consulter l'aide proposée (annexe 6.1). La Figure 6-8 se réfère à la troisième interaction concernant les fluctuations hautes fréquences. La Figure 6-9 montre l'aide proposée pour répondre à la question.

Finalement, une fois que les fluctuations hautes fréquences sont observées, la deuxième phase est terminée, et le filtre fonctionne en autonomie. La Figure 6-10 présente l'interface finale de Kalm'Air, à la fin de la troisième phase. On remarque, au-dessus des résultats, une boîte « calculated parameters for the uncertainty estimation ». Cela correspond aux tests qui définissent si les 5τ sont atteintes, si la variation de CO_2 de transit était significative, si le mixage est bon, et combien de points de mesure étaient disponibles sur 2τ.

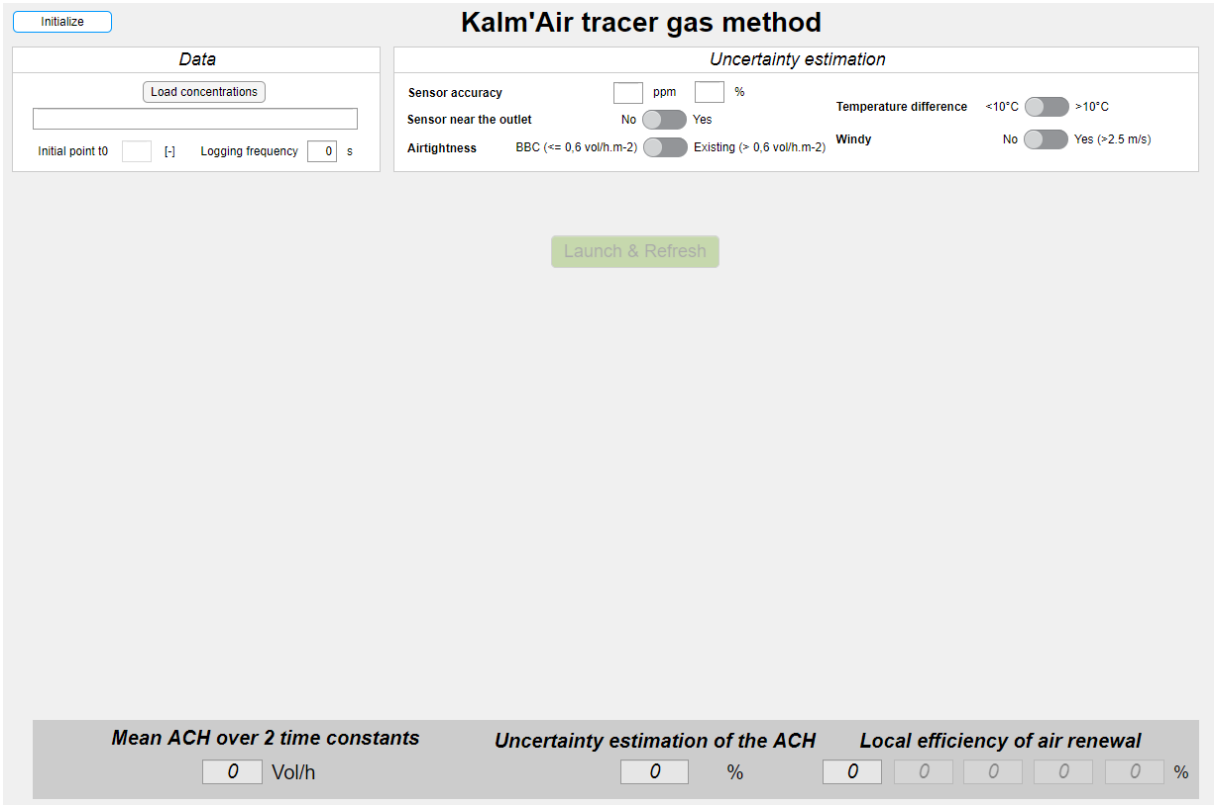


Figure 6-5 : Interface d'accueil de Kalm'Air

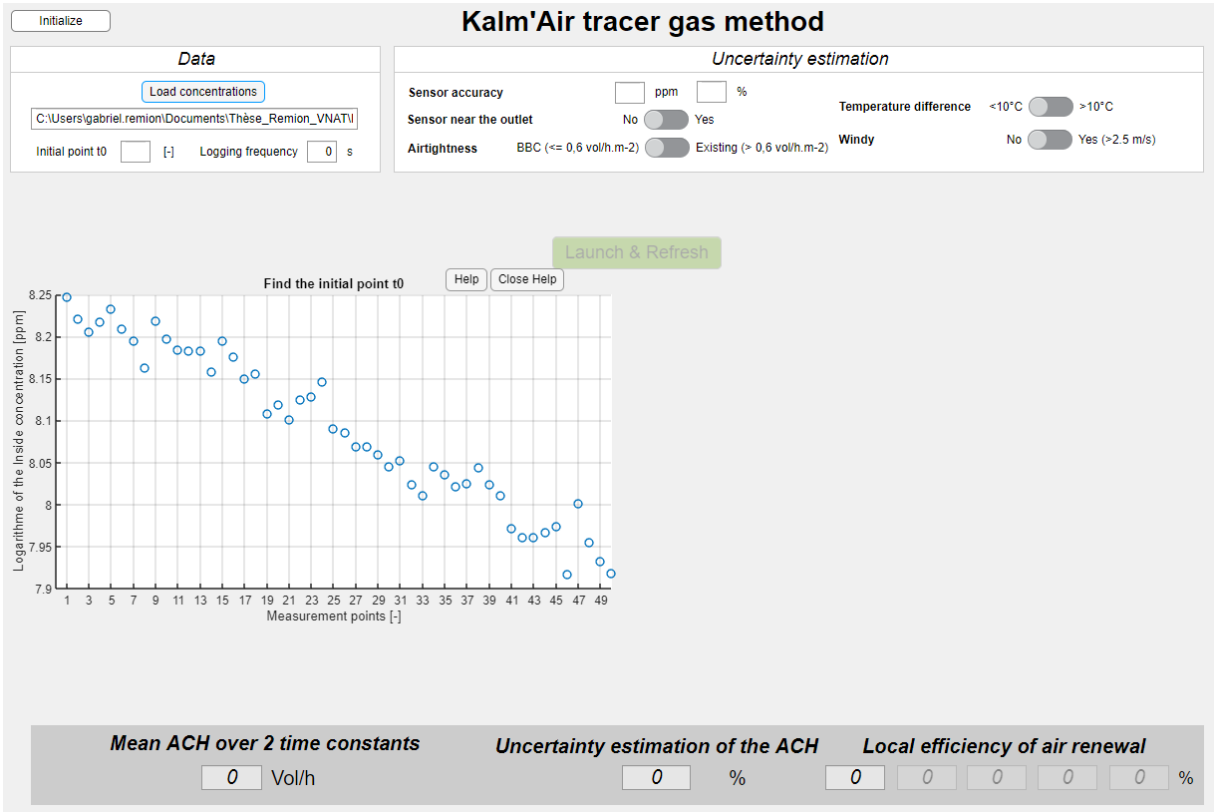


Figure 6-6 : Interface de Kalm'Air, Phase 1 choix du point initial t0

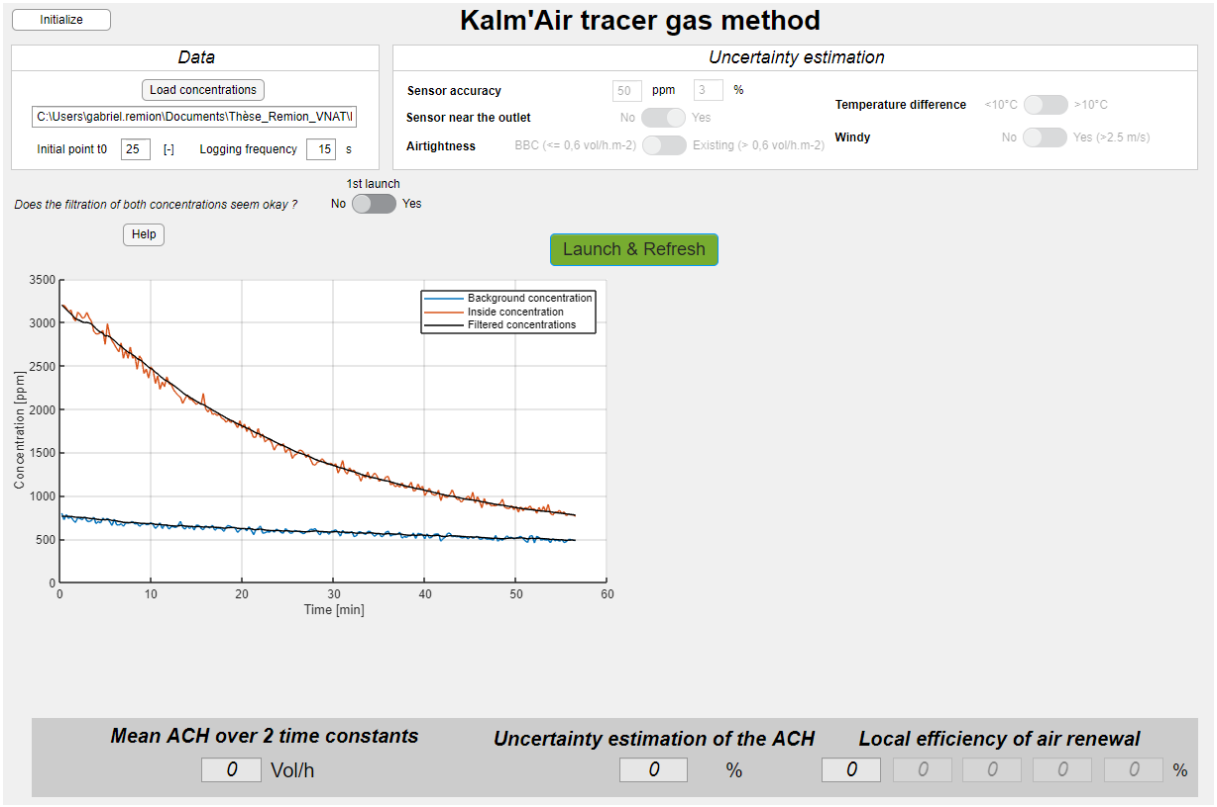


Figure 6-7 : Interface de Kalm'Air, phase 2 question qualité de la filtration

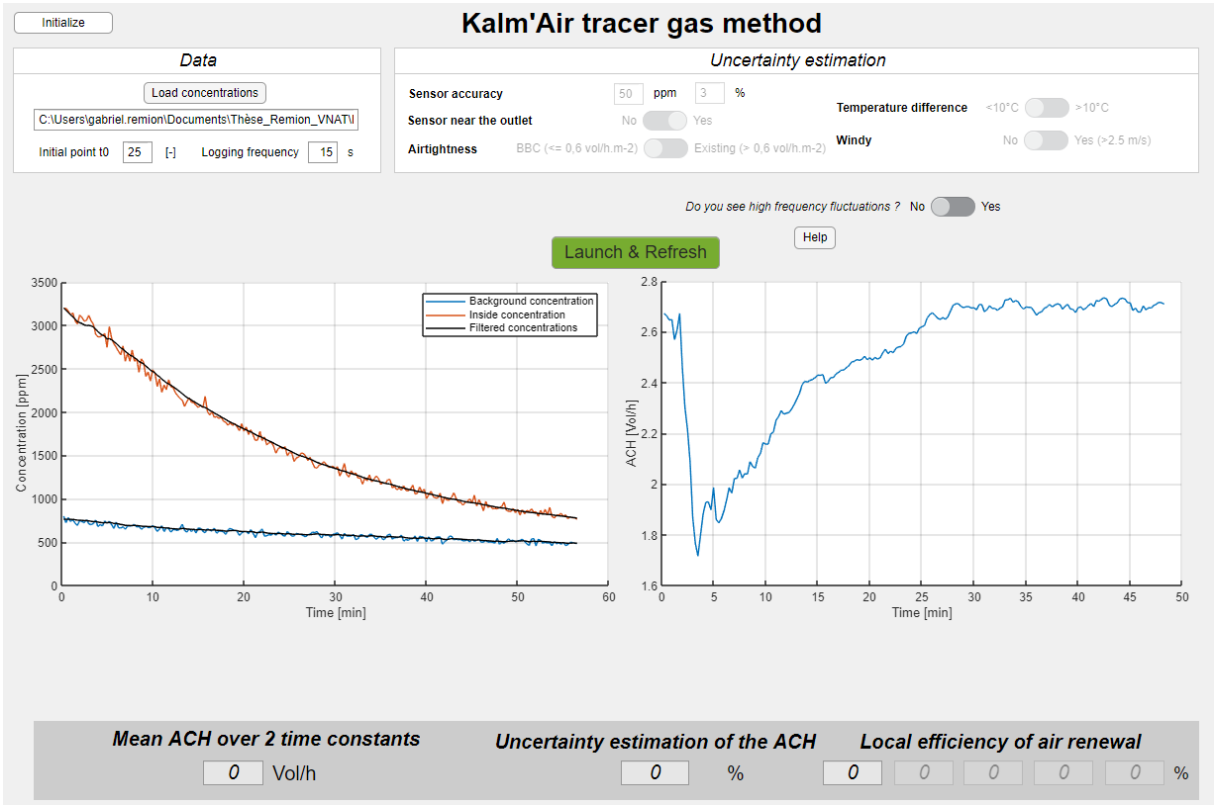


Figure 6-8 : Interface de Kalm'Air, phase 2 question fluctuations hautes fréquences

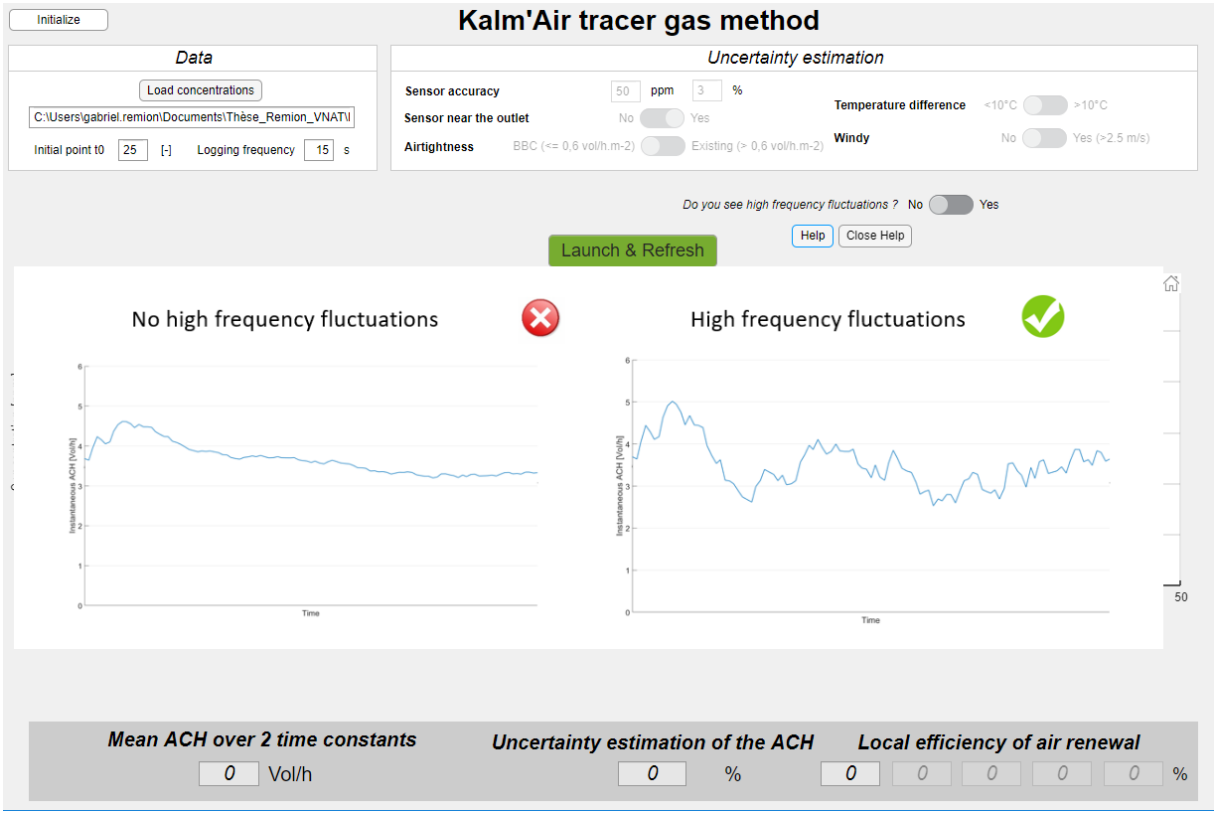


Figure 6-9 : Interface de Kalm'Air, phase 2 aide sur les fluctuations hautes fréquences

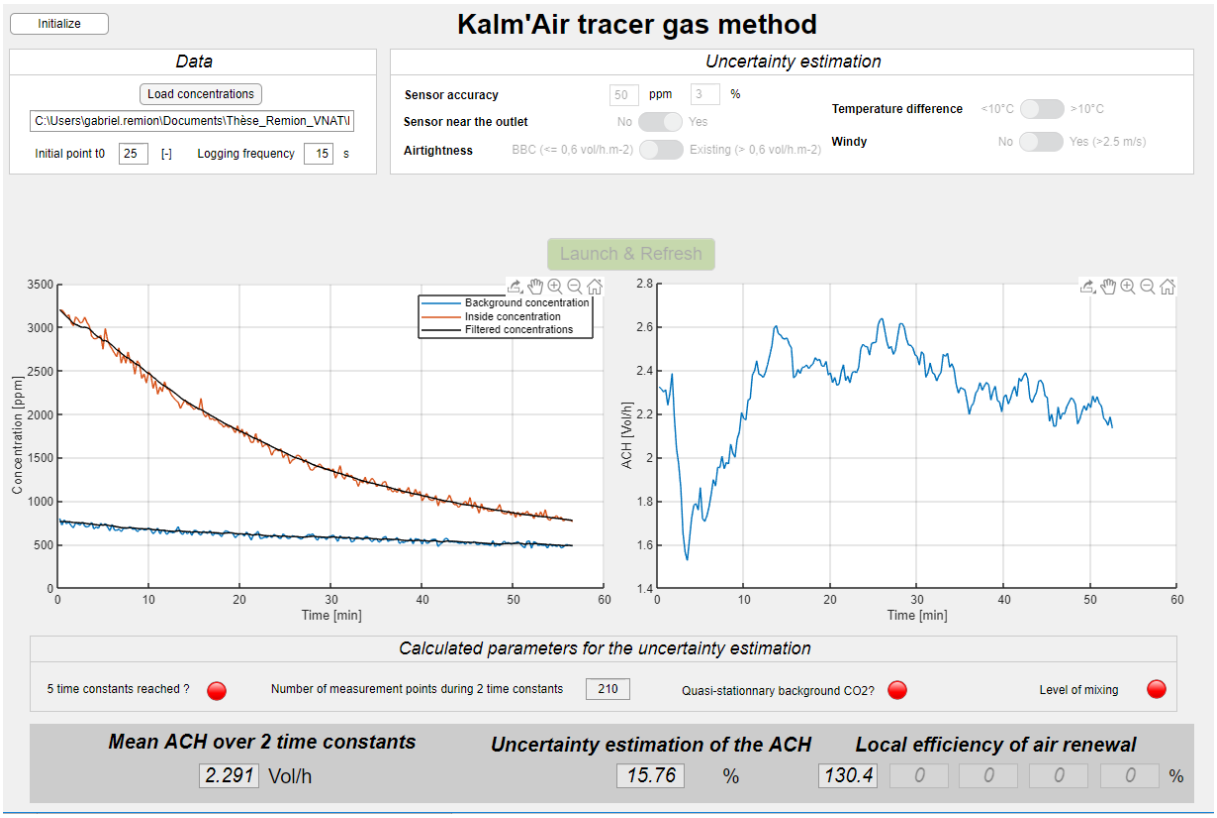


Figure 6-10 : Interface finale de Kalm'Air

4 Application in situ de la méthode Kalm'Air

4.1 Présentation du cas d'étude

Le bâtiment du cas d'étude est un bâtiment situé rue Quivogne à Lyon. C'est le cas d'étude du projet VNAT financé par l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) , porté par le Cerema en partenariat entre le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et Medieco. C'est un immeuble construit en 1955, rénové en 2014. La Figure 6-11 est une photo aérienne du bâtiment. Le bâtiment présente trois empilements de logements de six niveaux: empilements nord, sud et ouest. Le système de ventilation avant rénovation est un système de ventilation naturelle par conduit. Au cours de la rénovation de 2014, le système de ventilation a été rénové en système de ventilation hybride, par le système Hélys de la société Achtys. Les extracteurs basse pression du système de ventilation hybride sont présentés en Figure 6-12. Le mode de régulation du système de ventilation s'opère à l'aide d'une mesure de température uniquement. Si la température extérieure dépasse 2°C, alors le système d'extraction se met en route afin d'assister les forces motrices naturelles. Celles-ci ne sont toutefois pas inhibées grâce aux caractéristiques basse pression du ventilateur d'extraction. Les bouches d'entrées d'air et d'extraction sont des bouches hygro-réglables, ce qui signifie qu'elles modulent leur surface d'ouverture en fonction du taux d'humidité, ce qui permet de moduler les débits. En France, les systèmes de ventilation hygro-réglables sont largement représentés au sein des systèmes de ventilation mécanique.

Le système de ventilation n'est donc pas purement naturel. En revanche, la ventilation naturelle par conduit est impliquée dans la ventilation hybride, et leurs principes constructifs sont identiques. La méthode développée ici est donc tout à fait adaptée à la ventilation hybride, qui est très prometteuse que ce soit pour la rénovation des systèmes de ventilation naturelle par conduit, ou en vue d'implémentation dans les constructions neuves. L'analyse de sensibilité qui a permis de définir l'incertitude calculée par l'outil Kalm'Air a été menée sur la base d'un modèle aéraulique de ventilation par conduits. Il y a peu de risques que la ventilation hybride entraîne une incertitude plus importante que la ventilation naturelle par conduit :

- les fluctuations du taux de ventilation seront moins importantes en ventilation hybride qu'en ventilation naturelle par conduit car le ventilateur entraîne une perte de charge supérieure à celle d'un extracteur statique (diminution des amplitudes de variation), et il renforce les faibles débits ;
- le mixage de l'air sera similaire voire meilleur en ventilation hybride car le taux de ventilation sera davantage stable.

L'incertitude calculée par l'outil Kalm'Air évaluée à partir d'un modèle de ventilation naturelle par conduit est donc compatible avec la ventilation hybride.

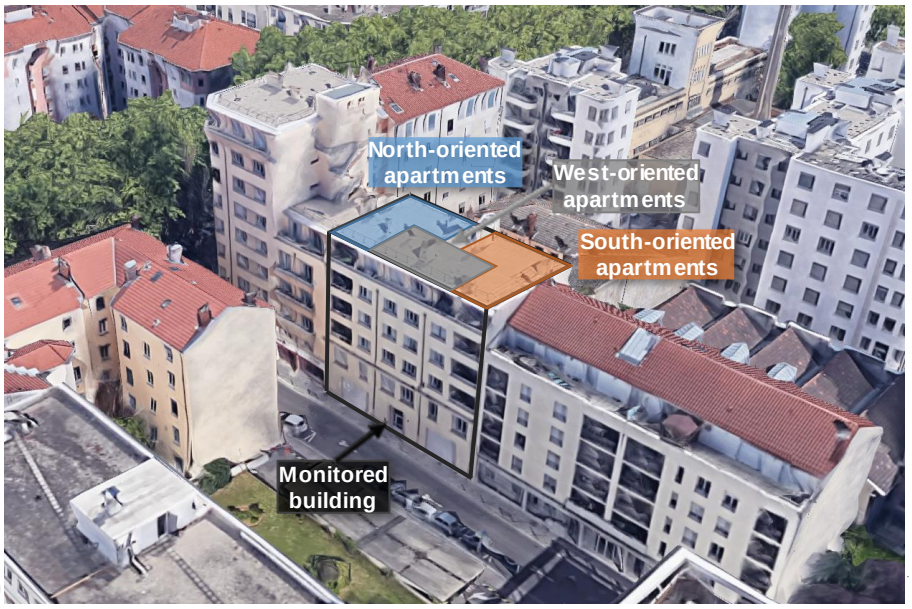


Figure 6-11 : Photographie aérienne du cas d'étude

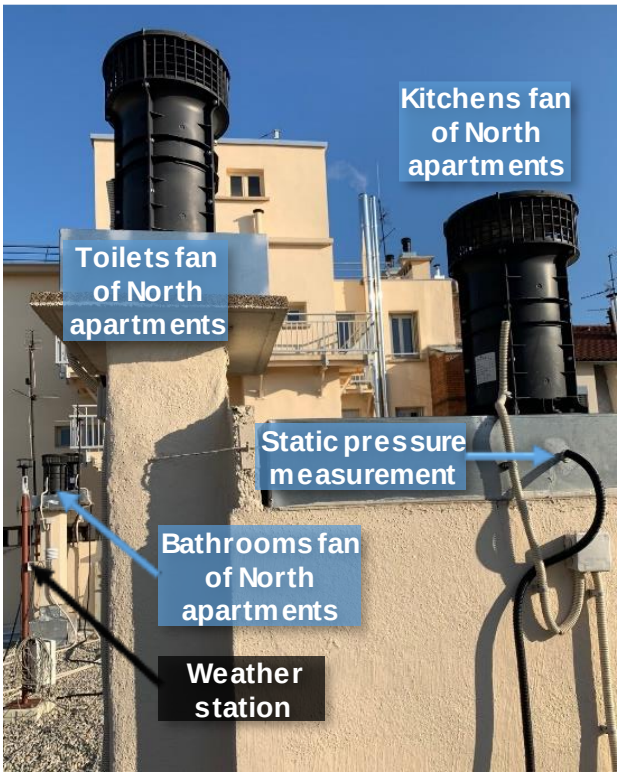


Figure 6-12: Photographie des extracteurs basse pression du système de ventilation hybride

4.2 Mise en place du protocole

La méthode gaz traceur a été implémentée dans le logement R+3 de l'empilement Nord. Il est composé de deux chambres, d'un séjour, d'un hall d'entrée, d'une cuisine de 24 m^3, d'une salle d'eau de 10,4 m^3, et de toilettes séparées de 4m^3. Il comporte donc trois pièces de vie et trois pièces de service. Les mesures ont été réalisées le 19 décembre 2019. La température extérieure était supérieure à 15°C, et la vitesse moyenne du vent a été mesurée à 2,5 $m.s^{-1}$. La mesure a été réalisée simultanément dans chaque pièce de service. Le logement était occupé

par trois personnes, dont deux qui ont quitté le logement 1h avant le début de la mesure, et la dernière personne à la fin des trois injections.

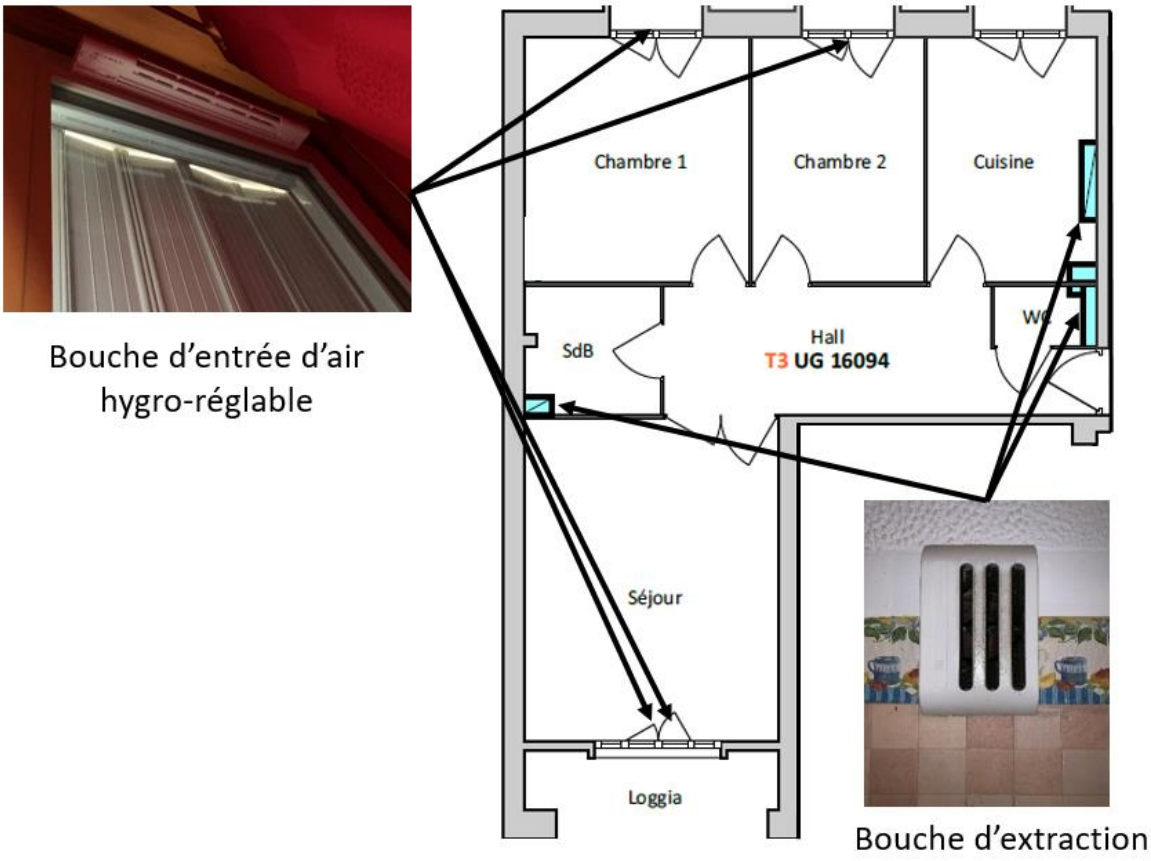


Figure 6-13 : Plan de l'appartement R+3 de l'empilement Nord

Le protocole d'injection et de mesure présenté au paragraphe 2.2 a ensuite été suivi. Les vérifications visuelles ont montré que les bouches d'entrées d'air et d'extraction étaient en bon état (cf. Figure 6-14). Le détalonnage des portes est respecté (1,5 cm pour les portes autres que cuisine, 3cm pour la porte de la cuisine). Ensuite un capteur par pièce de service a été disposé au centre de chaque pièce. Ils n'ont pas été placés proches de l'évacuation car l'expérimentation a eu lieu avant la réalisation de l'analyse de sensibilité du chapitre 5 qui a confirmé la meilleure performance du capteur situé proche de l'évacuation. Un capteur a également été placé en amont de chaque transit (détalonnage des portes des pièces de service). La disposition des capteurs est montrée en Figure 6-14. Le grammage des bouteilles sélectionnées par correspondance avec les volumes des pièces décrits ci-dessus était de 100g, 60g et 40g, respectivement pour la cuisine, la salle d'eau, et les toilettes. Les bouteilles de gaz ont ensuite été percutées simultanément dans chaque pièce de service, en ayant pris soin de brasser l'air pendant la percussion de la bouteille ainsi qu'une minute après que la bouteille ait été entièrement vidée. Les capteurs ont été récupérés en fin de journée (7h plus tard). Le gaz avait perdu 100% de sa concentration initiale.

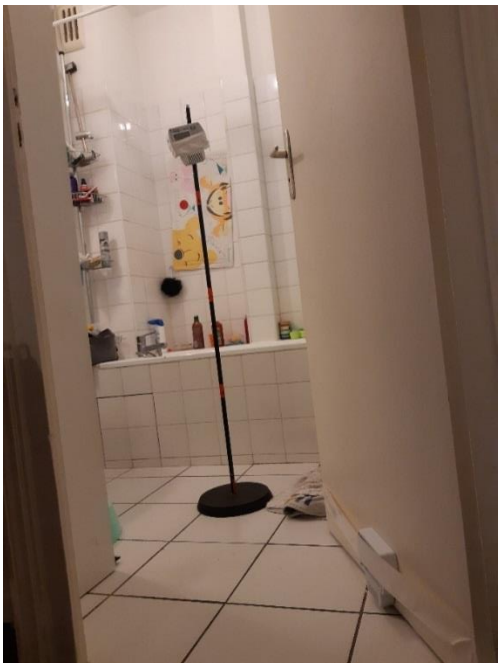



Figure 6-14: Disposition des capteurs dans deux pièces de service

4.3 Résultats obtenus par Kalm'Air

Les résultats ont été analysés à l'aide de l'outil Kalm'Air et sont présentés de la Figure 6-15 à la Figure 6-17. Les figures traitent individuellement de chaque pièce de service. L'incertitude associée à la mesure du taux de ventilation est élevée. Le capteur n'était pas placé sous l'évacuation d'air ce qui ne permet pas d'inhiber l'influence du mixage de l'air supposé imparfait à défaut d'avoir pu mesurer l'âge de l'air en plusieurs points d'une même pièce. Le logement n'était pas occupé mais la concentration du CO_2 de transit décroît fortement en début de mesure car les occupants venaient de quitter l'appartement. Le test concernant la variation du CO_2 de transit est donc positif. Les 5τ sont effectivement atteintes, et chaque pièce de service tend à un nombre de points de mesure supérieur à 55, ce qui n'induit pas d'incertitude supplémentaire. L'incertitude conséquente de 19,4% est donc majoritairement induite par le mixage imparfait de l'air, la variation du CO_2 de transit ainsi que le vent. Elle aurait pu être significativement réduite si le capteur avait été placé sous l'évacuation. Les taux de ventilation ont été estimés, pour la salle de bain, la cuisine, et les toilettes, à respectivement 5,0 $vol.h^{-1}$, 2,6 $vol.h^{-1}$, et 5,9 $vol.h^{-1}$ (ou en débit volumique 52 $m^3.h^{-1}$, 63 $m^3.h^{-1}$, et 19 $m^3.h^{-1}$). On remarque également que le profil de variation du taux de ventilation suit la même tendance pour les 3 pièces de service. Il décroît fortement pendant les 5 premières minutes. Il recroît ensuite puis se maintient à partir de la dixième minute environ. Les extracteurs sont soumis aux mêmes forces motrices naturelles, donc il est cohérent que l'évolution des trois taux de ventilation soit similaire. On remarque également par la variabilité du taux de ventilation que, même si le ventilateur basse pression était activé (T_{ext} > 2°C), le système de ventilation hybride tire toujours profit des forces motrices naturelles.

En ce qui concerne l'efficacité locale de renouvellement d'air au centre des pièces de service, les résultats s'échelonnent entre 82,3% pour la salle de bain, et 122,9% pour la cuisine. Les toilettes tendent à une efficacité locale de renouvellement d'air égale à 100%. Une efficacité locale de 100% représente un mixage parfait entre l'air neuf et l'air vicié. Une efficacité locale inférieure à 100% annonce que la zone est potentiellement court-circuitée. Une efficacité locale

supérieure à 100% représente un mixage qui s'effectue plutôt par balayage ou par « effet piston ». En perspective de ces critères, le point central de la salle de bain serait court-circuité, le point central de la cuisine présente un renouvellement par effet piston, et le mixage des toilettes est parfait. Le renouvellement par effet piston est, normalement, le mixage qui prédomine en ventilation naturelle par conduit. Le résultat de l'efficacité locale de renouvellement d'air de la cuisine est donc cohérent. Le résultat de la salle de bain peut s'expliquer par le petit volume encombré de plusieurs meubles, d'une vasque, et d'une baignoire. Ces obstacles peuvent perturber le flux d'air et induire des court-circuit. Les toilettes représentaient le plus petit volume donc il n'est pas étonnant que l'efficacité locale de renouvellement d'air présage d'un mixage parfait.

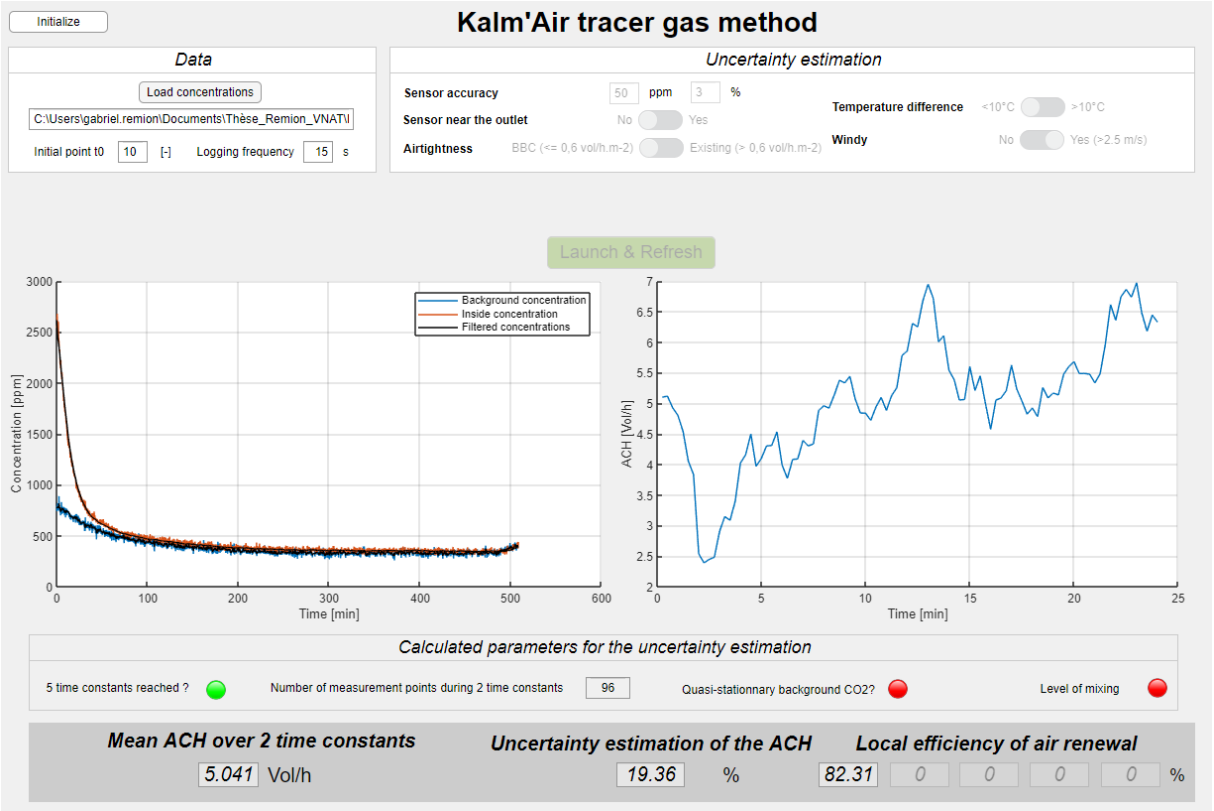


Figure 6-15 : Résultats de l'outil Kalm'Air pour la salle de bain

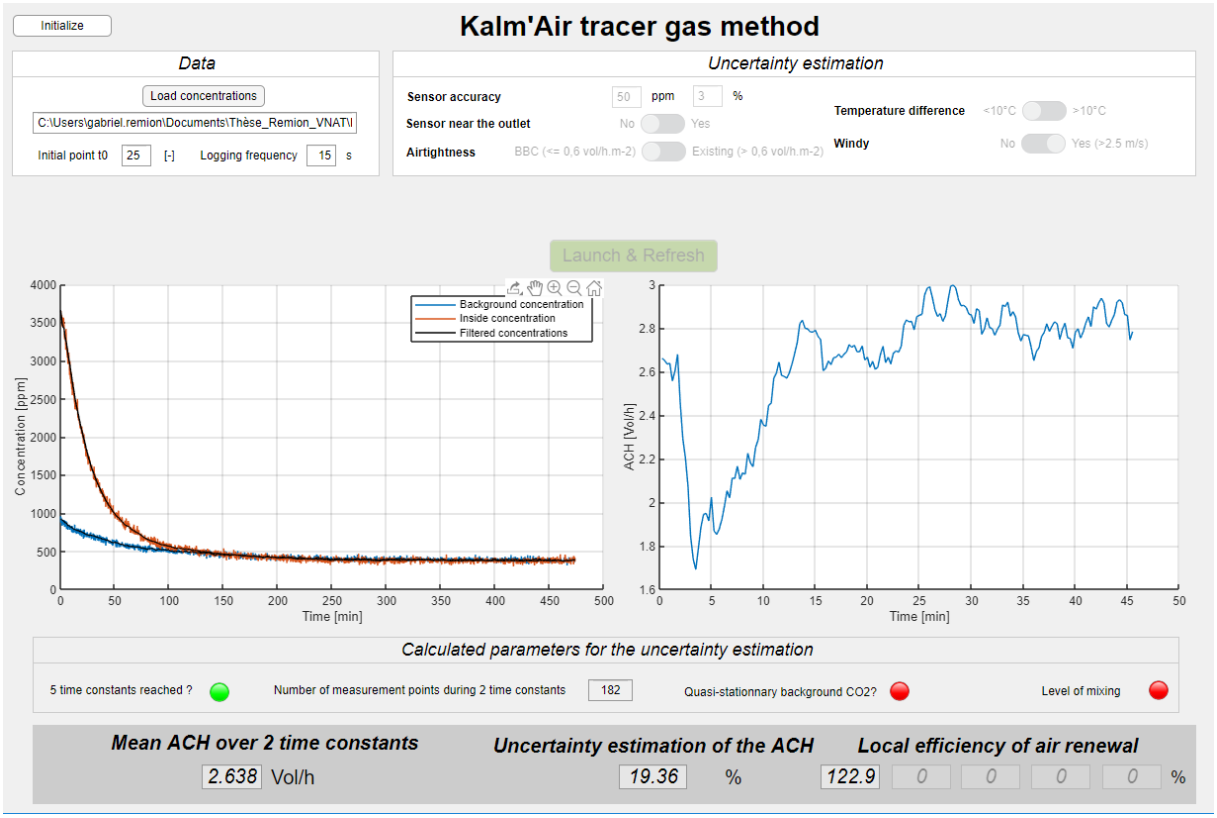


Figure 6-16 : Résultats de l'outil Kalm'Air pour la cuisine

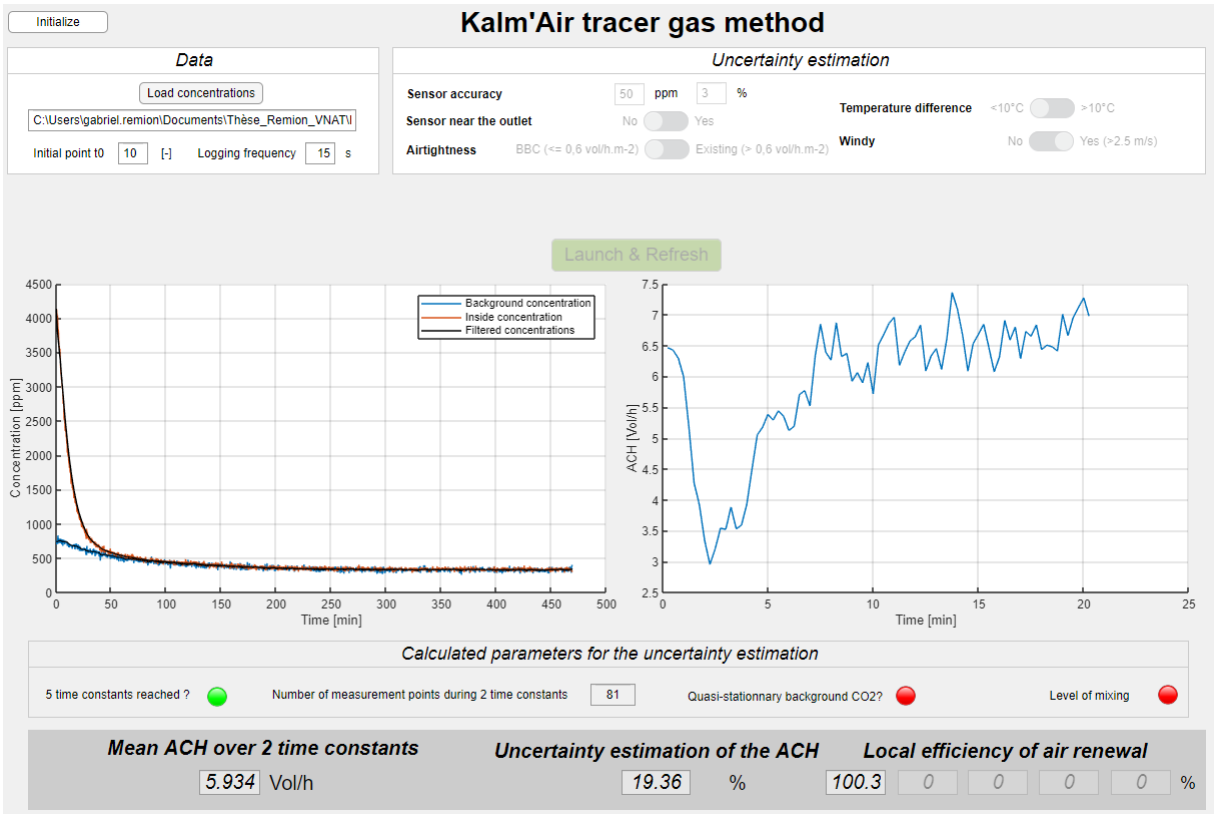


Figure 6-17 : Résultats de l'outil Kalm'Air pour les toilettes

5 Conclusion

Dans ce chapitre, la méthode Kalm'Air a été complétement décrite à l'aide d'une fiche caractérisant le protocole d'injection et de mesure, ainsi que l'outil automatisé Kalm'Air. Cet outil concentre les développements théoriques et expérimentaux de la thèse. Il est simple d'utilisation, et destiné à des non spécialistes. Il permet de calculer l'ensemble des indicateurs de performance aéraulique définis dans le chapitre 2, avec notamment une mesure du taux de ventilation fiabilisée par le filtre de Kalman présentée dans le chapitre 4. La mesure du taux de ventilation est associée à une incertitude également calculée par l'outil Kalm'Air, incertitude définie au chapitre 5. La méthode Kalm'Air a été testée en conditions in situ. Les résultats n'ont pas été comparés à une valeur de référence, mais ils semblent cohérents.

Sans connaître les détails du filtre de Kalman ou d'une mesure gaz traceur, un mesureur équipé de trois bouteilles de gaz, de six capteurs minimum, d'un percuteur, ainsi que d'un ventilateur de brassage, pourra mesurer la performance aéraulique d'un logement ventilé naturellement par conduits, ou par ventilation hybride, ce qui représente une avancée majeure pour la caractérisation expérimentale des systèmes de ventilation naturelle.

L'outil Kalm'Air peut être encore davantage automatisé en réduisant le nombre d'interactions avec le mesureur. Par exemple, l'adéquation de la corrélation pourrait être évaluée à l'aide d'un indicateur tel que l'erreur moyenne quadratique. Enfin, le calcul de l'efficacité globale de l'air par l'outil Kalm'Air pourrait représenter une perspective intéressante, mais requiert une plus grande attention sur l'emplacement des capteurs.

Chapitre 7 Conclusion générale

1 Conclusion

Ce travail de thèse ambitionnait de développer un protocole de mesure des performances aérauliques d'un système de ventilation naturelle par conduit. Les objectifs fixés visent le développement, la caractérisation et la validation d'un protocole fiable, applicable à un logement in situ, au prix abordable, et déployable à grande échelle. La finalité scientifique concerne l'élargissement des connaissances sur la ventilation naturelle. Le choix du système de ventilation naturelle étudié s'est porté sur la ventilation par conduits car elle est très représentée en France, notamment dans les bâtiments de logements collectifs. Par ailleurs, c'est le système de ventilation naturelle impliqué dans la ventilation hybride, ce qui représente un enjeu majeur en termes de rénovation des bâtiments existants, et d'implémentation dans les constructions neuves.

Une revue bibliographique a été menée dans le but d'identifier d'une part les indicateurs de performance aéraulique d'un système de ventilation. L'efficacité de renouvellement d'air d'un système de ventilation tient compte de deux indicateurs que sont le taux de ventilation, et l'âge de l'air. C'est uniquement l'évaluation conjointe des deux qui permet de caractériser la performance aéraulique d'un système de ventilation. D'autre part, la revue bibliographique a également dressé un état des lieux des méthodes de mesure des indicateurs susmentionnés utilisées en ventilation naturelle. Leur adaptation vis-à-vis d'une application in situ ainsi que leur précision ont été comparées sur la base du corpus d'articles. La méthode par décroissance de la concentration a été identifiée comme la mieux adaptée à la mesure des indicateurs de performance aéraulique en ventilation naturelle. A la différence des autres méthodes tolérant aussi un taux de ventilation variable, elle ne requiert pas nécessairement de régulateur de débit massique, ni plusieurs points de dosage du gaz. Par ailleurs, elle est la seule méthode qui permet de mesurer conjointement le taux de ventilation et l'âge de l'air avec les contraintes qu'imposent les systèmes de ventilation naturelle. Sa précision concernant la mesure du taux de ventilation est évaluée, dans l'état de l'art, à 15%. En revanche les méthodes gaz traceur, en général, ne sont pas adaptées à un bâtiment multi-zones. De plus, la norme qui les décrit cadre le matériel sophistiqué requis pour leur implémentation. Une application in situ encourage une simplification du matériel requis, que ce soit pour une plus grande facilité de mise en œuvre, ou pour réduire les coûts de l'instrumentation.

Avant de confronter un protocole fiabilisé à une application in situ, trois expériences ont été menées en conditions de laboratoire. Deux ont été implémentées dans la cellule expérimentale Hybcell basée à l'ENTPE, qui a été ensuite réaménagée à la ventilation naturelle par conduit pour la troisième expérimentation. Avant d'être réaménagée en cellule appelée NATCELL, la cellule Hybcell était ventilée par un système de ventilation mécanique contrôlable, qui a permis de tester la précision des méthodes de mesure à l'aide d'une mesure de référence réalisée dans le conduit d'extraction.

La première expérimentation visait à confirmer la meilleure précision et facilité de mise en œuvre de la méthode par décroissance de la concentration par rapport aux autres méthodes identifiées dans la littérature. La méthode par décroissance de la concentration, plus pratique à implémenter compte tenu des contraintes de la ventilation naturelle, s'est aussi montrée plus précise que la méthode par dose continue (jusque 15%). Ses résultats étaient, par ailleurs, similaires à ceux de la méthode par concentration constante, considérée comme méthode gaz

traceur de référence, mais trop sophistiquée pour une application in situ. C'est donc la méthode par décroissance de la concentration qui a été fiabilisée par la suite afin de la rendre à la fois:

- adaptée à une mesure in situ multi-zones ;
- adaptée à l'utilisation du CO_2 comme gaz traceur car celui-ci permet une grande simplification du matériel requis pour implémenter la méthode ;
- moins sensible.

L'application in situ d'une méthode gaz traceur dans un bâtiment multi-zones avec le CO_2 comme gaz traceur apporte deux contraintes majeures. La concentration en CO_2 de l'air qui pénètre dans la pièce où est réalisée la mesure, appelée concentration de transit, doit être soustraite à la concentration à l'intérieur de la pièce. La résolution de l'équation de bilan de masse qui régit les méthodes gaz traceur suppose un certain nombre d'hypothèses, dont (i) un échange aéraulique exclusif entre la zone d'intérêt et l'extérieur, (ii) ainsi qu'une concentration stationnaire du gaz traceur de l'air qui pénètre dans la pièce d'intérêt. L'échange exclusif entre la zone d'intérêt et l'extérieur permet de connaître la concentration de transit du gaz traceur (concentration de l'air qui pénètre dans la pièce d'intérêt) en la mesurant. Plusieurs provenances de l'air empêcheraient de connaître la concentration de transit. Or, opérer la méthode gaz traceur dans un logement multi-zones requiert de réaliser la méthode quasi-simultanément dans chaque pièce de service. L'air qui pénètre dans la pièce de service provient majoritairement du composant aéraulique de transfert d'air situé entre la pièce adjacente et la pièce de service. L'hypothèse (i) peut donc être respectée en considérant que la pièce adjacente est l'extérieur et que cette pièce est en contact exclusif avec la pièce de service. La mesure de la concentration en amont du composant aéraulique fournit alors la mesure de la concentration de transit. En revanche, toute infiltration qui proviendrait effectivement de l'extérieur ou d'une autre pièce viendrait infirmer hypothèse (i). La mesure de la concentration effectuée en amont du dispositif dédié de transfert d'air ne serait alors pas représentative de la concentration de transit, ce qui peut induire des erreurs importantes. Ne connaissant pas la part des infiltrations, il n'est alors, a priori, pas possible d'estimer la concentration de transit qui pénètre effectivement dans la pièce de service. L'hypothèse (ii) a également peu de chances d'être respectée avec le CO_2 comme gaz traceur. Si l'air provient d'une pièce de vie et circule jusque la pièce de service, alors sa concentration en CO_2 a de fortes probabilités de varier en fonction des sources présentes dans le bâtiment. Cette variabilité du CO_2 de transit biaise la méthode par décroissance de la concentration conventionnelle.

La deuxième expérimentation, toujours implémentée dans la cellule Hybcell, visait à adapter la méthode par décroissance de la concentration du CO_2 aux contraintes apportées par une application multi-zones. La cellule était, cette-fois, utilisée dans sa configuration multi-zones. Une procédure d'estimation du CO_2 de transit a été proposée pour tenir compte de la violation de l'hypothèse (i). La concentration mesurée en amont du dispositif de transfert d'air était alors corrigée pour tenir compte des infiltrations. Cette procédure est biaisée si la décroissance de la concentration n'est pas complète. Elle s'est, toutefois, avérée robuste, et a permis d'améliorer la précision jusque 195 points. Ensuite, l'outil de traitement du signal « filtre de Kalman », dont le potentiel avait été identifié dans la revue de littérature, a été testé pour tolérer la variation du CO_2 de transit, et donc contourner l'hypothèse (ii). Sa capacité à prendre en compte une concentration de transit variable, permet de traiter des bâtiments occupés dans les pièces de vie. Couplé avec la procédure d'estimation de la concentration de transit, le filtre de Kalman permet de véritablement envisager une mesure in situ dans un logement multi-zones

avec le CO_2 comme gaz traceur. Une analyse paramétrique de la performance du filtre de Kalman vis-à-vis de la variation du CO_2 de transit, et du niveau initial de CO_2 en début de décroissance, a permis de vérifier la moins grande sensibilité du filtre par rapport à la méthode originelle. L'erreur maximale pendant le cas avec variation du CO_2 de transit a été réduite de près de 5% par rapport à la méthode 2 points lissée sur cinq points de mesure. Il permet également de suivre l'évolution du taux de ventilation dynamique alors que la seule méthode gaz traceur qui le permettait dans la littérature était trop sophistiquée en vue d'une application in situ. La méthode ainsi fiabilisée inclut l'injection, le mesure, la procédure de prétraitement des concentrations, ainsi que l'analyse par filtre de Kalman. L'outil et la méthode développés, et testés en conditions in situ constituent une toolbox que nous avons intitulé « méthode Kalm'Air ».

Le potentiel de la méthode Kalm'Air a ensuite été concrétisé par une analyse de sensibilité effectuée à l'aide d'une modélisation aéraulique à discrétisation zonale en code en pression. Le modèle a été validé sur la base d'une comparaison avec des données expérimentales obtenues dans notre cellule expérimentale multi-zones. La cellule expérimentale avait été préalablement adaptée à la ventilation naturelle par conduit. L'analyse de sensibilité a été effectuée sur six paramètres à deux niveaux à l'aide d'un plan d'expérience factoriel complet. L'influence de trois autres paramètres a été testée en parallèle du plan d'expérience factoriel complet. La méthode Kalm'Air a été très peu sensible comparée à la méthode originelle pour laquelle la procédure d'estimation du CO_2 de transit était également réalisée. Cette plus faible sensibilité a donc été apportée uniquement par le filtre de Kalman. Parmi les facteurs les plus influents sur la précision de la méthode Kalm'Air, on retrouve la variation du CO_2 de transit, la qualité du mixage de l'air ainsi que l'application de la version biaisée de la procédure d'estimation du CO_2 de transit, version appliquée si la décroissance n'est pas entièrement terminée en fin de mesure. Cela met l'accent sur l'importance de maximiser le temps de mesure afin d'accroître la probabilité que la décroissance soit complète. Par ailleurs, la meilleure performance de la méthode avec un capteur placé sous l'évacuation, qui avait déjà été lue dans la littérature, a été vérifiée. Elle permet d'améliorer la précision moyenne de la méthode, et inhibe l'effet du mixage imparfait de l'air. L'analyse de sensibilité a permis de formuler l'incertitude de la méthode en fonction de l'ensemble des paramètres influents. Globalement, dans le meilleur des cas, la méthode peut avoir une incertitude de 5,7%, qui peut être dégradée de 30%. Si le capteur est placé en dessous de l'évacuation, l'incertitude maximale de la méthode Kalm'Air est de 22%. Ces valeurs sont en adéquation avec les résultats de la deuxième expérimentation qui a été menée pour tester le filtre de Kalman. La méthode originelle présentait, elle, des incertitudes supplémentaires par rapport à la méthode Kalm'Air entre 7,5 et 10%, et sa sensibilité vis-à-vis du CO_2 de transit variable était quasiment de 20% plus grande. La méthode Kalm'Air s'est donc montrée beaucoup plus performante.

Finalement, le protocole opérationnel d'injection du gaz et de mesure a été complétement décrit. L'outil automatisé Kalm'Air a été développé pour procéder à l'analyse de la méthode Kalm'Air. Il permet à un opérateur non spécialiste muni de bouteilles de CO_2, d'un percuteur, de capteurs de CO_2, ainsi que d'un ventilateur de brassage, de procéder à la mesure des performances aérauliques d'un système de ventilation naturelle par conduit, installé dans un logement. Il calcule par ailleurs l'estimation de l'incertitude de la mesure du taux de ventilation et l'âge de l'air. Il permet donc de calculer l'indice d'efficacité locale de renouvellement d'air, ce qui est remarquable. Cela répond à l'enjeu de vérification à réception du bâtiment énoncé dans l'introduction. La méthode Kalm'Air peut donc participer à

l'augmentation des connaissances sur la ventilation naturelle par conduit, ainsi qu'à l'essor des systèmes de ventilation hybride en rénovation et en implémentation dans les constructions neuves.

2 Perspectives

L'outil automatisé Kalm'Air s'est montré fiable et facile d'utilisation. Les résultats très encourageants ont également révélé un potentiel d'amélioration et d'extension d'usage de l'outil. Ainsi, l'outil peut être davantage automatisé, par exemple en calculant l'indicateur de moyenne de l'erreur quadratique pour définir si les concentrations filtrées sont bien corrélées. Il permettra aussi de calculer le nombre de changement de sens de la dérivée du calcul du taux de ventilation pour déceler, lui-même, si des fluctuations hautes fréquences sont observées. Finalement, un travail supplémentaire sur la position des capteurs permettant de remonter à l'efficacité globale de renouvellement d'air pourrait être apporté.

Par ailleurs, la méthode Kalm'Air est adaptée à un bâtiment ventilé naturellement par conduits ou par ventilation hybride. La méthode n'est, en revanche, pas directement adaptée aux deux autres systèmes de ventilation naturelle que sont les systèmes de ventilation traversante, et mono-façade. L'écoulement de l'air est moins bien défini dans ces types de ventilation donc cela nécessiterait de revoir les préconisations en termes de position des capteurs. Aussi, l'analyse de sensibilité d'un système de ventilation naturelle par conduit a été réalisée avec un modèle en code en pression. L'effet de chaque paramètre sur l'incertitude sera différent d'un système à l'autre donc l'analyse d'incertitude est incompatible avec les systèmes de ventilation traversante et mono-façade. En revanche, la théorie du filtre de Kalman reste applicable aux deux autres systèmes de ventilation naturelle. Aussi, l'aération par ouverture des fenêtres est également compatible avec le filtre de Kalman. La ventilation traversante et l'aération par ouverture des fenêtres sont largement dépendantes du vent et de ses turbulences. La fiabilisation numérique de la méthode appliquée à ces deux types de renouvellement d'air nécessiterait donc d'utiliser une modélisation Computational Fluid Dynamics qui tient compte des turbulences du vent. La validation du modèle CFD pourrait provenir d'une instrumentation de l'ouverture de la fenêtre par la technologie Particle Image Velocimetry ou par grille de tubes de Pitot.

Finalement, la méthode Kalm'Air permet d'évaluer la performance de renouvellement d'air à un instant t du système. Pour participer à accroître les connaissances concernant les systèmes de ventilation naturelle par conduit, il faudrait que la mesure soit couplée à une modélisation aéraulique du bâtiment, afin de pouvoir extrapoler la performance aéraulique du système sur une plus longue durée. Or, il n'est pas concevable, au vue du temps et de l'expertise que cela requiert, d'accompagner d'une modélisation (zonale ou CFD) chaque mesure des performances aérauliques d'un bâtiment ventilé naturellement. Seule la modélisation empirique pourrait être concevable par sa rapidité mais elle souffre d'un trop grand nombre d'incertitudes. En l'état, la méthode Kalm'Air ne permet donc pas de justifier qu'un système de ventilation naturelle ou hybride respecte les exigences réglementaires, même si un critère performantiel était défini dans le cadre de la loi ESSOC.

L'intelligence artificielle, notamment grâce aux réseaux de neurones alimentés par les résultats d'un grand nombre d'application de la méthode Kalm'Air, pourrait répondre à l'enjeu de fiabilisation de la modélisation aéraulique de la ventilation naturelle. Ils connaissent un essor spectaculaire ces dernières années. Les réseaux de neurones apprennent à partir d'un grand

nombre de jeux de données, et permettent, entre autres, d'établir une formule analytique en fonction des paramètres du jeu de données utilisé pendant la phase d'apprentissage. Imaginons que chaque opérateur qui réalise la méthode gaz traceur Kalm'Air renseigne le résultat de la méthode dans une base de données. Il renseigne également tous les paramètres influents sur les résultats: nombre de bouches d'entrées d'air ; natures, hauteurs et orientations des bouches ; détalonnages de portes, hauteur du bâtiment ; nombre de logements connectés au conduit de ventilation ; type de ventilation (naturelle ou hybride) ; type de régulation si le système de ventilation est hybride ; température, vitesse, et direction du vent ; occupation. Alors le réseau de neurones apprendrait en autonomie sur l'ensemble de la base de données, et permettrait de développer une formule analytique du taux de ventilation en fonction de tous les paramètres. Une formule analytique évaluée à partir d'un certain nombre de paramètres permettrait alors de calculer rapidement le taux de ventilation d'un logement ventilé naturellement par conduits.

Références

[1] Président de la république, *Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte*, vol. 2015–992. 2015.

[2] Président de la république, *Loi relative à l'énergie et au climat*. 2019.

[3] *Arrêté relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants à usage rincipal d'habitation proposés à la location en France métropolitaine*. 2007.

[4] Commission européenne, 'Indoor air pollution: new EU research reveals higher riskes than previously thought', Commission européenne, Brussels, Sep. 2003. Accessed: Sep. 02, 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_03_1278.

[5] *Arrêté relatif à l'aération des logements*. 1982.

[6] Le président de la république, *loi pour un état au service d'une société de confiance*. 2018.

[7] G. Guyot, I. S. Walker, and M. H. Sherman, 'Performance based approaches in standards and regulations for smart ventilation in residential buildings: a summary review', *Int. J. Vent.*, pp. 1–17, Mar. 2018, doi: 10.1080/14733315.2018.1435025.

[8] T. Schulze and U. Eicker, 'Controlled natural ventilation for energy efficient buildings', *Energy Build.*, vol. 56, pp. 221–232, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.07.044.

[9] M. Caciolo, P. Stabat, and D. Marchio, 'Full scale experimental study of single-sided ventilation: Analysis of stack and wind effects', *Energy Build.*, vol. 43, no. 7, pp. 1765–1773, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.03.019.

[10] M. Caciolo, S. Cui, P. Stabat, and D. Marchio, 'Development of a new correlation for single-sided natural ventilation adapted to leeward conditions', *Energy Build.*, vol. 60, pp. 372–382, May 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.01.024.

[11] G. Carrilho da Graça, 'A technical note on simplified modeling of turbulent mixing in wind-driven single sided ventilation', *Build. Environ.*, vol. 131, pp. 12–15, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.01.014.

[12] G. R. Hunt and P. P. Linden, 'The fluid mechanics of natural ventilation—displacement ventilation by buoyancy-driven flows assisted by wind', *Build. Environ.*, vol. 34, no. 6, pp. 707–720, Nov. 1999, doi: 10.1016/S0360-1323(98)00053-5.

[13] A. Dhalluin, 'Etude de stratégies de ventilation pour améliorer la qualité environnementale intérieure et le confort des occupants en milieu scolaire', Université de La Rochelle, 2012.

[14] J.-P. Lucas, O. Ramalho, S. Kirchner, and J. Ribéron, 'Etat de la ventilation dans le parc de logement français', CSTB - Observatoire de la Qalité de l'Air Intérieur, 2009.

[15] Laure Mouradian, I. Carré, F. R. Carrié, A. Bailly, V. Leprince, and G. Perez, 'Projet PROMEVENT - Rapport bibliographique : Etat des lieux des protocles et du matériel utilisés pour caractériser les débits de ventilation', Rapport bibliographique, 2017. [Online]. Available: http://www.promevent.fr/doc/PROMEVENT_Rapport%20Bibliographique.pdf.

[16] Cerema, 'Bâtiment démonstrateurs à basse consommation d'énergie PREBAT', 2018.

[17] P. X. W. Zou, X. Xu, J. Sanjayan, and J. Wang, 'Review of 10 years research on building energy performance gap: Life-cycle and stakeholder perspectives', *Energy Build.*, vol. 178, pp. 165–181, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.08.040.

[18] R. Jobert, 'La ventilation mécanique des bâtiments résidentiels neufs: Etat de l'art général, Analyse qualitative et technique des dysfonctionnements', CETE de Lyon, 2012.

[19] AVEMS, 'Guide de la ventilation naturelle et hybride "VNHY"'. Sep. 2010, Accessed: Feb. 08, 2018. [Online]. Available: http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-ventilation-naturelle-et-hybride-vnhy-2010.pdf.

[20] D. Etheridge, *Natural Ventilation of Building, Theory, Measurement, and Design*. Wiley, 2012.
[21] M. Sherman, 'Tracer-Gas Technique For Measuring Ventilation in a Single Zone', *Build. Environ.*, vol. 25, no. 4, pp. 365–374, 1990.
[22] AFNOR, 'NF EN ISO 12569 - Performance thermique des bâtiments et des matériaux - Détermination du débit d'air spécifique dans les bâtiments - Méthode de dilution de gaz traceurs'. AFNOR, 2017.
[23] S. Omrani, V. Garcia-Hansen, B. Capra, and R. Drogemuller, 'Natural ventilation in multi-storey buildings: Design process and review of evaluation tools', *Build. Environ.*, vol. 116, pp. 182–194, May 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.02.012.
[24] AFNOR, *NF EN 16798-17 : Performance énergétique des bâtiments - Ventilation des bâtiments - Partie 17 : lignes directrices pour l'inspection des systèmes de ventilation et de conditionnement d'air*. 2017.
[25] S. Wullens, 'Étude numérique de la ventilation naturelle, mise en oeuvre d'un modèle fin dans une simulation de thermique du bâtiment', Université Grenoble Alpes, 2015.
[26] A. Belleri, R. Lollini, and S. M. Dutton, 'Natural ventilation design: An analysis of predicted and measured performance', *Build. Environ.*, vol. 81, pp. 123–138, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.06.009.
[27] N. Nikolopoulos, A. Nikolopoulos, T. S. Larsen, and K.-S. P. Nikas, 'Experimental and numerical investigation of the tracer gas methodology in the case of a naturally cross-ventilated building', *Build. Environ.*, vol. 56, no. Supplement C, pp. 379–388, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.04.006.
[28] L. J. Lo and A. Novoselac, 'Cross ventilation with small openings: Measurements in a multi-zone test building', *Build. Environ.*, vol. 57, pp. 377–386, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.06.009.
[29] M. Z. I. Bangalee, J. J. Miau, S. Y. Lin, and J. H. Yang, 'Flow visualization, PIV measurement and CFD calculation for fluid-driven natural cross-ventilation in a scale model', *Energy Build.*, vol. 66, pp. 306–314, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.07.005.
[30] G. Remion, B. Moujalled, and M. El Mankibi, 'Review of tracer gas-based methods for the characterization of natural ventilation performance: Comparative analysis of their accuracy', *Build. Environ.*, vol. 160, pp. 106–118, 2019.
[31] Y. Allab, 'Evaluation expérimentale des performances des systèmes de ventilation dans le bâtiment: efficacité de ventilation et confort thermique', PhD Thesis, Paris, ENSAM, 2017.
[32] AFNOR, *NF EN 15665 - Ventilation des bâtiments - critères de performance pour les systèmes de ventilation résidentielle*, vol. NF EN 15665. 2009.
[33] M. W. Liddament, 'A Guide to Energy Efficient Ventilation', AIVC, Mar. 1996.
[34] M. Sandberg, 'What is ventilation efficiency', *Build. Environ.*, vol. 16, no. 2, pp. 123–135, 1981.
[35] ASTM, *ASTM E741 - 17 : Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution*, vol. ASTM E741. 2017.
[36] ASTM, *ASTM D6245 - 12 : Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation*. 2012.
[37] S. Batterman, 'Review and Extension of CO2-Based Methods to Determine Ventilation Rates with Application to School Classrooms', *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 14, no. 12, p. 145, Feb. 2017, doi: 10.3390/ijerph14020145.
[38] G. Bekö, T. Lund, F. Nors, J. Toftum, and G. Clausen, 'Ventilation rates in the bedrooms of 500 Danish children', *Build. Environ.*, vol. 45, no. 10, pp. 2289–2295, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.04.014.

[39] G. Bekö *et al.*, 'Diurnal and seasonal variation in air exchange rates and interzonal airflows measured by active and passive tracer gas in homes', *Build. Environ.*, vol. 104, pp. 178–187, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.05.016.
[40] \AA Blomsterberg, T. Carlsson, C. Svensson, and J. Kronvall, 'Air flows in dwellings—simulations and measurements', *Energy Build.*, vol. 30, no. 1, pp. 87–95, 1999.
[41] C. Buratti, R. Mariani, and E. Moretti, 'Mean age of air in a naturally ventilated office: Experimental data and simulations', *Energy Build.*, vol. 43, no. 8, pp. 2021–2027, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.04.015.
[42] J. Dias Carrilho, M. Mateus, S. Batterman, and M. Gameiro da Silva, 'Air exchange rates from atmospheric CO2 daily cycle', *Energy Build.*, vol. 92, pp. 188–194, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.01.062.
[43] C. Y. Chao, M. P. Wan, and A. K. Law, 'Ventilation performance measurement using constant concentration dosing strategy', *Build. Environ.*, vol. 39, no. 11, pp. 1277–1288, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.03.012.
[44] C.-R. Chu, Y.-H. Chiu, Y.-T. Tsai, and S.-L. Wu, 'Wind-driven natural ventilation for buildings with two openings on the same external wall', *Energy Build.*, vol. 108, pp. 365–372, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.09.041.
[45] D. A. Coley and A. Beisteiner, 'Carbon Dioxide Levels and Ventilation Rates in Schools', *Int. J. Vent.*, vol. 1, no. 1, pp. 45–52, Jun. 2002, doi: 10.1080/14733315.2002.11683621.
[46] S. Cui, M. Cohen, P. Stabat, and D. Marchio, 'CO2 tracer gas concentration decay method for measuring air change rate', *Build. Environ.*, vol. 84, no. Supplement C, pp. 162–169, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.11.007.
[47] S. Cui, R. Issoglio, J. Koffi, M. Mankibi, P. Stabat, and D. Marchio, 'Performance evaluation of natural ventilation through windows with horizontal a blade shutter', *ISIAQ Conf. Indoor Air 2014*, p. 9, 2015.
[48] T. G. M. Demmers, L. R. Burgess, V. R. Phillips, J. A. Clark, and C. M. Wathes, 'Assessment of Techniques for Measuring the Ventilation Rate, using an Experimental Building Section', *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 76, no. 1, pp. 71–81, May 2000, doi: 10.1006/jaer.2000.0532.
[49] R. Duarte, M. Glória Gomes, and A. Moret Rodrigues, 'Estimating ventilation rates in a window-aired room using Kalman filtering and considering uncertain measurements of occupancy and CO2 concentration', *Build. Environ.*, vol. 143, pp. 691–700, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.07.016.
[50] H. L. Gough *et al.*, 'Field measurement of natural ventilation rate in an idealised full-scale building located in a staggered urban array: Comparison between tracer gas and pressure-based methods', *Build. Environ.*, vol. 137, pp. 246–256, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.03.055.
[51] H. Han, C.-Y. Shin, I.-B. Lee, and K.-S. Kwon, 'Tracer gas experiment for local mean ages of air from individual supply inlets in a space with multiple inlets', *Build. Environ.*, vol. 46, no. 12, pp. 2462–2471, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.05.023.
[52] J. Hou *et al.*, 'Air change rates at night in northeast Chinese homes', *Build. Environ.*, vol. 132, pp. 273–281, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.01.030.
[53] AFNOR, *NF EN ISO 12569 : Performance thermique des bâtiments et des matériaux - Détermination du débit d'air spécifique dans les bâtiments - Méthode de dilution de gaz traceurs*. 2017.
[54] AFNOR, *NF ISO 16000-8 : Air intérieur Partie 8 : Détermination des âges moyens locaux de l'air dans des bâtiments pour caractériser les conditions de ventilation*. 2012.
[55] C. J. Koinakis, 'The effect of the use of openings on interzonal air flows in buildings: an experimental and simulation approach', *Energy Build.*, vol. 37, no. 8, pp. 813–823, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.enbuild.2004.10.012.

[56] D. Laussmann and D. Helm, 'Air change measurements using tracer gases: Methods and results. Significance of air change for indoor air quality', in *Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality*, InTech, 2011.
[57] T. Lu, A. Knuutila, M. Viljanen, and X. Lu, 'A novel methodology for estimating space air change rates and occupant CO2 generation rates from measurements in mechanically-ventilated buildings', *Build. Environ.*, vol. 45, no. 5, pp. 1161–1172, May 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.10.024.
[58] M. Lunden *et al.*, 'Experiments to evaluate and implement passive tracer gas methods to measure ventilation rates in homes', Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States), 2012.
[59] M. Macarulla, M. Casals, N. Forcada, M. Gangolells, and A. Giretti, 'Estimation of a room ventilation air change rate using a stochastic grey-box modelling approach', *Measurement*, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.04.029.
[60] A. Mikola, T. Kalamees, and T.-A. Kõiv, 'Performance of ventilation in Estonian apartment buildings', *Energy Procedia*, vol. 132, pp. 963–968, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.681.
[61] N. Nikolopoulos, A. Nikolopoulos, T. S. Larsen, and K.-S. P. Nikas, 'Experimental and numerical investigation of the tracer gas methodology in the case of a naturally cross-ventilated building', *Build. Environ.*, vol. 56, no. Supplement C, pp. 379–388, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.04.006.
[62] H. Okuyama and Y. Onishi, 'Uncertainty analysis and optimum concentration decay term for air exchange rate measurements: Estimation methods for effective volume and infiltration rate', *Build. Environ.*, vol. 49, no. Supplement C, pp. 182–192, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.09.018.
[63] J. M. Penman, 'An experimental determination of ventilation rate in occupied rooms using atmospheric carbon dioxide concentration', *Build. Environ.*, vol. 15, no. 1, pp. 45–47, Jan. 1980, doi: 10.1016/0360-1323(80)90028-1.
[64] S. B. Riffat and K. W. Cheong, 'Estimation of zone effective-volume using tracer-gas techniques', *Appl. Energy*, vol. 45, no. 4, pp. 327–334, 1993.
[65] C.-A. Roulet, R. Compagnon, and M. Jakob, 'A Simple Method Using Tracer Gas to Identify the Main Airflow and Contaminant Paths within a Room', *Indoor Air*, vol. 1, no. 3, pp. 311–322, Sep. 1991, doi: 10.1111/j.1600-0668.1991.08-13.x.
[66] C.-A. Roulet and L. Vandaele, 'Air flow patterns within buildings measurement techniques', AIVC, AIVC Technical Note 34, 1991. [Online]. Available: https://www.aivc.org/resource/tn-34-air-flow-patterns-within-buildings-measurement-techniques.
[67] R. Claude-Alain and F. Foradini, 'Simple and Cheap Air Change Rate Measurement Using CO_2 Concentration Decays', *Int. J. Vent.*, vol. 1, no. 1, pp. 39–44, Jun. 2002, doi: 10.1080/14733315.2002.11683620.
[68] M. Sandberg and M. Sjöberg, 'The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms', *Build. Environ.*, vol. 18, no. 4, pp. 181–197, Jan. 1983, doi: 10.1016/0360-1323(83)90026-4.
[69] M. Sandberg and C. Blomqvist, 'A quantitative estimate of the accuracy of tracer gas methods for the determination of the ventilation flow rate in buildings', *Build. Environ.*, vol. 25, no. 4, pp. 139–150, 1985.
[70] M. Sandberg and H. Stymne, 'The constant tracer flow technique', *Build. Environ.*, vol. 24, no. 3, pp. 209–219, Jan. 1989, doi: 10.1016/0360-1323(89)90034-6.
[71] M. Santamouris *et al.*, 'Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation', *Energy Build.*, vol. 40, no. 10, pp. 1833–1843, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.04.002.

[72] L. Schibuola, M. Scarpa, and C. Tambani, 'Natural Ventilation Level Assessment in a School Building by CO2 Concentration Measures', *Energy Procedia*, vol. 101, pp. 257–264, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.11.033.
[73] M. Sherman, 'Tracer-Gas Technique For Measuring Ventilation in a Single Zone', *Build. Environ.*, vol. 25, no. 4, pp. 365–374, 1990.
[74] M. H. Sherman, I. S. Walker, and M. M. Lunden, 'Uncertainties in air exchange using continuous-injection, long-term sampling tracer-gas methods', *Int. J. Vent.*, vol. 13, no. 1, pp. 13–28, 2014.
[75] P. N. Smith, 'Determination of Ventilation Rates in Occupied Buildings from Metabolic CO2 Concentrations and Production Rates', *Build. Environ.*, vol. 23, no. 2, pp. 95–102, 1988.
[76] H. Sutcliffe, 'A guide to air change efficiency', *AIVC*, p. 48, 1990.
[77] V. Turanjanin, B. Vučićević, M. Jovanović, N. Mirkov, and I. Lazović, 'Indoor CO 2 measurements in Serbian schools and ventilation rate calculation', *Energy*, vol. 77, pp. 290–296, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.10.028.
[78] I. Turiel, 'Occupant-generated CO2 as an indicator of ventilation rate', 1980.
[79] S. Van Buggenhout *et al.*, 'Data-based mechanistic modelling approach to determine the age of air in a ventilated space', *Build. Environ.*, vol. 41, no. 5, pp. 557–567, May 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.02.029.
[80] S. Van Buggenhout, A. Van Brecht, S. E. Özcan, E. Vranken, W. Van Malcot, and D. Berckmans, 'Influence of sampling positions on accuracy of tracer gas measurements in ventilated spaces', *Biosyst. Eng.*, vol. 104, no. 2, pp. 216–223, 2009.
[81] M. Qi, L. Xiaofeng, L. Weschler, and J. Sundell, 'CO2 generation rate in Chinese people', *Indoor Air*, vol. 24, no. 24, pp. 559–566, 2014.
[82] L. Zhong *et al.*, 'Compositions, thermodynamic properties, and transport coefficients of high-temperature $C_5F_{10}O$ mixed with CO_2 and O_2 as substitutes for SF_6 to reduce global warming potential', *AIP Adv.*, vol. 7, no. 7, p. 075003, Jul. 2017, doi: 10.1063/1.4993305.
[83] S. Cui, M. Cohen, P. Stabat, and D. Marchio, 'CO2 tracer gas concentration decay method for measuring air change rate', *Build. Environ.*, vol. 84, no. Supplement C, pp. 162–169, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.11.007.
[84] G. Bekö *et al.*, 'Diurnal and seasonal variation in air exchange rates and interzonal airflows measured by active and passive tracer gas in homes', *Build. Environ.*, vol. 104, pp. 178–187, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.05.016.
[85] \AA Blomsterberg, T. Carlsson, C. Svensson, and J. Kronvall, 'Air flows in dwellings—simulations and measurements', *Energy Build.*, vol. 30, no. 1, pp. 87–95, 1999.
[86] H. Okuyama, Y. Onishi, S. Tanabe, and S. Kashihara, 'Statistical data analysis method for multi-zonal airflow measurement using multiple kinds of perfluorocarbon tracer gas', *Build. Environ.*, vol. 44, no. 3, pp. 546–557, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.04.014.
[87] C. Y. Chao, M. P. Wan, and A. K. Law, 'Ventilation performance measurement using constant concentration dosing strategy', *Build. Environ.*, vol. 39, no. 11, pp. 1277–1288, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.03.012.
[88] C. F. A. AFONSO, E. A. B. MALDONADO, and E. SK, 'A Single Tracer-gasMethod to CharacterizeMulti-room Air Exchanges', p. 8, 1986.
[89] M. H. Sherman, 'On the estimation of multizone ventilation rates from tracer gas measurements', *Build. Environ.*, vol. 24, no. 4, pp. 355–362, Jan. 1989, doi: 10.1016/0360-1323(89)90030-9.

[90] M. Sandberg, ‘The multi-chamber theory reconsidered from the viewpoint of air quality studies’, *Build. Environ.*, vol. 19, no. 4, pp. 221–233, 1984, doi: 10.1016/0360-1323(84)90003-9.
[91] T. Lu, A. Knuutila, M. Viljanen, and X. Lu, ‘A novel methodology for estimating space air change rates and occupant CO2 generation rates from measurements in mechanically-ventilated buildings’, *Build. Environ.*, vol. 45, no. 5, pp. 1161–1172, May 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.10.024.
[92] D. L. Johnson, R. A. Lynch, E. L. Floyd, J. Wang, and J. N. Bartels, ‘Indoor air quality in classrooms: Environmental measures and effective ventilation rate modeling in urban elementary schools’, *Build. Environ.*, vol. 136, pp. 185–197, May 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.03.040.
[93] M. Macarulla, M. Casals, M. Carnevali, N. Forcada, and M. Gangolells, ‘Modelling indoor air carbon dioxide concentration using grey-box models’, *Build. Environ.*, vol. 117, pp. 146–153, May 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.02.022.
[94] L. Ljung, *System Identification: Theory for User*. Prentice Hall, 1987.
[95] M. W. Liddament, *International Energy Agency energy conservation in buildings and community systems programme: IEA-ECB & CS. Annex 5 [...]: Air Infiltration and Ventilation Centre Air infiltration calculation techniques: an applications guide*. Bracknell, Berkshire: Air Infiltration and Ventilation Centre, 1986.
[96] M. H. Sherman, I. S. Walker, and M. M. Lunden, ‘Uncertainties in air exchange using continuous-injection, long-term sampling tracer-gas methods’, *Int. J. Vent.*, vol. 13, no. 1, pp. 13–28, 2014.
[97] G. Remion, B. Moujalled, and M. El Mankibi, ‘Test of new analysis methodologies to assess dynamic airflow rate with the tracer gas decay method’, *AIVC 40th Conf. Gent Belg.*, p. 8, Oct. 2019.
[98] M. Brabec and K. Jílek, ‘State-space dynamic model for estimation of radon entry rate, based on Kalman filtering’, *J. Environ. Radioact.*, vol. 98, no. 3, pp. 285–297, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.jenvrad.2007.05.006.
[99] B. Wang, D. W. Etheridge, and M. Ohba, ‘Wind tunnel investigation of natural ventilation through multiple stacks. Part 2: Instantaneous values’, *Build. Environ.*, vol. 46, no. 7, pp. 1393–1402, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.01.011.
[100] J. S. Park, ‘Long-term field measurement on effects of wind speed and directional fluctuation on wind-driven cross ventilation in a mock-up building’, *Build. Environ.*, vol. 62, pp. 1–8, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.12.013.
[101] M. El Mankibi, ‘Développement et évaluation numérique et expérimentale de stratégies de régulation de la ventilation hybride’, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, 2003.
[102] H. E. Feustel and A. Rayner-Hooson, ‘COMIS Fundamentals’, Berkeley, May 1990.
[103] F. Allard, *Natural ventilation in buildings*. London, 1998.
[104] J. C. Frutos Dordelly, M. Coillot, M. El Mankibi, R. Enriquez Miranda, M. J. Jimenez, and J. Arce Landa, ‘Active Solar Chimney (ASC) - Numerical and Experimental Study of Energy Storage and Evaporative Cooling’, in *Proceedings of SWC2017/SHC2017*, Abu Dhabi, 2017, pp. 1–12, doi: 10.18086/swc.2017.12.03.
[105] J. W. Axley, ‘Residential Passive Ventilation Systems: Evaluation and Design’, 2001.
[106] H. E. Feustel, ‘COMIS—an international multizone air-flow and contaminant transport model’, p. 16, 1999.
[107] AFNOR, *ISO 9972 - Thermal performance of buildings- Determination of air permeaility of buildings - fan presurization method*. 2015.
[108] W. G. Brown and K. R. Solvason, ‘Natural convection through rectangular openings in partitions Pt. 1 : Vertical partitions’, p. 27.

[109] CSTB, *Ventilation des bâtimetns - Réhabilitation dans l'habitat collectif*. 2005.
[110] D. Costola, B. Blocken, and J. L. M. Hensen, 'Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs', *Build. Environ.*, vol. 44, no. 10, pp. 2027–2036, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.02.006.
[111] I. Vrachimi, A. P. Melo, and D. Cóstola, 'Prediction of wind pressure coefficients in building energy simulation using machine learning', p. 9, 2017.
[112] AFNOR, *NF EN 13141-5 Performance testing of components/ products for residential ventilation Part 5: Cowls and roof outlet terminal devices*, vol. 13141–5. 2005.
[113] AFNOR, *EN 12599 - Ventilation for Buildings - test proedures and measurement methods to hand over air conditioning and ventilation systems*, vol. 12599. 2012.
[114] P. Schimmerling, J.-C. Sisson, and A. Zaïdi, *Pratique des plans d'expériences*. .
[115] M. Humbert, 'Impact des paramètres de conception sur le confort d'été des grands espaces-serres', INSA, Lyon, 2002.
[116] A. B. Mélois, B. Moujalled, G. Guyot, and V. Leprince, 'Improving building envelope knowledge from analysis of 219,000 certified on-site air leakage measurements in France', *Build. Environ.*, vol. 159, p. 106145, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.05.023.
[117] C.-A. Roulet and L. Vandaele, 'Air flow patterns within buildings measurement techniques', AIVC, AIVC Technical Note 34, 1991. [Online]. Available: https://www.aivc.org/resource/tn-34-air-flow-patterns-within-buildings-measurement-techniques.
[118] D. Costola and D. W. Etheridge, 'Unsteady natural ventilation at model scale—Flow reversal and discharge coefficients of a short stack and an orifice', *Build. Environ.*, vol. 43, no. 9, pp. 1491–1506, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.buildenv.2007.08.005.
[119] D. Yang and P. Li, 'Dimensionless design approach, applicability and energy performance of stack-based hybrid ventilation for multi-story buildings', *Energy*, vol. 93, pp. 128–140, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.08.115.

Annexes

Annexe 1.1 : Principe de la ventilation naturelle

Tout débit d'air traversant un bâtiment est résultant d'une différence de pression exercée sur au moins deux bouches de ventilation différentes. L'air se déplacera ainsi de la bouche sur laquelle est exercée la plus grande pression vers la bouche sur laquelle est exercée la plus basse pression. Le débit d'air se déplaçant d'une bouche à l'autre est caractérisé par l'équation 1 :

$$Q = A_{eff} \sqrt{\frac{2\,\Delta P}{\rho}} \qquad (1)$$

Avec :

- Q le débit d'air [$m^3.s^{-1}$] ;
- A_{eff} la surface effective équivalente des ouvertures [m^2] ;
- ΔP la différence de pression [Pa] ;
- ρ la masse volumique [$kg.m^{-3}$].

Un système de ventilation mécanique peut fonctionner en extraction ou en insufflation, ou les deux en même temps pour la ventilation double flux. Par exemple, s'il fonctionne en extraction comme c'est largement le cas en France, il va imposer une dépression dans le bâtiment par rapport à l'extérieur. L'air va alors pénétrer par les bouches du bâtiment, et va être extrait par les conduits de ventilation reliés au ventilateur d'extraction. Concernant maintenant les systèmes de ventilation naturelle, ce sont les conditions atmosphériques qui vont imposer ces différences de pression entre les bouches de ventilation du bâtiment. La vitesse, la direction du vent, ainsi que la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment vont engendrer les différences de pression, traduits ensuite en débit de ventilation.

Le vent

Le vent est l'une des deux forces motrices impliquées dans la ventilation naturelle. Le vent va imposer une surpression sur la façade qu'il frappe, façade dite face au vent. La façade à l'opposée, dite façade sous le vent, entre alors en dépression par rapport à la façade face au vent. L'air va pénétrer par les ouvertures de la façade face au vent, et il va s'écouler jusqu'à être évacué par les ouvertures de la façade sous le vent. La pression exercée par le vent sur la façade face au vent est appelée pression dynamique (équation 2).

$$P_{dynamique} = \frac{1}{2}\, C_p\, \rho\, U^2 \qquad (2)$$

Avec :

- $P_{dynamique}$ la pression dynamique [Pa] ;
- Cp le coefficient de pression [-] ;
- U la vitesse du vent [$m.s^{-1}$].

On remarque ici l'introduction d'un coefficient de pression dans la formulation de la pression dynamique. C'est ce coefficient de pression qui va induire les différences entre les pressions des deux façades opposées. La Figure 0-1 synthétise l'action du vent sur les deux

façades opposées. On remarque que la seule différence entre les deux équations définissant la pression exercée sur les deux ouvertures réside dans le coefficient de pression. Il sera positif si la façade est face au vent (Cp_{fv}) et négatif pour la façade sous le vent (Cp_{sv}). Donc finalement, en considérant uniquement l'action du vent, l'équation 1 peut être reformulée ainsi :

$$Q = A_{eff}\, U \sqrt{\Delta C_p} \qquad (3)$$

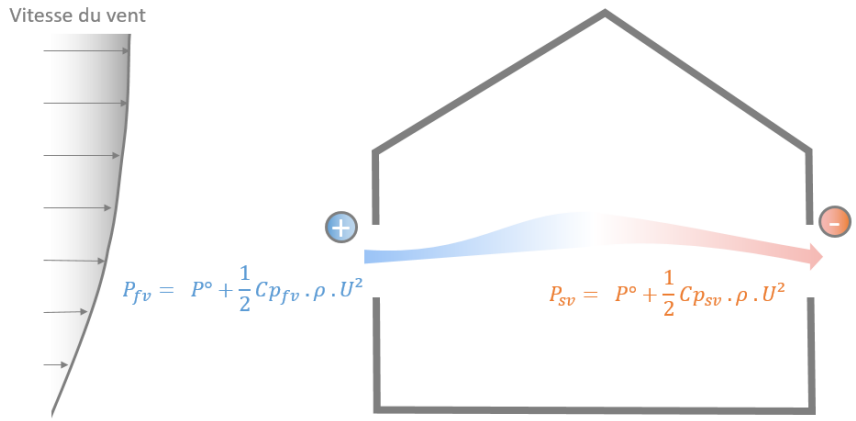


Figure 0-1 : Action du vent sur les façades d'un bâtiment

Les débits induits par le vent sont sujets à être plus importants que ceux induits par la deuxième force motrice naturelle. En revanche, ils sont plus incertains et présentent des fluctuations hautes fréquences qui rendent le dimensionnement de ce type de systèmes très compliqué. L'écoulement d'air induit par le vent va être moins bien maîtrisé.

Le tirage thermique

La deuxième force motrice naturelle est appelée tirage thermique et concerne les débits induits par la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Considérons l'équation de la pression hydrostatique (équation 4) :

$$P = P° - \rho\, g\, z \qquad (4)$$

Avec :

- P° la pression de référence [Pa] ;
- g l'accélération de la pesanteur [$m.s^{-2}$] ;
- z la hauteur [m].

Alors, deux ouvertures de hauteurs différentes avec une différence de température (donc de masse volumique) de part et d'autre des ouvertures entraînent une différence de pression comme suit :

$$\Delta P_{12} = P°_{int} - P°_{ext} - (\rho_{int} - \rho_{ext})\, g\, \Delta z \qquad (5)$$

Le schéma résumant l'action du tirage thermique est présenté en Figure 0-2. En l'absence de vent, si la température intérieure est supérieure à la température extérieure, et qu'il existe une différence de hauteur entre deux ouvertures, alors la différence de pression ΔP_{12} de l'équation 5 sera négative, et l'air entrera donc par l'ouverture basse et sera évacué par l'ouverture haute.

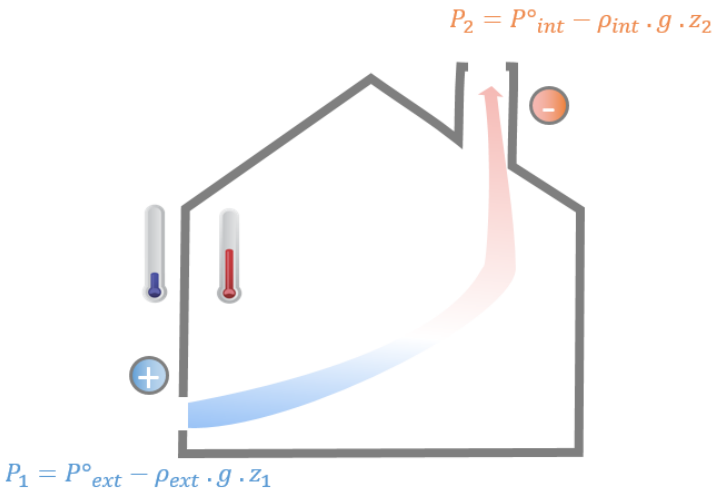


Figure 0-2 : Action du tirage thermique

La combinaison des deux

Les deux paragraphes précédents ont présenté l'action individuelle du vent et du tirage thermique. En présence de vent, s'il existe une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, et que deux bouches sont disposées à des hauteurs différentes, il y aura une action combinée du vent et du tirage thermique sur les débits d'air. Suivant la direction du vent par rapport à la disposition des bouches, ainsi que la position d'éventuels obstacles, le vent peut renforcer les débits induits par le tirage thermique, ou il peut s'y opposer [12]. Si la bouche haute, par exemple située en toiture, est moins soumise au vent que la bouche basse, alors les débits seront renforcés (cf. Figure 0-3 de gauche). A l'inverse, si la bouche basse est sous le vent, et que la bouche haute est face au vent, alors le vent s'opposera aux débits induits par le tirage thermique (cf. Figure 0-3 de droite), jusqu'à une possible inversion de flux si le vent est très fort [118]. Plusieurs auteurs proposent la formulation approximative suivante pour caractériser les débits induits par une combinaison des deux actions [12], [119]:

$$Q = A_{eff}\sqrt{\left|U_{tirage}^2 +/- U_{vent}^2\right|} \qquad (6)$$

Avec :

- U_{tirage} la vitesse induite par le tirage thermique [m.s^{-1}] ;
- U_{vent} la vitesse d'air dans l'ouverture induite par le vent [m.s^{-1}].

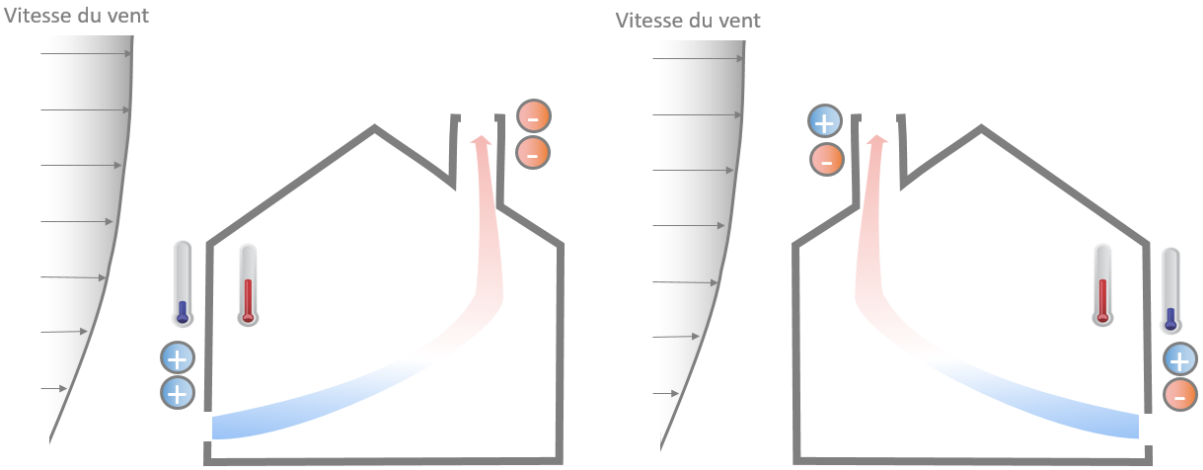


Figure 0-3 : Actions combinées du vent et du tirage thermique

Annexe 3.1 : Documentation technique des capteurs

NZP Pitot - Débitmètre

NZP1000 Series Nozzle Pitot Air/Gas Flow Sensor

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Accuracy:	Typically ±0.5% of Flow
Repeatability:	±0.1% of Flow
Recommended Velocity Range:	175 - 6000 FPM (0.89 to 30.5 m/s) pipe velocity @ S.T.P. Corresponding D.P. = 0.00764 to 9.0 inch w.c. (0.194 to 229 mmwg). *The throat velocity is approximately double the pipe velocity.*
Unrecovered Pressure Loss:	Approximately 44% of measured DP *Example: At a Velocity of 4000 FPM @ S.T.P., the measured D.P. is 1.0"w.c. The permanent pressure loss is 44% of 1.0"w.c. or 0.44" w.c.*
Velocity Turndown:	34:1 (Ratio of Maximum to Minimum Velocity)

FUNCTIONAL SPECIFICATIONS

Temperature Rating:	Carbon Steel: -200° to 750°F (-128° to 400°C) Stainless Steel: -200° to 750°F (-128° to 400°C) With Aluminum Flow Straighteners or Nozzle: -67° to 300°F (-55° to 149°C)
Maximum Static Pressure	
Low Pressure:	Carbon Steel Casing: 10 psig (0.4 Bar). Stainless Steel Casing: 12 psig (0.8 Bar).
High Pressure:	Dependent on process temperature, media and installation. Flanges/Casing are ANSI standard and fabrication is continuous weld. Special Flanges, Pipe and fabrication requirements or procedures are possible. Consult factory.

PHYSICAL SPECIFICATIONS

Pitot Array:	316 Stainless Steel with Argon welded joints
Connections:	316 Stainless Steel, 1/4" NPTF Standard
Flow Straighteners:	3/8" Hexagonal Cells either Aluminum (3.5" deep), 304 SS or 316 SS (2.5" deep). SS is of welded construction. For higher velocities, reinforced Flow Straighteners (6 mil. thick, welded each node) are available. *Other materials available. Consult factory.*
Casing/Flanges:	304 Stainless Steel or Carbon Steel (Epoxy coated with rust inhibiting primer). All joints are continuously seam welded. Flanges with bolt holes are standard. For other materials, special coatings, custom flanges, etc. consult factory. *Note : End Flange Bolts Not Supplied*
Nozzle:	Aluminum, 304 or 316 Stainless Steel
Gaskets:	Low Pressure Configuration: Neoprene High Pressure Configuration: Spiral Wound Graphite *Other gasket materials such as Silicon, Gortex, etc. are available. Consult Factory*
Available Sizes:	Nominal diameters of 4", 6", 8", 10", 12", 14", 16", 18", 20", 22", 24", 26", 28", 30" and 40". Consult factory for other sizes.

OPTIONS

ZV	Mounted Zeroing Valve for D.P. Transmitter. See Brandt MVA1000 Specification Sheet for Model Number of Valve.
CF	Companion Flanges: Mounting flanges for adapting the NZP1000 to existing duct work. Please supply Duct O.D.
IB	Intake Bell. Mounts on Inlet of NZP for outside air intake measurement. Minimizes permanent pressure loss and shapes profile.
TH	Intake Bell Rain Cover.
SGM	Special Gasket Material: Gaskets used between the two flanged section assemblies. Specify Material.
TC	Temperature Connection: 1/2" NPTF, 316SS connection for insertion of Temperature Sensor
PC	Pressure Connection: 1/4" NPTF, 316SS connection for static pressure measurement in Mass Flow Applications.
RTD	Resistance Temperature Detector, 3 wire device for temperature measurement. Includes TC Option.
ARTD	Averaging RTD Sensor, 3 wire device for temperature measurement. Averages Temperature across Pipe. Includes TC Option.
QS	Seismic Qualified for Nuclear applications. Specify seismic zone & response spectrum.

INSTALLATION GUIDELINES

The Patented NZP1000 Series Nozzle Pitot requires No Upstream Straight run and only 1-2 Downstream Diameters to maintain an accuracy of ±0.5% except when a Damper is installed. Consult Factory for special installation conditions.

SPECIFYING THE BRANDT NZP1000

Flow measuring station shall be a Nozzle/Pitot Averaging Type with integral flow straightening vanes. Nozzle shall compose a uniform velocity profile and reduce the area at the point of measurement by 1/2. Flow straighteners shall have 3/8 inch diameter hexagon shaped cells with a minimum depth of 2.5 inches. All components shall be housed in a flanged spool piece with a flange to flange dimension of 24.25 Inches. Flow station shall measure actual flow within ±0.5% of reading over a range of 175 to 6000 FPM with repeatability of ±0.1% of reading. Permanent pressure loss shall not exceed 44% of the measured velocity pressure.

Thermo Electron Corporation

Thermo Electron has been the recognized leader in the measurement of air/gas flow and very low differential pressure in industrial applications. Thermo offers a complete line of pitot/static probes and arrays, D.P. Transmitters, the unique Nozzle Pitot flow sensor and a complete family of Current to Pressure (I/P) and Pressure to Current (P/I) Transducers.

Thermo ELECTRON CORPORATION

Thermo Electron Corporation
1410 Gillingham Lane
Sugar Land, Texas 77478
Telephone: (713) 227-0404 Facsimile: (713) 713-2273

Represented By:

C2AI Enregistreurs HD35ED

Carbon dioxide (CO2) – HD35ED… models for indoor	
Sensor	Non-Dispersive Infrared (NDIR)
Measuring range	0…5,000 ppm
Resolution (of the instrument)	1 ppm
Accuracy	± (50 ppm + 3% of the measure) @ 25 °C and 1013 hPa
Operating conditions	0…50 °C / 0…95%RH non-condensing / 950…1050 hPa
Response time	T_{90} < 120 s (air speed = 2 m/s)
Stability	5% of the measure/5 years (with autocalibration enabled)
Non-linearity	< 1% f.s.

Vaisala GMW115

Technical Data

Performance

CO_2-measurement range	0 ... 2000 ppm 0.....5000 ppm
Accuracy (including repeatability, non-linearity and calibration uncertainty)	±(2 % of range + 2 % of reading)
Long-term stability	± 5 % of range/5 years
Response time T90	1 min
Temperature dependence, typical	-0,35 % of reading / °C
Pressure dependence, typical	+0,15 % of reading/hPa
Warm-up time	1 min, 10 min for full. specification
Product lifetime	> 10 years

Operating Environment

Temperature	-5 ... +45 °C (23 ... 113 °F)
Humidity	0 ... 85 %RH
Pressure	700 ... 1200 hPa
Electromagnectic compatibility	
Complies with EMS standard EN61326-1, Generic Environment	

Inputs and Outputs

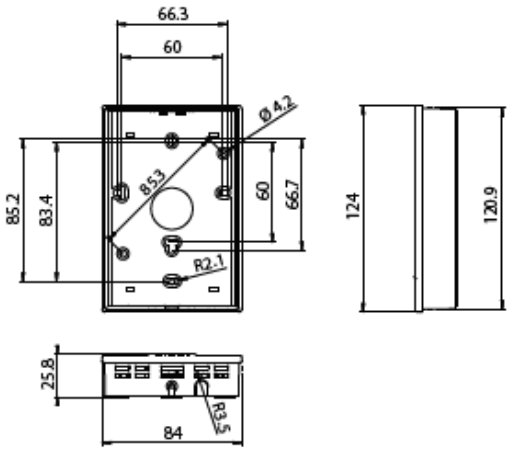
Operating voltage	24 V (±20 %) AC/DC
Power consumption	<2 W
Outputs	4 ... 20 mA, 0 ... 10 V, RS-485, 2-wire, non-isolated

Housing

Material:	ABS plastics
Colour:	Cycolac 233599/NCS 0502-G50Y
Fire resistance:	UL94 HB
Ingress protection:	IP30

Dimensions

Dimensions in mm





VAISALA

Please contact us at
www.vaisala.com/requestinfo

www.vaisala.com

Scan the code for more information

Ref. B210568EN-E ©Vaisala 2012
This material is subject to copyright protection, with all copyrights retained by Vaisala and its individual partners. All rights reserved. Any logos and/or product names are trademarks of Vaisala or its individual partners. The reproduction, transfer, distribution or storage of information contained in this brochure in any form without the prior written consent of Vaisala is strictly prohibited. All specifications — technical included — are subject to change without notice.

CE

Annexe 3.2 : Analyse d'incertitude

Décroissance de la concentration – Méthode 2 points

Pour la méthode par décroissance de la concentration, on a :

$$\sigma N = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial N}{\partial Ci}\right)^2 \sigma_{Ci}2 + \frac{\partial N}{\partial Cext}^2 \sigma_{Cext}{}^2 + Infiltrations^2}$$

Pour la méthode 2 points, on a donc :

$$\frac{\partial N_2}{\partial C_0} = \frac{1}{\Delta T} \cdot \frac{1}{C_0 - C_{ext}} \qquad \frac{\partial N_2}{\partial C_f} = -\frac{1}{\Delta T} \cdot \frac{1}{C_f - C_{ext}}$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial C_{ext}} = \frac{1}{\Delta T} \cdot \left(-\frac{1}{C_0 - C_{ext}} + \frac{1}{C_f - C_{ext}}\right)$$

Il nous reste maintenant à déterminer l'écart-type (σ_{Cext}) de l'estimation de la concentration extérieure. Cette concentration a été estimée en utilisant les valeurs caractéristiques de la décroissance exponentielle. En effet, après 3 constante nominale te temps τ, la valeur de la concentration vaut 5% de sa valeur initiale. La constante nominale de temps est l'inverse du taux de renouvellement d'air. Cela revient à écrire la formule suivante :

$$C(3\tau) = (C(0) - C_{ext}) * 0.05 + C_{ext}$$

On obtient l'écart-type de la valeur de la concentration extérieure à l'aide de la loi de propagation des incertitudes :

$$\sigma C_{ext} = \sqrt{-0.05^2\, \sigma C_0^2 + \sigma C_{3\tau}^2 * (0.95)^2}$$

Dose continue – Moyenne de la concentration inverse

Pour la méthode dose continue, on a :

$$\sigma Q = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial Q}{\partial Ci}\right)^2 \sigma_{Ci}2 + \frac{\partial Q}{\partial Cext}^2 \sigma_{Cext}{}^2 + \frac{\partial Q}{\partial m}^2 \sigma_m^2 + Infiltrations^2}$$

On a donc pour la méthode par moyenne de la concentration inverse :

$$\frac{\partial Q}{\partial C_0} = \frac{m}{n+1} * \frac{-1}{(C_0 - C_{ext})^2} + \frac{Ve}{n * (\Delta t)} * \left(\frac{1}{C_0 - C_{ext}}\right)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial C_f} = \frac{m}{n+1} * \frac{-1}{(C_0 - C_{ext})^2} - \frac{Ve}{n * (\Delta t)} * \left(\frac{1}{C_f - C_{ext}}\right)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial C_i} = \frac{m}{n+1} * \frac{-1}{(C_i - C_{ext})^2}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial C_{ext}} = \frac{m}{n+1} * \sum_i \frac{1}{(C_i - C_{ext})^2} + \frac{Ve}{n * \Delta t} * \left(\frac{-1}{C_0 - C_{ext}} + \frac{1}{C_f - C_{ext}}\right)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial m} = \frac{1}{n+1} * \sum_i \frac{1}{C_i - C_{ext}}$$

Concentration constante

Pour la méthode par concentration constante, on a :

$$\sigma Q = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial Q}{\partial Ci}\right)^2 \sigma_{Ci}2 + \frac{\partial Q}{\partial Cext}^2 \sigma_{Cext}{}^2 + \sum_i \frac{\partial Q}{\partial m_i}^2 \sigma_{m_i}^2 + Infiltrations^2}$$

Avec

$$\frac{\partial Q}{\partial m_i} = \frac{1}{n+1} * \frac{1}{C_i - C_{ext}}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial C_i} = \frac{1}{n+1} * \frac{-m_i}{(C_i - C_{ext})^2}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial C_{ext}} = \frac{1}{n+1} * \sum_i \frac{m_i}{(C_i - C_{ext})^2}$$

Annexe 4.1 : Article présenté à la 40eme conférence de l'AIVC

Test of new analysis methodologies to assess dynamic airflow rate with the tracer gas decay method

Gabriel Remion*[1,2], Bassam Moujalled[1], Mohamed El Mankibi[2]
1 Cerema BPE Project-team
46 rue St-Theobald
38080 L'isle d'Abeau, France
2 ENTPE - University of Lyon
3 rue Maurice Audin
69120 Vaulx-en-velin, France
*Corresponding author: gabriel.remion@entpe.fr

ABSTRACT

The measurement of natural airflows is practically challenging. Driving forces that induce natural airflows are characterized by low pressure differences. Conventional airflow-meters would introduce pressure drops, which can significantly affect the flow pattern. Besides, the measurement of the flow crossing a window is difficult to implement and poorly reliable. Thus, indirect methods called tracer gas methods are widely used to bypass these difficulties, as they do not interfere with the flow pattern. They rely on the analysis of the evolution of the concentration of a tracer gas, injected before or during the measurement.
However, tracer gas methods are subject to several uncertainty sources. To reduce the uncertainty due to concentration measurements, least squares regressions are often realised, which allow to smooth the measurement noise. If the regression is realised, airflows have to be stationary during the measurement, which is particularly questionable for natural airflows. Actually, for lack of better methods, these techniques are often used in natural conditions, assuming that the bias induced by the regression is inferior than the bias due to the measurement noise. The aim of the present paper is to experimentally assess a dynamic airflow rate with the commonly used multi-points tracer decay method, which theoretically assumes a constant ACH. The variation of airflows is realised thanks to a mechanical controllable fan, which allows a direct measurement of the airflow in the extract duct to test the accuracy of the tracer gas-dynamic ACH measurement.

KEYWORDS

Tracer decay method, Variable airflow, Kalman filter, Local least square regression.

1 INTRODUCTION

The measurement of natural airflow is a challenging task. Low pressure differences induced by the wind and buoyancy effects lead to an unstable flow path. An airflow-meter would introduce some pressure drops likely to interfere with the flow pattern. Tracer gas methods are the most widely used methods to assess natural airflows, as they do not interfere with the flow pattern. They provide the Air Change per Hour from the measurement of the emission rate and the concentration of the tracer gas. The three main tracer gas methods, that differ from the way of dosing the gas, are the constant concentration method, the constant dosing method, and the concentration decay method (Sherman, 1990). Among them, the concentration decay method is the most suited method to natural ventilation (Remion, 2019). One of the reason is that the artificial homogenization of the tracer gas, which is one prerequisite that may alter the flow path, can be realised before the measurement, contrary to other methods (AFNOR, 2017).

Analysing the decrease of the gas can come from the measurement of only two extreme points. The accuracy of this method is weak but it tolerates variable airflows. To increase the accuracy of the method, a least squares regression may be realised with several measurement points, leading to the multi-points decay method. However, the regression

implies a stationary airflow assumption during the measurement, which is troublesome for natural ventilation systems. The aim of the present paper is to test two other analysis techniques that reduce the time laps of the assumed constant airflow, or even circumvent this requirement. The first technique is a moving least squares regression on a significantly reduced time laps. It is enabled by measurement instruments that allow now to have access to nearly continuous concentration data. The moving regression provides a dynamic ACH. The second technique is the use of a Kalman filter, which is a very convenient tool to reduce the measurement noise, while keeping the ability to track the parameter of interest, namely the dynamic ACH. Duarte et al. provide the mathematical development of the filter adapted to the Transient Mass Balance Equation metabolic CO_2 method (Duarte, 2018). Those methods will be compared to the 2 points decay method, which should be used when variable airflows are likely to occur (AFNOR 2017).

2 METHODS

2.1 Experimental setup

The test was conducted in an experimental cell of 2.45m width, 3.17m length and 2.65m height, leading to a volume of 20.6 m^3. The laboratory cell is featured with a controllable fan, allowing to simulate airflow variation profiles. An airflow-meter, which is installed in the extract duct connecting the fan to the room, provides the reference value of the airflow rate with an accuracy of 0.5%. Laussmann & Helm have proved the suitability of CO_2 by comparing tracer gas results from CO_2 and SF_6 (Laussmann, 2011). We chose CO_2 as a tracer gas during the experiment, considering that no internal sources were to take into account. We used two typologies of CO_2 sensors based on the NDIR[1] technology : two vaisala sensors with an accuracy of 4% and an acquisition frequency of 0.5 Hz, and five stand-alone C2AI sensors with an accuracy of +/- (50 ppm + 3%) with a frequency of one measurement every 12 sec. Table 1 presents technical specificities of measurement instruments. Two typologies of sensors were tested because stand-alone sensors are very convenient for in-situ applications, but their acquisition frequency and accuracy are weaker. The aim is to test the impact of the degradation of technical characteristics of sensors. Those sensors were averaged by types to inhibit the effect of imperfect mixing. Figure 1 presents a schematic of the experimental cell.

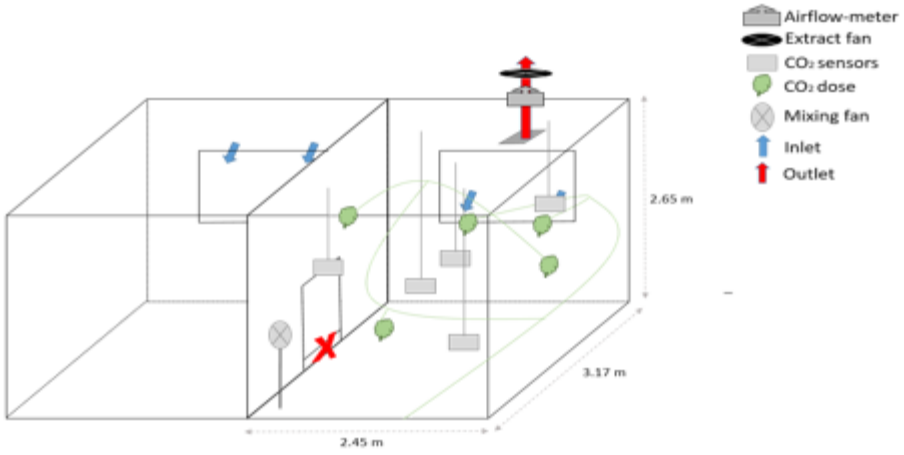


Figure 1 : Schematic of the experimental cell

[1] Non Dispersive Infrared Technology

Table 1: Instruments technical specificities

Measurement instrument	Technology	Accuracy	Acquisition frequency
C2AI CO_2 sensors	Stand-alone NDIR[1]	50 ppm + 3% reading	1/12 Hz
Vaisala CO_2 sensors	Wired NDIR[1]	4% reading	0.5 Hz
NZP Nozzle series airflow-meter	Pitot-tube	0.5% reading	0.5 Hz

2.2 Airflow variation profile

A mechanical ventilation system was used to reproduce airflows in accordance with airflows induced by natural conditions. We considered stack and cross ventilation. Stack ventilation was simulated by computing airflows from the formula characterizing the flow between two openings of different height (**equation 1**). The formula was filled with meteorological data measured by a local weather station in Lyon, France. Stack ventilation is mainly induced by buoyancy effects. In order to have significant fluctuations of airflow, we looked for a day with a significant temperature amplitude.

$$Q_{stack}(t) = C_d \cdot A_{eff} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \rho_{ext} \cdot H \cdot \frac{T_{ext} - T_{int}}{T_{int}}}{\rho_{int}}} \quad (1)$$

With C_d [ ] the discharge coefficient, A_{eff} [m^2] the effective area, ρ_{ext} and ρ_{int} [$kg.m^{-3}$] the external and the internal density of the air, H [m] is the height between two openings, T_{ext} and T_{int} [°C] the external and internal temperatures, g [$m.s^{-2}$] the acceleration of gravity.

Airflows were then computed and two profiles were isolated, one in the morning leading to a monotonous decreasing profile [75 to 50 $m^3.h^{-1}$ in 2 hours], and one in the afternoon, leading to a monotonous increasing profile [50 to 65 $m^3.h^{-1}$ in 2 hours]. It corresponds to temperature fluctuations of 4°C in 2 hours. Those particular profiles were selected because it allows to have more than 5 air renewals in 2 hours (which is important for the constant dosing method) and because their mean values are similar.

To simulate a flow consistent with cross-ventilation, we used data from a study conducted by J. Lo et al. (Lo, 2012). They investigated the flow crossing windows of a multi-zone building. We determined two profiles from those data, based on a different multiplier coefficient (0.3 and 0.7). The coefficient 0.3 was chosen to set the mean airflow at the same level than the two aforementioned profiles. The coefficient 0.7 allows to test the impact of wider and faster fluctuations on the accuracy of tracer gas methods. Figure 1 shows airflows measured by the airflow meter, for each variation profile that have been used in the experiment.

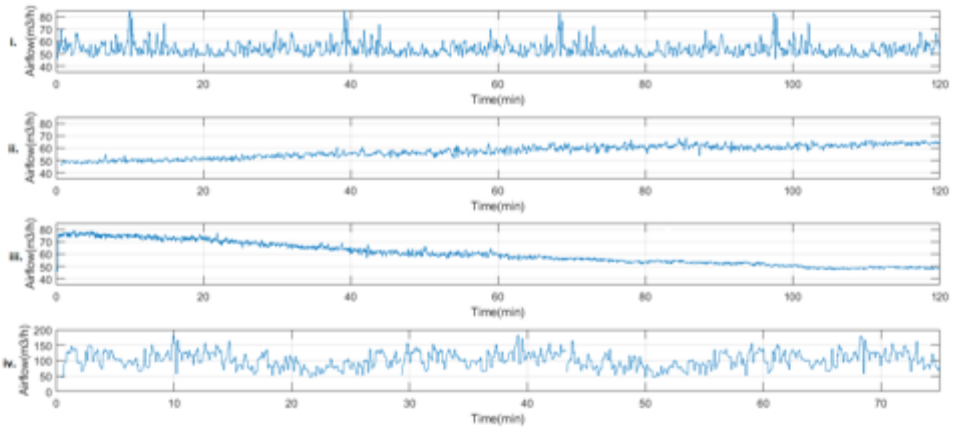


Figure 2 : Airflow variation profiles: (i) cross, (ii) stack increasing (up), (iii) stack decreasing (down), (iv) high cross (hicross)

2.3 Calculation of airflow

We will test three calculations of the airflow rate: the conventional 2 points decay formulation which is the standard-prescribed decay method in case of variable airflows, a local moving least squares regression that is to say a local moving multi-points decay method, and finally the Kalman filter. The formulation of the calculation of the 2 points decay ACH, and the multi-points decay ACH are given in Ref. (Roulet, 1991). For the local moving multi-points method, CO_2 concentrations were first smoothed thanks to a moving term average. A two minutes-time laps of both moving term average and moving multi-points method was arbitrarily chosen.

Concerning now the Extended Kalman filter, the mathematical development is available in Ref. (Duarte, 2018). The principle of the filter is to estimate the state parameter x (**equation 2**). Transition functions are defined to predict the value of the state parameter at the next time step (**equation 3**). Transition functions involve some process noise terms, that accounts for violations of assumptions of tracer gas methods. For instance, the process noise of the concentration (w_k^c) would be deviations from a perfect mixing of the fresh air, and process noise of the airflow (w_k^n) would be deviations from a stationary airflow. The prediction $\widehat{x_{k+1}}$ of the state parameter is then compared to the noise corrupted measurement (**equation 4**). The comparison provides the error (ε_{k+1}). The filter will finally update the estimation of the state parameter (x_{k+1}) from the calculated error by multiplying it by the Kalman gain, which is dependant on the Variance/Covariance matrix of the process noise (W) and the measurement noise (V). The measurement covariance matrix was defined in accordance with technical specificities of sensors. The covariance matrix of the process noise was set to: $= \begin{Bmatrix} 0.1\ ppm^2 & 0 \\ 0 & 0.001\ (Vol^2.h^{-2}) \end{Bmatrix}$. Added to the predicted state ($\widehat{x_{k+1}}$), it provides the updated state parameter. The block diagram of the filter is presented in Figure 3. A dynamic airflow rate is provided by successive states of the airflow rate n.

$$x_k = \begin{cases} C_k \\ n_k \end{cases} \tag{2}$$

$$\widehat{x_{k+1}} = \begin{cases} C_{k+1} = (C_k - C_{ext}) * e^{-n_k \cdot \Delta T} + C_{ext} + w_k^c \\ n_k = n_{k+1} + w_k^n \end{cases} \tag{3}$$

$$C_k^* = C_k + v_k^c \tag{4}$$

With C_k the concentration at time k [kg/kg], n_k the airflow rate at time k [Vol/h], C_k^* the noise corrupted measured concentration [kg/kg], ΔT the time laps between two measurements [h].

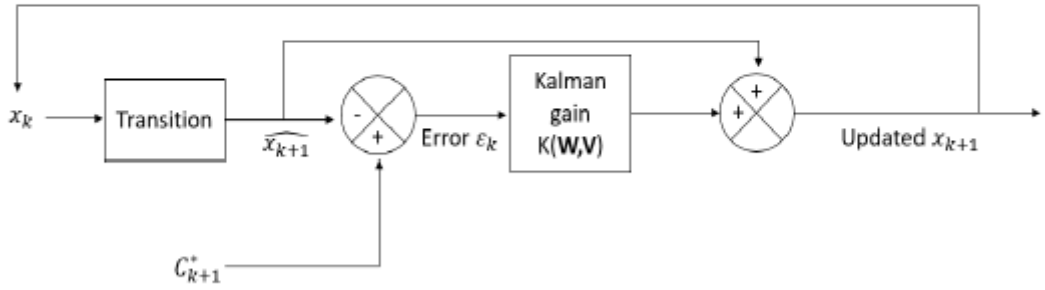


Figure 3 : schematic of the Extended Kalman filter principle

3 RESULTS

The mean airflow rate was computed with the 2 points method, and a dynamic airflow rate was provided by the Extended Kalman Filter and the Local fit methods. Figure 4 shows the evolution of dynamic airflows (Extended Kalman filter, Local fit) compared to the reference airflow measurement, performed by the airflow meter in the extract duct. The airflow profile which is showed is the most critical highly variating profile, consistent with cross ventilation. CO_2 concentrations used to compute airflows of Figure 3 come from wired Vaisala sensors with a good acquisition frequency (0.5 Hz). The time laps of the graph represents 2 air renewals. We can see that, apart from small fluctuations, both methods are very accurate, and account well for the dynamic airflow rate.

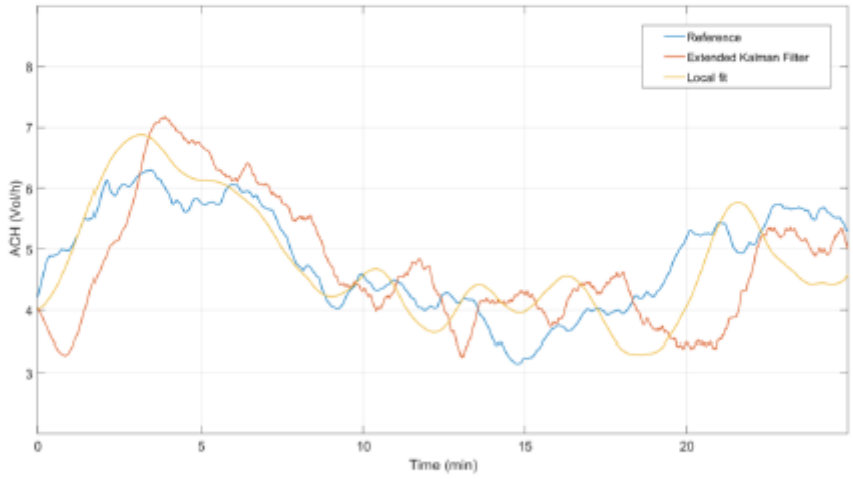
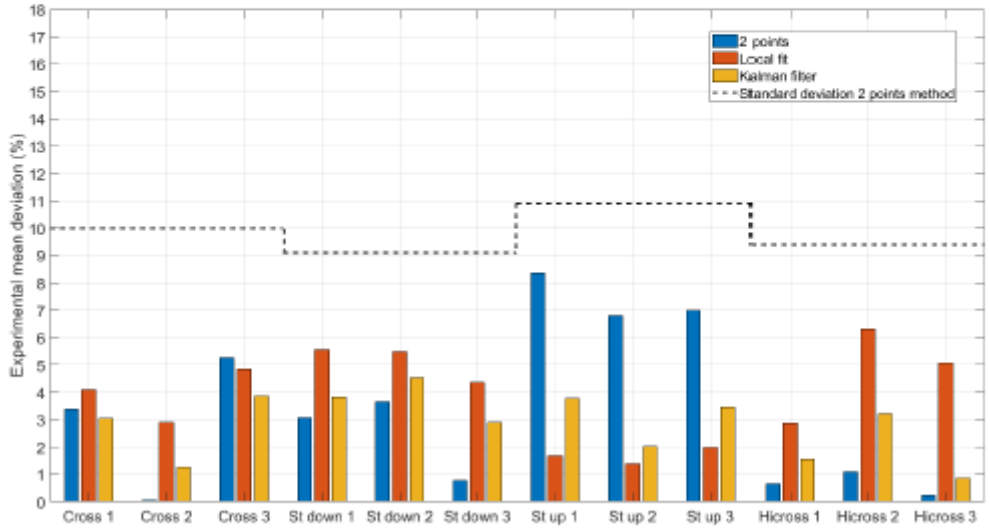


Figure 4 : Evolution of the reference airflow, and airflows calculated by the Extended Kalman filter and the local fit techniques, for the highly variating profile (Vaisala sensors)

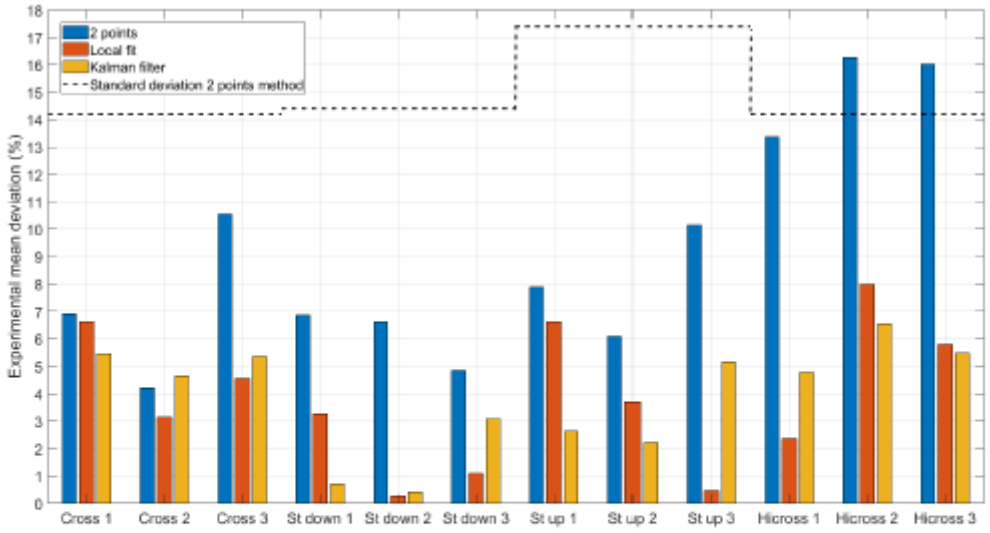
To compare the accuracy of the conventional 2 points method with others, we computed the average of the airflow rate from 5 minutes to the period allowing 2 air renewals for the three methods.

Figure 5 shows histograms of the Experimental mean deviation between methods and the reference value. Dash lines represent the standard deviation of the 2 points method, computed thanks to the error propagation law. The subplot (i) refers to stand-alone sensors (C2AI), and the subplot (ii) refers to wired sensors (Vaisala). For Vaisala sensors, apart from the stack increasing profile (St up), averaged deviations are far below the standard deviation. The Kalman filter and the local fit methods do not allow to significantly improve the accuracy, which is already very good. For the hicross profile, the local fit method leads to deviations from 1.5% (1.5 m^3/h) to 5% (5.1 m^3/h) higher than the 2 points method, whereas the Kalman filter leads to closer deviations (1% (1 m^3/h) to 2% (2 m^3/h) higher). However, the inverse conclusion occurs for the stack increasing profile: dynamic methods are between 4% (2.2 m^3/h) and 6.5% (3.6 m^3/h) more accurate. In general the Kalman filter leads to results between -5% (2.7 m^3/h) to +2% (1.1 m^3/h) against the 2 points method, while the local fit leads to results between -6% (3.3 m^3/h) to +5% (2.7 m^3/h). Also, the standard deviation between experimental deviations among each profile is lower for dynamic methods than for the 2 points method (2.5% against 3%), and so is the maximum mean deviation (6.3% (3.5 m^3/h) and 4.5% (2.5 m^3/h) against 8.5% (4.7 m^3/h)). Dynamic methods are more stable, with a slight advantage for the Kalman filter.

For C2AI sensors, a better accuracy of both dynamic methods is experienced for every experiment. The improvement of accuracy is significant for several experiment (3rd cross, 2nd down, 3rd up, every hicross experiments). Maximum mean deviations among profiles is about 6.5% (6.7 m^3/h) for the Kalman filter, 8% (8 m^3/h) for the local fit, and 16.3% (16.3 m^3/h) for the 2 points method. Standard deviations between experimental mean deviations among each profile is about 2.7% for the Kalman filter, 3.9% for the local fit method, and 4.2 % for the 2 points method. Once again, the Kalman filter leads to the lowest maximum deviation among each profile (6.5%), which occurred for the most critical highly variating profile, which varied around 5 Vol/h about +/- 20%.



(i)



(ii)

Figure 5 : Histograms of the experimental mean deviation for the three analysis techniques (i) Vaisala sensors, (ii) C2AI sensors

4 DISCUSSION

For wired sensors, the accuracy was not significantly improved compared to the conventional 2 points method, even if highest deviations between methods are in favour of dynamic methods. However, dynamic methods lead to more stable results among airflow profiles, as the standard deviation between each experiment are below than the one of the 2 points method.

Stand-alone sensors are more convenient for in-situ applications, but are often less accurate than wired sensors. This is an issue for the assessment of natural ventilation, because the 2 points decay method should be employed, whereas it is subject to significant measurement errors. The proposed dynamic methods allowed to significantly improve the accuracy, while allowing to track the evolution of the ACH. This is two significant assets to increase the reliability of tracer decay method in natural conditions. Leading to the same order of magnitude of the experimental error between the wired and stand-alone sensors, dynamic methods are less sensitive to measurement noise than the conventional 2 points method. Moreover, they seem not affected by the variation of airflows, contrary to the 2 points method. It remains some room for improvement as the process noise covariance matrix of the Kalman filter could be better characterized, and also the time laps of the moving local fit could be better chosen.

Among dynamic methods, the Kalman filter leads to slightly better results than the local fit. Moreover, no stationary airflows is assumed, whether the local fit assumes the airflow stationary during the time laps of the regression (two minutes here). The Kalman filter is theoretically speaking more adapted to natural ventilation's assessment.

5 CONCLUSION

Dynamic analysis methods of the well-known decay methods were tested under mechanical variable airflows, namely the Kalman filter, and the moving local least squares regression methods. Results are very encouraging as dynamic analysis methods allowed to significantly improve the accuracy, especially for stand-alone sensors, that are likely to be less accurate. They also allow to track the dynamic ACH, which is noteworthy for the tracer decay method.

These proposed analyses take advantage of the ease of implementation of the tracer decay method, while ensuring a relatively good accuracy if airflows are likely to fluctuate. The Kalman filter performed slightly better than the local fit, with deviations which are quasi-exclusively below 5%, with a maximum of 6.5% for stand-alone sensors with the hicross variation airflow profile.

6 ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the French ministry of ecology that funded this project. We would also like to thank Dr. James Lo, who provided experimental data necessary to create airflow variation profiles, consistent with cross ventilation.

7 REFERENCES

AFNOR. 2017. 'Performance thermique des bâtiments et des matériaux - Détermination du débit d'air spécifique dans les bâtiments - Méthode de dilution de gaz traceurs'. AFNOR.

Duarte, Rogério, Maria Glória Gomes, and António Moret Rodrigues. 2018. 'Estimating Ventilation Rates in a Window-Aired Room Using Kalman Filtering and Considering Uncertain Measurements of Occupancy and CO2 Concentration'. *Building and Environment* 143 (October): 691–700. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.016.

Laussmann, Detlef, and Dieter Helm. 2011. 'Air Change Measurements Using Tracer Gases: Methods and Results. Significance of Air Change for Indoor Air Quality'. In *Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality*. InTech.

Lo, L. James, and Atila Novoselac. 2012. 'Cross Ventilation with Small Openings: Measurements in a Multi-Zone Test Building'. *Building and Environment* 57 (November): 377–86. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.009.

Remion, Gabriel, Bassam Moujalled, and Mohamed El Mankibi. 2019. 'Review of Tracer Gas-Based Methods for the Characterization of Natural Ventilation Performance: Comparative Analysis of Their Accuracy'. *Building and Environment* 160.

Roulet, Claude-Alain, and Luk Vandaele. 1991. 'Air Flow Patterns within Buildings Measurement Techniques'. AIVC Technical Note 34. AIVC. https://www.aivc.org/resource/tn-34-air-flow-patterns-within-buildings-measurement-techniques.

Sherman, Max. 1990. 'Tracer-Gas Technique For Measuring Ventilation in a Single Zone'. *Building and Environment* 25 (4): 365–74.

Annexe 4.2 : Développement du gain de Kalman

Le développement du gain de Kalman est tiré de l'article de Duarte et al. [49]. On définit tout d'abord deux matrices de covariance associées aux résidus de mesure, et à l'erreur de l'estimation du paramètre d'état durant la phase de prédiction, respectivement appelées S_k et $P_{k/k-1}$:

$$S_k = E\left(\boldsymbol{\varepsilon_k}.\boldsymbol{\varepsilon_k^T}\right) = HP_{k/k-1}H^T + V_k \quad (1)$$

$$P_{k/k-1} = E\left(\widetilde{\boldsymbol{x}}_{k/k-1}.\widetilde{\boldsymbol{x}}_{k/k-1}{}^{\boldsymbol{T}}\right) \quad (2)$$

Avec $\widetilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k/k-1}}$ qui est donc l'erreur associée à l'estimation durant la phase de prédiction :

$$\widetilde{\boldsymbol{x}}_{k/k-1} = \boldsymbol{x_k} - \widehat{\boldsymbol{x}}_{k/k-1} \quad (3)$$

Le gain de Kalman est décrit par la formule suivante :

$$K_k = P_{k/k-1}H^T S_k^{-1} \quad (4)$$

On va chercher ensuite à exprimer la matrice de covariance de l'erreur de prédiction $P_{k/k-1}$. Pour ce faire, l'erreur de l'estimation durant la phase de prédiction doit être approchée. Comme le problème n'est pas linéaire, le filtre de Kalman étendue utilise l'approximation linéaire de Taylor sur $\boldsymbol{x_k}$ à partir du dernier état corrigé $\widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}}$, qui consiste en un développement limité d'ordre 1. On s'intéresse donc au gradient de la fonction de transition G en $\widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}}$:

$$D_{k-1} = \frac{dG}{dx(\widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}})} \quad (5)$$

L'approximation de Taylor se formule comme suit en $\boldsymbol{x_{k-1}} = \widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}} + \widetilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}}$:

$$\boldsymbol{x}_k = G(\widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}} + \widetilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}}) + \boldsymbol{w_{k-1}} \cong F_k\,\widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}} + D_{\boldsymbol{k-1}}\,\widetilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}} + \boldsymbol{w_{k-1}} \quad (6)$$

En injectant l'équation 6 dans l'équation 3, puis en utilisant l'équation 4.18 ($\widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k/k-1}} = F_k\,\widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}}$), on obtient l'expression de l'erreur de prédiction :

$$\widetilde{\boldsymbol{x}}_{k/k-1} = D_{k-1}\,\widetilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}} + \boldsymbol{w_{k-1}} \quad (7)$$

On obtient donc la covariance de l'erreur de prédiction à partir de l'équation 2 considérée avec l'expression de $\widetilde{\boldsymbol{x}}_{\mathrm{k\backslash k-1}}$ développée en équation 7:

$$P_{k/k-1} = D_{k-1}P_{k-1}D_{k-1}^T + W_{k-1} \quad (8)$$

On reconnait dans cette expression $P_{k-1} = E(\widetilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}}.\widetilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}}{}^{T})$ qui est la covariance de l'erreur de l'estimation pendant la phase de correction, que l'on appellera covariance de l'erreur de la correction. Il nous reste donc à connaître P_{k-1}, et le gain de Kalman sera complétement caractérisé.

En combinant l'équation 4.19 ($\widehat{\boldsymbol{z}}_{\boldsymbol{k/k-1}} = H\,\widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k-1}}$), l'équation 4.21 ($\widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k}} = \widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k/k-1}} + K_k\,\boldsymbol{\varepsilon_k}$), puis l'équation 8, on obtient finalement l'expression de P_k :

$$P_k = (I - K_kH)P_{k/k-1}(I - K_kH)^T + K_kV_kK_k^T \quad (9)$$

Il a été démontré ici comment le gain de Kalman peut corriger la prédiction du paramètre d'état. Si l'on a une initialisation $\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{0}}$ et P_0, alors il est possible de calculer le gain de Kalman pour la première prédiction, avec $P_{1/0}$ depuis l'équation 8. On obtient donc $\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{1}}$, correction de la première prédiction grâce à l'équation 4.21 ($\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k}} = \hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k/k-1}} + K_k\, \boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{k}}$). Ensuite, à l'aide de $P_{1/0}$, on calcule P_1 avec l'équation 9, et par itération on peut remonter toute la série temporelle. On remarque que les covariances *V* et *W* relatives aux bruits de mesure et de processus apparaissent bien dans l'expression du filtre de Kalman. On remarque également que le filtre est récursif, ce qui signifie qu'il a besoin uniquement des informations sur les derniers points de mesure pour fonctionner.

Annexe 4.3 : Documentation technique, sonde GMP252

Caractéristiques techniques

Performances

Plage de mesure	0… 10 000 ppm de CO_2
avec une précision moindre	0… 30 000 ppm de CO_2
Précision (dont répétabilité et non-linéarité)	
à 25 °C et 1013 hPa	
0… 3000 ppm de CO_2	± 40 ppm de CO_2
3 000 … 10 000 ppm de CO_2	± 2 % de la valeur
Jusqu'à 30 000 ppm de CO_2	± 3,5 % de la valeur
Incertitude d'étalonnage	
à 2 000 ppm de CO_2	± 18 ppm de CO_2
à 10 000 ppm de CO_2	± 66 ppm de CO_2
Stabilité à long terme	
0… 3 000 ppm de CO_2	± 60 ppm de CO_2/an
3 000 … 6 000 ppm de CO_2	± 150 ppm de CO_2/an
6 000 … 10 000 ppm de CO_2	± 300 ppm de CO_2/an
Température 0 … 10 000 ppm de CO_2	
avec compensation, +10 … +50 °C	< ± 0,05 % de la valeur par °C
avec compensation, -40 … +60 °C	< ± 0,1 % de la valeur par °C
Dépendance à la pression avec compensation	
à 0… 10 000 ppm de CO_2,	
500 … 1 100 hPa	± 0,015 % de la valeur indiquée/ hPa
Temps de démarrage à 25 °C	< 12 sec.
Temps de mise en service	
(pour spécifications complètes)	< 2 min
Temps de réponse (T90) avec filtre standard	< 1 min

Environnement de fonctionnement

Température de fonctionnement	-40 … +60 °C
Température de stockage	-40 … +70°C
Pression (compensée)	500 … 1 100 hPa
de fonctionnement	< 1,5 bar
Humidité	0 … 100 % HR, sans condensation
Anti-condensation	
la tête du capteur chauffe lorsque l'instrument est allumé	
Tolérance aux produits chimiques	
(exposition temporaire lors du nettoyage)	
	H_2O_2 (2 000 ppm) sans condensation ; agents nettoyants à base d'alcool (par exemple éthanol et isopropanol) ; acétone ; acide acétique
Compatibilité électromagnétique	EN61326-1, environnement générique

Entrées et sorties

Tension de fonctionnement	
lors de l'utilisation de la sortie numérique	12 … 30 VCC
lors de l'utilisation de la sortie tension	12 … 30 VCC
lors de l'utilisation de la sortie courant	20 … 30 VCC
Sortie numérique	RS485 (protocoles Vaisala, Modbus)
Sorties analogiques	0 … 5/10 V (évolutif), charge min. 10 kΩ
	0/4 … 20 mA (évolutif), charge max. 500 Ω
Consommation d'énergie	0,4 W en fonctionnement continu

Composants mécaniques

Matériau du boîtier de la sonde	Plastique PBT
Matériau du filtre	PTFE
Connecteur	Laiton nickelé, M12 à 5 broches
Classification du boîtier	IP65
Poids	
sonde	58 g

Pièces détachées et accessoires

Filtre en PTFE fritté poreux	DRW244221SP
Câble de sonde doté de fils nus (1,5 m)	223263SP
Câble de sonde doté de fils nus et d'une prise 90° (0,6 m)	244669SP
Câble de sonde doté de fils nus (10 m)	216546SP
Accessoire de fixation de la sonde (2 pièces)	243257SP
Bride de montage de la sonde	243261SP
Câble USB pour raccordement à un PC	242659
Câble de connexion MI70 pour sonde	CBL210472
Câble plat	CBL210493SP
Adaptateur d'étalonnage	DRW244827SP

Dimensions

Dimensions en mm



VAISALA

www.vaisala.com

Merci de nous contacter à l'adresse www.vaisala.com/requestinfo

Pour plus d'informations scanner le code

Ref. B211567FR-A ©Vaisala 2016
Le présent matériel est soumis à la protection du copyright, tous les droits étant conservés par Vaisala et chacun de ses partenaires. Tous droits réservés. Tous les logos et/ou noms de produits constituent des marques de Vaisala ou de ses partenaires. Il est strictement interdit de reproduire, transférer, distribuer ou stocker les informations contenues dans la présente brochure, sous quelque forme que ce soit, sans le consentement écrit préalable de Vaisala. Toutes les spécifications – y compris techniques – sont susceptibles d'être modifiées sans préavis. Cette version est une traduction de l'original en anglais. En cas d'ambiguïté, c'est la version anglaise de ce document qui prévaudra.

CE

Annexe 4.4 : Conditions expérimentales

Le Tableau 0-1 synthétise les conditions expérimentales pour la totalité des tests. Les températures extérieures étaient comprises entre 19 et 33°C. Cela a conduit à des différences de températures entre l'extérieur et la salle A de maximum de 7°C. La concentration de CO_2 extérieure a, elle, varié entre 353 ppm, et 508 ppm.

	DFN1	**DFN2**	**DFN3**	**FFN1**	**FFN2**	**FFN3**	**CFN1**	**CFN2**	**CFN3**
T_{ext} [°C]	21	21	20	19	19	19	30	27	25
T_A [°C]	27	27	27	26	26	26	31	30	30
T_B [°C]	26	25	25	25	24	24	31	30	28
CO_2 ext [ppm]	402	412	419	442	456	439	362	385	412
CO_2 lab [ppm]	611	587	592	602	618	610	600	623	612
	DFO1	**DFO2**	**DFO3**	**DF2O 1**	**DF2O 2**	**DF2O 3**	**DOO1**	**DOO2**	**DOO3**
T_{ext} [°C]	20	19	24	32	31	30	24	27	29
T_A [°C]	26	26	26	31	32	32	26	28	29
T_B [°C]	25	25	26	32	33	33	27	29	30
CO_2 ext [ppm]	406	403	390	351	358	361	379	373	370
CO_2 lab [ppm]	662	703	631	604	588	615	649	619	617
	DON1	**DON2**	**DON3**	**DFNB 1**	**DFNB 2**	**DFNB 3**	**DFNH 1**	**DFNH 2**	**DFNH 3**
T_{ext} [°C]	33	30	31	30	27	25	23	21	24
T_A [°C]	33	30	31	30	30	29	29	28	29
T_B [°C]	32	30	31	31	30	28	27	26	27
CO_2 ext [ppm]	408	353	355	361	380	416	465	508	488
CO_2lab [ppm]	630	656	629	605	587	575	620	656	665

Tableau 0-1 : Conditions expérimentales

Annexe 4.5 : Moyenne et écart-type de l'erreur des 30 tests de répétabilité

Le Tableau 0-2 présente les statistiques du test de répétabilité, qui ont servi à calculer l'incertitude globale.

Tableau 0-2 : Statistiques du test de répétabilité

Statistique [%]	**Moyenne de l'erreur σ_{Nmean}**						**Ecart-type σ_{Nstd}**					
Capteur	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Tous**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Tous**
Kalman	2,5	5,8	4,1	3,0	7,6	5,2	6,1	5,8	6,6	7,0	8,3	5,2
2 points lissée	-0,6	2,9	0,2	0,0	4,0	**0,6**	6,4	4,4	7,6	7,8	9,1	4,6
2 points non lissée	-1,6	0,1	-1,0	0,6	3,7	1,5	9,2	6,2	11,7	11,7	13,2	**6,6**

Annexe 4.6 : Erreurs des 3 méthodes avec une calibration majorée de 5%

La Figure 0-4 présente le graphique à barres avec une calibration du capteur 3 majorée de 5%. Les résultats sont identiques au cas sans majoration, ce qui prouve l'indépendance de la méthode vis-à-vis d'un écart de calibration. Cette indépendance est rendue possible par la procédure d'estimation de la concentration de transit.

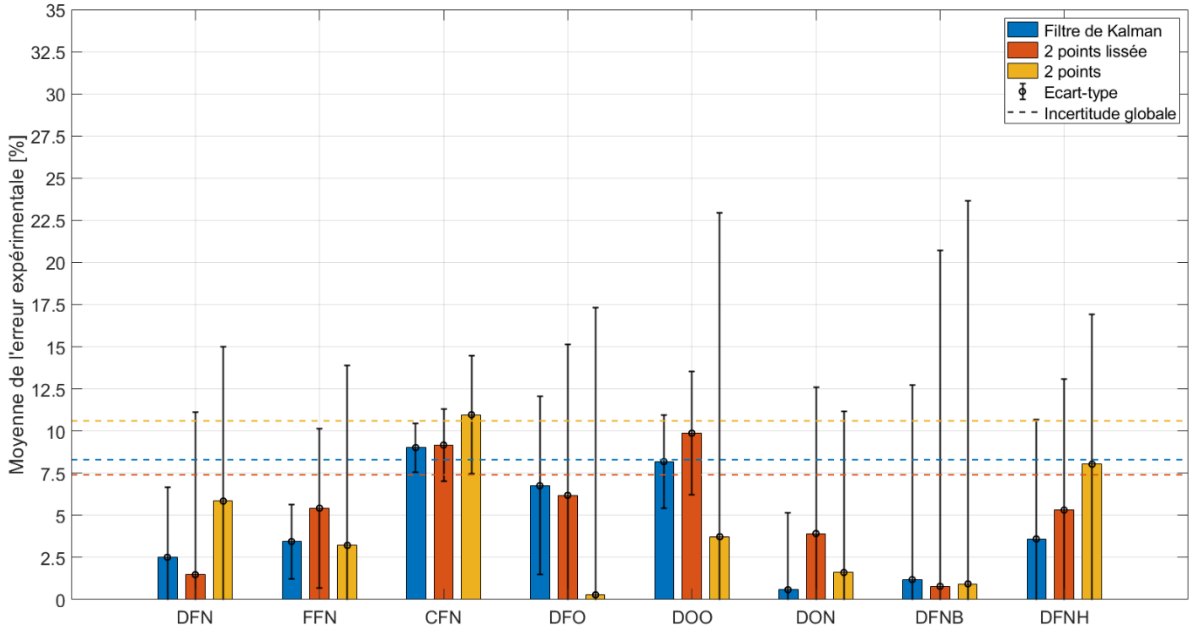


Figure 0-4 : Erreur des 3 méthodes avec une calibration majorée de 5%

Annexe 5.1 : Documentation technique station météorologique

Spécifications techniques

Vitesse du vent	
Capteur utilisé	Ultrasons
Plage de mesure	0…60 m/s
Résolution	0,01 m/s
Précision	± 0,3 m/s o ± 2%, le plus grand (0…35 m/s) ± 3% (> 35 m/s)
Direcion du vent	
Capteur utilisé	Ultrasons
Plage de mesure	0…360°
Résolution	0,1°
Précision	± 2° RMSE de 1.0 m/s
Boussole	
Capteur utilisé	Magnétique
Plage de mesure	0…360°
Risolution	0,1°
Précision	± 1°
Température de l'air *(nécessite option **17**)*	
Capteur utilisé	Pt100
Plage de mesure	-40…+60 °C
Résolution	0,1 °C
Précision	± 0,15°C ± 0,1% de la lecture
Humidité relative (*nécessite option **17***)	
Capteur utilisé	Capacitive
Plage de mesure	0…100%HR
Résolution	0,1%
Précision (@ T = 15…35 °C)	± 1,5%UR (0..90%HR), ± 2%HR (au dehors)
Précision (@ T = -40…+60 °C)	± (1,5 + 1,5% de)%HR
Pression atmospherique (*nécessite option **4***)	
Capteur utilisé	piézorésistive
Plage de mesure	600…1100 hPa
Résolution	0,1 hPa

Figure 0-5 : Caractéristiques techniques de la station météorologique

Annexe 5.2 : Mesures en soufflerie des pressions dynamiques et statiques pour la détermination du coefficient de pression

Les Figure 0-6 et Figure 0-7 montrent la pression de vent (courbes oranges), et la différence de pression statique qui ont servi à calculer les coefficients de pression. Le rapport a été évalué à chaque palier, puis moyenné :

$$C_p = \frac{DP_{statique}}{P_{vent}}$$

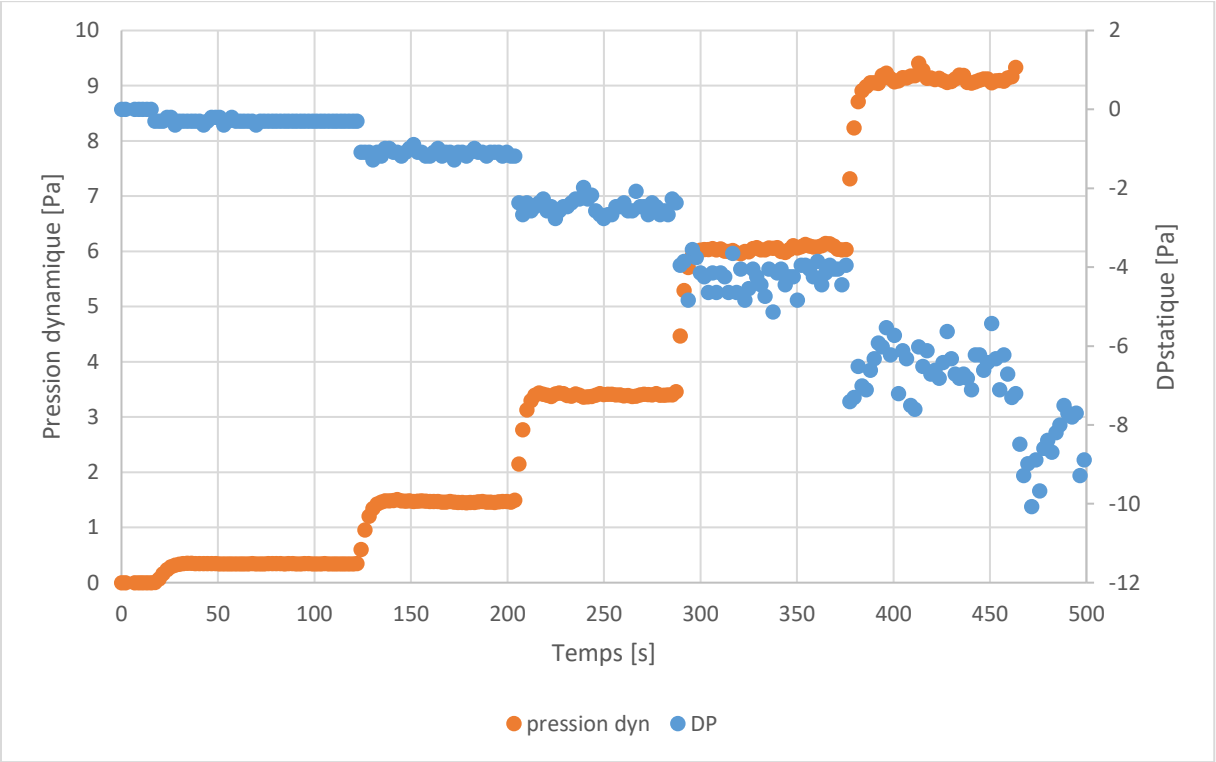


Figure 0-6 : Mesures des pressions dynamiques et statiques dans le soufflerie, cas classique

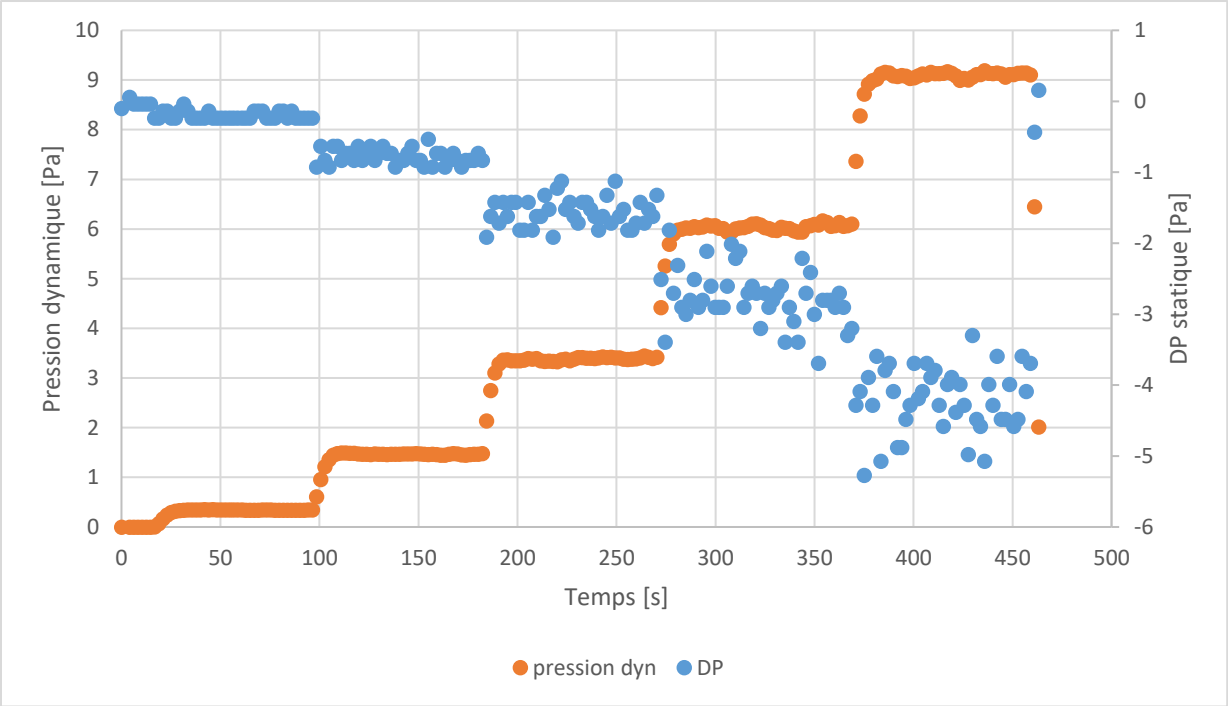


Figure 0-7 : Mesures des perssions dynamique et statiques dans le soufflerie, cas incliné

Annexe 5.3 : Norme 12599, incertitude de mesure du débit dans le conduit par un anémomètre

La norme ISO 12599 définit l'incertitude liée à la mesure du débit par un anémomètre dans un conduit de ventilation. Elle donne les valeurs d'incertitude en fonction du nombre de points de mesure dans la surface de section du conduit. Les valeurs sont reportées dans la Figure 0-8. La norme précise que l'on peut procéder à une interpolation linéaire pour connaître l'incertitude liée à un nombre de points de mesure non mentionné dans le tableau. Nous avons donc interpolé pour connaître l'incertitude liée à un seul point de mesure dans la section du conduit. La droite bleue de la Figure 0-8 se réfère à une estimation de la variation de vitesse d'air sur un radius à 20%, la droite orange se réfère à une estimation de la variation de vitesse sur un radius de 10%. Pour 1 points de mesure, on obtient respectivement 15,2 et 23,1% d'erreur.

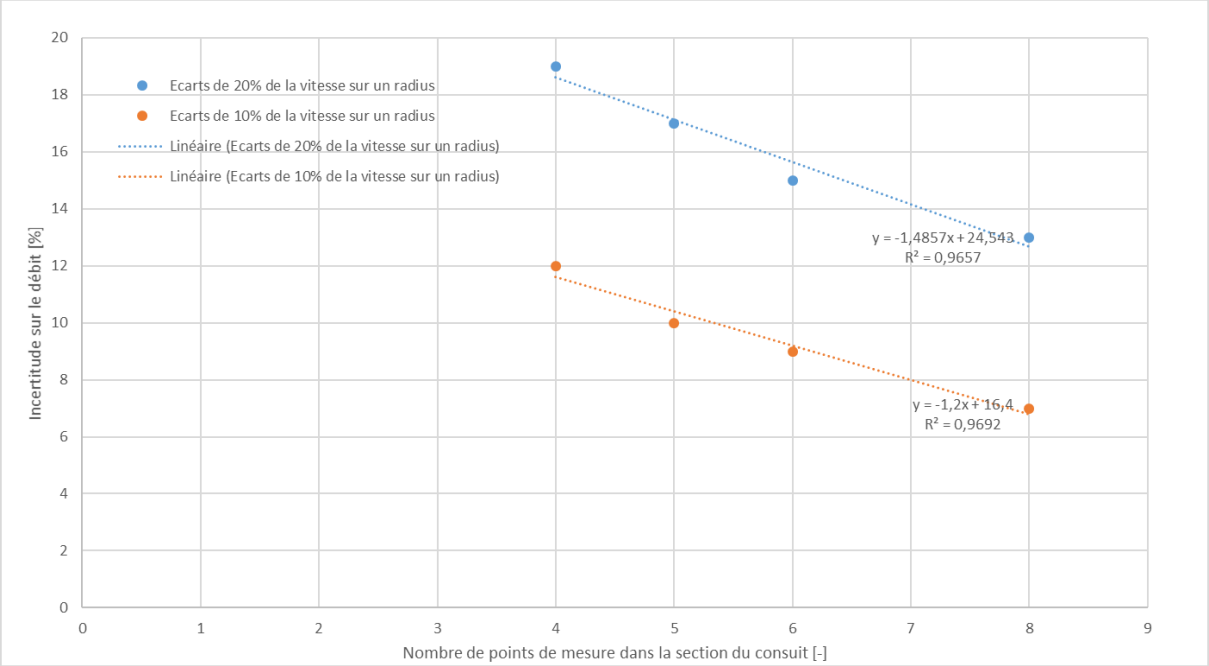


Figure 0-8 : Incertitude du débit mesuré dans le conduit par un anémomètre en fonction du nombre de points de mesure dans la section du conduit, (ISO 12599)

Annexe 5.4 : Recirculation de l'air de la cellule A à la cellule B

On observe sur cette figure que la concentration de transit augmente alors que l'air doit transiter de la cellule B vers la cellule A. Cette recirculation de l'air de la cellule A vers la cellule B observée par l'augmentation de la concentration de transit est accompagnée d'un débit mesuré qui s'annule quasiment au début de l'augmentation de la concentration de transit. On peut en conclure qu'il y a eu une possible inversion de flux avec de l'air pénétrant dans la cellule A par le conduit, et étant évacué par la cellule B.

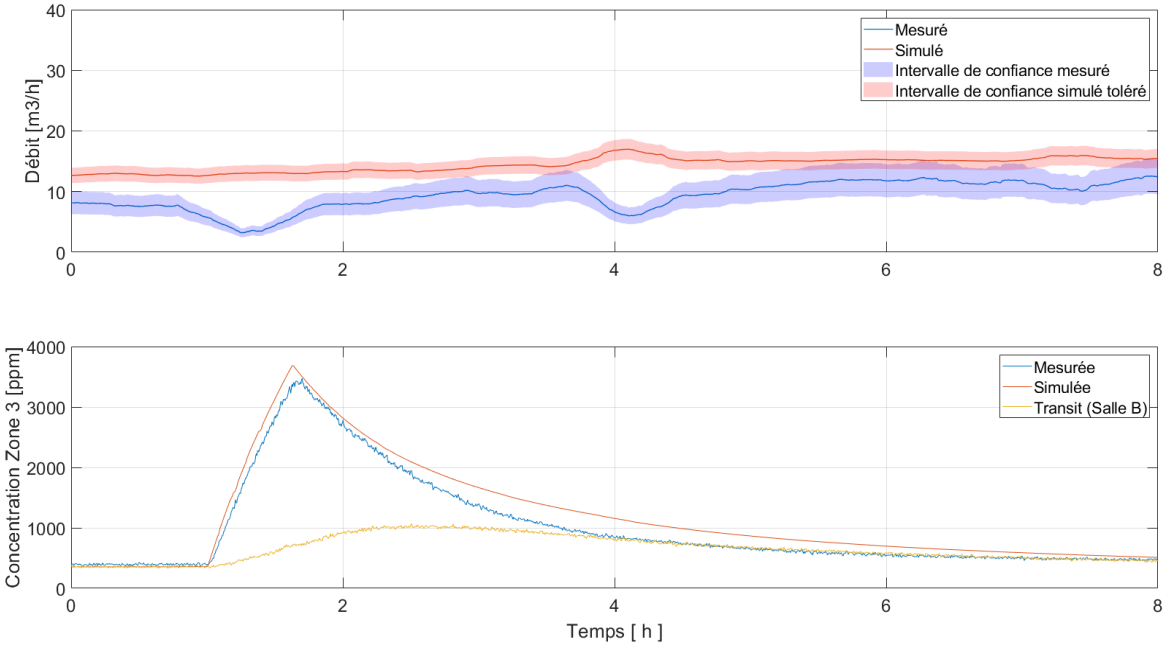


Figure 0-9 : Recirculation de l'air de la cellule A à la cellule B

Annexe 5.5 : Analyse des variances pour le cas classique

Interaction	Effet	Somme des carrés	Ddl	Variance	Fexp	Contribution Somme des carrés [%]
46	1,88	227,33	1	227,33	545,70	16,80
6	1,58	160,25	1	160,25	384,67	11,84
16	1,45	134,24	1	134,24	322,24	9,92
2	-1,26	100,92	1	100,92	242,26	7,46
4	1,20	92,68	1	92,68	222,48	6,85
1	1,16	86,67	1	86,67	208,05	6,41
56	1,09	75,70	1	75,70	181,72	5,60
45	0,90	51,58	1	51,58	123,82	3,81
345	0,85	46,66	1	46,66	112,01	3,45
35	-0,75	36,47	1	36,47	87,54	2,70
34	-0,75	35,58	1	35,58	85,40	2,63
14	0,74	34,76	1	34,76	83,43	2,57
36	-0,73	33,91	1	33,91	81,40	2,51
3	0,65	27,37	1	27,37	65,70	2,02
146	0,63	25,56	1	25,56	61,35	1,89
15	0,61	23,64	1	23,64	56,75	1,75
Residus	0,07	159,55	47	3,39	0,00	11,79
Naturelle	0,00	12,08	29	0,42	0,00	0,89

Tableau 0-3 : Analyse de la variance pour le capteur 2

Interaction	Effet	Somme des carrés	Ddl	Variance	Fexp	Contribution Somme des carrés [%]
6	3,16	639,59	1	639,59	2383,69	28,51
3	2,93	550,76	1	550,76	2052,63	24,55
34	-1,88	226,73	1	226,73	844,99	10,11
46	1,42	129,48	1	129,48	482,56	5,77
2	-1,37	119,40	1	119,40	444,99	5,32
45	1,04	68,64	1	68,64	255,82	3,06
35	-1,00	64,58	1	64,58	240,69	2,88
345	0,90	52,25	1	52,25	194,74	2,33
36	0,87	48,13	1	48,13	179,36	2,15
4	0,78	38,61	1	38,61	143,90	1,72
1	0,71	32,57	1	32,57	121,37	1,45
346	-0,70	31,60	1	31,60	117,76	1,41
56	0,67	28,48	1	28,48	106,15	1,27
15	0,65	26,76	1	26,76	99,74	1,19
16	0,58	21,40	1	21,40	79,75	0,95

13	-0,52	17,10	1	17,10	63,72	0,76
1234	-0,47	14,41	1	14,41	53,71	0,64
123	0,46	13,82	1	13,82	51,52	0,62
Residus	0,04	118,87	45	2,64	0,00	5,30
Naturelle	0,00	7,78	29	0,27	0,00	0,35

Tableau 0-4 : Analyse de la variance pour le capteur 1

Interaction	**Effet**	**Somme des carrés**	**Ddl**	**Variance**	**Fexp**	**Contribution Somme des carrés [%]**
3	3,38	733,25	1	733,25	2242,05	48,74
36	1,91	233,15	1	233,15	712,91	15,50
345	1,15	84,21	1	84,21	257,47	5,60
45	1,04	69,78	1	69,78	213,36	4,64
34	-1,04	69,20	1	69,20	211,60	4,60
6	0,98	60,98	1	60,98	186,46	4,05
35	-0,94	56,68	1	56,68	173,30	3,77
5	-0,89	50,23	1	50,23	153,59	3,34
2	-0,61	24,03	1	24,03	73,49	1,60
#N/A	0,00	122,90	54	2,28	0,00	8,17
#N/A	0,00	9,48	29	0,33	0,00	0,63

Tableau 0-5 : Analyse de la variance pour le capteur 4

Annexe 5.6 : Effets prépondérants par zone pour chaque cas

Les quatre tableaux suivants (du Tableau 0-6 au Tableau 0-9) montrent les effets prépondérants par zones, pour le cas avec dégradation de la précision des capteurs, application de la procédure biaisée de correction du CO_2 de transit, fréquence dégradée, ainsi que pour la méthode 2 points.

Facteur	Zone 3	Zone 4	Zone 2	Zone 1	Effet max
3	2,73	4,13	1,94	4,01	4,13 (+0,8)
6				2,94	2,94 (-0,2)
1		0,87	1,52	1,73	1,73 (+0,6)
4			1,36	1,70	1,70 (+0,4)
36		1,32		1,55	1,55 (-0,4)
46			1,22	0,90	1,22 (+0,5)
14			1,07		1,07 (+0,33)
45		1,02	1,00	0,82	1,02 (=)
345		0,99		0,99	0,99 (-0,15)
146			0,92	0,97	0,97 (Na)
34	-1,12			-0,91	-0,91
23456				-0,92	-0,92
2			-1,15	-1,07	-1,07
346				-1,14	-1,14
35				-1,21	-1,21
Nu	8,70 (+3)	9,39 (+3)	9,36 (+2,25)	10,88 (+3)	10,88 (+3)

Tableau 0-6 : Effets prépondérants pour la dégradation de la précision des capteurs

Facteur	Zone 3	Zone 4	Zone 1	Zone 2	Effet max
4	3,02	3,64	4,55	5,00	5,00 (+3,8)
5	1,34	1,70	2,66	2,99	2,99 (Na)
1	2,08	2,33	2,81	2,68	2,81 (+1,65)
6	-4,31	-3,02	1,47	2,46	2,46 (-0,6)
16				1,28	1,28 (-0,17)
46			1,15	1,28	1,28 (0,6)
15				0,90	0,90 (+0,25)
345			0,88		0,88 (-0,27)
2	-1,34	-1,27	-1,01	-1,24	-1,01
Nu	15,76 (+9,97)	15,90 (+9,45)	18,22 (+10,39)	18,77 (+12,7)	18,77 (+10,94)

Tableau 0-7 : Effets prépondérants pour l'application la procédure biaisée de correction du CO2 de transit

Facteur	Zone 4	Zone 2	Zone 3	Zone 1	Effet max
3	3,23	1,15	3,13	3,75	3,75 (+0,2)
6			-1,44	2,94	2,94 (-0,2)
4	1,94	2,47	1,52	2,21	2,47 (+1,2)
46	0,90	1,55	0,69	1,29	1,55 (+0,3)
1	0,97	1,37	0,80	1,46	1,46 (+0,3)
56		0,91		1,00	1,00 (-0,1)
16		0,91		0,88	0,91 (-0,6)
5		0,90		0,89	0,90 (Na)

146		0,87			0,87
3456			0,82		0,82
15			0,80	0,54	0,80 (+0,15)
36		-1,12		0,66	0,66
236		0,63			0,63
45		0,59			0,59
1235			0,57		0,57
345				0,54	0,54
134			0,54		0,54
1256				0,54	0,54
35			-0,55		-0,55
34	-0,84		-0,61	-0,94	-0,61
23			-0,61	-0,80	-0,61
456			-0,67		-0,67
145				-0,77	-0,77
2	-1,16	-1,39	-1,39	-1,71	-1,16
Nu	8,80 (+1,1)	8,35 (+1,6)	7,97 (+2,2)	10,25 (+2,4)	10,25 (+2,4)

Tableau 0-8 : Effets prépondérants pour le filtre de Kalman avec une fréquence d'acquisition réduite de 66%

Facteur	Zone 3	Zone 1	Zone 2	Zone 4	Effet max
3	16,93	23,16	13,16	21,40	23,16
6		6,58	-3,76	4,93	6,58
36		4,99	-4,34	3,84	4,99
45	2,81	1,81	3,57	1,65	3,57
345	2,85	1,90	3,35	1,33	3,35
46		1,91	0,77	0,92	1,91
3456		1,80			1,80
56		1,57			1,57
14	1,27		1,43	1,43	1,43
356		1,28			1,28
134			0,73	1,06	1,06
256		1,05			1,05
156				1,02	1,02
236		0,99	1,01	0,71	1,01
1346	1,00	0,98			1,00
245		0,93		0,76	0,93
126				0,84	0,84
246		0,82		0,74	0,82
135			0,79		0,79
1		0,78	0,69	0,67	0,78
26	0,73	0,74	0,50	0,72	0,74
1456		0,74			0,74
16				0,69	0,69
15			0,61		0,61

23456				0,61	0,61
25				0,57	0,57
2456			0,50		0,50
23456			-0,57		-0,57
2345		-1,45		-0,64	-0,64
13			-0,65		-0,65
12			-0,66		-0,66
24	-0,68				-0,68
346	-0,74				-0,74
2356		-0,78			-0,78
1236			-0,85	-1,28	-0,85
2346				-0,99	-0,99
136			-1,08		-1,08
5	-3,68	-1,26	-3,19	-1,43	-1,26
23	-1,34		-1,40		-1,34
456		-1,46			-1,46
35	-4,06	-2,24	-3,79	-2,08	-2,08
2	-2,12		-2,31		-2,12
4	-3,21	-2,86	-4,09	-3,13	-2,86
34	-4,36	-5,06	-5,56	-4,82	-4,36
Nu	13,2	17,8	11,7	16,1	17,8

Tableau 0-9 : Effets prépondérants du cas de base pour la méthode deux points

Annexe 5.7 : Equations de l'incertitude résultante de l'analyse de sensibilité

Les Tableau 0-10 et Tableau 0-11 présentent les équations des incertitudes associées à l'arbre de décision.

Cas de figure	Zones	Label	Equation
Précision 5% Sans proc.	**Evacuation**	**Equation 1**	$\sigma_{Kalm'Air} = 5{,}49 + 2{,}41 \cdot \delta_{Occ} + 0{,}61 \cdot \delta_{Occ} \cdot \delta_{mix} + 0{,}75 \cdot \delta_{vent} \cdot \delta_{temp}$
	Toutes zones	**Equation 4**	$\sigma_N = 7{,}83 + 3{,}38 \cdot \delta_{Occ} + 3{,}16 \cdot \delta_{mix} + 1{,}91 \cdot \delta_{Occ} \cdot \delta_{mix} + 1{,}88 \cdot \delta_{vent} \cdot \delta_{mix} + 1.45 \cdot \delta_{inf} \cdot \delta_{mix} + 1{,}2 \cdot \delta_{vent} + 1{,}16 \cdot \delta_{inf} + 1{,}15 \cdot \delta_{Occ} \cdot \delta_{vent} \cdot \delta_{temp} + 1{,}09 \cdot \delta_{temp} \cdot \delta_{mix} + 1{,}04 \cdot \delta_{vent} \cdot \delta_{temp} + 0.74 \cdot \delta_{inf} \cdot \delta_{vent} + 0{,}65 \cdot \delta_{inf} \cdot \delta_{temp} + 0.63 \cdot \delta_{inf} \cdot \delta_{vent} \cdot \delta_{occ} + 0{,}46 \cdot \delta_{Occ} \cdot \delta_{inf} \cdot \delta_{repart.}$
Précision 10% Sans proc.	**Evacuation**	**Equation 2**	$\sigma_{Kalm'Air} = 8{,}7 + 2{,}73 \cdot \delta_{Occ}$
	Toutes zones	**Equation 5**	$\sigma_{Kalm'Air} = 10{,}88 + 4{,}13 \cdot \delta_{Occ} + 1{,}55 \cdot \delta_{Occ} \cdot \delta_{mix} + 1{,}22 \cdot \delta_{vent} \cdot \delta_{mix} + 1{,}7 \cdot \delta_{vent} + 1{,}73 \cdot \delta_{inf} + 0{,}99 \cdot \delta_{Occ} \cdot \delta_{vent} \cdot \delta_{temp} + 1{,}07 \cdot \delta_{inf} \cdot \delta_{vent} + 1{,}02 \cdot \delta_{vent} \cdot \delta_{temp} + 0{,}97 \cdot \delta_{inf} \cdot \delta_{vent} \cdot \delta_{mix}$
Précision 5% Avec proc.	**Evacuation**	**Equation 3**	$\sigma_{Kalm'Air} = 15{,}76 + 3.02 \cdot \delta_{vent} + 2.08 \cdot \delta_{inf} + 1.34 \cdot \delta_{temp}$
	Toutes zones	**Equation 6**	$\sigma_{Kalm'Air} = 18.77 + 5{,}0 \cdot \delta_{vent} + 2{,}99 \cdot \delta_{temp} + 2{,}81 \cdot \delta_{inf} + 2{,}46 \cdot \delta_{mix} + 1{,}28 \cdot \delta_{inf} \cdot \delta_{mix} + 1{,}28 \cdot \delta_{vent} \cdot \delta_{mix} + 0{,}9 \cdot \delta_{inf} \cdot \delta_{temp} + 0{,}88 \cdot \delta_{Occ} \cdot \delta_{vent} \cdot \delta_{temp}$

Tableau 0-10: Formulation des incertitudes

Nbr de points de mesure	npts > 55 pts	55 > npts > 40	40 > npts >25	25 > npts > 20
Incertitude supplémentaire	+0%	+2%	+5%	+7%

Tableau 0-11 : Incertitude liée aux points de mesure sur 2 constante de temps

Annexe 6.1 : Protocole d'utilisation de l'outil Kalm'Air

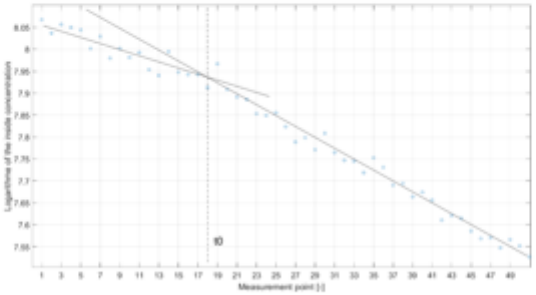
Protocole d'utilisation de l'outil Kalm'Air 2/2

Mesure des performances aérauliques d'un logement

Installer l'application Kalm'Air, Avoir les données de concentration

- Charger les concentrations en appuyant sur « load concentrations »
  Sous format excel. La première colonne est la concentration de transit, la colonne d'après est la concentration intérieure utilisée pour le calcul du taux de ventilation, les colonnes d'après sont les autres concentrations éventuelles

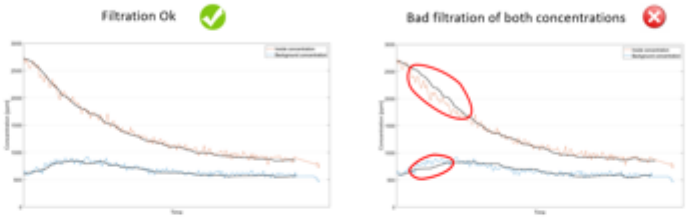
- Identifier le temps initial t0 à partir du graphique qui s'est affiché
  Identifier le point d'inflexion qui représente le point t0.



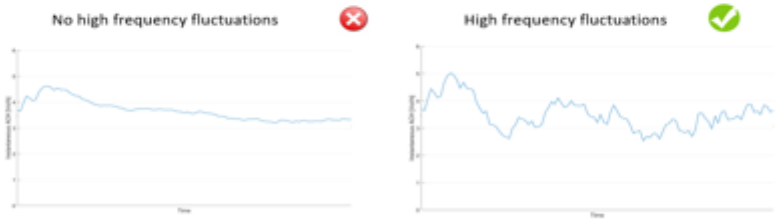
- Renseigner la fréquence d'acquisition ainsi que les paramètres de la boîte « uncertainty estimation »

- Lancer le programme en appuyant sur « Launch & Refresh »

- Répondre à la question posée, à savoir si les concentrations sont bien filtrées. Si elles ne le sont pas, appuyer de nouveau sur « Launch & Refresh », et répondre à nouveau à la question



- Répondre à la question posée, à savoir le taux de ventilation calculé comporte des fluctuations hautes fréquences. Sinon, appuyer de nouveau sur « Launch & Refresh et répondre à nouveau à la question



- L'analyse est terminée

Figure 0-10 : Protocole d'utilisation de l'outil Kalm'Air