

Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-851



Étude en soufflerie de l'effet des bâtiments adjacents sur la dispersion en champ proche des émissions polluantes de cheminées de toit

*Ted Stathopoulos
Bodhisatta Hajra
Mauricio Chavez
Ali Bahloul*



Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST. Abonnement : www.csst.qc.ca/AbonnementPAT

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2014
ISBN : 978-2-89631-771-4 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
octobre 2014

Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-851

Étude en soufflerie de l'effet des bâtiments adjacents sur la dispersion en champ proche des émissions polluantes de cheminées de toit

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Ted Stathopoulos, Bodhisatta Hajra, Mauricio Chavez
Département de génie du bâtiment et des génies civil et de l'environnement,
Université Concordia

Ali Bahloul
Prévention des risques chimiques et biologiques, IRSST



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.
Cette publication a été traduite; seule la version originale (R-848) fait foi.

ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a bénéficié de l'appui de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) du Québec. Nous tenons sincèrement à remercier l'IRSST de sa coopération, de son soutien et son encouragement, qui ont positivement contribué à la réussite de la recherche.

RÉSUMÉ

La dispersion des polluants des émissions de cheminées de toit dans la couche limite est fortement influencée par la présence de bâtiments avoisinants et la topographie locale. Il est donc très difficile d'évaluer précisément les concentrations dans le panache sur différentes surfaces de bâtiments. Les polluants émis par une cheminée de toit peuvent présenter des risques pour la santé des occupants des bâtiments s'ils s'y réintroduisent ou s'ils pénètrent dans un bâtiment voisin par des ouvertures se trouvant sur différentes surfaces. La plupart des études réalisées par le passé ont porté sur les émissions de cheminées de toit de bâtiments isolés, tels qu'on en trouve rarement en milieu urbain. La majorité des modèles de dispersion restent incapables de fournir des estimations de dilution raisonnables sur les surfaces de bâtiments, et ils ne tiennent pas compte des effets liés à la présence de bâtiments adjacents. Par conséquent, il s'avère nécessaire de développer un nouveau modèle ou d'en modifier un existant pour prendre en compte les effets de la dispersion des effluents et pour évaluer précisément l'impact des bâtiments qui se trouvent dans le voisinage immédiat de la source de polluants. Afin d'aborder cette question, un programme de recherche axé sur la modélisation numérique et expérimentale a été mis sur pied entre l'Université Concordia et l'IRSST. Ce rapport présente les résultats expérimentaux, alors que les résultats numériques sont publiés dans un rapport complémentaire¹ (Bahloul *et al.*, 2014).

La modélisation expérimentale a été effectuée au moyen d'études avec gaz traceur pour différentes configurations de bâtiments adjacents dans la soufflerie à couche limite de l'Université Concordia. Ces configurations intégraient des bâtiments de géométrie différente en amont (ou en aval) du bâtiment émetteur (source). Une configuration comprenant un bâtiment placé en amont et un autre placé en aval de la source a également été étudiée. Différents paramètres ont été modulés, à savoir les dimensions des bâtiments, l'espacement entre les bâtiments, la hauteur et l'emplacement de la cheminée, les paramètres d'émission et l'azimut du vecteur vent. Les résultats obtenus ont ensuite été comparés aux modèles de type gaussien de l'ASHRAE (2007 et 2011).

Les données de soufflerie indiquent que les dilutions sont moindres sur le toit d'un bâtiment émetteur se trouvant à une distance inférieure à la longueur de la zone de recirculation d'un bâtiment plus élevé en amont. Par ailleurs, la présence de bâtiments plus élevés en aval empêche le panache de se disperser, ce qui a pour effet d'accroître les concentrations dans le panache sur le toit et sur le mur sous le vent du bâtiment émetteur. L'espacement entre les bâtiments et la vitesse d'évacuation se sont généralement révélés être des paramètres influant de façon marquée sur les caractéristiques du panache. Des lignes directrices sur l'implantation sécuritaire de cheminées et de prises d'air sur différentes surfaces de bâtiments sont également présentées sur la base des données expérimentales. Les prévisions d'ASHRAE 2007 sont trop prudentes, tandis que celles d'ASHRAE 2011 concordent bien avec les données de soufflerie dans le cas d'un bâtiment isolé et de facteurs d'impulsion (M) inférieurs à 3. Des rectifications ont été apportées au modèle d'ASHRAE 2007 pour obtenir des estimations de dilution raisonnables dans le cas d'un bâtiment isolé, outre la prise en compte des effets liés à la présence de bâtiments adjacents. Le modèle rectifié de l'ASHRAE (2007) s'est révélé fiable dans la plupart des cas comparativement aux résultats de la présente étude et d'études antérieures.

¹ <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-852.pdf>

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
RÉSUMÉ.....	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	VIII
LISTE DES FIGURES.....	IX
NOMENCLATURE.....	XI
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS.....	XIV
1. INTRODUCTION.....	1
1.1. Contexte	1
1.2. Objectifs de l'étude	2
2. REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
2.1. Généralités.....	3
2.2. Écoulement de l'air et des polluants autour des bâtiments.....	3
2.3. Études expérimentales sur la dispersion du panache en champ proche.....	4
2.4. Application de modèles de CFD	5
2.5. Application de modèles de type gaussien	6
2.5.1. Le SMDA.....	6
2.5.2. Les modèles de l'ASHRAE	6
2.6. Résumé.....	7
3. MÉTHODES.....	9
3.1. Généralités.....	9
3.2. Montage expérimental en soufflerie	9

3.3.	Considérations d'échelle.....	10
3.4.	Analyse qualitative.....	12
3.4.1.	Détermination des paramètres clés qui régissent le comportement du panache.....	12
3.4.2.	Étude paramétrique de la dispersion des émissions à partir d'essais en soufflerie...	14
4.	RÉSULTATS ET ANALYSE	17
4.1.	Généralités.....	17
4.2.	Configurations de bâtiments en amont.....	17
4.2.1.	Effet d'un bâtiment plus élevé en amont	17
4.3.	Configurations de bâtiments en aval.....	20
4.4.	Bâtiments en amont et en aval du bâtiment émetteur	21
4.5.	Résumé.....	22
5.	UTILISATION DES RÉSULTATS DE RECHERCHE POUR AMÉLIORER LE MODÈLE DE L'ASHRAE.....	25
5.1.	Introduction.....	25
5.2.	Comparaison des estimations de l'ASHRAE et des données de soufflerie.....	25
5.3.	Regroupement de différentes configurations de bâtiments	26
5.4.	Comparaison des configurations de bâtiments adjacents avec le cas du bâtiment isolé	27
5.4.1.	Dilution sur le toit du bâtiment émetteur	27
5.4.2.	Dilution sur le toit du bâtiment en aval.....	29
5.4.3.	Dilution au mur d'un bâtiment adjacent	29
5.5.	Rectification du modèle de l'ASHRAE (2007)	32
5.6.	Application du modèle rectifié de l'ASHRAE (2007) à la présente étude	34
5.7.	Résumé.....	36
6.	LIGNES DIRECTRICES SUR L'IMPLANTATION SÉCURITAIRE DE CHEMINÉES ET DE PRISES D'AIR SUR DIFFÉRENTES SURFACES DE BÂTIMENTS	37
6.1.	Généralités.....	37
6.2.	Lignes directrices sur l'implantation de cheminées et de prises d'air	37
6.2.1.	Configurations de bâtiments en amont	37

6.2.2. Configurations de bâtiments en aval..... 38
6.2.3. Bâtiments en amont et en aval du bâtiment émetteur 38

7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS POUR DE FUTURES RECHERCHES 41

7.1. Résumé 41

7.2. Conclusions..... 41

7.2.1. Étude en soufflerie 41
7.2.2. Dispositions de l'ASHRAE 42
7.2.3. Approche axée sur la rectification d'ASHRAE 2007 42
7.2.4. Considérations en matière de santé et sécurité au travail 43

7.3. Recommandations pour de futures recherches 43

RÉFÉRENCES..... 45

ANNEXE A..... 49

ANNEXE B..... 54

ANNEXE C..... 55

ANNEXE D..... 57

ANNEXE E..... 59

ANNEXE F 62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 – Caractéristiques de la couche limite	10
Tableau 3.2 – Les variables qui interviennent dans l'étude et leurs valeurs respectives	13
Tableau 3.3 – Dimensions des maquettes de bâtiments utilisées pour les expériences en soufflerie.....	14
Tableau 3.4 – Configurations testées en soufflerie (18 configurations au total).....	15
Tableau 5.1 – Dilution au niveau du toit sur une surface de bâtiment en fonction du bâtiment émetteur.....	31
Tableau 5.2 – Dilution au mur sur une surface de bâtiment en fonction du bâtiment émetteur.....	32
Tableau 5.3 – Facteurs utilisés pour rectifier ASHRAE 2007 dans le cas d'un bâtiment isolé	34

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 – Profils de vitesse éolienne normalisée et d'intensité de la turbulence mesurés dans la soufflerie à couche limite de l'Université Concordia.....	9
Figure 3.2 – Bâtiment élevé placé en aval d'un bâtiment émetteur de faible hauteur ($\theta = 0^\circ$).....	12
Figure 3.3 – Représentation schématique des différentes configurations testées en soufflerie	16
Figure 4.1 – Dilution normalisée sur le toit du bâtiment de faible hauteur : a) $M = 1$; b) $M = 3$..	18
Figure 4.2 – Dilution normalisée au mur sous le vent du bâtiment en amont : a) $M = 1$; b) $M = 3$	19
Figure 4.3 – Dilution normalisée sur le toit du bâtiment de faible hauteur : a) $M = 1$; b) $M = 3$..	21
Figure 4.4 – Dilution normalisée sur le toit du bâtiment de faible hauteur : a) $M = 1$; b) $M = 3$	22
Figure 5.1 – Dilution normalisée sur le toit du bâtiment isolé pour $h_s = 1$ m et $M = 3$	25
Figure 5.2 – Ensemble réduit de configurations de bâtiments fondé sur les caractéristiques du panache selon différents cas de proximité.....	27
Figure 5.3 – Dilution normalisée sur le toit du bâtiment émetteur : a) $M = 1$; b) $M = 3$	28
Figure 5.4 – Dilution normalisée au mur sous le vent du bâtiment en amont : a) $M = 1$; b) $M = 3$	31
Figure 5.5 – Dilution normalisée sur le toit du bâtiment de faible hauteur : a) $M = 1$; b) $M = 3$..	33
Figure 5.6 – Dilution normalisée sur le toit du bâtiment de faible hauteur : a) $M = 1$; b) $M = 3$..	35
Figure 5.7 – Schéma illustrant le calcul du facteur correspondant à la Figure 5.6(a).....	35
Figure 5.8 – Dilution normalisée au mur sous le vent du bâtiment en amont : a) $M = 1$; b) $M = 3$	36
Figure 6.1 – Représentation schématique des emplacements de prises d'air appropriés.....	40
Figure B – Vue de face de la soufflerie à couche limite de l'Université Concordia.....	54
Figure C1 – Dilution normalisée au mur sous le vent de B_5 : a) $M = 1$; b) $M = 3$	56

Figure C2 – Dilution normalisée sur le toit de B ₁ pour différents espacements : a) M = 1 ; b) M = 3	56
Figure D1 – Dilution normalisée au mur sous le vent de B ₂ pour S ₂ = 20 m : a) h _s = 1 m ; b) h _s = 3 m.....	58
Figure D2 – Dilution normalisée sur le toit de B ₁ pour h _s = 3 m et X _s = 0 : a) M = 1 ; b) M = 3..	58
Figure E1 – Dilution normalisée sur le toit de B ₁ pour h _s = 3 m et X _s = 20 m : a) M = 1 ; b) M = 3	60
Figure E2 – Dilution normalisée sur le toit de B ₁ pour X _s = 0 : a) M = 1 ; b) M = 3.....	60
Figure E3 – Dilution normalisée sur le toit de B ₆ pour X _s = 0 : a) M = 1 ; b) M = 3.....	61
Figure E4 – Dilution normalisée sur le toit de B ₅ avec la configuration 11 pour X _s = 0	61
Figure F1 – Validation avec les résultats de Stathopoulos <i>et al.</i> (2004) (dilution sur le toit).....	63
Figure F2 – Validation avec les résultats de Stathopoulos <i>et al.</i> (2004) (dilution au mur).....	63
Figure F3 – Validation avec les données de soufflerie de Wilson <i>et al.</i> (1998) (dilution sur le toit)	64
Figure F4 – Validation avec les données de soufflerie de Wilson <i>et al.</i> (1998) (dilution sur le toit)	64

NOMENCLATURE

<u>Symbole</u>	<u>Définition</u>	<u>Unité</u>
A_e	Superficie de la cheminée	m^2
B_1	Paramètre de dilution en fonction de la distance	-
B_s	Plus petite dimension de la façade du bâtiment perpendiculaire au vent	m
B_s	Plus grande dimension de la façade du bâtiment perpendiculaire au vent	m
C_e	Concentration des émissions	ppm
C_r	Concentration au récepteur	ppm
D_o	Dilution initiale	-
D_d	Dilution sur le toit du bâtiment en aval	-
D_{de}	Dilution du côté sous le vent du bâtiment de faible hauteur	-
D_{min}	Dilution minimale (C_e/C_r)	-
D_{lu}	Dilution au mur sous le vent du bâtiment en amont	-
D_{le}	Dilution au mur sous le vent du bâtiment de faible hauteur	-
D_r	Dilution au niveau du toit (C_e/C_r)	-
$(D_r)_s$	Estimation de dilution pour un temps de moyennage plus court	-
$D_{normalisée}$	Dilution normalisée	-
D_i	Dilution sur le toit du bâtiment isolé	-
D_a	Dilution sur le toit du bâtiment de faible hauteur avec les configurations de bâtiments adjacents	-
D_{wd}	Dilution au mur au vent du bâtiment en aval	-
d_e	Diamètre de la cheminée	m
f1	Facteur de correspondance entre la dilution sur le toit avec le bâtiment isolé et avec les configurations de bâtiments adjacents	-
f2	Facteur de correspondance entre la dilution sur le toit en aval et du côté sous le vent du bâtiment de faible hauteur	-
f3	Facteur de correspondance entre la dilution sous le vent de la cheminée et la dilution au mur sous le vent du bâtiment en amont	-
f4	Facteur de correspondance entre la dilution du côté sous le vent et sur le mur sous le vent du bâtiment de faible hauteur	-
f5	Facteur de correspondance entre la dilution au mur au vent du bâtiment en aval et du côté sous le vent du bâtiment de faible hauteur	-

<u>Symbole</u>	<u>Définition</u>	<u>Unité</u>
h	Hauteur du bâtiment de faible hauteur	m
h_1	Hauteur du bâtiment en amont	m
h_2	Hauteur du bâtiment en aval	m
h_d	Réduction de la hauteur du panache	m
h_{panache}	Hauteur du panache	m
h_r	Élévation du panache (ASHRAE 2003, 2007)	m
h_x, h_f	Élévation du panache (ASHRAE 2011)	m
h_s	Hauteur de la cheminée	m
h_{faible}	Plus faible hauteur du panache	m
h_{haut}	Hauteur de la zone de recirculation critique	m
H_c	Hauteur maximale de la zone de recirculation du toit	m
H	Hauteur du bâtiment	m
$I_u(z)$	Intensité de la turbulence à une hauteur z donnée	-
i_x, i_y, i_z	Intensité de la turbulence le long des axes x , y et z	-
k	Constante de von Kármán = 0,4	-
L	Dimension au vent du bâtiment de faible hauteur	m
L_1	Dimension au vent du bâtiment en amont	m
L_2	Dimension au vent du bâtiment en aval	m
L_c	Longueur de la zone de recirculation du toit	m
L_r	Longueur de la zone de recirculation dans le sillage du bâtiment	m
m_i	Dilution mesurée à un récepteur donné	-
M	Facteur d'impulsion (V_e/U_H)	-
n	Nombre total de points d'échantillonnage (récepteurs)	-
p_i	Dilution estimée à un récepteur donné	-
Q_e	Taux d'écoulement volumétrique	m^3/s
S_1	Distance entre le bâtiment de faible hauteur et le bâtiment en amont	m
S_2	Distance entre le bâtiment de faible hauteur et le bâtiment en aval	m

<u>Symbole</u>	<u>Définition</u>	<u>Unité</u>
Sc_t	Nombre de Schmidt turbulent	-
t_s	Temps de moyennage	min
u_*	Vitesse de frottement	m/s
U_H	Vitesse du vent à la hauteur du bâtiment	m
V_e	Vitesse d'évacuation	m/s
$V(z)$	Vitesse du vent à une hauteur z donnée	m/s
V_g	Vitesse de gradient	m/s
w	Dimension perpendiculaire au vent du bâtiment de faible hauteur	m
w_1	Dimension perpendiculaire au vent du bâtiment en amont	m
w_2	Dimension perpendiculaire au vent du bâtiment en aval	m
x	Distance entre le récepteur et le côté au vent	m
x'	Distance entre le récepteur et le bord du bâtiment en aval	m
X_s	Emplacement de la cheminée par rapport au côté au vent	m
X_c	Distance entre le bord antérieur et H_c	m
z	Hauteur du bâtiment hors sol	m
Z_0	Coefficient de rugosité	m
Z_2	Zone de haute turbulence	-
Z_3	Limite de la zone de sillage du toit	-
Z_g	Hauteur de gradient	m

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS

<u>Symbole grec</u>	<u>Définition</u>	<u>Unité</u>
σ_o	Taille initiale du panache à la source	m
σ_y	Paramètre de dispersion (à l'horizontale)	m
σ_z	Paramètre de dispersion (à la verticale)	m
α	Exposant de loi de puissance	-
β	Facteur d'obturation de la cheminée	-
β_j	Coefficient d'entraînement du jet	-
ζ	Séparation verticale ($h_{\text{panache}} - H_c$)	m
ρ_e	Densité des émissions	kg/m ³
ρ_a	Densité de l'air	kg/m ³
θ	Azimut du vecteur vent	degrés

Abréviations

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers
SMDA	Système de modélisation de la dispersion atmosphérique
CFD	Mécanique des fluides numérique
EPA	Environmental Protection Agency
ESDU	Engineering Science Data Unit
CPG	Chromatographe en phase gazeuse
LES	Simulation de grands tourbillons
ÉT	Écart-type
SSLT	Structure sur le toit

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

La pollution atmosphérique est un phénomène mondial et une source de préoccupation parmi les ingénieurs et les radiohygiénistes. Les flux de polluants entre les bâtiments dans les zones urbaines s'avèrent particulièrement complexes en ce qu'ils sont soumis à des turbulences dues aux conditions atmosphériques, à la topographie locale et aux bâtiments eux-mêmes. Les polluants émis par une cheminée de toit peuvent se réintroduire dans le bâtiment émetteur ou pénétrer dans un bâtiment voisin, et y détériorer la qualité de l'air intérieur (Petersen *et al.*, 2002). Les personnes qui travaillent dans les universités et les laboratoires industriels qui émettent des vapeurs toxiques sont plus sujettes que d'autres à avoir des problèmes de santé causés par une réingestion de polluants. Malheureusement, la plupart des normes de conception actuelles ne permettent pas de résoudre ce problème de façon adéquate. Des études rigoureuses sont donc nécessaires pour comprendre l'écoulement de l'air et des polluants autour des bâtiments, et pour développer une technique permettant d'atténuer efficacement le problème de la réingestion.

Les effets liés à la présence de bâtiments adjacents sur la dispersion des émissions polluantes en champ proche n'ont été étudiés que par très peu de chercheurs. Stathopoulos *et al.* (2004) ont toutefois constaté, grâce à des expériences sur le terrain, qu'un bâtiment élevé en amont produit des concentrations plus importantes au niveau du toit d'un bâtiment émetteur moins élevé. Wilson *et al.* (1998) ont quant à eux observé que les concentrations de polluants étaient plus élevées sur le mur au vent d'un bâtiment en aval lorsque les émissions polluantes provenaient d'un bâtiment émetteur situé en amont. Nombre d'études ont en outre porté sur les émissions de cheminées de toit de bâtiments isolés, tels qu'on en trouve rarement en milieu urbain (Halitsky, 1963). Ainsi la présente étude des effets liés à la présence de bâtiments adjacents sur la dispersion des émissions polluantes en champ proche s'inscrit-elle dans un contexte plus réaliste et revêt-elle de ce fait une extrême importance.

Par le passé, de nombreux projets de recherche coopérative ont été réalisés par l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) et l'Université Concordia. Parmi ces projets, on compte des études au gaz traceur sur certains bâtiments du campus de l'Université Concordia, de même que la simulation des résultats obtenus dans la soufflerie à couche limite (SACL) de l'Université Concordia (Stathopoulos *et al.*, 2004). Une étude de divers modèles de l'Environmental Protection Agency (EPA) et de l'American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) a également été effectuée afin d'évaluer leur pertinence en ce qui concerne les problèmes de dispersion en champ proche (Stathopoulos *et al.*, 2008). Le présent rapport résume les résultats expérimentaux d'essais réalisés dans la SACL avec différentes configurations de bâtiments adjacents. Les données de soufflerie ont ensuite été comparées à celles des modèles de l'ASHRAE (2007 et 2011). Compte tenu des résultats obtenus, des suggestions visant à améliorer les techniques de modélisation de l'ASHRAE sont ci-après formulées, de même que des lignes directrices sur l'implantation sécuritaire de cheminées et de prises d'air sur différentes surfaces de bâtiments afin d'éviter une réingestion du panache. La section suivante décrit les objectifs de la présente étude.

1.2. Objectifs de l'étude

La présente étude poursuivait les objectifs suivants :

1. réaliser une série d'études au gaz traceur dans la SACL de l'Université Concordia avec différentes configurations de bâtiments, notamment :
 - i) un bâtiment isolé (source) ;
 - ii) des bâtiments de géométrie différente placés en amont de la source ;
 - iii) des bâtiments de géométrie différente placés en aval de la source ;
 - iv) un bâtiment placé en amont et un autre placé en aval de la source ;
2. comprendre les différents paramètres qui influent sur les caractéristiques du panache avec des configurations de bâtiments adjacents, notamment la hauteur et l'emplacement de la cheminée, les dimensions des bâtiments, l'espacement entre les bâtiments, la vitesse d'évacuation, la vitesse du vent et l'azimut du vecteur vent ;
3. comparer les estimations obtenues en soufflerie à celles des modèles de l'ASHRAE (2007 et 2011) avec différentes configurations de bâtiments adjacents ;
4. suggérer des façons d'améliorer le modèle de l'ASHRAE en ce qui a trait aux bâtiments isolés et y intégrer les effets de configurations de bâtiments adjacents de manière à obtenir des estimations de dilution raisonnables ;
5. formuler des lignes directrices sur l'implantation sécuritaire de cheminées et de prises d'air sur différentes surfaces de bâtiments.

Comme mentionné précédemment, ce rapport présente essentiellement les résultats expérimentaux de l'étude, alors que l'application de modèles dérivés de la mécanique des fluides numérique (CFD) aux résultats expérimentaux de l'étude fait l'objet d'un rapport complémentaire (Bahloul *et al.*, 2014). Le présent rapport comporte sept chapitres. Après ce premier chapitre d'introduction, le chapitre 2 présente une revue exhaustive de la littérature portant sur les études antérieures menées dans le domaine de la dispersion du panache en champ proche. Le chapitre 3 décrit la technique d'expérimentation en soufflerie, suivie des résultats et des constatations au chapitre 4. Le chapitre 5 porte sur les rectifications proposées pour améliorer les modèles de l'ASHRAE, tandis que le chapitre 6 renferme des lignes directrices sur l'implantation sécuritaire de cheminées et de prises d'air sur différentes surfaces de bâtiments. Les conclusions de l'étude et des recommandations relatives à de futures recherches sont présentées au chapitre 7, suivi d'une liste de références et d'annexes.

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1. Généralités

Les polluants émis par une cheminée de toit peuvent se réintroduire dans le bâtiment émetteur si l'emplacement des prises d'air n'est pas dûment étudié. Les effluents qui pénètrent dans un bâtiment peuvent éventuellement causer des problèmes de santé à ses occupants (Petersen *et al.*, 2002). La majorité des études se sont concentrées sur les émissions provenant d'un bâtiment isolé (Halitsky, 1963 ; Wilson, 1979) ; très peu d'études ont porté sur les effets liés à la présence de bâtiments adjacents (Stathopoulos *et al.*, 2008).

La section 2.2 donne une brève description de l'écoulement de l'air et des polluants autour d'un bâtiment isolé et de configurations de bâtiments adjacents. La section 2.3 traite de la littérature relative aux études expérimentales, aussi bien sur le terrain qu'en soufflerie. Certains rapports d'études récents sur l'application de modèles de CFD et de modèles de type gaussien sont ensuite présentés aux sections 2.4 et 2.5, respectivement. La section 2.6 offre quant à elle un résumé de ce chapitre.

2.2. Écoulement de l'air et des polluants autour des bâtiments

Décrivons tout d'abord l'écoulement de l'air et des polluants autour d'un bâtiment isolé. Grâce à des études expérimentales approfondies, Wilson (1979) a pu démontrer que lorsque des polluants s'échappent d'une cheminée de toit, trois zones différentes se forment. Du côté au vent du bâtiment, une zone de recirculation (Z_1) se forme au niveau du toit là où se produit un décollement de l'écoulement, et sous l'effet de faibles vitesses d'évacuation, une partie des effluents peut également être emprisonnée dans cette zone. Près de la cheminée se trouve une zone de forte turbulence (Z_2) où la turbulence due à la cheminée est plus élevée et où les concentrations de gaz sont elles-mêmes généralement plus élevées. Une zone de sillage limite (Z_3) se forme au niveau du toit à une distance suffisamment importante de la cheminée. Dans cette zone, un rabattement du panache causé par la présence de la cheminée peut survenir, les émissions polluantes étant alors susceptibles de s'accumuler sous l'effet de faibles vitesses d'évacuation et de vitesses éoliennes élevées. Wilson a avancé que des zones de recirculation de deux longueurs différentes se formaient en raison de l'écoulement de l'air autour du bâtiment :

- a) L_c l'une sur le toit du bâtiment ;
- b) L_r l'autre dans le sillage du bâtiment.

La première de ces zones se formait lorsque le bâtiment était suffisamment long. Les études de Wilson ont révélé qu'un panache de forme triangulaire (en deux dimensions) se formait avec une inclinaison de 5:1 par rapport à son axe central. Ces résultats ont été validés par des études ultérieures, notamment Wilson et Winkel (1982) et Wilson (1983) pour divers bâtiments isolés. Ils ont par la suite servi au développement du modèle de l'ASHRAE (1999) et de ses versions subséquentes, publiées en 2003, 2007 et 2011.

Un prolongement de cette étude a été réalisé par Wilson *et al.* (1998) à l'Université de l'Alberta afin d'examiner la structure du panache en présence d'un bâtiment en amont. Les résultats ont révélé que la cavité de recirculation qui se formait dans le sillage du bâtiment en amont jouait un rôle majeur dans la transformation de la géométrie du panache. Un bâtiment plus élevé en amont avait tendance à attirer le panache vers lui. Il s'agissait là d'une découverte importante puisque la trajectoire du panache en présence d'un bâtiment en amont n'était pas bien comprise avant cette étude. Plus tard, des mesures sur le terrain effectuées sur deux bâtiments de l'Université Concordia ont confirmé cette conclusion (Stathopoulos *et al.*, 2004). Cette étude a elle-même fait l'objet d'un prolongement afin d'examiner la structure du panache en présence d'un bâtiment en aval, et les résultats ont révélé qu'une partie importante du panache se dissipait par dispersion latérale sur les côtés du bâtiment.

Une partie du panache pouvait en outre toucher le toit du bâtiment en aval, surtout si les bâtiments étaient suffisamment proches l'un de l'autre. Bien que les études de Wilson aient grandement contribué à la compréhension de la géométrie du panache, elles ne permettaient pas de formuler des lignes directrices sur l'implantation sécuritaire de cheminées et de prises d'air sur différentes surfaces de bâtiments. Une étude plus récente sur l'écoulement de l'air et des polluants autour de multiples configurations de bâtiments, réalisée par Hajra *et al.* (2013), fournit une excellente description des caractéristiques d'écoulement dans un contexte urbain plus réaliste.

2.3. Études expérimentales sur la dispersion du panache en champ proche

Au début des années 1960, Halitsky (1963) a effectué une série d'essais au gaz traceur en soufflerie avec un bloc cubique pourvu d'un évent en effleurement. Les résultats expérimentaux lui ont permis de démontrer qu'un « écoulement de retour » se formait dans le sillage du bâtiment, ce qui amenait une partie du panache à se réintroduire par les ouvertures se trouvant sur le mur sous le vent. À partir des résultats obtenus, il a formulé l'équation suivante concernant la dilution minimale :

$$D_{\min} = [\alpha + 0,11 (1 + 0,2 \alpha) S/A_e^{0,5}]^2 \quad (2.1)$$

où D_{\min} représente la dilution à un récepteur donné, et se définit comme le rapport de la concentration massique des émissions sur la concentration massique au récepteur ; S , la distance de la source ; A_e , la surface d'émission ; et α , le paramètre adimensionnel dépendant de la forme et de l'orientation du bâtiment ainsi que du facteur d'impulsion ; il s'ensuit que l'équation 2.1 est elle-même adimensionnelle.

En 1985, Wilson et Chui ont développé un modèle empirique à partir de nombreuses expériences en soufflerie sur des bâtiments isolés, qu'ils ont par la suite modifié (Wilson et Chui, 1987). Voici la formule qu'ils ont proposée pour calculer la dilution minimale le long de l'axe du panache :

$$D_{\min} = (D_o^{0,5} + D_d^{0,5})^2 \quad (2.2)$$

où D_0 représente la dilution initiale au point d'émission, et D_d , la dilution en fonction de la distance résultant de la turbulence atmosphérique et de la turbulence provoquée par le bâtiment.

Wilson *et al.* (1998) ont cherché à comprendre l'effet de bâtiments adjacents. La contribution la plus importante de cette étude a été d'établir la structure du panache avec des configurations de bâtiments en amont et en aval. Saathoff *et al.* (2009) ont démontré que la présence d'une structure sur le toit (SSLT) d'un bâtiment influence grandement les caractéristiques de dispersion du panache sur le toit du bâtiment. Des essais en soufflerie ont été effectués relativement à des bâtiments élevés et de faible hauteur en variant la hauteur des cheminées, la vitesse d'évacuation, l'azimut du vecteur vent et l'emplacement de la SSLT. Le rabattement du panache causé par l'implantation de la cheminée sous le vent de la SSLT a tout particulièrement été étudié, et on a constaté que la présence d'une SSLT réduisait la dilution au niveau du toit comparativement à un toit plat. Cela dit, la présente étude ne tient pas compte des effets liés à la présence de SSLT, tous les bâtiments considérés ayant un toit plat. De futures études de dispersion au gaz traceur sur les effets liés à la présence de bâtiments adjacents en tenant compte des effets liés à la présence de SSLT présenteraient un intérêt certain.

De récentes études en soufflerie réalisées par Hajra *et al.* (2011, 2013) ont révélé que lorsque des bâtiments adjacents sont suffisamment éloignés de la zone de recirculation du bâtiment émetteur, les caractéristiques de l'écoulement de l'air et des polluants sont comparables à celles d'un bâtiment isolé. La plupart des études expérimentales ont d'abord porté sur la compréhension de la structure du panache formé par les émissions d'une cheminée montée sur le toit d'un bâtiment isolé. Ce n'est que plus tard que les chercheurs se sont graduellement intéressés aux effets liés à la présence de bâtiments adjacents sur la dispersion des émissions polluantes en champ proche.

2.4. Application de modèles de CFD

La mécanique des fluides numérique (CFD) repose essentiellement sur des modèles de type lagrangien, de type RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) et de type LES (simulation de grands tourbillons). Il existe de nombreuses études en soufflerie et en CFD sur la dispersion des polluants dans les canyons urbains (p. ex. Meroney *et al.*, 1996 ; Wedding *et al.*, 1977 ; Chang et Meroney, 2000, 2001, 2003 ; Meroney, 2010). Comme le présent rapport porte sur les résultats expérimentaux d'essais en soufflerie avec de nombreuses configurations de bâtiments multiples, on ne trouvera ici que très peu d'information sur l'application de modèles de CFD.

Blocken *et al.* (2008) ont simulé les résultats d'une étude sur le terrain réalisée à l'Université Concordia (voir Stathopoulos *et al.*, 2004 pour plus de détails) à l'aide du modèle de contraintes de Reynolds (RSM), et ils les ont comparés à ceux du modèle de l'ASHRAE (1999). Leurs résultats ont montré que les profils d'énergie cinétique turbulente présentaient des gradients longitudinaux inopportuns dans le domaine de calcul, ce qui provoquait une erreur de calcul dans le modèle RSM. Par ailleurs, les données d'ASHRAE 1999 se sont avérées trop prudentes.

L'application de différents modèles de turbulence $k-\epsilon$ à la dispersion des polluants autour d'un cube isolé a été étudiée par Tominaga et Stathopoulos (2009). Ils ont constaté que « *les modèles $k-\epsilon$ révisés fournissent des concentrations qui concordent mieux avec les données expérimentales* ». Ils ont également déclaré que « *les concentrations estimées par tous les*

modèles de CFD étaient moins diffuses que celles des expériences réalisées ». Chavez *et al.* (2011) ont effectué des simulations de CFD au moyen d'un modèle k- ϵ réalisable, et ils ont comparé leurs données à celle d'ASHRAE 2007 de même qu'aux données de soufflerie recueillies sur le toit d'un bâtiment de faible hauteur en présence de bâtiments adjacents. Leurs simulations ont montré que les résultats variaient en fonction des valeurs du nombre de Schmidt turbulent (Sc_t) et qu'il était très difficile de généraliser une quelconque valeur de Sc_t . Les données de l'ASHRAE se sont en outre avérées trop prudentes pour toutes les configurations de bâtiments.

Plus récemment, Chavez *et al.* (2012) ont comparé les données de CFD et de soufflerie obtenues avec des configurations de bâtiments plus élevés en amont. Les simulations ont été réalisées en utilisant le modèle k- ϵ réalisable, et selon le rapport publié, « *Certains écarts entre les données de CFD et de soufflerie ont été observés, plus particulièrement avec des configurations extrêmes, par exemple en présence d'un bâtiment nettement plus élevé en amont. Ces écarts sont principalement dus aux fluctuations instables inhérentes au sillage des bâtiments, que les modèles de type RANS ne permettent pas de déceler.* » Il en ressort que la CFD s'est sans conteste avérée un nouvel outil prometteur pour évaluer la dispersion du panache dans un environnement construit, mais que d'autres études expérimentales sont nécessaires pour en valider et en améliorer les résultats.

2.5. Application de modèles de type gaussien

Cette section présente les résultats d'études publiés sur l'application de modèles de type gaussien, comme ceux de l'ASHRAE et de l'EPA, notamment le système de modélisation de la dispersion atmosphérique (SMDA).

2.5.1. Le SMDA

Le système de modélisation de la dispersion atmosphérique (SMDA) est un modèle de dispersion fondé sur le modèle développé par Hunt et Robins (1982). Il sert à calculer les concentrations d'émissions dans le panache de cheminées isolées et de cheminées de toit à partir de récepteurs installés sur le toit ou au niveau du sol. Cependant, dans le cas des complexes comptant plusieurs bâtiments, le modèle fond ces derniers en un seul tout. Une étude rigoureuse réalisée par Stathopoulos *et al.* (2008) a démontré que le SMDA n'est utile que pour estimer les concentrations de panache à plusieurs kilomètres de la source, et qu'il ne peut simuler les effets liés à la présence de SSLT.

2.5.2. Les modèles de l'ASHRAE

Le premier modèle de l'ASHRAE a été développé à partir du modèle de Halitsky (1963). Il a par la suite fait l'objet de nombreuses modifications dans la foulée des travaux de Wilson, décrits précédemment. Un nouveau modèle fondé sur les travaux de Wilson (1979) a ainsi vu le jour en 2003, pour ensuite être modifié une fois de plus en 2007. Des études menées par Saathoff *et al.* (2009) ont révélé que les estimations d'ASHRAE 2003 et 2007 étaient extrêmement prudentes, et ne pouvaient donc servir à la conception des cheminées. Une version révisée a été publiée en

2011, mais elle est également jugée trop prudente dans certains cas (Gupta *et al.*, 2012). Pour une revue complète des autres modèles gaussiens en usage, voir Holmes et Morawska (2006).

2.6. Résumé

On comprend, à la lumière de ce chapitre, qu'il y a eu plusieurs études en soufflerie, mais peu d'expériences sur le terrain, ce qui s'explique par le fait que les premières permettent plus facilement que les secondes de contrôler divers paramètres. Wilson et ses collaborateurs ont réalisé quelques études relatives à l'effet des bâtiments adjacents sur la dispersion des émissions polluantes en champ proche (Wilson et Netterville, 1976 ; Wilson *et al.*, 1998), mais ces études ne modulaient pas systématiquement différents paramètres (p. ex. la hauteur et l'emplacement de la cheminée, l'espacement entre les bâtiments et les dimensions des bâtiments) comme le fait la présente étude. D'autres travaux expérimentaux s'avèrent nécessaires pour étudier l'effet des bâtiments adjacents sur la dispersion en champ proche dans des contextes plus réalistes ; une approche axée sur la CFD serait particulièrement intéressante à cet égard. Par conséquent, de nouvelles collaborations entre expérimentateurs et modélisateurs sont requises pour améliorer les simulations de CFD.

3. MÉTHODES

3.1. Généralités

Ce rapport résume les résultats de l'étude expérimentale réalisée dans la soufflerie à couche limite (SACL) de l'Université Concordia. Par conséquent, il importe de comprendre la technique de modélisation en soufflerie ainsi que les divers instruments utilisés pour effectuer des études au gaz traceur. La section 3.2 décrit le montage expérimental, et la section 3.3 traite des considérations d'échelle. La section 3.4 porte sur l'analyse qualitative et décrit les différentes configurations retenues de même que les résultats issus de la visualisation de l'écoulement.

3.2. Montage expérimental en soufflerie

La SACL est une soufflerie à circuit ouvert de 1,8 m sur 1,8 m de section et de 12,2 m de longueur. Une épaisse couche limite atmosphérique a été générée à l'aide d'éléments de rugosité grossiers et de flèches agissant comme génératrices de tourbillons. Les éléments de rugosité consistaient en cubes de 5 cm décalés et espacés d'environ 6 cm les uns des autres. Une sonde Cobra, dont la précision de mesure est généralement de l'ordre de $\pm 0,5$ m/s ou moins jusqu'à des taux de turbulence d'environ 30 % (Turbulent Flow Instrumentation, 2008), a été utilisée pour mesurer la vitesse éolienne et l'intensité des turbulences. Les profils de vitesse et de turbulence en soufflerie ont également été comparés aux résultats de l'Engineering Science Data Unit (ESDU, 1974) pour un relief urbain (Figure 3.1). De bonnes concordances entre les vitesses éoliennes normalisées (V/V_g) issues des données expérimentales et de l'ESDU (1974) ont été observées très près du sol et à environ 70 cm du plancher de la soufflerie. Aux points situés entre 10 cm et 60 cm, les estimations de l'ESDU étaient environ 1,2 fois plus élevées que les données de soufflerie.

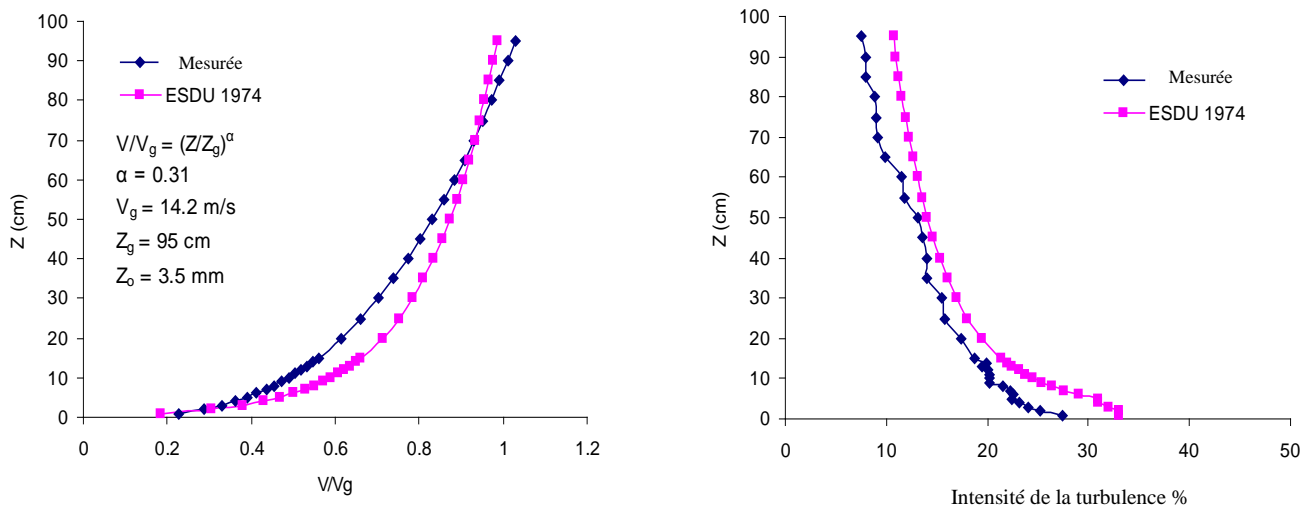


Figure 3.1 Profils de vitesse éolienne normalisée et d'intensité de la turbulence mesurés dans la soufflerie à couche limite de l'Université Concordia (d'après Hajra et Stathopoulos, 2012).

Les estimations de turbulence de l'ESDU étaient également plus élevées que les données de soufflerie par un facteur d'environ 1,3, et ce, à tous les points. Selon Liu *et al.* (2003), les formules de l'ESDU (1974) ont été développées « *en mettant en corrélation des données atmosphériques de vents forts avec un large éventail de conditions de rugosité* ». C'est ce qui explique l'écart entre les données expérimentales et celles de l'ESDU (1974) en ce qui concerne les profils de vitesse et de turbulence de la présente étude. Les caractéristiques de la couche limite mesurées en soufflerie sont présentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 – Caractéristiques de la couche limite.

Caractéristique de la couche limite	Valeur (échelle en soufflerie)
Vitesse de frottement (U^*)	1 m/s
Coefficient de rugosité (Z_o)	3,5 mm
Hauteur de gradient (Z_g)	95 cm
Exposant de loi de puissance (α)	0,31
Vitesse de gradient (V_g)	14,2 m/s
Échelle de longueur de la turbulence (L_u^x)	40 cm
Vitesse du vent à la hauteur du bâtiment (U_H)	6,2 m/s

Les expériences ont été réalisées en libérant un gaz traceur consistant en un mélange d'hexafluorure de soufre (SF_6) et d'azote depuis une cheminée de 3 mm de diamètre, ce qui correspond à 0,6 m en grandeur réelle. Les expériences au gaz traceur n'ont débuté qu'une fois la soufflerie stabilisée, soit après environ 4 minutes de fonctionnement.

3.3. Considérations d'échelle

Les maquettes de bâtiments ont été réalisées en bois à une échelle de 1:200. Un relief urbain avec un exposant de loi de puissance de 0,31 a été constitué. Une échelle de longueur de la turbulence de 40 cm, correspondant à une valeur de 80 m en grandeur réelle, a été calculée en utilisant la formule développée par Counihan (1975).

Selon Snyder (1981), les critères qui suivent doivent être satisfaits lorsqu'il s'agit de modéliser la dispersion d'un panache non flottant en soufflerie :

- similarité géométrique ;
- nombre de Reynolds du bâtiment $> 11\ 000$;
- nombre de Reynolds de la cheminée $> 2\ 000$;

Des études au gaz traceur effectuées par Saathoff *et al.* (1995) révèlent qu'« *il n'est généralement pas possible de satisfaire au critère relatif au nombre de Reynolds avec les cheminées de faible diamètre, et il est par ailleurs difficile de perturber l'écoulement intérieur pour augmenter la turbulence à la sortie de la cheminée* ». Dans la présente étude, bien que le nombre de Reynolds de la cheminée ait été de 1 900, ce qui est relativement moins que 2 000, cela n'a pas eu d'incidence sur la précision des mesures de concentration, comme expliqué dans Saathoff *et al.* (1995) et Hajra *et al.* (2010).

- similarité entre l'écoulement en soufflerie et la couche limite de surface ;

Ce critère fait référence à l'obtention de profils de vitesse et d'intensité de turbulence similaires en grandeur réelle aux mesures obtenues en soufflerie.

- équivalence du facteur d'impulsion.

En général, le facteur d'impulsion (M) se définit comme suit :

$$M = (\rho_e / \rho_a)^{0.5} (V_e / U_H) \quad (3.1)$$

où :

ρ_e et ρ_a représentent respectivement la densité des émissions et de l'air (kg/m^3) ;

V_e , la vitesse d'évacuation (m/s) ;

et U_H , la vitesse du vent à la hauteur du bâtiment (m/s).

L'équation 3.1 se réduit à un rapport de vitesses (V_e/U_H) du fait que la densité des émissions et de l'air sont à peu près égales dans le cadre des études au gaz traceur non flottant réalisées en soufflerie (Stathopoulos *et al.*, 2008). Dans la présente étude, l'échantillonneur à seringues ne pouvait recueillir les échantillons que pendant une minute compte tenu des capacités de l'instrument (Hajra *et al.*, 2010), alors que le modèle de l'ASHRAE (2007) estime qu'un temps de moyennage de 60 minutes sur le terrain équivaut à 2 minutes en soufflerie. Des études menées par Saathoff *et al.* (2009) ont cependant démontré que cette subtile différence quant au temps de moyennage n'a pas d'incidence sur la précision des mesures de dispersion en champ proche dans le cadre des expériences au gaz traceur. Les échantillons ont été recueillis à l'aide d'un échantillonneur à seringues fabriqué par KD Scientific² dont le taux de succion a été maintenu égal pour tous les échantillons prélevés en soufflerie, sans égard aux valeurs de h_s et de M , afin d'assurer l'obtention de mesures isocinétiques. Le gaz traceur s'échappait de la cheminée de toit, et des échantillons étaient recueillis à différents récepteurs au moyen de seringues reliées par des tubes disposés sous la table tournante pour éviter qu'ils perturbent l'écoulement de l'air et du gaz traceur. Les échantillons prélevés étaient injectés dans un chromatographe en phase gazeuse VARIAN 3400, dont la résolution de mesure est de 1 et la précision, d'environ 5 %. L'efficacité du système de ventilation du laboratoire évite par ailleurs que des concentrations de fond ne faussent les mesures. Pour plus de détails sur le matériel expérimental, voir Hajra *et al.* (2011).

² <http://www.kdscientific.com/technical-resources/manuals.asp> [dernière visite : 25 février 2014].

3.4. Analyse qualitative

Très peu d'études ont porté sur l'évaluation de la dispersion en champ proche des émissions polluantes de cheminées de toit en présence de bâtiments adjacents. Certaines de ces études ont été décrites à la section 2. Entre autres, Wilson *et al.* (1998) ont constaté qu'en présence d'un bâtiment plus élevé en amont, le panache provenant d'un bâtiment de faible hauteur avait tendance à se déplacer en direction du bâtiment en amont. Bien qu'il s'agisse là d'une importante découverte, des estimations quantitatives n'ont été effectuées que pour quelques cas. La figure 3.2 offre une visualisation de l'écoulement d'un panache s'échappant d'un bâtiment de faible hauteur en présence d'un bâtiment plus élevé en aval. Les polluants étaient émis à faible vitesse d'évacuation ($M \sim 1$) depuis un bâtiment de faible hauteur placé à environ 10 m (en grandeur réelle) en amont d'un bâtiment élevé sous le vent.

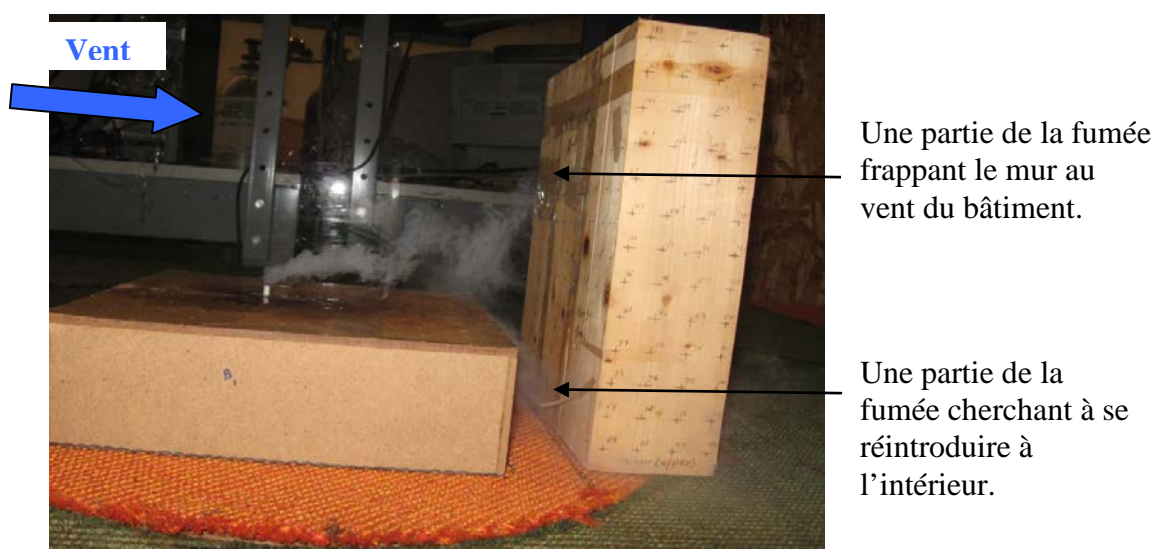


Figure 3.2 – Bâtiment élevé placé en aval d'un bâtiment émetteur de faible hauteur ($\theta = 0^\circ$).

On a constaté que le toit du bâtiment émetteur et le mur au vent du bâtiment en aval étaient tous deux touchés. La fumée avait aussi tendance à se réintroduire dans le bâtiment émetteur par le mur sous le vent. Afin d'approfondir la question, on a placé un bâtiment élevé en amont et en aval du bâtiment de faible hauteur, et une fois de plus, le toit du bâtiment émetteur et le mur au vent du bâtiment en aval ont tous deux été touchés.

3.4.1. Détermination des paramètres clés qui régissent le comportement du panache

La visualisation de l'écoulement a permis de dégager les conclusions qui suivent :

- la hauteur et la dimension perpendiculaire au vent des bâtiments adjacents (en amont et en aval) avaient une influence majeure sur la dispersion du panache ;

- b) la hauteur du bâtiment émetteur, la hauteur et l'emplacement de la cheminée, la vitesse d'évacuation et l'espacement entre les bâtiments se sont également révélés être des facteurs critiques nécessitant des études plus approfondies.

Les expériences axées sur la visualisation de l'écoulement ont fourni une bonne compréhension des caractéristiques d'écoulement du panache. À partir de ces observations, divers paramètres ont été retenus pour l'étude en soufflerie et sont présentés dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 – Les variables qui interviennent dans l'étude et leurs valeurs respectives.

Variable	Fourchette de valeurs	Raisons qui ont motivé le choix de ces valeurs
M	$1 \leq M \leq 3$	Cette fourchette de valeurs de M a été utilisée dans des études antérieures sur des bâtiments isolés (Stathopoulos <i>et al.</i> , 2004).
Hauteur du bâtiment	15 – 50 m	Les résultats d'une étude sur le terrain en présence d'un bâtiment plus élevé en amont sont disponibles.
Espacement	10 – 50 m	Des études antérieures sur deux bâtiments ont été réalisées à l'Université Concordia (Stathopoulos <i>et al.</i> , 2004).
Largeur*	30 – 50 m	Des expériences axées sur la visualisation de l'écoulement ont révélé qu'un bâtiment étroit en amont avait une moins grande influence sur le panache qu'un bâtiment plus large.
Longueur	15 – 30 m	Une variation de la longueur n'a été prise en compte dans aucune étude antérieure, non plus que dans les modèles de l'ASHRAE.
X_s	$0 \leq X_s \leq 20$ m	Les résultats d'études antérieures avec des cheminées centrales et du côté au vent d'un bâtiment sont disponibles (Saathoff <i>et al.</i> , 2009).
h_s	$1 \leq h_s \leq 5$ m	Des études antérieures ont fourni des données de concentration pour un bâtiment isolé avec une cheminée d'une hauteur de 1 m et de 5 m.
θ	$0 \leq \theta \leq 45^\circ$	La plupart des études ont retenu $\theta = 0^\circ$; très peu ont retenu $\theta = 45^\circ$.

* La largeur correspond à la dimension du bâtiment perpendiculaire à la direction du vent.

Comme expliqué au chapitre 2, les études antérieures n'ont porté que sur des bâtiments isolés. Par conséquent, une étude approfondie faisant intervenir différents paramètres variables des bâtiments émetteur et adjacents a été jugée nécessaire.

3.4.2. Étude paramétrique de la dispersion des émissions à partir d'essais en soufflerie

Le Tableau 3.3 présente les dimensions des six maquettes de bâtiments en bois utilisées pour les expériences en soufflerie. La longueur de la zone de recirculation de chaque bâtiment a été estimée à l'aide des formules de l'ASHRAE (voir l'Annexe A). Il convient ici de noter que la valeur la plus faible et la valeur la plus élevée en ce qui concerne la longueur de la zone de recirculation étaient respectivement de 22,3 m et 51,2 m. Puisque l'objectif principal de ce projet de recherche consistait à évaluer la dilution du panache à l'intérieur de la zone de recirculation, on a fait varier l'espacement entre les bâtiments de 10 m à 50 m. Le Tableau 3.4 porte sur les différentes configurations testées en soufflerie. Les dimensions fournies dans les Tableaux 3.3 et 3.4 sont des dimensions en grandeur réelle. Les récepteurs n'ont été installés que dans l'axe central des bâtiments ; aucun n'a été installé latéralement sur les différentes surfaces. Dans l'ensemble, les récepteurs se trouvaient sur le toit, sur le mur au vent et sur le mur sous le vent de chaque bâtiment, et non sur les façades latérales des bâtiments.

Tableau 3.3 – Dimensions des maquettes de bâtiments utilisées pour les expériences en soufflerie.

Bâtiment	Hauteur (cm) (m)	Largeur* (m)	Longueur (m)	Longueur de la zone de recirculation (Éq. A1, Annexe A)
B ₁	15	50	50	22,3
B ₂	30	50	30	35,5
B ₃	30	50	15	35,5
B ₄	30	30	30	30,0
B ₅	54	50	15	51,2
B ₆	30	50	50	35,5

* La largeur correspond à la dimension du bâtiment perpendiculaire à la direction du vent.

Pour plus de détails, voir Hajra *et al.* (2011) et Hajra et Stathopoulos (2012). La Figure 3.3 offre une représentation schématique des différentes configurations testées en soufflerie, dont le Tableau 3.4 dresse une liste complète. Les chiffres inscrits dans la figure correspondent aux « numéros de configuration ». Les points noirs indiquent l'emplacement des récepteurs sur les surfaces de bâtiments. Bien que des récepteurs aient été placés à divers endroits, seuls les emplacements où des concentrations de panache ont été détectées sont ici indiqués.

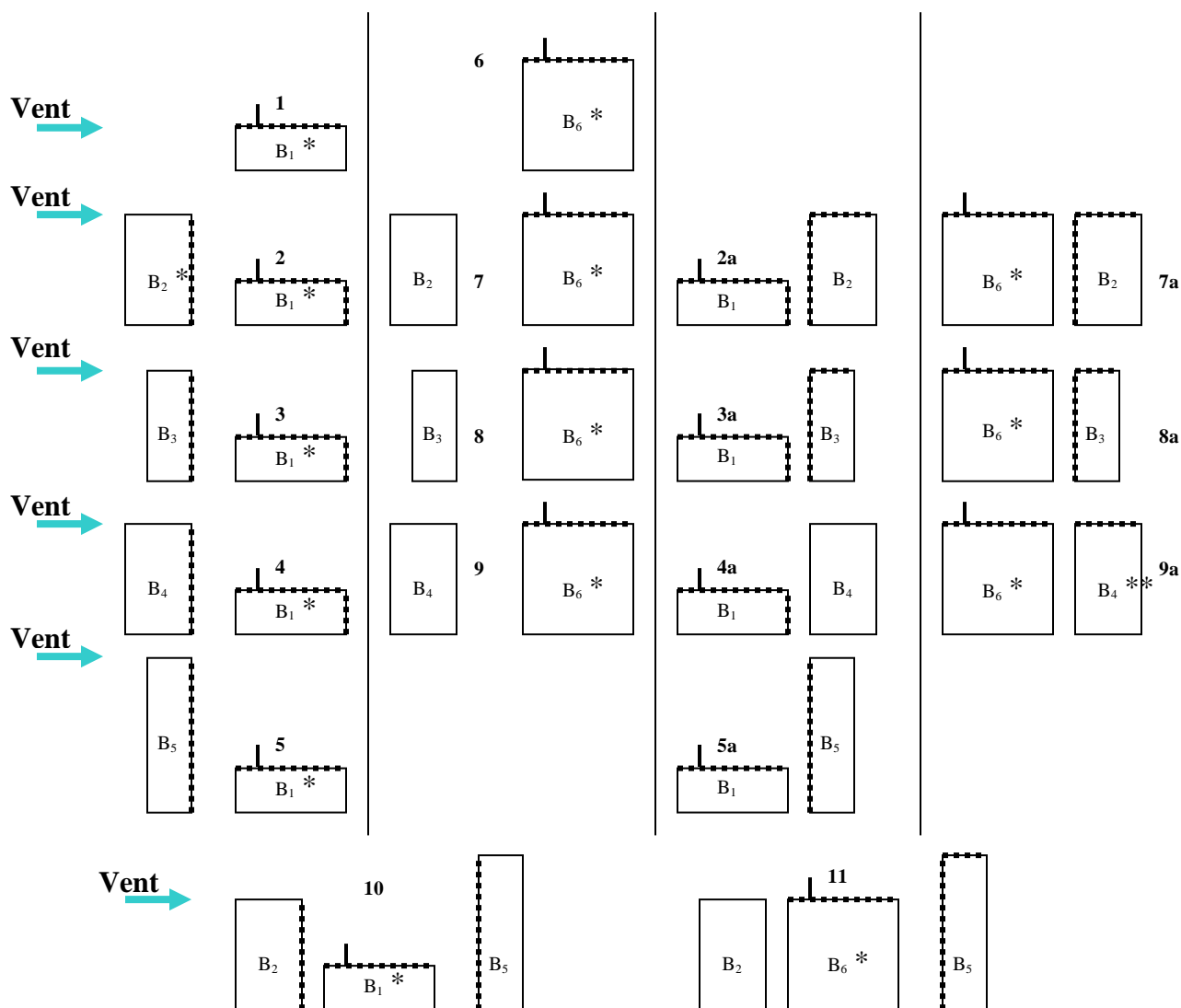
La distance entre la cheminée et le côté au vent (X_s) variait de 0 à 20 m, et la hauteur de la cheminée (h_s), de 1 m à 5 m. Les facteurs d'impulsion (M) variaient quant à eux de 1 à 3, et ce, afin que les caractéristiques de la dilution sur différentes surfaces de bâtiments puissent être rigoureusement évaluées pour différentes configurations de bâtiments. Bien que les essais aient été effectués selon des azimuts du vecteur vent (θ) de 0° , $22,5^\circ$ et 45° , $\theta = 0^\circ$ s'est révélé être le plus critique. Aussi les résultats présentés au chapitre 4 ne le sont-ils que pour $\theta = 0^\circ$.

Tableau 3.4 – Configurations testées en soufflerie (18 configurations au total).

Numéro de configuration	Configuration	Remarques
1	B ₁ (bâtiment émetteur)	Isolé
2	B ₂ en amont de B ₁	Bâtiment plus élevé en amont
3	B ₃ en amont de B ₁	Bâtiment plus élevé en amont
4	B ₄ en amont de B ₁	Bâtiment plus élevé en amont
5	B ₅ en amont de B ₁	Bâtiment plus élevé en amont
6	B ₆ (bâtiment émetteur)	Isolé
7	B ₂ en amont de B ₆	Bâtiments de hauteur semblable
8	B ₃ en amont de B ₆	Bâtiments de hauteur semblable
9	B ₄ en amont de B ₆	Bâtiments de hauteur semblable
2a	B ₂ en aval de B ₁	Bâtiment plus élevé en aval
3a	B ₃ en aval de B ₁	Bâtiment plus élevé en aval
4a	B ₄ en aval de B ₁	Bâtiment plus élevé en aval
5a	B ₅ en aval de B ₁	Bâtiment plus élevé en aval
7a	B ₂ en aval de B ₆	Bâtiments de hauteur semblable
8a	B ₃ en aval de B ₆	Bâtiments de hauteur semblable
9a	B ₄ en aval de B ₆	Bâtiments de hauteur semblable
10	B ₂ en amont et B ₅ en aval de B ₁	Bâtiments de part et d'autre du bâtiment émetteur
11	B ₂ en amont et B ₅ en aval de B ₆	Bâtiments de part et d'autre du bâtiment émetteur

Notes :

- i) La dimension perpendiculaire au vent de B₁, B₂, B₃, B₅ et B₆ est de 50 m, alors que celle de B est de 30 m ;
- ii) La hauteur de B₂, B₃, B₄ et B₆ est de 30 m, soit le double de celle de B₁ ;
- iii) La dimension au vent de :
 - B₂ et B₄ est de 30 m ;
 - B₃ et B₅ est de 15 m ;
 - B₁ et B₆ est de 50 m.



**Figure 3.3 – Représentation schématique des différentes configurations testées en soufflerie. Seuls les récepteurs auxquels une concentration de gaz traceur a été détectée sont indiqués ;
les chiffres en gras représentent les numéros de configuration ;
* et ** indiquent la dimension perpendiculaire au vent – * = 50 m et ** = 30 m.**

Les résultats expérimentaux présentaient un taux de répétabilité de l'ordre de $\pm 15\%$ par rapport aux données précédemment publiées, ce qui, selon Hajra et Stathopoulos (2012), « est généralement considéré comme probant dans le cas des études sur la dispersion en champ proche ».

4. RÉSULTATS ET ANALYSE

4.1. Généralités

Ce chapitre présente les résultats obtenus en soufflerie pour différentes configurations de bâtiments. Ces résultats sont ensuite comparés aux estimations fournies par les modèles de l'ASHRAE (2007 et 2011). Les résultats obtenus avec les configurations de bâtiments en amont et les configurations de bâtiments en aval sont présentés aux sections 4.2 et 4.3, respectivement. La section 4.4 est consacrée aux configurations avec un bâtiment placé en amont et un autre placé en aval du bâtiment émetteur, tandis que la section 4.5 offre un résumé de ce chapitre. Une courte description des modèles de l'ASHRAE (2007 et 2011) se trouve par ailleurs à l'Annexe A.

4.2. Configurations de bâtiments en amont

Cette section présente les données expérimentales recueillies avec différentes configurations de bâtiments en amont de même que les estimations fournies par ASHRAE 2007 et 2011. Elle met l'accent sur les dilutions obtenues sur le toit du bâtiment émetteur et sur le mur sous le vent du bâtiment en amont, ces surfaces ayant été les plus touchées, surtout dans le cas des configurations de bâtiments plus élevés en amont.

4.2.1. Effet d'un bâtiment plus élevé en amont

La présence d'un bâtiment élevé en amont d'un bâtiment de faible hauteur a une incidence sur le toit du bâtiment émetteur et sur le mur sous le vent du bâtiment en amont. Les résultats exprimés sous forme de dilution normalisée sur le toit du bâtiment émetteur sont traités ci-après.

Dilution sur le toit du bâtiment émetteur (B_1) pour $X_s = 20$ m

La Figure 4.1(a) compare la dilution au niveau du toit entre les configurations 1 à 5, ASHRAE 2007 et ASHRAE 2011 pour $h_s = 1$ m, $M = 1$ et $X_s = 20$ m. Il convient de mentionner que dans les configurations 3 et 5, B_3 et B_5 se trouvent en amont de B_1 , respectivement. La hauteur de B_5 est en outre presque deux fois plus importante que celle de B_3 (voir les Tableaux 3.3 et 3.4). Une plus grande zone de recirculation se forme dans le sillage du bâtiment en amont avec la configuration 5 qu'avec la configuration 3, ce qui donne lieu à une plus forte concentration de polluants sur le toit du bâtiment émetteur dans le premier cas que dans le second. La dilution devient toutefois comparable au-delà de 20 m, puisque l'effet de la hauteur du bâtiment en amont diminue progressivement sous le vent de la cheminée. Dans le cas de bâtiments en amont de hauteur et de largeur égales, une plus grande dimension au vent n'a pas d'incidence sur la zone de recirculation qui se forme en aval. Par conséquent, les configurations 2 et 3 donnent lieu à une dilution comparable à tous les points d'échantillonnage. Lorsque le bâtiment en amont est plus long, un réattachement de l'écoulement est susceptible de se produire, mais comme les deux bâtiments en amont sont de la même hauteur, la turbulence

générée dans le sillage du bâtiment en amont sera vraisemblablement du même ordre de grandeur, de sorte que le bâtiment émetteur sera très peu touché. Il n'y a rien d'étonnant à ce qu'aucune concentration d'effluents n'ait été relevée à moins de 20 m sur le toit du bâtiment émetteur avec la configuration 4. En effet, le bâtiment en amont (B_4) présente une zone de recirculation moins longue (30 m) ; or, comme la cheminée est suffisamment éloignée du côté au vent, le panache surmonte facilement la zone de recirculation du bâtiment en amont, de sorte que seuls les récepteurs sous le vent de la cheminée sont touchés.

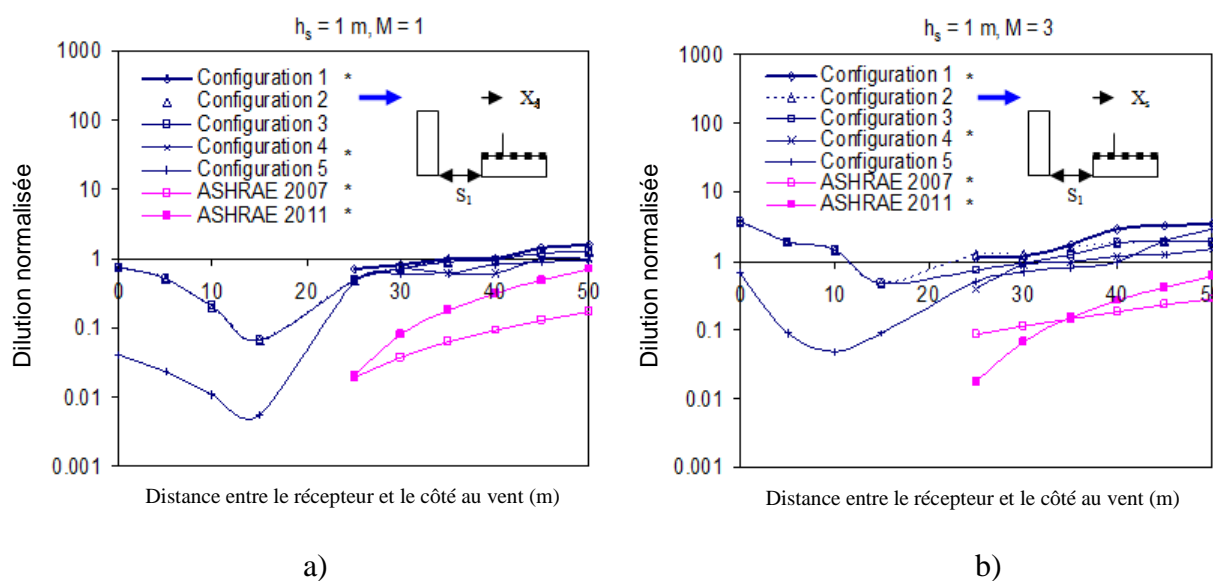


Figure 4.1 – Dilution normalisée sur le toit du bâtiment émetteur (B_1) pour $X_s = 20$ m et $S_1 = 20$ m : a) $M = 1$; b) $M = 3$.

*** Des concentrations n'ont été relevées que sous le vent de la cheminée.**

ASHRAE 2007 prévoit des dilutions plus faibles que celles observées (par un facteur d'environ 10) avec toutes les configurations pour $M = 1$ (Figure 4.1(a)). Une tendance similaire a d'ailleurs été observée pour $M = 3$, comme l'indique la Figure 4.1(b). Cela dit, les estimations d'ASHRAE 2011 sont légèrement meilleures que celles de la version 2007, en ce qu'elles prévoient des dilutions environ 5 fois plus faibles que les données de soufflerie dans le cas du bâtiment isolé, surtout près du bord sous le vent du bâtiment pour $M = 1$. À vitesse d'évacuation plus élevée ($M = 3$), les estimations d'ASHRAE 2011 dans le cas du bâtiment isolé restent néanmoins inférieures aux données de soufflerie par un facteur de 10, quoique plus plausibles que celles du modèle 2007. Les dilutions estimées par ASHRAE 2011 ne changent pas de façon significative avec une augmentation de la valeur de M étant donné que les paramètres de dispersion du panache sont fonction de l'intensité de la turbulence et de la distance du récepteur. Dans l'ensemble, aucun des deux modèles de l'ASHRAE ne fournit des estimations de dilution au vent de la cheminée. Pour $h_s > 1$ m, les configurations 2, 3 et 5 produisent des concentrations au niveau du toit à tous les récepteurs, et ce, bien que les valeurs de dilution augmentent avec la valeur de M . De façon générale, les valeurs de dilution obtenues avec toutes les configurations deviennent comparables aux récepteurs sous le vent de la cheminée lorsque la hauteur de celle-ci est supérieure à 1 m.

Dilution au mur sous le vent du bâtiment en amont (B₂, B₃ et B₄)

La Figure 4.2(a) présente la dilution normalisée au mur sous le vent de B₂ (configuration 2), B₃ (configuration 3) et B₄ (configuration 4) pour $h_s = 1$ et $M = 1$. Les formules de l'ASHRAE ne peuvent être utilisées que pour estimer la dilution au niveau du toit ; elles ne fournissent pas d'estimation de la dilution au mur sous le vent du bâtiment en amont. Il convient de noter que, dans ces configurations, le bâtiment en amont est deux fois plus élevé que le bâtiment émetteur. Dans le cas des configurations 2 et 3, des dilutions comparables ont été observées à tous les points du mur sous le vent du bâtiment en amont, alors que la configuration 4 a donné lieu à une dilution près de 10 fois plus importante que les configurations 2 et 3.

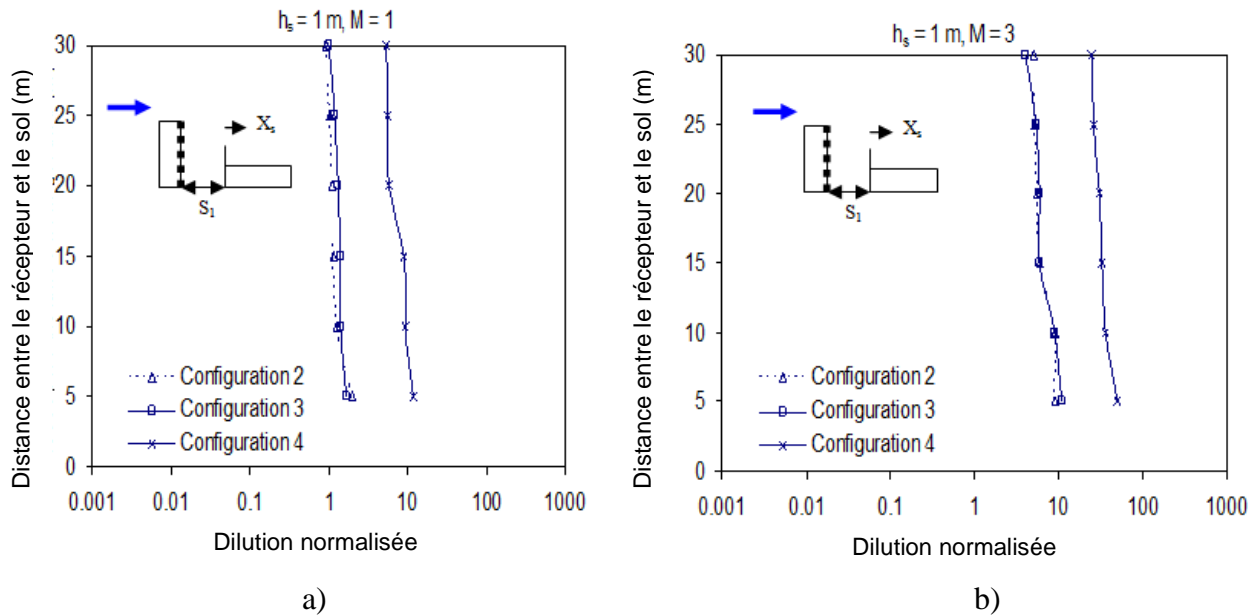


Figure 4.2 – Dilution normalisée au mur sous le vent du bâtiment en amont pour $X_s = 0$ et $S_1 = 20 \text{ m}$: a) $M = 1$; b) $M = 3$.

Cela est dû au fait que la dimension perpendiculaire au vent du bâtiment en amont est plus faible dans la configuration 4, ce qui réduit la longueur de la zone de recirculation sous le vent du bâtiment. Une tendance similaire a été observée pour $M = 3$, comme l'indique la Figure 4.2(b). Avec une cheminée plus élevée ($h_s > 1 \text{ m}$), aucune concentration de polluants n'a été détectée sur le mur sous le vent du bâtiment en amont, car le panache s'élevait à plus de 3 m au-dessus de la surface du bâtiment, ce qui provoquait une plus grande dispersion du panache. En pareil cas, le panache touche principalement le toit du bâtiment émetteur, sans atteindre le bâtiment en amont. Lorsque la cheminée était placée à 20 m du côté au vent du bâtiment, le panache se trouvait assez éloigné de la zone de recirculation du bâtiment en amont pour que les concentrations de gaz traceur soient diluées au point d'être indétectables sur le mur sous le vent du bâtiment en amont. Cependant, un bâtiment plus élevé (54 m) en amont (configuration 5) engendrait une zone de recirculation plus importante (51,2 m selon l'ASHRAE), de sorte que même avec une cheminée centrale, des concentrations de polluants pouvaient être détectées à $h_s < 3 \text{ m}$. Cela dit, des tendances similaires ont été observées avec les configurations 2 et 3 (voir Hajra *et al.*, 2011 pour plus de détails).

Avec une petite cheminée ($h_s = 1$ m), des dilutions ont aussi été relevées sur le mur sous le vent du bâtiment source de faible hauteur, puisque la plus grande partie des polluants touchaient le toit du bâtiment émetteur et le mur sous le vent du bâtiment plus élevé en amont. Les résultats et les constatations présentés à la section précédente se rapportaient à des cas où les bâtiments étaient espacés de 20 m. En fait, dans la plupart des cas, on a constaté que la dilution demeurait inchangée avec un espacement de 20 m à 30 m. Cependant, lorsque l'espacement entre les bâtiments dépassait cette fourchette, l'effet du bâtiment en amont diminuait graduellement, comme on peut le voir à l'Annexe C. Des résultats complémentaires sont fournis dans Hajra *et al.* (2011). La section suivante décrit les différentes configurations en aval testées en soufflerie, et fait état des comparaisons effectuées avec les estimations des modèles de l'ASHRAE.

4.3. Configurations de bâtiments en aval

Cette section traite de l'effet des configurations de bâtiments plus élevés en aval en mettant tout particulièrement l'accent sur la dilution au niveau du toit du bâtiment émetteur, cette surface ayant été la plus touchée. De façon générale, des concentrations de polluants ont été relevées sur le toit et sur le mur sous le vent du bâtiment émetteur, de même que sur le toit et le mur au vent du bâtiment en aval. Des résultats complémentaires sont fournis dans Hajra et Stathopoulos (2012). La Figure 4.3(a) présente des comparaisons entre la configuration 1, les configurations 2a à 5a, ASHRAE 2007 et ASHRAE 2011 pour $h_s = 1$ m, $M = 1$, $S_2 = 20$ m et $X_s = 0$. Il convient de noter que, bien que B_2 , B_3 et B_4 soient deux fois plus élevés que B_1 , la dimension au vent de B_3 est deux fois moindre que celle de B_2 , et que la dimension perpendiculaire au vent de B_4 s'établit à 60 % de celle de B_2 . Des dilutions comparables ont été observées à tous les points d'échantillonnage avec les configurations 2a et 3a, ce qui s'explique par le fait qu'une variation de la dimension au vent du bâtiment en aval n'a pas d'incidence significative sur la géométrie du panache. Cela dit, la configuration 4a fournit une estimation de dilution plus élevée que les configurations 2a et 3a puisqu'un bâtiment étroit permet à une plus grande partie du panache de se dissiper par dispersion latérale, ce qui augmente la dilution au niveau du toit du bâtiment émetteur, bien qu'elle reste relativement plus faible que dans le cas du bâtiment isolé. La configuration 5a donne lieu à une estimation de dilution environ 10 fois plus faible que les configurations 2a et 3a en raison de la hauteur du bâtiment en aval (B_5), qui empêche le panache de se disperser. Une tendance similaire a été observée pour $h_s = 1$ m et $M = 3$, comme le montre la figure 4.3(b), bien que dans le cas des configurations 4a et 1, la dilution soit comparable, surtout aux récepteurs se trouvant à proximité du côté sous le vent de B_1 , car la vitesse d'évacuation plus élevée et la plus petite dimension perpendiculaire au vent du bâtiment en aval favorisent une plus grande dispersion du panache, ce qui réduit l'effet du bâtiment en aval. ASHRAE 2007 prévoit de très faibles dilutions par rapport aux données expérimentales pour $M = 1$, ce qui conduit à une conception de cheminée trop prudente. Toujours pour $M = 1$, dans le cas du bâtiment isolé, les estimations d'ASHRAE 2011 se comparent aux données de soufflerie aux récepteurs qui se trouvent au-delà de 15 m sous le vent de la cheminée. Pour $M = 3$, toutefois, les estimations de dilution d'ASHRAE 2011 sont environ 10 fois plus faibles que les données expérimentales sur le bâtiment isolé, surtout à proximité du bord sous le vent du bâtiment émetteur ; ces estimations sont néanmoins légèrement meilleures que celles du modèle 2007. Dans l'ensemble, la version 2011 du modèle de l'ASHRAE a été jugée adéquate pour de

faibles valeurs de M ($M < 3$), tandis que la version 2007 s'est avérée trop prudente dans tous les cas.

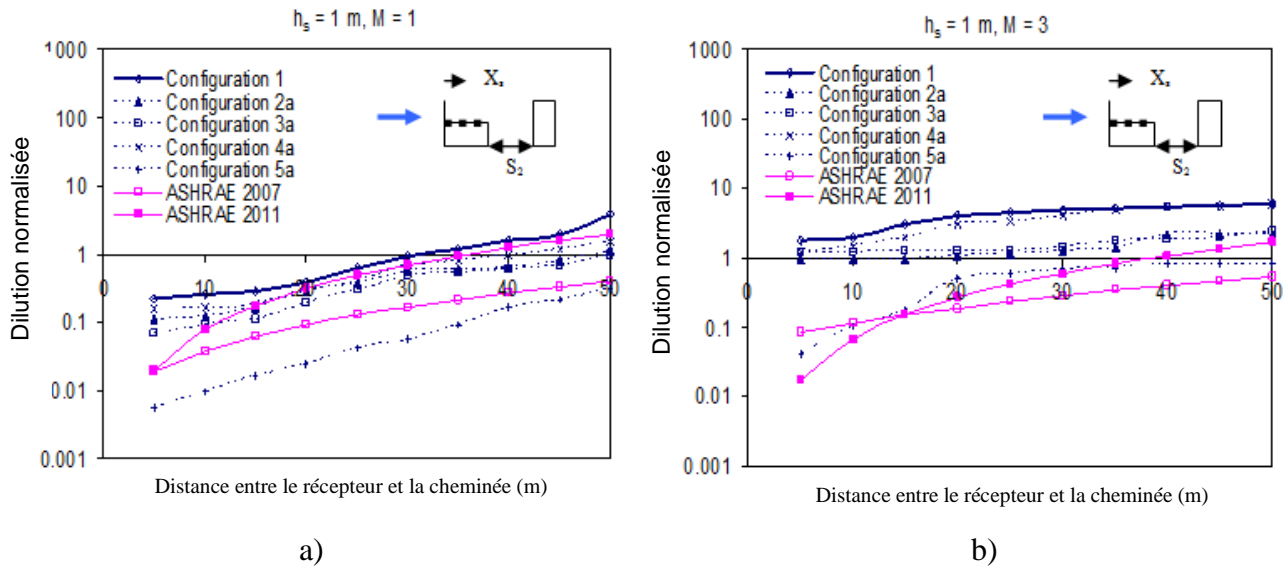


Figure 4.3 – Dilution normalisée sur le toit de B_1 pour $X_s = 0$ et $S_2 = 20$ m : a) $M = 1$; b) $M = 3$.

Pour des valeurs plus élevées de h_s et de M , la dilution observée avec toutes les configurations devient comparable à celle du bâtiment isolé, ce qui indique une réduction de l'effet du bâtiment en aval. Lorsque $X_s = 20$ m, l'éventualité d'un panache sinueux se trouve réduite, étant donné que le bâtiment en aval est de la même hauteur que le bâtiment émetteur. Par conséquent, toutes les configurations ont produit une dilution comparable pour un M donné et $h_s > 1$ m. Avec une cheminée peu élevée ($h_s = 1$ m), un effet de dilution a également été observé sur le mur sous le vent du bâtiment émetteur de faible hauteur, du fait que la plus grande partie des effluents ne touchaient que le toit du bâtiment émetteur et le mur au vent du bâtiment en aval. Les résultats relatifs à l'effet de l'espacement entre les bâtiments sont présentés à l'Annexe D.

4.4. Bâtiments en amont et en aval du bâtiment émetteur

Cette section présente les résultats obtenus avec un bâtiment en amont et un bâtiment en aval du bâtiment émetteur. Il présente plus précisément les résultats obtenus avec un bâtiment plus élevé en amont et un bâtiment plus élevé en aval du bâtiment émetteur (configuration 10), des résultats complémentaires figurant à l'Annexe E.

La Figure 4.4(a) illustre la dilution normalisée sur le toit de B_1 pour $h_s = 1$ m, $M = 1$ et $X_s = 0$ avec les configurations 1 et 10, et selon ASHRAE 2007 et ASHRAE 2011. Les résultats montrent que les dilutions estimées avec la configuration 10 sont près de 20 fois plus faibles qu'avec la configuration 1 (bâtiment isolé). Cela est dû au fait que le panache se trouve emprisonné entre deux bâtiments (panache sinueux). En outre, la zone de recirculation du bâtiment plus élevé en amont rapproche le panache du mur sous le vent du bâtiment en amont et

du toit du bâtiment émetteur. Une tendance similaire a été observée pour $h_s = 1$ m et $M = 3$, comme le montre la figure 4.4(b), bien que la dilution soit quelque peu plus élevée qu'avec $M = 1$ en raison d'une vitesse d'évacuation plus élevée. Cette tendance se maintient d'ailleurs avec une cheminée plus haute ($h_s = 3$ m). Pour $h_s = 5$ m et $M = 3$, les dilutions obtenues avec la configuration 10 et le bâtiment isolé deviennent comparables, sans doute parce que le panache s'élève suffisamment pour échapper à l'effet des bâtiments adjacents. Les valeurs d'ASHRAE 2007 se trouvent être inférieures aux données de soufflerie dans le cas du bâtiment isolé, alors que les estimations de la version 2011 se comparent bien aux données de soufflerie, mais seulement pour $M = 1$. Globalement, aucune des deux versions de l'ASHRAE ne permet de simuler les effets liés à la présence de bâtiments adjacents, pour des raisons expliquées précédemment.

Les cheminées centrales donnent lieu à une trajectoire de panache comparable à celle observée avec les configurations de bâtiments en amont précédemment abordées. De fait, les tendances relatives aux dilutions observées sur le mur sous le vent du bâtiment en amont (B_2) sont comparables à celles des configurations de bâtiments en amont (Figure 2.2).

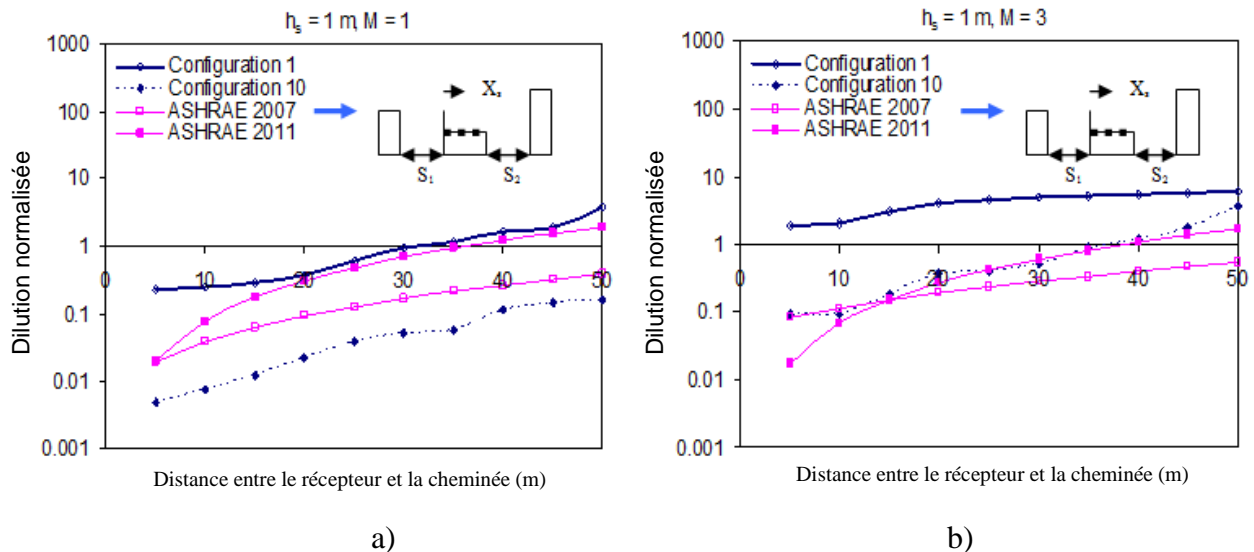


Figure 4.4 – Dilution normalisée sur le toit de B_1 pour $X_s = 0$ et $S_1 = S_2 = 20$ m : a) $M = 1$; b) $M = 3$.

4.5. Résumé

Ce chapitre traite principalement de quatre cas, à savoir :

- un bâtiment isolé (source) ;
- des bâtiments de géométrie différente placés en amont de la source ;
- des bâtiments de géométrie différente placés en aval de la source ;
- un bâtiment placé en amont et un autre placé en aval de la source ;

Les données de soufflerie issues des essais au gaz traceur avec différentes configurations ont été comparées aux estimations des modèles de l'ASHRAE. On a constaté que lorsque les bâtiments étaient placés dans la zone de recirculation du bâtiment émetteur, les bâtiments plus élevés en amont amenaient le panache à se déplacer vers le mur sous le vent du bâtiment en amont, ce qui avait pour effet d'accroître les concentrations dans le panache au mur sous le vent du bâtiment en amont et sur le toit du bâtiment émetteur. La présence d'un bâtiment plus élevé en aval empêchait le panache de se disperser, ce qui augmentait les concentrations sur le toit du bâtiment émetteur. La présence de bâtiments de part et d'autre de la source rendait le panache plus sinueux, ce qui en réduisait la dilution sur le toit du bâtiment émetteur. Plus l'espacement entre les bâtiments augmentait, plus la géométrie du panache s'orientait vers le bâtiment isolé. Les estimations d'ASHRAE 2007 sont trop prudentes, tandis que celles d'ASHRAE 2011 sont raisonnables, surtout pour de faibles valeurs de M . Les deux modèles de l'ASHRAE ne peuvent être utilisés que pour estimer la dilution du panache sur le toit de bâtiments isolés ; ils ne peuvent être utilisés pour estimer la dilution sur les surfaces de bâtiments adjacents.

5. UTILISATION DES RÉSULTATS DE RECHERCHE POUR AMÉLIORER LE MODÈLE DE L'ASHRAE

5.1. Introduction

Ce chapitre porte sur l'utilisation des données de soufflerie de la présente étude pour améliorer les estimations du modèle de l'ASHRAE (2007). Dans ce contexte, la dilution des émissions polluantes sur les surfaces de bâtiments adjacents est exprimée en termes de dilution sur le toit du bâtiment isolé, et la résultante est utilisée pour rectifier ASHRAE 2007. La section 5.2 porte sur la comparaison des données de soufflerie et des estimations fournies par les modèles de l'ASHRAE pour un bâtiment isolé. La section 5.3 décrit le regroupement de différentes configurations de bâtiments sur la base des données de dilution présentées au chapitre 4. Les comparaisons de dilution pour différentes configurations de bâtiments adjacents et pour le bâtiment isolé sont présentées à la section 5.4, suivies des rectifications proposées aux modèles de l'ASHRAE à la section 5.5. La section 5.6 traite de l'application du modèle rectifié de l'ASHRAE (2007) au problème spécifié, suivie d'un résumé du chapitre à la section 5.7.

5.2. Comparaison des estimations de l'ASHRAE et des données de soufflerie

La Figure 5.1 compare les données de soufflerie obtenues avec la configuration 1 (bâtiment isolé) aux estimations d'ASHRAE 2007 et 2011 pour $h_s = 1$ m, $M = 3$ et une cheminée placée du côté au vent (X_s) en termes de dilution normalisée. Les données de soufflerie indiquent que la dilution au bord sous le vent est un peu plus élevée que près de la cheminée en raison d'une plus grande dispersion du panache.

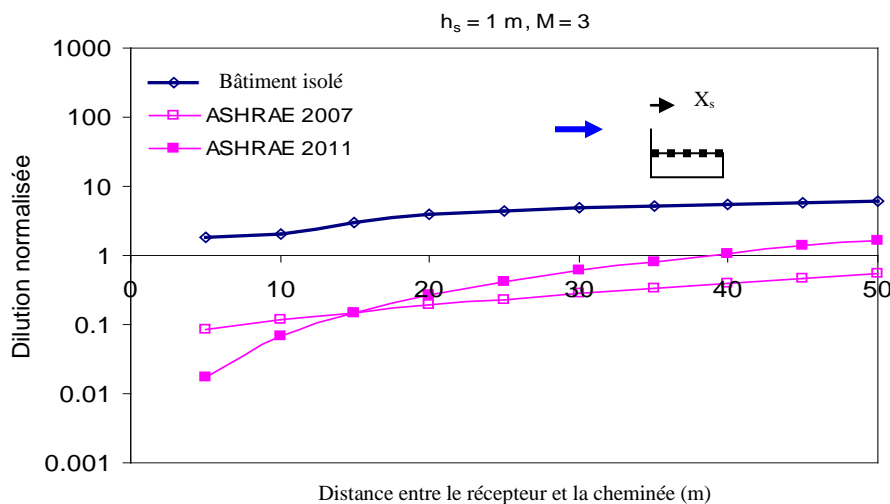


Figure 5.1 – Dilution normalisée sur le toit du bâtiment isolé pour $h_s = 1$ m et $M = 3$.

Les estimations de dilution d'ASHRAE 2007 sont près de 10 fois plus faibles que les données de soufflerie à tous les récepteurs, car les formules du modèle ne prennent en compte ni la

turbulence générée autour du bâtiment ni la topographie locale. De plus, ASHRAE 2007 fournit une faible estimation de l'élévation du panache, ce qui rend les estimations de dilution trop prudentes. Les estimations d'ASHRAE 2011 sont environ 5 fois plus faibles que les données de soufflerie près du bord sous le vent du bâtiment. Dans l'ensemble, les estimations d'ASHRAE 2011 sont légèrement meilleures que celles du modèle 2007 ; le modèle 2011 fournit cependant des estimations de dilution un peu plus faibles que le modèle 2007 à proximité immédiate de la cheminée en raison de faibles estimations relatives à l'élévation du panache.

5.3. Regroupement de différentes configurations de bâtiments

Le chapitre 4 fait état de 18 configurations de bâtiments testées en soufflerie : 2 cas de bâtiment isolé (source), 7 configurations de bâtiments en amont, 7 configurations de bâtiments en aval et 2 configurations de bâtiments adjacents comportant un bâtiment en amont et un bâtiment en aval de la source.

Compte tenu de la structure du panache du bâtiment isolé par rapport aux configurations de bâtiments adjacents (Figure 3.3), on constate généralement ce qui suit :

- a. les configurations de bâtiments en amont 2 et 3 génèrent une dilution comparable sur toutes les surfaces du bâtiment (Figure 4.1). Une tendance similaire a été observée avec les configurations de bâtiments en aval 2a et 3a, comme l'indique la Figure 4.3 ;
- b. la configuration 4 génère une dilution sur le toit du bâtiment émetteur comparable à celle observée dans le cas du bâtiment isolé (Figure 4.1). Les configurations 1 et 4a produisent également une dilution comparable sur le toit du bâtiment émetteur ;
- c. la présence d'un bâtiment de hauteur inférieure ou égale à celle du bâtiment émetteur en amont (ou en aval) de ce dernier n'a pas d'incidence significative sur la géométrie du panache ;
- d. la configuration 10, dans laquelle un bâtiment élevé se trouve de part et d'autre du bâtiment émetteur, peut être assimilée à une combinaison des configurations 2 et 5a d'après les résultats présentés au chapitre 4 (section 4.4). De même, la configuration 11 peut être assimilée à une combinaison des configurations 3a et 6.

Cela permet de simplifier les résultats présentés à la Figure 3.3 en ramenant les 18 configurations décrites à seulement 6, comme le montre la Figure 5.2.

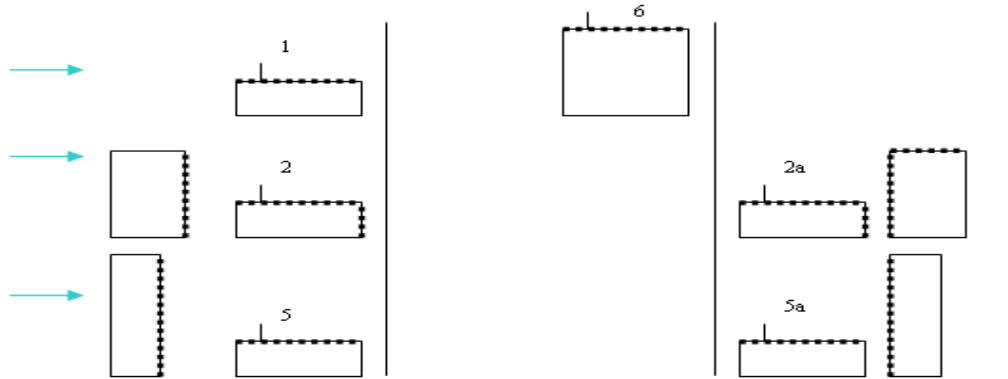


Figure 5.2 – Ensemble réduit de configurations de bâtiments fondé sur les caractéristiques du panache selon différents cas de proximité.

5.4. Comparaison des configurations de bâtiments adjacents avec le cas du bâtiment isolé

Cette section compare les estimations de dilution obtenues en soufflerie avec différentes configurations de bâtiments adjacents et avec le bâtiment isolé. Les surfaces de bâtiments comprennent le toit du bâtiment émetteur et du bâtiment sous le vent de même que les murs des bâtiments adjacents. L'estimation des facteurs propres à chaque surface de bâtiment fait l'objet d'un traitement distinct dans les sous-sections qui suivent.

5.4.1. Dilution sur le toit du bâtiment émetteur

Les facteurs ont été estimés séparément en ce qui concerne la dilution sur le toit du bâtiment émetteur « en présence d'un bâtiment plus élevé en amont » et « en présence d'un bâtiment plus élevé en aval » (Hajra, 2012). Les configurations 2, 3 et 5 (Figure 3.3) ont été prises en compte pour évaluer la dilution sur le toit du bâtiment émetteur dans le cas du bâtiment isolé (configuration 1). Pour évaluer et comparer la dilution entre différentes configurations, on a établi le rapport de la dilution au niveau du toit du bâtiment isolé sur la dilution au niveau du toit du bâtiment émetteur avec les configurations de bâtiments adjacents :

$$f1 = \frac{D_i}{D_a} \tag{5.1}$$

où

D_i représente la dilution sur le toit du bâtiment isolé, et

D_a , la dilution sur le toit du bâtiment émetteur avec les différentes configurations de bâtiments adjacents.

Dans le cas de la cheminée placée du côté au vent ($X_s = 0$), les comparaisons entre la dilution moyenne avec les configurations 2 et 3 et avec le bâtiment isolé (configuration 1) sont présentées à la figure 5.3. La distance entre le récepteur et le bord au vent (x) a été exprimée en fonction de la dimension au vent (L) du bâtiment émetteur. Dans le cas des configurations 2 et 3, une dilution moyenne a été retenue puisque les dilutions au niveau du toit étaient comparables (voir la Figure 4.1). Un facteur moyen ($f1$) a été calculé en divisant la dilution obtenue dans le cas du bâtiment isolé par la dilution moyenne produite par les configurations 2 et 3 à chacun des récepteurs, comme dans l'équation 5.1. Ce facteur a été calculé afin de pouvoir établir un rapport entre un bâtiment isolé et un bâtiment deux fois plus élevé en amont du bâtiment émetteur. Il convient de mentionner que dans ce cas précis, l'espace entre les bâtiments est de $0,4 L$.

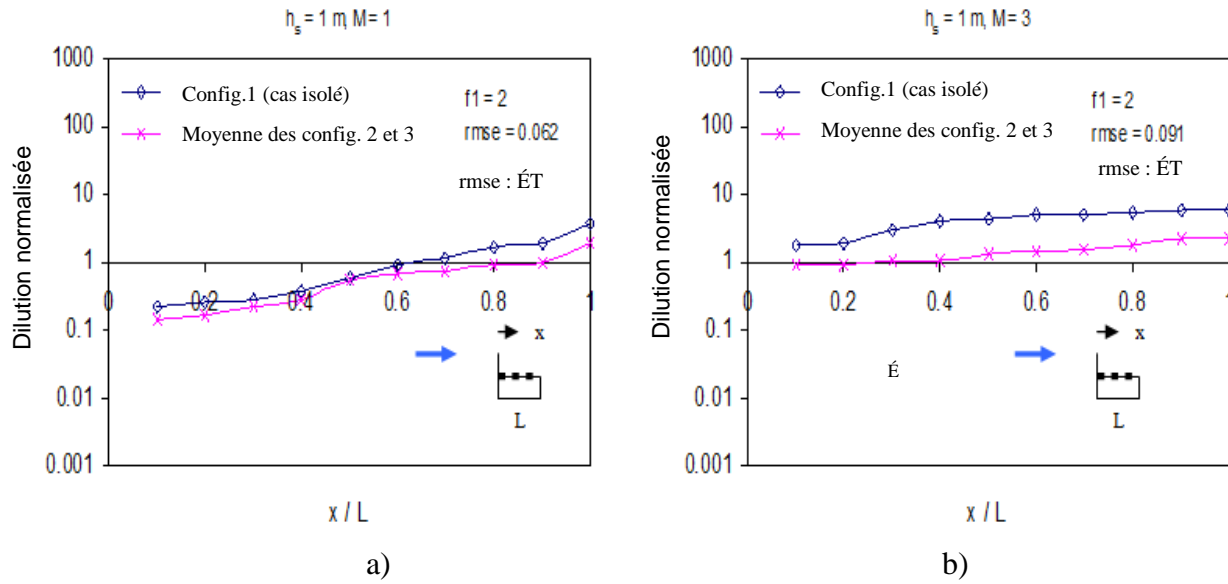


Figure 5.3 – Dilution normalisée sur le toit du bâtiment émetteur : a) $M = 1$; b) $M = 3$.

On retient du chapitre 4 que pour les configurations de bâtiments en amont à moins de $0,6 L$ du bâtiment émetteur et les configurations de bâtiments en aval à moins de $0,5 L$ du bâtiment émetteur, une modification de l'espacement entre les bâtiments n'a pas d'incidence significative sur la géométrie du panache. Le facteur $f1$ présenté à la Figure 5.3 résulte d'une minimisation de l'écart-type (ÉT), et se définit comme suit :

$$\acute{E}T = \frac{1}{n} \sqrt{\sum \left(1 - \frac{p_i}{m_i}\right)^2} \quad (5.2)$$

où :

n représente le nombre total de points d'échantillonnage, et

p_i et m_i , la dilution estimée et la dilution mesurée, respectivement, au récepteur i .

Dans le cas présent, la dilution mesurée (m_i) correspond aux données de soufflerie avec la configuration 1, et la dilution estimée (p_i) correspond à la dilution pondérée. À titre d'exemple,

dans la Figure 5.3(a), $f1 = 2$ a été déterminé en divisant la dilution estimée sur le toit du bâtiment isolé (configuration 1) par la dilution moyenne obtenue avec les configurations 2 et 3 à chacun des récepteurs, et en minimisant l'écart-type, calculé comme étant de 0,062.

Une approche semblable a été adoptée pour estimer les facteurs applicables aux configurations de bâtiments en aval. La sous-section qui suit décrit l'estimation des facteurs applicables sur le toit du bâtiment en aval à partir de la dilution mesurée du côté sous le vent du bâtiment émetteur.

5.4.2. Dilution sur le toit du bâtiment en aval

Cette section traite du rapport entre la dilution sur le toit du bâtiment en aval et la dilution du côté sous le vent du bâtiment émetteur. Ce rapport se définit comme suit :

$$f2 = \frac{D_d}{D_{de}} \tag{5.3}$$

où

D_d représente la dilution sur le toit du bâtiment en aval, et

D_{de} , la dilution du côté sous le vent du bâtiment émetteur.

Il convient de rappeler, d'après les résultats présentés au chapitre 4, qu'une dilution sur le toit du bâtiment en aval n'a pu être détectée que lorsque le bâtiment en aval était de la même hauteur ou jusqu'à deux fois plus élevé que le bâtiment émetteur. Les bâtiments en aval dont la hauteur est plus du double de celle du bâtiment émetteur empêchent une concentration du panache sur leur toit. On comprend aisément que la dilution du côté sous le vent du bâtiment émetteur puisse être étroitement liée à la dilution sur le toit du bâtiment en aval, puisqu'il s'agit de la surface du bâtiment émetteur la plus rapprochée du bâtiment en aval. Des facteurs de correspondance entre la dilution au mur d'un bâtiment adjacent et la dilution sur le toit du bâtiment émetteur ont également été calculés, comme expliqué ci-après.

5.4.3. Dilution au mur d'un bâtiment adjacent

Nous considérons ici la dilution au mur sous le vent du bâtiment en amont, la dilution au mur au vent du bâtiment en aval et la dilution au mur sous le vent du bâtiment de faible hauteur. Il est raisonnable d'établir un lien entre la dilution du côté sous le vent de la cheminée et la dilution au mur sous le vent du bâtiment en amont puisque ces surfaces de bâtiments sont rapprochées l'une de l'autre. Ainsi peut-on définir un facteur $f3$ comme suit :

$$f3 = \frac{D_s}{D_{lu}} \tag{5.4}$$

où

D_s représente la dilution sous le vent de la cheminée, et

D_{lu} , la dilution au mur sous le vent du bâtiment en amont.

Comme une dilution a été relevée au mur sous le vent du bâtiment émetteur avec les configurations de bâtiments aussi bien en amont qu'en aval, le rapport de la dilution au bord sous le vent du bâtiment émetteur sur la dilution au mur sous le vent du bâtiment émetteur se définit comme suit :

$$f_4 = \frac{D_{de}}{D_{le}} \quad (5.5)$$

où

D_{de} représente la dilution au bord sous le vent du bâtiment émetteur, et

D_{le} , la dilution au mur sous le vent du bâtiment émetteur.

De même, la dilution au niveau du mur au vent du bâtiment en aval peut être mise en rapport avec la dilution au bord sous le vent du bâtiment émetteur puisque ces surfaces de bâtiments sont rapprochées l'une de l'autre. Ainsi peut-on définir un facteur f_5 comme suit :

$$f_5 = \frac{D_{de}}{D_{wd}} \quad (5.6)$$

où

D_{de} représente la dilution au bord sous le vent du bâtiment émetteur, et

D_{wd} , la dilution au niveau du mur au vent du bâtiment en aval.

La Figure 5.4 compare la dilution moyenne normalisée obtenue avec les configurations 2 et 3, et la dilution du côté au vent du bâtiment émetteur. Les facteurs f_3 de la Figure 5.4 sont des facteurs moyens. Les Tableaux 5.1 et 5.2 résument les résultats relatifs à cette section.

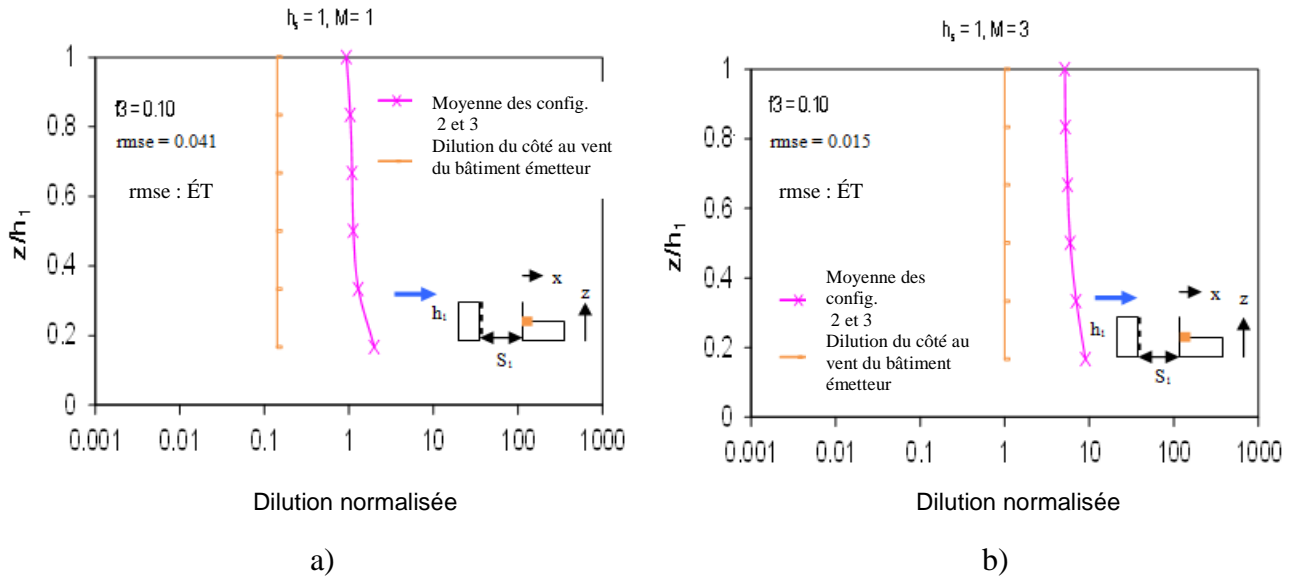
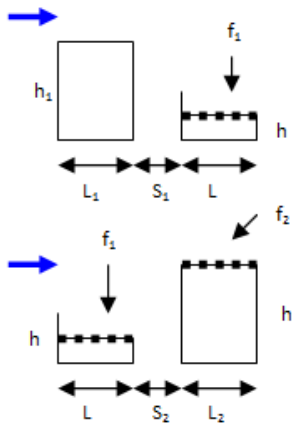


Figure 5.4 – Dilution normalisée au mur sous le vent du bâtiment en amont : a) M = 1 ; b) M = 3.

Tableau 5.1 – Dilution au niveau du toit sur une surface de bâtiment en fonction du bâtiment émetteur.



Configuration	X_s	h_s	M	Valeur du facteur (ÉT)
$h_1/h = 2$	0	1,2,3	1,2,3	$f1 = 2$ (0,033-0,091)
$h_1/h = 2$ ou 4	0,4 L	1,3	1,3	$f1 = 1,0$ (0,024-0,082)*
$h_2/h = 2$	0	1,2,3	1,2,3	$f1 = 2,0$ (0,018-0,033)
$h_2/h = 4$	0	1,2,3	1,2,3	$f1 = 12$ (0,046-0,065)
$h_2/h = 2$	0 ou 0,4 L	1,3	1,2,3	$f2 = 2,8$ (0,016-0,020)
$h_2/h = 1$	0 ou 0,4 L	1,3	1,2,3	$f2 = 1,12$ (0,011-0,036)

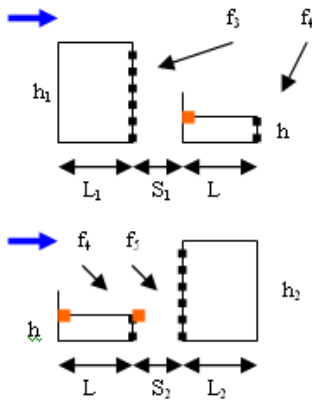
Notes

* Dilution détectée sous le vent de la cheminée seulement.

$f1$ = (dilution sur le toit du bâtiment isolé)/(dilution sur le toit du bâtiment émetteur avec une configuration de bâtiments adjacents)

$f2$ = (dilution sur le toit du bâtiment en aval)/(dilution au bord sous le vent du bâtiment émetteur)

Tableau 5.2 – Dilution au mur sur une surface de bâtiment en fonction du bâtiment émetteur.



Configuration	X_s	h_s	M	Valeur du facteur (ÉT)
$h_1/h = 2$	0	1,3	1,3	$f_3 = 0,10$ (0,041-0,055)
$h_1/h = 4$	0	1,3	1,3	$f_3 = 0,3$ (0,0431-0,0891)
$h_1/h = 4$	0,4 L	1	1,3	$f_3 = 0,15$ (0,0581)
$h_1/h = 4$	0,4 L	3	1,3	$f_3 = 0,25$ (0,073)
$h_1/h = h_2/h = 2$	0	1	1,2	$f_4 = 1$ (0,016-0,066)
$h_2/h = 2$ ou 4	0,4 L	1,3	1,3	$f_5 = 0,40$ (0,041-0,085)

Notes

f_3 = (dilution sous le vent de la cheminée)/(dilution au mur sous le vent du bâtiment en amont)

f_4 = (dilution au bord sous le vent du bâtiment émetteur)/(dilution au mur sous le vent du bâtiment émetteur)

f_5 = (dilution au bord sous le vent du bâtiment émetteur)/(dilution au mur au vent du bâtiment en aval)

Les tableaux de cette section ont principalement été dressés pour établir le rapport de la dilution au niveau du toit sur la dilution au niveau des surfaces du bâtiment émetteur et des bâtiments adjacents en fonction du bâtiment isolé. La section suivante porte sur la rectification du modèle de l'ASHRAE (2007).

5.5. Rectification du modèle de l'ASHRAE (2007)

Cette section traite des facteurs évalués en comparant les estimations d'ASHRAE 2007 avec les données expérimentales sur le bâtiment isolé. Ces facteurs, combinés à ceux décrits dans les Tableaux 5.1 et 5.2, peuvent être utilisés pour estimer la dilution du panache sur différentes surfaces de bâtiments. Les modèles de l'ASHRAE ont été appliqués aux deux bâtiments isolés testés en soufflerie – l'un de faible hauteur (15 m) et l'autre, de hauteur intermédiaire (30 m) –, et un facteur a ainsi été obtenu pour chaque modèle. Par exemple, la Figure 5.5 compare les données de soufflerie, les estimations d'ASHRAE 2007 et leurs valeurs rectifiées respectives pour $h_s = 1$ m et $X_s = 0$.

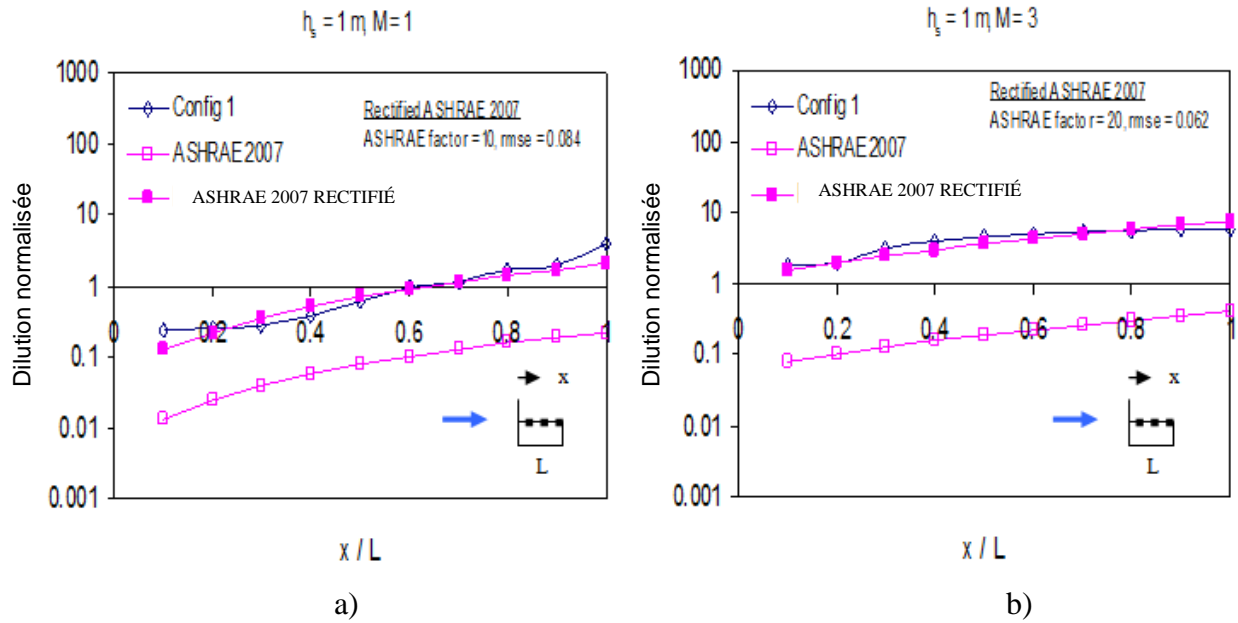


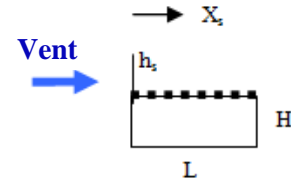
Figure 5.5 – Dilution normalisée sur le toit du bâtiment de faible hauteur :
a) M = 1 ; b) M = 3.

Un facteur moyen a été calculé pour chaque modèle en divisant les données de soufflerie par les valeurs respectives des modèles de l'ASHRAE et en minimisant l'écart-type. Un modèle rectifié a ensuite été obtenu en multipliant ce facteur par la valeur correspondante de l'ASHRAE. Comme l'indiquent les figures 5.5(a) et 5.5(b), pour $M = 1$ et $M = 3$, un facteur de 10 et un facteur de 20 ont respectivement été utilisés pour rectifier le modèle de l'ASHRAE (2007). Des facteurs ont aussi été calculés pour des valeurs plus élevées de h_s et de M , de même qu'avec une cheminée centrale ($X_s = 0,4 L$) sur le bâtiment de faible hauteur (15 m) et sur le bâtiment de hauteur intermédiaire (30 m).

On peut normalement s'attendre à ce que la corrélation soit faible entre les données expérimentales et les estimations du modèle (l'écart-type étant plus élevé) en pareille situation de modélisation à microéchelle. Par exemple, Stern et Yamartino (2001) ont obtenu des corrélations allant de 0,637 à 0,888 et un écart-type variant entre 0,041 et 1,341 avec un modèle de dispersion à microéchelle dans un canyon urbain visant à estimer les concentrations dues à l'écoulement de la circulation. Les résultats obtenus ont révélé que les estimations d'ASHRAE 2007 étaient plus prudentes que celles de la version 2011, d'où ce chapitre axé sur la rectification du modèle de 2007 (Tableau 5.3). Les facteurs obtenus à partir des Tableaux 5.1, 5.2 et 5.3 sont ci-après appliqués aux données de la présente étude et d'études antérieures afin de rectifier les estimations d'ASHRAE 2007.

Tableau 5.3 – Facteurs utilisés pour rectifier ASHRAE 2007 dans le cas d'un bâtiment isolé.

X_s	h_s	M	ASHRAE 2007	
			Facteur ASHRAE (bâtiment de faible hauteur – 15 m)	Facteur ASHRAE (bâtiment de hauteur intermédiaire – 30 m)
0	1,3,5	1	10 (0,084-0,092)	10 (0,085-0,099)
0	1,3	2	15 (0,088-0,091)	10 (0,081-0,085)
0	1,3,5	3	20 (0,044-0,083)	10 (0,072-0,094)
0,4 L	1	1,2,3	10 (0,081-0,098)	10 (0,091-0,098)
0,4 L	3	1,2,3	10 (0,094-0,099)	20 (0,092-0,099)
0,4 L	5	1	10 (0,051)	10 (0,096)
0,4 L	5	3	10 (0,093)	20 (0,095)



5.6. Application du modèle rectifié de l'ASHRAE (2007) à la présente étude

Cette approche a été appliquée à un bâtiment en amont deux fois plus élevé que le bâtiment de faible hauteur (configuration 2) pour $h_s = 1$ m et $X_s = 0$, comme illustré à la Figure 5.6. Dans ce cas, les valeurs d'ASHRAE 2007 ont été obtenues pour le bâtiment isolé (valeurs identiques à celles de la Figure 5.5) et multipliées par le facteur approprié. Le facteur a été déterminé à partir des Tableaux 5.1 et 5.3. Par exemple, pour $h_1/h = 2$, $X_s = 0$, $h_s = 1$ m et $M = 1$, le Tableau 5.1 donne $f_1 = 2$. Il convient de rappeler que ce facteur a été calculé en divisant la dilution sur le toit du bâtiment isolé par celle de la configuration de bâtiments en amont. Pour $X_s = 0$, $h_s = 1$ m et $M = 1$, le Tableau 5.3 renvoie un facteur ASHRAE de 10, soit le rapport de la dilution en soufflerie avec le bâtiment isolé sur les valeurs d'ASHRAE 2007. En conséquence, pour établir une correspondance entre les valeurs d'ASHRAE 2007 et les données de dilution en soufflerie dans le cas de la configuration 2, il faut appliquer un facteur de 5, obtenu en divisant 10 par 2, comme dans la Figure 5.6(a). Les résultats d'ASHRAE 2007 rectifiés se comparent bien aux données expérimentales à tous les récepteurs. La Figure 5.7 présente un schéma illustrant les calculs effectués pour produire les données de la Figure 5.6(a).

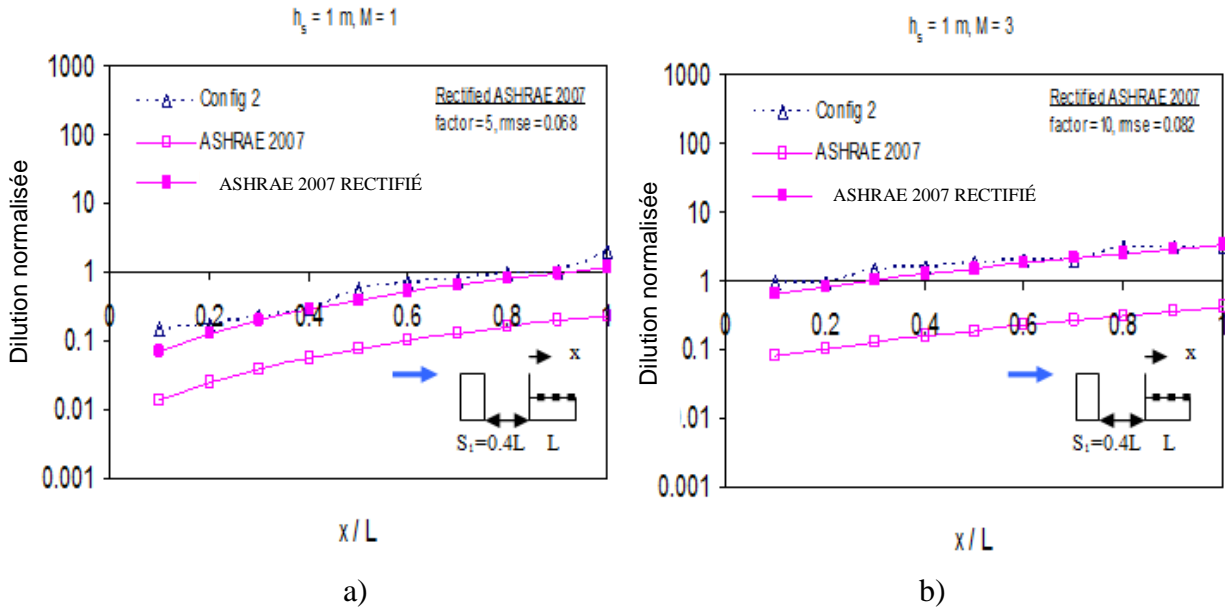


Figure 5.6 – Dilution normalisée sur le toit du bâtiment de faible hauteur : a) M = 1 ; b) M = 3.

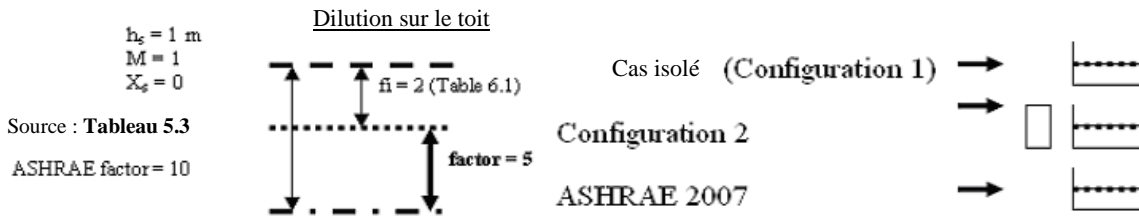
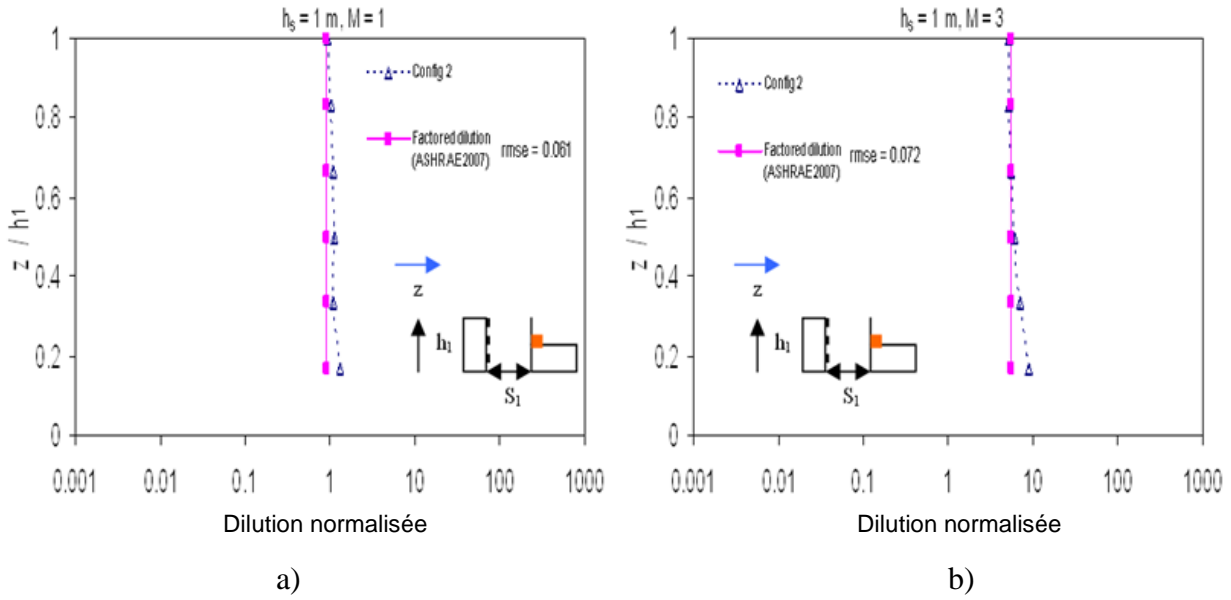


Figure 5.7 – Schéma illustrant le calcul du facteur utilisé pour générer les données présentées à la Figure 5.6(a).

La Figure 5.8 illustre la dilution au mur sous le vent du bâtiment en amont avec la configuration 2 pour $h_s = 1$ m, $X_s = 0$ et $S_1 = 0,4$ L. Il convient de mentionner que les facteurs sont applicables aux configurations de bâtiments adjacents espacés de moins de $0,6$ L dans le cas des configurations de bâtiments en amont, et de moins de $0,5$ L dans le cas des configurations de bâtiments en aval. Au-delà de $0,6$ L, la dilution sur le toit du bâtiment émetteur peut être estimée en utilisant les facteurs applicables au bâtiment isolé (Tableau 5.3). La dilution au mur sous le vent du bâtiment en amont est estimée à partir de la dilution sur le toit mesurée au récepteur immédiatement sous le vent de la cheminée. Par exemple, selon la Figure 5.6(a), pour $h_s = 1$ m et $M = 1$, la valeur de dilution fournie par ASHRAE 2007 rectifié à $0,1$ L est de $0,095$. D'après le Tableau 5.2, $f_3 = 0,1$ pour $h_1/h = 2$. Rappelons que f_3 correspond au rapport de la dilution au niveau du toit sous le vent de la cheminée sur la dilution au mur sous le vent du bâtiment en amont. Ainsi, $0,095$ divisé par $0,1$ donne environ $0,95$ comme valeur de dilution pondérée avec le modèle rectifié de l'ASHRAE (2007) (Figure 5.8 (a)).



**Figure 5.8 – Dilution normalisée au mur sous le vent du bâtiment en amont :
a) $M = 1$; b) $M = 3$.**

5.7. Résumé

Ce chapitre traite de la méthode employée pour rectifier le modèle de l'ASHRAE (2007) en ce qui a trait à la détermination de la dilution des émissions polluantes sur diverses surfaces de bâtiment. Il s'agit d'un processus en deux étapes :

- établir un rapport entre les estimations de dilution obtenues avec les configurations de bâtiments adjacents et dans le cas du bâtiment isolé (Tableaux 5.1 et 5.2) ;
- comparer les valeurs de dilution d'ASHRAE 2007 pour le bâtiment isolé aux données de soufflerie de la présente étude (Tableau 5.3).

Les données fournies par la rectification d'ASHRAE 2007 se comparent bien aux résultats expérimentaux de la présente étude (p. ex. Figure 5.6). L'Annexe F présente d'autres évaluations probantes de l'approche axée sur la rectification d'ASHRAE 2007 à l'aide de données expérimentales de Wilson *et al.* (1998) et de Stathopoulos *et al.* (2004).

Le chapitre qui suit présente des lignes directrices sur l'implantation sécuritaire de cheminées et de prises d'air sur différentes surfaces de bâtiments, selon les résultats de la présente étude.

6. LIGNES DIRECTRICES SUR L'IMPLANTATION SÉCURITAIRE DE CHEMINÉES ET DE PRISES D'AIR SUR DIFFÉRENTES SURFACES DE BÂTIMENTS

6.1. Généralités

Cette étude portait sur l'examen des caractéristiques de la dispersion en champ proche des émissions polluantes de cheminées de toit en présence de bâtiments adjacents au moyen d'essais au gaz traceur en soufflerie. Les estimations de dilution d'ASHRAE 2007 se sont avérées trop prudentes dans tous les cas, tandis que celles d'ASHRAE 2011 se sont avérées raisonnables dans certains cas. Des efforts ont en outre été déployés pour rectifier les estimations d'ASHRAE 2007 dans le cas du bâtiment isolé et pour étendre leur application aux surfaces de bâtiments adjacents. Sur la base des résultats expérimentaux, ce chapitre présente des lignes directrices sur l'implantation sécuritaire de cheminées et de prises d'air sur différentes surfaces de bâtiments.

6.2. Lignes directrices sur l'implantation de cheminées et de prises d'air

Cette section présente, à l'intention des ingénieurs, certaines lignes directrices sur l'implantation sécuritaire de cheminées et de prises d'air sur un bâtiment. L'emplacement approprié des cheminées et des prises d'air sur une surface de bâtiment dépend de plusieurs facteurs, tels que la topographie locale, la turbulence et la nature des polluants émis par la cheminée. La Figure 6.1 présente des lignes directrices distinctes pour chaque configuration de bâtiments.

6.2.1. Configurations de bâtiments en amont

Les configurations de bâtiments testées en soufflerie consistaient en configurations de bâtiments plus élevés en amont et en une configuration de bâtiment en amont de la même hauteur que le bâtiment émetteur.

Bâtiment plus élevé en amont

1. Lorsque l'espacement entre les bâtiments dépasse la longueur de la zone de recirculation du bâtiment en amont, les prises d'air peuvent aussi bien être placées sur le mur sous le vent du bâtiment en amont qu'à proximité du bord sous le vent du bâtiment émetteur pour une hauteur de cheminée et une valeur de M données.
2. Lorsque le bâtiment émetteur se trouve dans la zone de recirculation du bâtiment en amont, les prises d'air ne doivent pas être placées au vent de la cheminée ; elles peuvent toutefois être placées à proximité du mur sous le vent du bâtiment émetteur.

Bâtiment en amont d'une hauteur moindre ou comparable à celle du bâtiment émetteur

1. Lorsqu'un bâtiment en amont d'une hauteur moindre ou comparable à celle du bâtiment émetteur se trouve à une distance qui dépasse la longueur de la zone de recirculation du bâtiment en amont, quels que soient la hauteur et l'emplacement de la cheminée, les prises d'air peuvent être placées sur le toit du bâtiment en amont.
2. Lorsqu'un bâtiment se trouve dans la zone de recirculation du bâtiment en amont, pour un emplacement de cheminée donné, les prises d'air peuvent aussi bien être placées sur le mur sous le vent du bâtiment émetteur qu'à proximité du mur au vent du bâtiment en amont.

6.2.2. Configurations de bâtiments en aval

Des lignes directrices sur l'implantation de cheminées et de prises d'air sont ici présentées pour des configurations de bâtiments en aval d'une hauteur supérieure ou comparable à celle du bâtiment émetteur, puisque la structure du panache ne varie pas significativement d'un cas à l'autre.

Bâtiment en aval d'une hauteur supérieure ou comparable à celle du bâtiment émetteur

1. Lorsqu'un bâtiment en aval se trouve à une distance inférieure à la longueur de la zone de recirculation du bâtiment émetteur, les prises d'air ne doivent pas être placées à proximité du mur sous le vent du bâtiment émetteur.
2. Lorsque l'espacement entre les bâtiments dépasse la longueur de la zone de recirculation du bâtiment émetteur, les prises d'air peuvent être placées sur l'une ou l'autre des surfaces de bâtiments.
3. Quelle que soit la valeur de h_s et de M , et quel que soit l'espacement entre les bâtiments, il faut éviter de placer les prises d'air immédiatement sous le vent d'une cheminée peu élevée à vitesse d'évacuation lente (p. ex. $h_s = 1$ m et $M = 1$) en raison d'un effet de rabattement accru du panache en présence de la cheminée ; il est plus prudent de les placer au vent de la cheminée.

6.2.3. Bâtiments en amont et en aval du bâtiment émetteur

Une configuration dans laquelle un bâtiment se trouve en amont et un autre en aval du bâtiment émetteur a une incidence sur le mur sous le vent du bâtiment en amont, sur le toit du bâtiment émetteur ainsi que sur le mur au vent et sur le toit du bâtiment en aval. Comme le montre la Figure 3.3, la configuration 10 consistait en un bâtiment de faible hauteur (B_1), un bâtiment plus élevé en amont (B_2) et un bâtiment plus élevé en aval (B_5), tandis que la configuration 11 consistait en un bâtiment en amont (B_2) de la même hauteur que le bâtiment émetteur (B_6) et un bâtiment plus élevé (B_5) en aval du bâtiment émetteur (B_6).

Avec ces configurations, les lignes directrices qui suivent peuvent être adoptées (la Figure 6.1 présente un résumé schématique des lignes directrices sur l'implantation sécuritaire des prises d'air).

1. Dans le cas de la configuration 10, si l'espacement entre les bâtiments est inférieur à la longueur de la zone de recirculation du bâtiment plus élevé en amont, il faut éviter de placer les prises d'air au vent de la cheminée, quelle que soit la valeur de h_s et de M ; il serait plus prudent de les placer à proximité du mur sous le vent du bâtiment en aval.
2. Dans le cas de la configuration 11, les prises d'air peuvent être placées sur des surfaces de bâtiments au vent de la cheminée et à proximité du mur sous le vent du bâtiment plus élevé en aval, quelle que soit la valeur de h_s et de M , et quel que soit l'espacement entre les bâtiments.
3. En général, les lignes directrices applicables à une configuration comportant un bâtiment plus élevé en amont et un bâtiment plus élevé en aval sont aussi applicables à la configuration 10.

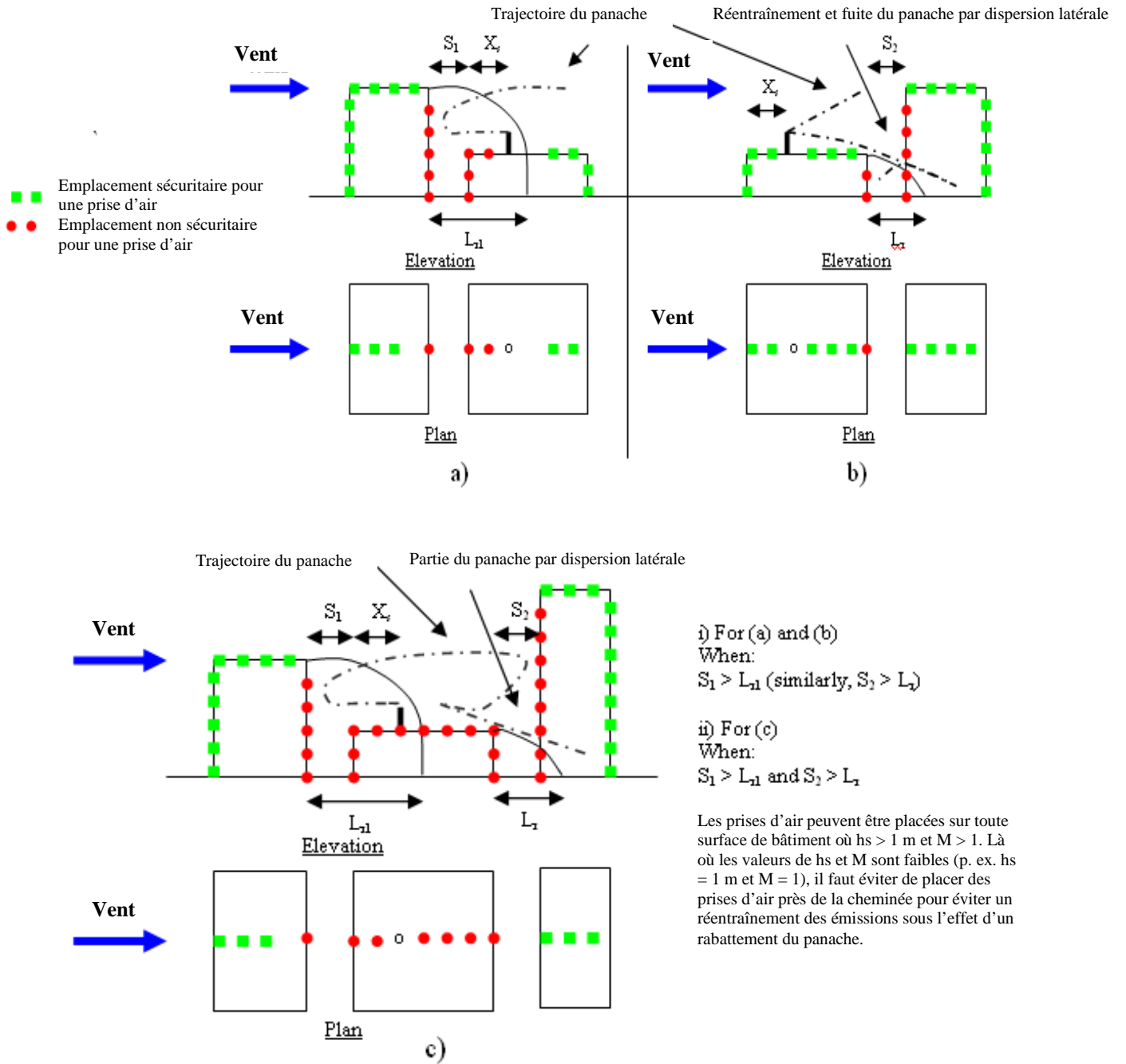


Figure 6.1 – Représentation schématique des emplacements de prises d’air appropriés : a) configurations de bâtiments en amont ; b) configurations de bâtiments en aval ; c) bâtiments en amont et en aval d’un bâtiment émetteur.

7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS POUR DE FUTURES RECHERCHES

7.1. Résumé

Ce rapport porte essentiellement sur une étude détaillée en soufflerie concernant la dispersion des émissions polluantes en champ proche avec différentes configurations de bâtiments adjacents. Dans ce contexte, la concentration de polluants a été mesurée sur différentes surfaces de bâtiments, et l'effet de divers paramètres a été étudié, notamment h_s , M , l'espacement entre les bâtiments, X_s et la géométrie du bâtiment émetteur ainsi que des bâtiments adjacents. La comparaison des résultats obtenus avec les modèles de l'ASHRAE a révélé que ces derniers étaient moins applicables aux configurations de bâtiments adjacents qu'à un bâtiment isolé. Il en a résulté des suggestions visant à rectifier le modèle de l'ASHRAE (2007) pour obtenir des estimations de dilution raisonnables sur différentes surfaces de bâtiments. Des lignes directrices sur l'implantation sécuritaire de cheminées et de prises d'air ont également été formulées sur la base des résultats de cette étude.

La présente étude s'inscrit directement dans l'axe des objectifs de l'IRSST concernant l'amélioration de la santé et de la sécurité en milieu de travail. De fait, on s'attend à ce qu'une implantation plus judicieuse des bouches d'entrée par rapport aux bouches de sortie des laboratoires, des hôpitaux et d'autres bâtiments industriels minimise le risque de réingestion de fumées toxiques et d'autres polluants émis par les cheminées de toit, et empêche une détérioration de la qualité de l'air intérieur. Les résultats de l'étude contribueront à l'amélioration des normes et des règlements relatifs à la conception des bâtiments, et par conséquent de la sécurité et du bien-être des travailleurs à l'intérieur des bâtiments.

7.2. Conclusions

Les conclusions à tirer de cette étude ont été divisées en trois volets détaillés dans les sous-sections qui suivent.

7.2.1. Étude en soufflerie

1. Les résultats de cette étude indiquent que lorsque le bâtiment émetteur se trouve à une distance inférieure à la longueur de la zone de recirculation d'un bâtiment plus élevé en amont, une variation de la dimension au vent du bâtiment adjacent n'a qu'un effet négligeable sur la dilution du panache au niveau des différentes surfaces du bâtiment.
2. La présence d'un bâtiment plus élevé en aval à une distance inférieure à la longueur de la zone de recirculation du bâtiment émetteur (L_r) a pour effet d'emprisonner le panache à l'intérieur de L_r , ce qui a une incidence sur le mur sous le vent du bâtiment émetteur et sur le mur au vent du bâtiment en aval.

3. Quelle que soit la valeur de h_s et de M , et quel que soit l'espacement entre les bâtiments, la présence d'un étroit bâtiment adjacent (en amont ou en aval) n'a qu'une influence minime sur la trajectoire du panache par rapport à des bâtiments adjacents plus larges. En pareil cas, le bâtiment émetteur correspond à un bâtiment isolé.
4. La dilution sur le toit du bâtiment émetteur augmente graduellement (vers le niveau du bâtiment isolé) lorsque l'espacement entre les bâtiments dépasse la longueur de la zone de recirculation du bâtiment en amont.
5. Les bâtiments de hauteur moindre ou comparable à celle du bâtiment émetteur ont une influence minime sur les caractéristiques du panache, quelle que soit la valeur de h_s et de M , et quel que soit l'espacement entre les bâtiments.
6. La présence d'un bâtiment plus élevé en amont et d'un bâtiment plus élevé en aval augmente la concentration de polluant sur le toit du bâtiment émetteur en raison du va-et-vient du panache.

7.2.2. Dispositions de l'ASHRAE

1. Les estimations d'ASHRAE 2007 fournissent des dilutions plus faibles que les résultats expérimentaux, et sont donc trop prudentes. Les estimations d'ASHRAE 2011 se comparent bien aux résultats obtenus pour de faibles valeurs de M ($M < 3$) dans le cas d'un bâtiment isolé.
2. Dans l'ensemble, les dispositions de l'ASHRAE sont moins adaptées aux configurations de bâtiments multiples.
3. Les dispositions actuelles de l'ASHRAE doivent être révisées. Plus précisément, les formules doivent intégrer les effets liés à la présence de bâtiments voisins, et d'autres formules doivent être développées pour estimer la dilution sur les surfaces de bâtiments adjacents.

7.2.3. Approche axée sur la rectification d'ASHRAE 2007

1. L'approche axée sur la rectification d'ASHRAE 2007 utilise les résultats de soufflerie de la présente étude et les estimations de l'ASHRAE pour proposer certains facteurs susceptibles d'être appliqués pour obtenir des estimations de dilution réalistes.
2. Les facteurs en question peuvent être appliqués pour estimer la dilution sur les surfaces du bâtiment émetteur et de bâtiments adjacents, et ils fournissent des estimations raisonnables par rapport à la présente étude et aux études expérimentales antérieures.

7.2.4. Considérations en matière de santé et sécurité au travail

ASHRAE 2011 propose une vitesse d'évacuation d'au moins 10 m/s pour favoriser un taux de dilution élevé, quelle que soit la nature des émissions (fumées de laboratoire ou émissions d'immeubles résidentiels). Les résultats de la présente étude indiquent qu'avec des configurations de bâtiments adjacents, une hauteur de cheminée de 3 m (ou plus) produit, pour $M > 2$, une dilution élevée dont l'incidence est moindre dans le sillage du bâtiment émetteur et sur les surfaces d'un bâtiment adjacent. Les futures versions du modèle de l'ASHRAE doivent précisément établir les critères requis pour assurer la sécurité du personnel de laboratoire et des occupants d'immeubles résidentiels. Certains de ces critères pourraient notamment avoir trait à la nature et aux taux de concentration acceptables des émissions polluantes d'un bâtiment, à l'espacement entre les bâtiments et à l'emplacement des prises d'air sur les surfaces d'un bâtiment pour éviter une réingestion du panache (p. ex. la Figure 6.1). Selon Hori (2012), « *Sur le plan de la santé et de la sécurité au travail, une gestion déficiente et des règlements inopérants sont à l'origine de problèmes qui ont engendré de véritables catastrophes. Ironiquement, ces catastrophes ont amené les administrateurs et les responsables gouvernementaux à mettre en œuvre des changements efficaces qui ont globalement contribué à améliorer le milieu de travail. Peut-être serait-il judicieux d'envisager des études ultérieures sur de tels effets positifs, au-delà des efforts de prévention de problèmes physiques et psychologiques en milieu de travail.* »

7.3. Recommandations pour de futures recherches

La présente étude porte sur la dispersion en champ proche des émissions polluantes de cheminées de toit avec différentes configurations de bâtiments adjacents. De futures recherches pourraient notamment aborder les questions qui suivent.

- a. Des essais en soufflerie pourraient être effectués avec des bâtiments émetteurs ayant des structures sur le toit en présence de bâtiments adjacents, la présente étude n'ayant porté que sur des bâtiments au toit plat. La présence de structures sur un toit est réputée accroître les concentrations au niveau du toit dans le cas de bâtiments isolés (Gupta *et al.*, 2012).
- b. Les résultats de la présente étude se limitent à une condition de stabilité quasi neutre. On sait que la stabilité atmosphérique peut influencer sur le phénomène de la dispersion des effluents dans le cas d'un bâtiment isolé (Li et Meroney, 1983). Par conséquent, il serait intéressant d'étudier l'effet de la dispersion des émissions polluantes en champ proche sous différentes conditions atmosphériques dans une soufflerie à stratification thermique.
- c. Les résultats de cette étude se rapportent à la présence d'un seul bâtiment en amont ou en aval du bâtiment émetteur. Cependant, dans un environnement urbain densément peuplé, on est plus susceptible de trouver des ensembles de bâtiments adjacents. De futures recherches devraient donc être menées avec un plus grand nombre de bâtiments dans le voisinage de la source de manière à simuler un environnement plus réaliste.

- d. Très peu d'études au gaz traceur en soufflerie (dont Gromke *et al.*, 2008) ont examiné les effets de la présence d'arbres sur la dispersion en champ proche. Une étude détaillée en ce sens pourrait s'avérer d'un grand intérêt pour de futurs expérimentateurs.

RÉFÉRENCES

- ASHRAE 1999. Chapter 43, Building Air Intake and Exhaust Design. ASHRAE Applications Handbook American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.
- ASHRAE 2003. Chapter 44. Building Air Intake and Exhaust Design. ASHRAE Applications Handbook, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.
- ASHRAE 2007. Chapter 44, Building Air Intake and Exhaust Design. ASHRAE Applications Handbook, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.
- ASHRAE 2011. Chapter 45, Building Air Intake and Exhaust Design. ASHRAE Applications Handbook, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.
- Bahloul, A., Stathopoulos, T., Chavez, M., Hajra, B. (2014). The Effect of Upstream and Downstream Buildings on Dispersion of Effluents: A Computational Fluid Dynamics (CFD) approach. Research report (R-849), *Institut de recherche Robert Sauvé en santé et en sécurité du travail*, Montreal, Canada. Available online at <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-849.pdf>. [Last visit: June 2014].
- Blocken, B., Stathopoulos, T., Saathoff, P., Wang, X. 2008. Numerical evaluation of pollutant dispersion in the built environment: comparisons between models and experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1817–1831.
- Briggs, G.A. 1984. Plume rise and buoyancy effects in Atmospheric Science and Power Production. Randerson. Ed, U.S. Department of energy D.O.E./TIC-27601 (DE 84005177), Washington, D.C., USA.
- Chang, C.H., Meroney, R.N. 2000. Numerical and Physical Modeling of Bluff Body flow and Dispersion in Urban Street Canyons. 4th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, Ruhr-University, Bochum, Germany, September - 11-14, 4 pages.
- Chang, C.H., Meroney, R.N. 2001. Numerical and Physical Modeling of Bluff Body flow and Dispersion in Urban Street Canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89, 1325-1334.
- Chang, C.E., Meroney, R.N. 2003. Concentration and Flow Distributions in Urban Street Canyons: Wind Tunnel and Computational Data, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, 1141-154.
- Chavez, M., Hajra, B., Stathopoulos, T., Bahloul, A. 2011. Near-field pollutant dispersion in the built environment by CFD and wind tunnel simulations. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99, 330-339.

- Chavez, M., Hajra, B., Stathopoulos, T., Bahloul, A. 2012. Assessment of near-field pollutant dispersion: Effect of upstream buildings. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104–106, 509–515.
- Cimoreli, A.J., Perry, S.G., Venkatram, A., Weil, J.C., Paine, R.J., Wilson, R.B., Lee, R.F., Peters, W.D., Brode, R.W. 2005. AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part I: General model formulation and boundary layer characterisation. *Applied Meteorology*, 44, 682-693.
- Counihan J. 1975. Adiabatic atmospheric boundary layers: a review and analysis of data from the period 1880- 1972. *Atmospheric Environment* 9, 871-905.
- ESDU, 1974. Characteristics of atmospheric turbulence near the ground, part I: Definitions and general information. Engineering Science Data Unit, no. 74030, London, UK.
- Gromke, C., Buccolieri, R., Di Sabatino, S., Ruck, B. 2008. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations -evaluation of CFD data with experimental data. *Atmospheric Environment*, 42, 8640 - 8650.
- Gupta, A., Stathopoulos, T., Saathoff, P. 2012. Evaluation of ASHRAE Dilution Models to Estimate Dilution from Rooftop Exhausts. *ASHRAE Transactions*, 118, part 1, 2-20.
- Hajra, B., Stathopoulos, T., Bahloul, A. 2010. Assessment of pollutant dispersion from rooftop stacks: ASHRAE, ADMS and Wind Tunnel Simulation. *Building and Environment*, 45, 2768-2777.
- Hajra, B., Stathopoulos, T., Bahloul, A. 2011. The effect of upstream buildings on near-field pollutant dispersion in the built environment. *Atmospheric Environment*, 45, 4930-4940.
- Hajra, B., Stathopoulos, T. 2012. A wind tunnel study of the effect of downstream buildings on near-field pollutant dispersion. *Building and Environment*, 52, 19-31.
- Hajra, B. 2012. A Comprehensive Experimental Study of the Effects of Adjacent Buildings on Near-Field Pollutant Dispersion. PhD Thesis, Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, Canada. Available online at http://spectrum.library.concordia.ca/974833/4/Hajra_PhD_F2012.pdf. [Last visit: March 10, 2014].
- Hajra, B., Stathopoulos, T., Bahloul, A. 2013. A wind tunnel study of the effects of adjacent buildings on near-field pollutant dispersion from rooftop emissions in an urban environment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 119, 133-145.
- Halitsky, J. 1963. Gas Diffusion near buildings. *ASHRAE Transactions*, 69, 464-484.
- Holmes, N.S., Morawska, L. 2006. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. *Atmospheric Environment*, 40, 5902–5928.
- Hori, M. 2012. The trend and issues of occupational safety and health in Japan. *Procedia Engineering* 43, 610 – 614
- Hunt, J.C.R., Robins, A.G., 1982. A model for assessing dispersion of plumes from sources in the vicinity of cuboid shaped buildings. In: *Proceedings of the EUROMECH Conference on Surface Mounted Bluff Bodies in Turbulent Boundary Layers*, Lisbon.

- Li, W.W., Meroney, R.N. 1983. Gas dispersion near a cubical model building part II. Concentration fluctuation measurements. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 12, 35-47.
- Liu G, Xuan J, Park S. 2003. A new method to calculate wind profile parameters of the wind tunnel boundary layer. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91, 55-62.
- Meroney, R.N. Rafailidis, S, Pavageau, M. 1996. Dispersion in idealized urban street canyons, *Air Pollution Modeling and Its Application XL, NATO Challenges of Modern Society*, Springer publisher, New York, 21, 451-458.
- Meroney, R.N. 2010. CFD Prediction of Dense Gas Clouds Spreading in a Mock Urban Environment, Proceedings of the 5th International Symposium on Computational Wind Engineering, May 23-27, Chapel Hill, NC, USA, 8 pages.
- Petersen, R.L., Le-Compte, J. 2002. Exhaust contamination of hidden versus visible air intakes – Final Report. ASHRAE Research Project 1168-TRP, American Society of Heating, Refrig. and Air-Cond. Eng., Inc., Atlanta, USA.
- Saathoff, P.J., Stathopoulos, T., Dobrescu, M. 1995. Effects of model scale in estimating pollutant dispersion near buildings. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54/55, 549-559.
- Saathoff, P., Gupta, A., Stathopoulos, T., Lazure, L. 2009. Contamination of Fresh Air Intakes Due to Downwash from a Rooftop Structure. *Air & Waste Management Association*. 59, 343–353.
- Snyder W.H. 1981. Guidelines for fluid modelling of atmospheric diffusion. EPA office of Air quality, planning and standards, Research triangle park, NC, EPA-600/8-81-009.
- Stathopoulos, T., Lazure, L., Saathoff, P.J., Gupta, A. 2004. The effect of stack height, stack location and rooftop structures on air intake contamination A laboratory and full-scale study. Research report (R-392), *Institut de recherche Robert Sauvé en santé et en sécurité du travail*, Montreal, Canada. Available online at <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-392.pdf>. [Last visit: March 10, 2014].
- Stathopoulos, T., Hajra, B., Bahloul, A. 2008. Analytical evaluation of dispersion of exhaust from rooftop stacks on buildings. Research report (R-576), *Institut de recherche Robert Sauvé en santé et en sécurité du travail*, Montreal, Canada. Available online at <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-576.pdf>. [Last visit: March 10, 2014].
- Stern, R., Yamartino, R.J. 2001. Development and first evaluation of micro-calgrid: a 3-D, urban-canopy-scale photochemical model. *Atmospheric Environment*, 35, 149-165.
- Tominaga, Y, Stathopoulos, T. 2009. Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: Comparison of various types of k-ε models. *Atmospheric Environment*, 43 3200–3210.
- Turbulent Flow Instrumentation. 2008. Series 100 Cobra Probe Manual, Turbulent Flow Instrumentation, pages- 1-13.

- Wedding, J.B., Lombardi, D.J. and Cermak, J.E., 1977: A wind-tunnel study of gaseous pollutants in city street canyons, *Air Pollution Control Association*, 27, 557-566.
- Wilson, D.J., Nettekville, D.D.J. 1976. Influence of downwind high-rise buildings on stack design, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 26, 976-980.
- Wilson, D.J. 1979. Flow patterns over flat-roofed buildings and application to exhaust stack design. *ASHRAE Transactions*, 85, part 2, 284-295.
- Wilson, D.J., Winkel, G. 1982. The effect of varying exhaust stack height on contaminant concentration at roof level. *ASHRAE Transactions*, 88, part 1, 515-533.
- Wilson, D.J. 1983. A design procedure for estimating air intake contamination from nearby exhaust vents. *ASHRAE Transactions*, 89, part 2, 136-150.
- Wilson, D.J., Chui, E. 1985. Influence of exhaust velocity and wind incidence angle on dilution from roof vents. *ASHRAE Transactions*, 91, 1693-1706.
- Wilson, D.J., Chui, E. 1987. Effect of turbulence from upwind Buildings on Dilution of Exhaust gases. *ASHRAE Transactions*, 93, 2186-2197.
- Wilson, D.J., Fabris, I., Chen, J., Ackerman, M. 1998. Adjacent building effects on laboratory fume hood exhaust stack design. *ASHRAE Research Report 897*, American Society of Heating and Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, USA.

ANNEXE A

LES MODÈLES DE L'ASHRAE

A1. Généralités

Cette annexe décrit les modèles de l'ASHRAE (2007 et 2011). Les deux modèles sont de type semi-gaussien et peuvent être appliqués pour estimer la dilution sur le toit d'émissions polluantes provenant d'une cheminée de toit.

A2. ASHRAE 2007

ASHRAE 2007 présente deux techniques :

- a) une méthode de conception géométrique ;
- b) des équations gaussiennes de dispersion des panaches.

La première sert à évaluer la hauteur de cheminée requise pour éviter une réingestion du panache, tandis que la seconde sert à estimer la dilution du panache à un récepteur de toit donné. Pour plus de détails sur la méthode de conception géométrique, voir Stathopoulos *et al.* (2008). Cette annexe ne traite que de l'approche gaussienne.

Équations gaussiennes de dispersion des panaches

Les dimensions des zones de recirculation de l'écoulement qui se forment sur un bâtiment et autour des structures se trouvant sur le toit (SSLT) s'établissent comme suit :

$$L_r = B_s^{0,67} B_L^{0,33} \quad (\text{A.1})$$

où B_s et B_L représentent respectivement la plus petite et la plus grande dimensions de la façade du bâtiment perpendiculaire au vent.

$$H_c = 0,22L_r \quad (\text{A.2})$$

$$X_c = 0,5L_r \quad (\text{A.3})$$

$$L_c = 0,9L_r \quad (\text{A.4})$$

où :

H_c représente la hauteur maximale de la zone de recirculation du toit (m) ;

X_c , la distance entre le bord antérieur et H_c (m) ;

et L_c , la longueur de la zone de recirculation du toit (m).

Certains des paramètres requis pour évaluer la dilution prennent en compte la hauteur effective du panache ($h_{panache}$) au-dessus du toit :

$$h_{panache} = h_s + h_r - h_d \quad (A.5)$$

où :

h_s représente la hauteur de la cheminée (m) ;

h_r , l'élévation du panache (m) ;

et h_d , la réduction de la hauteur du panache sous l'effet d'entraînement du sillage de la cheminée par grands vents (m).

L'élévation du panache, calculée selon la formule de Briggs (1984), est présumée survenir instantanément, sous le seul effet de l'impulsion du flux d'air :

$$h_r = 3\beta d_e (V_e / U_H) \quad (A.6)$$

où :

d_e représente le diamètre de la cheminée(m) ;

V_e , la vitesse d'évacuation (m/s) ;

U_H , la vitesse du vent à la hauteur du bâtiment (m/s) ;

et β , le facteur d'obturation de la cheminée, dont la valeur est de 1 pour les cheminées sans capuchon et de 0 pour les cheminées avec capuchon.

L'effet du flottement du panache n'est pas pris en compte.

Wilson *et al.* (1998) ont recommandé un ajustement h_d au rabattement du panache dans le sillage de la cheminée, tel que :

$$h_d = d_e (3 - \beta V_e / U_H) \quad (A.7)$$

La dilution D_r se définit comme suit :

$$D_r = C_e / C_r \quad (A.8)$$

où :

C_e représente la concentration de la masse de contaminants à la source (kg/m^3) ;

et C_r , la concentration de la masse de contaminants au récepteur (kg/m^3).

Les paramètres de dispersion (écarts-types du panache) sont décrits comme suit :

$$\sigma_y / d_e = 0,071(t_{moy} / 2)^{0,2} (X / d_e) + \sigma_o / d_e \quad (\text{A.9})$$

$$\sigma_z / d_e = 0,071(X / d_e) + \sigma_o / d_e \quad (\text{A.10})$$

où :

t_{moy} correspond au temps de moyennage de la concentration en minutes ;

X , la distance sous le vent de la cheminée (m) ;

σ_y et σ_z , les écarts-types du panache (m) ;

et σ_o , la taille de la source initiale compte tenu du diamètre de la cheminée et de l'entraînement du jet de dilution durant l'élévation du panache (m).

Un temps de moyennage (t_{moy}) de 2 minutes a été utilisé pour estimer les dilutions, car ASHRAE 2007 stipule : « Dans le cas où l'extrémité de la cheminée et la prise d'air se trouvent dans la même zone de recirculation du vent, présumez que les valeurs de D_r pour un temps de moyennage de 2 minutes s'appliquent également à tous les temps de moyennage entre 2 et 60 minutes. »

La mesure dans laquelle l'étalement initial (σ_o) dépend du ratio vitesse d'évacuation / vitesse du vent (V_e/U_H) se calcule comme suit :

$$\sigma_o / d_e = [0,125\beta(V_e / U_H) + 0,911\beta(V_e / U_H)^2 + 0,25]^{1/2} \quad (\text{A.11})$$

D'après ASHRAE 2007, la dilution au niveau du toit dans un panache gaussien émis à hauteur d'élévation finale du panache s'obtient comme suit :

$$D_r = 4(U_H / V_e)(\sigma_y / d_e)(\sigma_z / d_e) \exp(\zeta^2 / 2\sigma_z^2) \quad (\text{A.12})$$

où :

ζ représente la séparation verticale entre $h_{panache}$ et H_c ;

$$\zeta = h_{panache} - H_c \quad \text{si } h_{panache} > H_c ;$$

$$\zeta = 0 \quad \text{si } h_{panache} \leq H_c.$$

Dans tous les cas, la dilution calculée à partir de l'équation A.12 a été convertie sous une forme normalisée selon Wilson *et al.* (1998) pour faciliter les comparaisons avec les études antérieures :

$$D_{\text{normalised}} = (D_r Q) / (U_H H^2) \quad (\text{A.13})$$

A3. ASHRAE 2011

ASHRAE 2011 a introduit des modifications permettant d'estimer l'élévation du panache (h_r), les paramètres de dispersion du panache (σ_y et σ_z) et la dilution pour des périodes de temps plus courtes. L'élévation du panache (h_r) est estimée comme suit :

$$h_r = \min\{\beta h_x, \beta h_f\} \quad (\text{A.14})$$

où :

β représente le facteur d'obturation de la cheminée : 1 sans capuchon, 0 avec capuchon ;

h_x et h_f sont estimées comme suit :

$$h_x = \left(\frac{3V_e^2 d_e^2 x}{4\beta_j^2 U_H^2} \right)^{1/3} \quad (\text{A.15})$$

$$h_f = \frac{0.9[(V_e^2 d_e^2 / 4)(U_H / U_*)]^{0.5}}{\beta_j U_H} \quad (\text{A.16})$$

où :

U_* représente la vitesse de frottement (m/s) ;

et β_j , le coefficient d'entraînement du jet, calculé comme suit :

$$\beta_j = \frac{1}{3} + \frac{U_H}{V_e} \quad (\text{A.17})$$

L'équation du profil logarithmique du vent se définit comme suit :

$$U_H / U_* = 2,5 \ln(H / Z_o) \quad (\text{A.18})$$

où :

H représente la hauteur du bâtiment (m) ;

et Z_o , le coefficient de rugosité de la surface (m).

Les paramètres de dispersion du panache (σ_y et σ_z) sont calculés à l'aide des formules de Cimoreli *et al.* (2005) :

$$\sigma_y = (i_y^2 X^2 + \sigma_0^2)^{0.5}$$

$$\sigma_z = (i_z^2 X^2 + \sigma_0^2)^{0.5} \tag{A.20}$$

$$i_x = [0,24 + 0,096 \log(Z_o) + 0,016(\log Z_o)^2][\ln(30/Z_o)/\ln(H/Z_o)] \tag{A.21}$$

$$i_y = 0,75i_x \tag{A.22}$$

$$i_z = 0,5i_x \tag{A.23}$$

où :

i_x , i_y , et i_z représentent l'intensité de la turbulence le long des axes x, y et z, respectivement ;

σ_0 , la taille de la source initiale, fixée à 0,35 d_e (m) ;

et H , la hauteur du bâtiment (m).

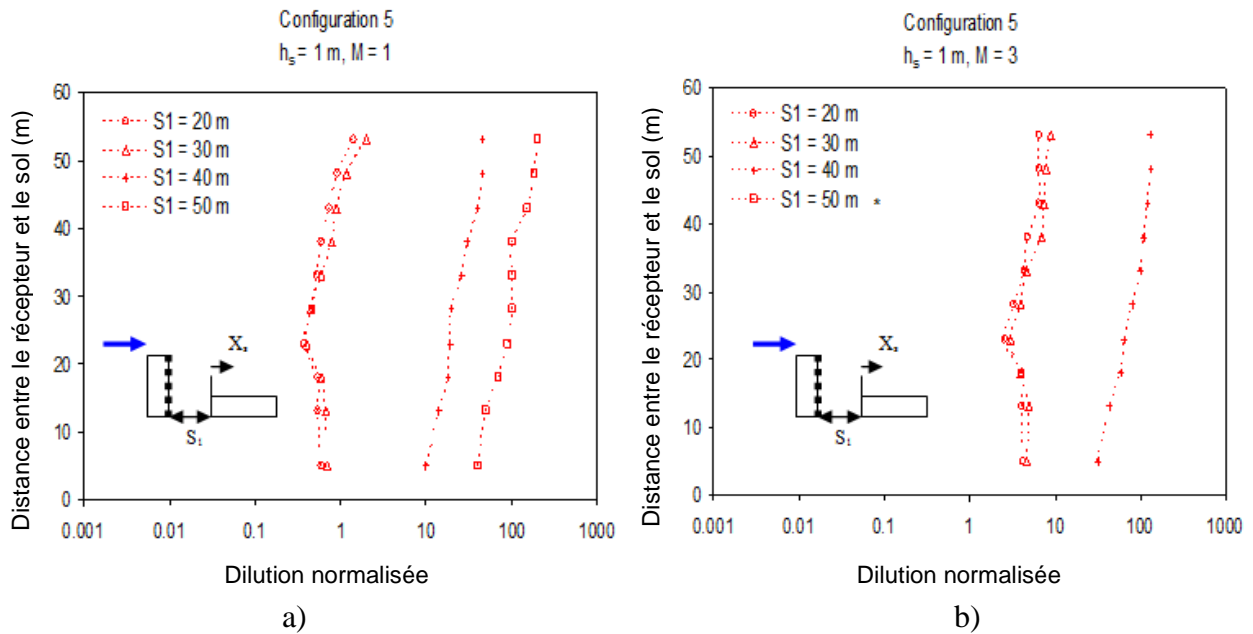
ASHRAE 2011 suggère par ailleurs que les calculs de dilution soient effectués pour trois longueurs de rugosité différentes (Z_o), à savoir 0,5 Z_o , 1,5 Z_o et Z_o , et que la valeur de dilution la plus faible soit retenue aux fins de conception.

ANNEXE B**SOUFFLERIE UTILISÉE POUR LES ÉTUDES AU GAZ TRACEUR
À L'UNIVERSITÉ CONCORDIA**^a Flèches agissant comme générateurs^b Cubes utilisés pour créer un relief**Figure B – Vue de face de la soufflerie à couche limite de l'Université Concordia.**

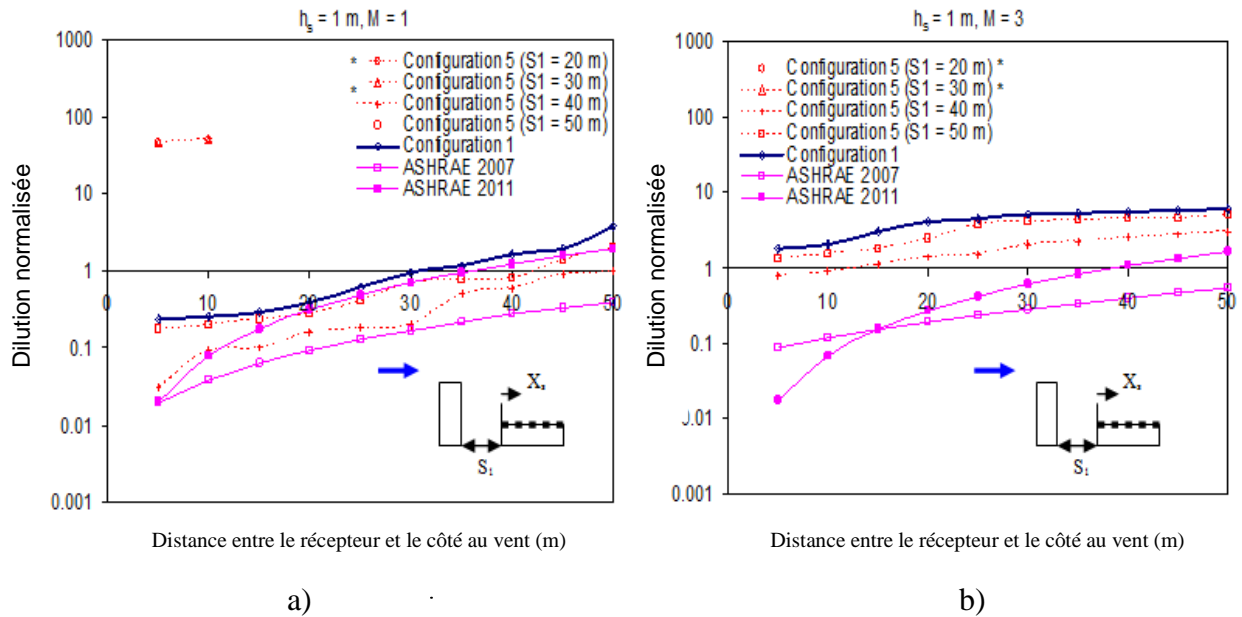
ANNEXE C

RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES POUR LES CONFIGURATIONS DE BÂTIMENTS EN AMONT

Les effets liés à l'espacement des bâtiments dans le cas d'une configuration de bâtiment plus élevé en amont (configuration 5) sont présentés pour le mur sous le vent du bâtiment plus élevé en amont (Figure C1) et pour le toit du bâtiment de faible hauteur où se trouve la source (Figure C2).



**Figure C1 – Dilution normalisée au mur sous le vent de B₅ pour différents espacements (S₁), X_s = 0 et h_s = 1 m : a) M = 1 ; b) M = 3.
* La concentration de polluants s’est avérée nulle.**



**Figure C2 – Dilution normalisée sur le toit de B₁ pour différents espacements (S₁), X_s = 0 et h_s = 1 m : a) M = 1 ; b) M = 3.
* La concentration de polluants s’est avérée nulle.**

ANNEXE D

RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES POUR LES CONFIGURATIONS DE BÂTIMENTS EN AVAL

Les données de dilution pour des bâtiments de hauteur égale (Figure D1) et l'effet de l'espacement entre les bâtiments dans le cas des configurations de bâtiments plus élevés en aval (Figure D2) sont ici présentés.

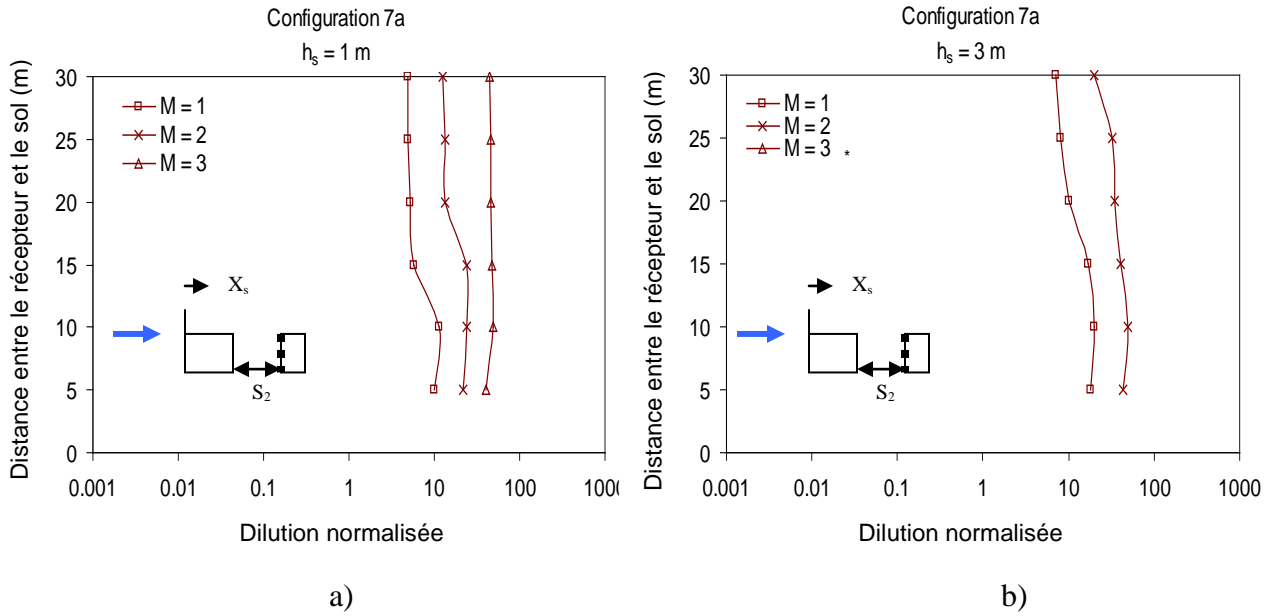


Figure D1 – Dilution normalisée au mur au vent de B₂ pour S₂ = 20 m et X_s = 0 :
a) h_s = 1 m ; b) h_s = 3 m.

*** La concentration de polluants s’est avérée nulle à tous les récepteurs.**

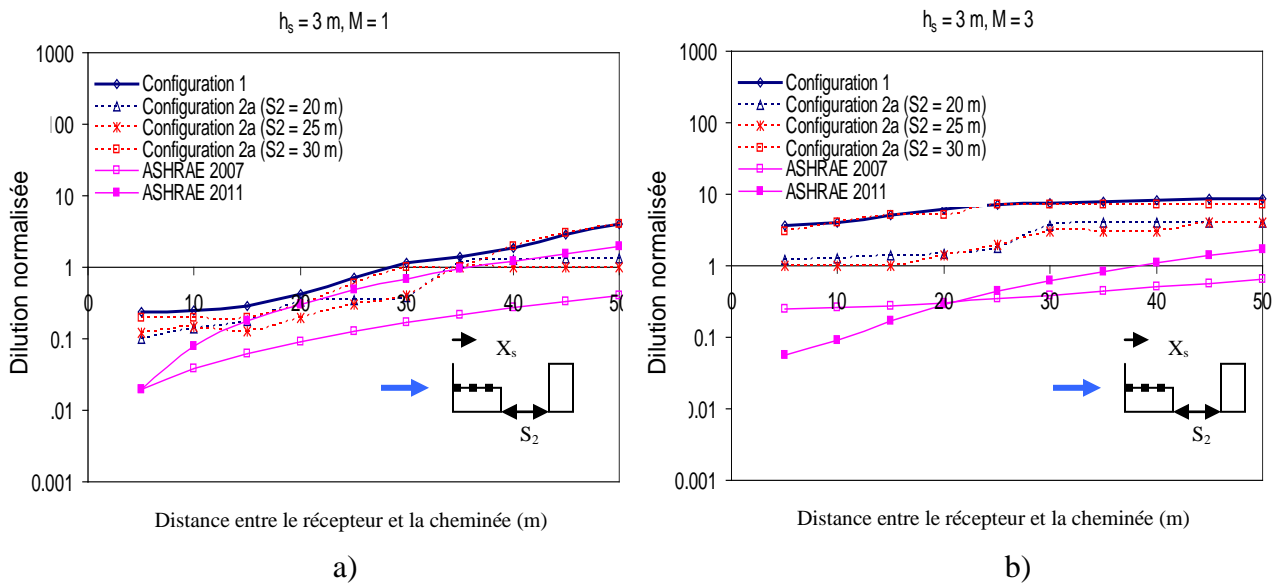


Figure D2 – Dilution normalisée sur le toit de B₁ pour h_s = 3 m et X_s = 0 :
a) M = 1 ; b) M = 3.

ANNEXE E

RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES POUR LES CONFIGURATIONS 10 ET 11

La configuration 10 consiste en un bâtiment émetteur de faible hauteur en présence d'un bâtiment plus élevé en amont et d'un bâtiment plus élevé en aval. La configuration 11 consiste en un bâtiment en amont d'une hauteur égale à celle du bâtiment émetteur en présence d'un bâtiment plus élevé en aval. L'effet d'une cheminée centrale avec la configuration 10 pour un espacement entre les bâtiments de $S_1 = S_2 = 20$ m est illustré à la Figure E1. L'effet d'une modification de l'espacement entre les bâtiments avec la configuration 10 est illustré à la Figure E2. La dilution au niveau du toit du bâtiment émetteur et du bâtiment en aval de la configuration 11 est présentée aux Figures E3 et E4, respectivement.

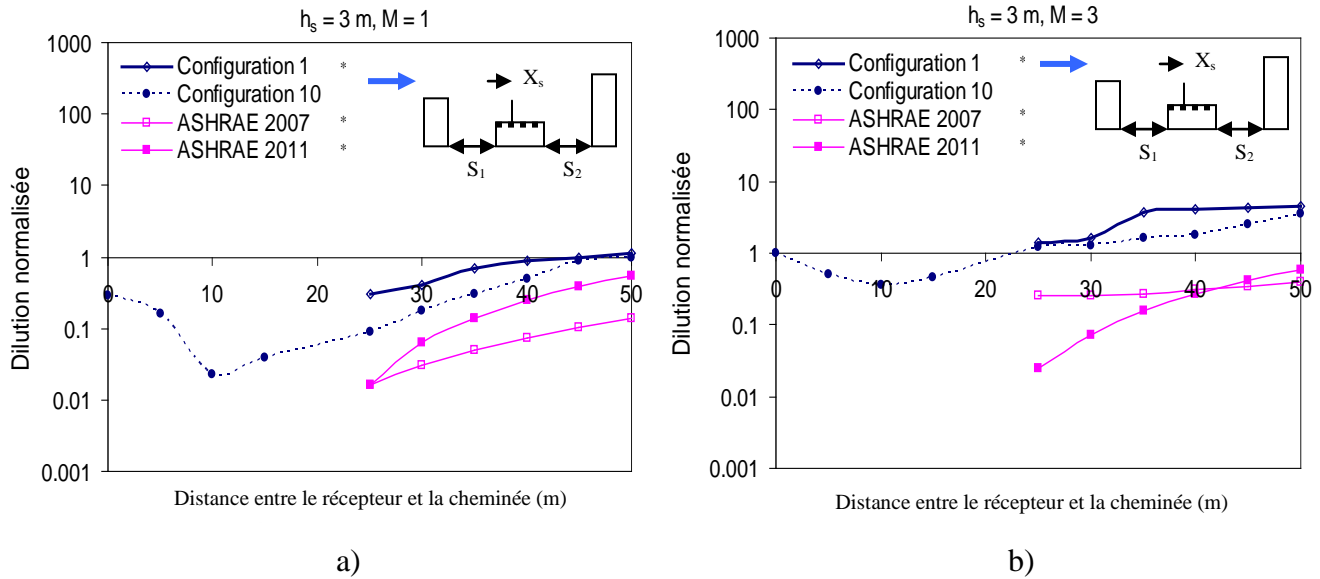


Figure E1 – Dilution normalisée sur le toit de B₁ pour h_s = 3 m et X_s = 20 m :
a) M = 1 ; b) M = 3.

* La concentration de polluants était nulle aux récepteurs au vent de la cheminée.

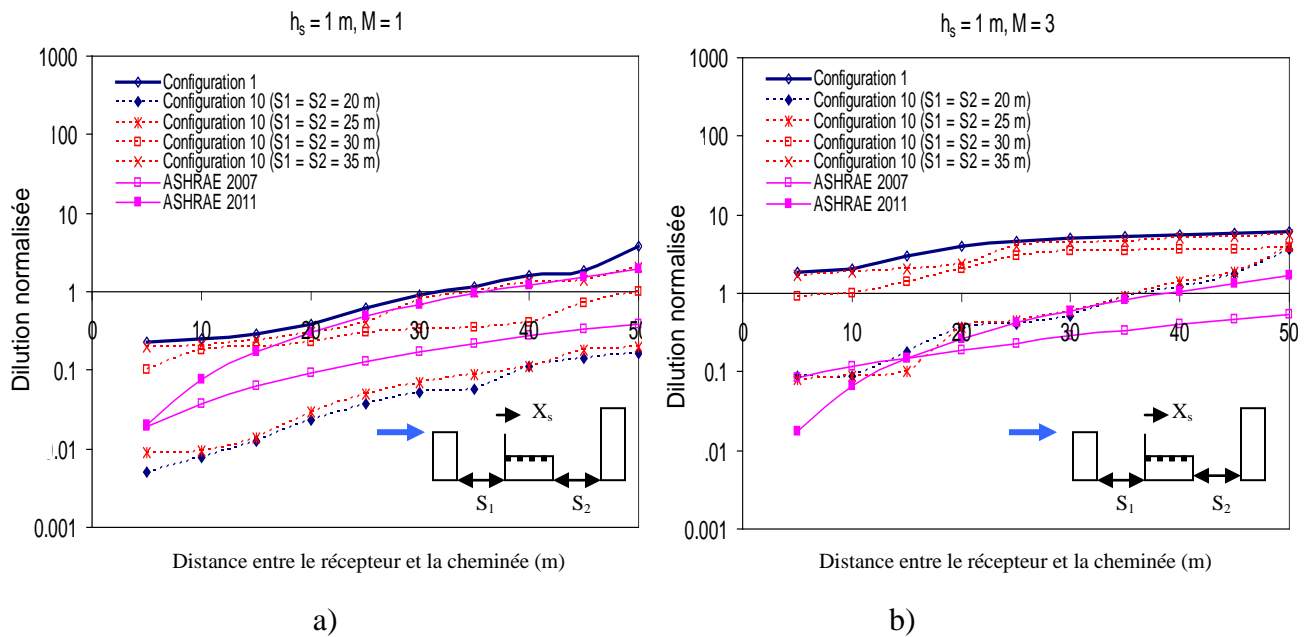
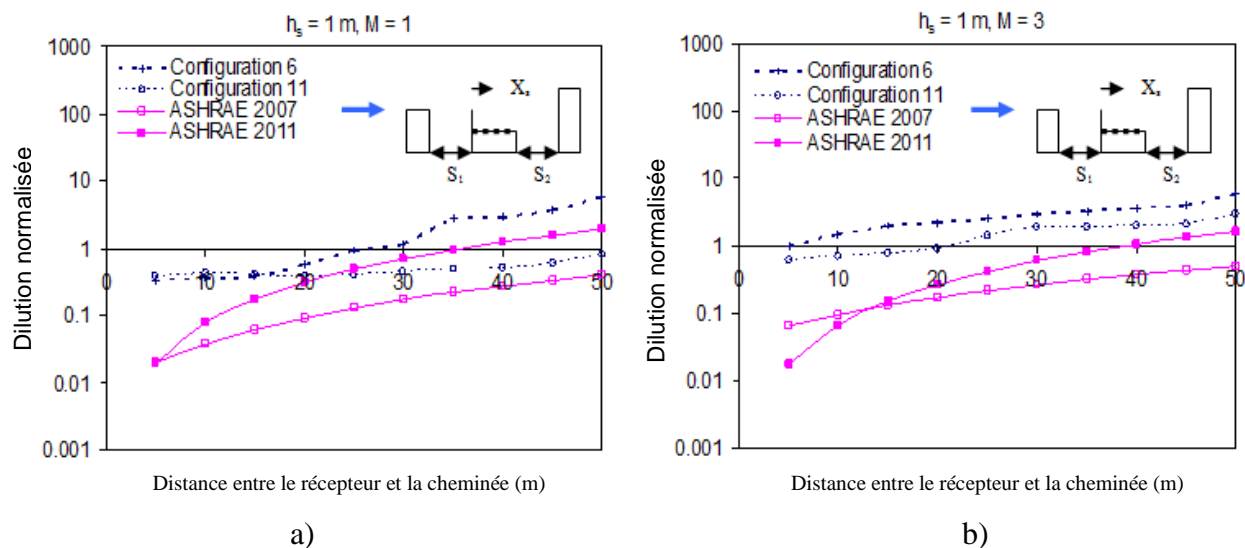
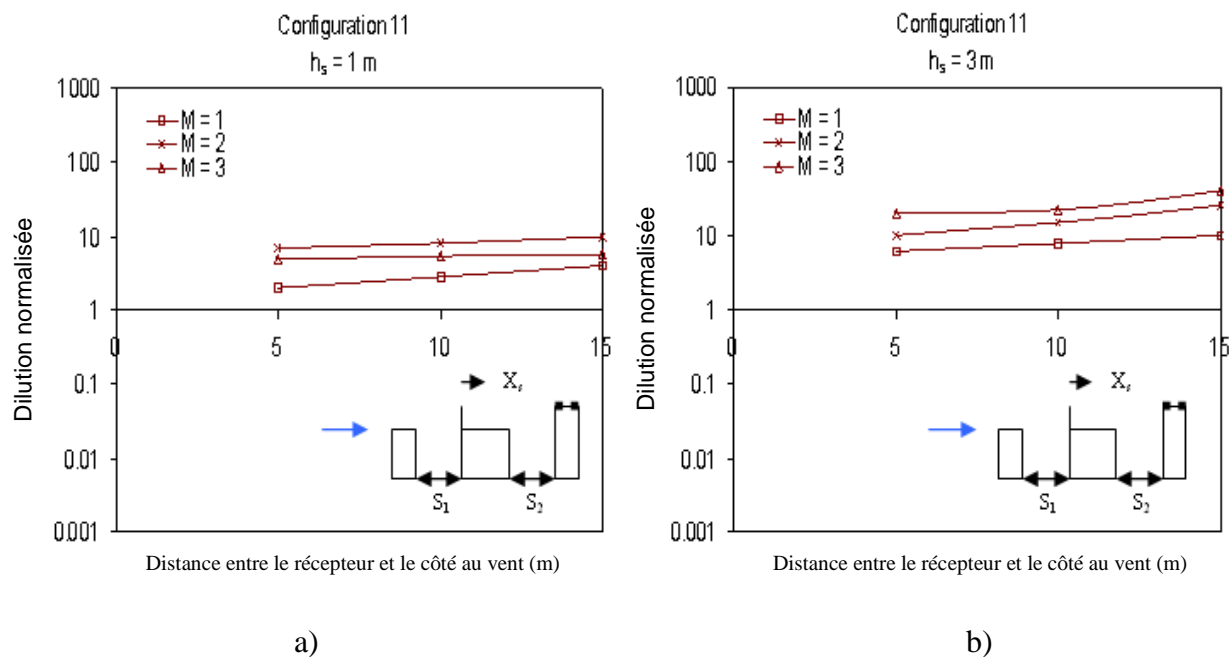


Figure E2 – Dilution normalisée sur le toit de B₁ pour X_s = 0 : a) M = 1 ; b) M = 3.



**Figure E3 – Dilution normalisée sur le toit de B₆ pour $X_s = 0$ et $S_1 = S_2 = 20 \text{ m}$:
a) $M = 1$; b) $M = 3$.**



**Figure E4 – Dilution normalisée sur le toit de B₅ pour $X_s = 0$ et $S_1 = S_2 = 20 \text{ m}$:
a) $h_s = 1 \text{ m}$; b) $h_s = 3 \text{ m}$.**

ANNEXE F

RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES LIÉS À L'APPLICATION DU MODÈLE RECTIFIÉ DE L'ASHRAE (2007)

Les résultats liés à l'application du modèle rectifié de l'ASHRAE (2007) aux données de terrain de Stathopoulos *et al.* (2004) sur la dilution au toit (Figure F1) et au mur (Figure F2) sont ici présentés. Des comparaisons entre les données expérimentales de Wilson *et al.* (1998) et les estimations d'ASHRAE 2007 rectifié pour un bâtiment isolé (Figure F3) et en présence d'un bâtiment plus élevé en aval (Figure F4) sont également présentées.

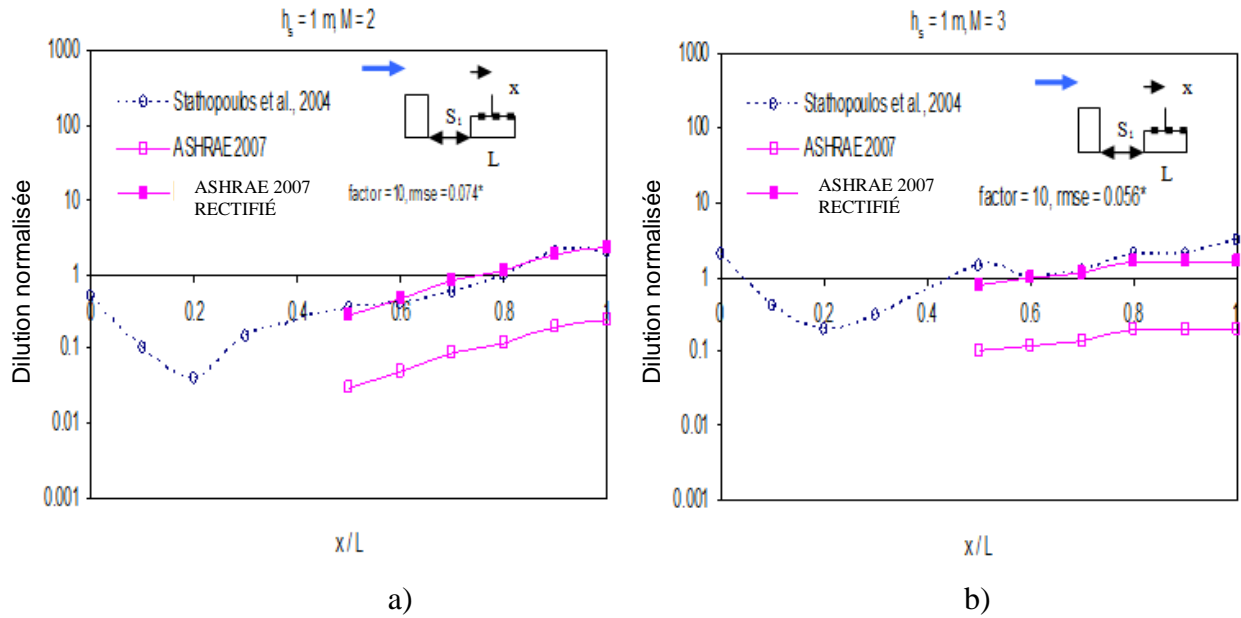


Figure F1 – Validation du modèle avec les données de terrain de Stathopoulos *et al.* (2004) sur un bâtiment de faible hauteur pour $X_s = 0,4 L$: a) $M = 2$; b) $M = 3$.

*** L'écart-type n 'a été évalué avec les données de soufflerie et les estimations du modèle rectifié de l'ASHRAE qu'aux récepteurs sous le vent de la cheminée (6 récepteurs).**

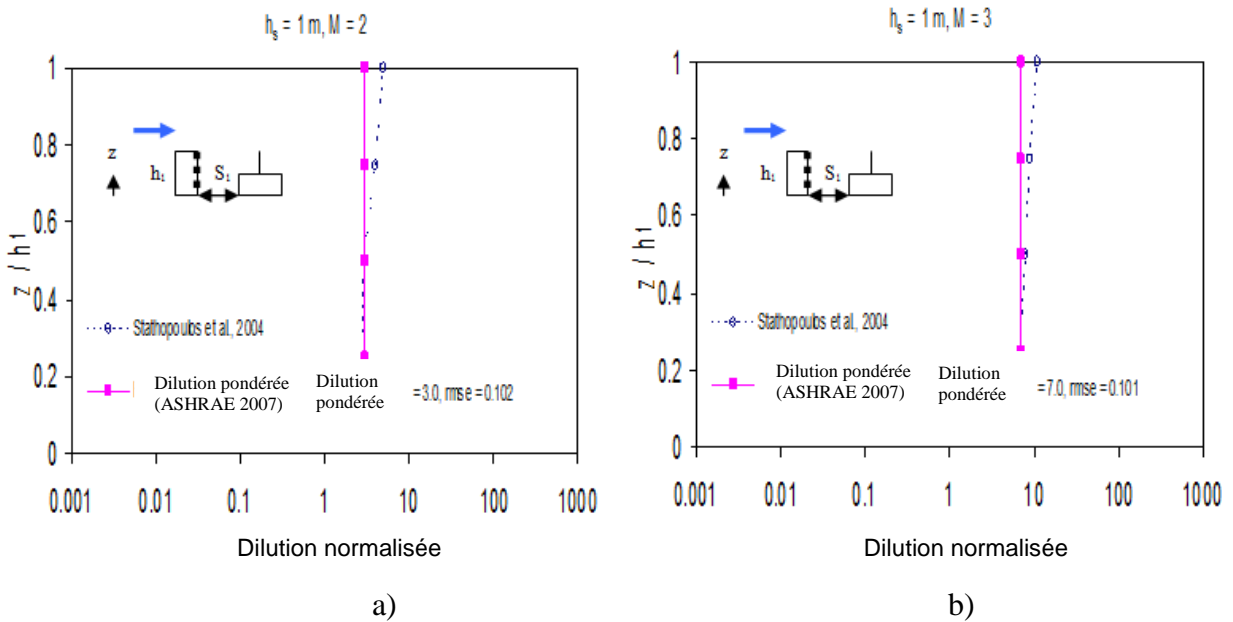


Figure F2 – Dilution normalisée au mur sous le vent du bâtiment en amont : a) $M = 2$; b) $M = 3$.

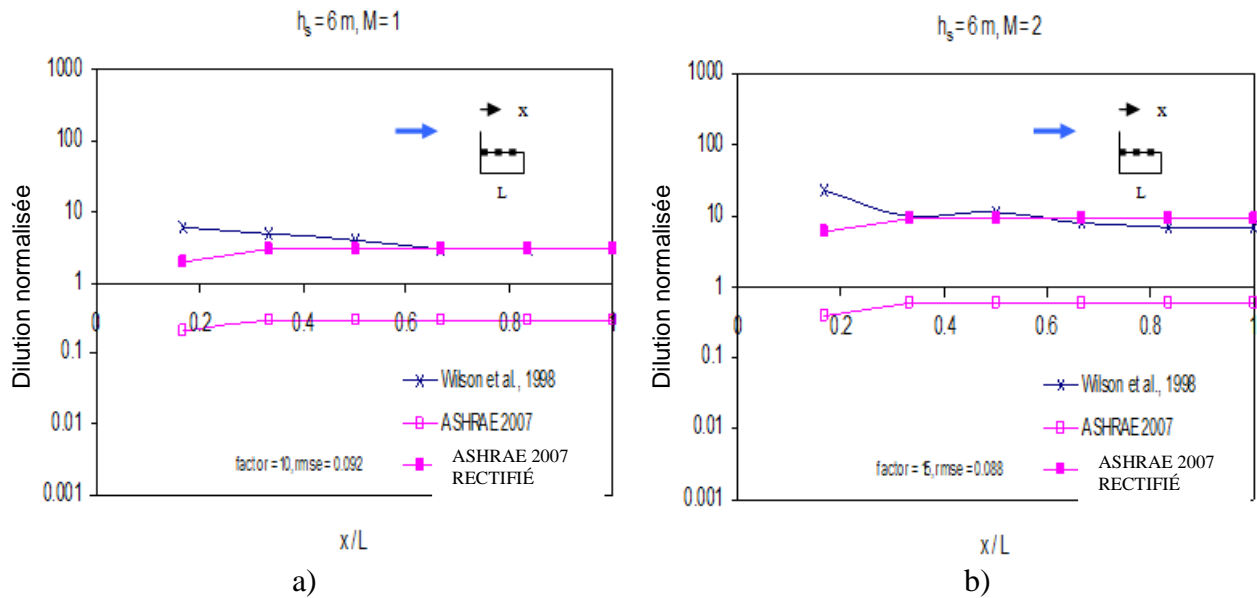


Figure F3 – Validation du modèle avec les données de soufflerie de Wilson *et al.* (1998) sur un bâtiment de faible hauteur à toit plat pour $X_s = 0$: a) $M = 1$; b) $M = 2$.

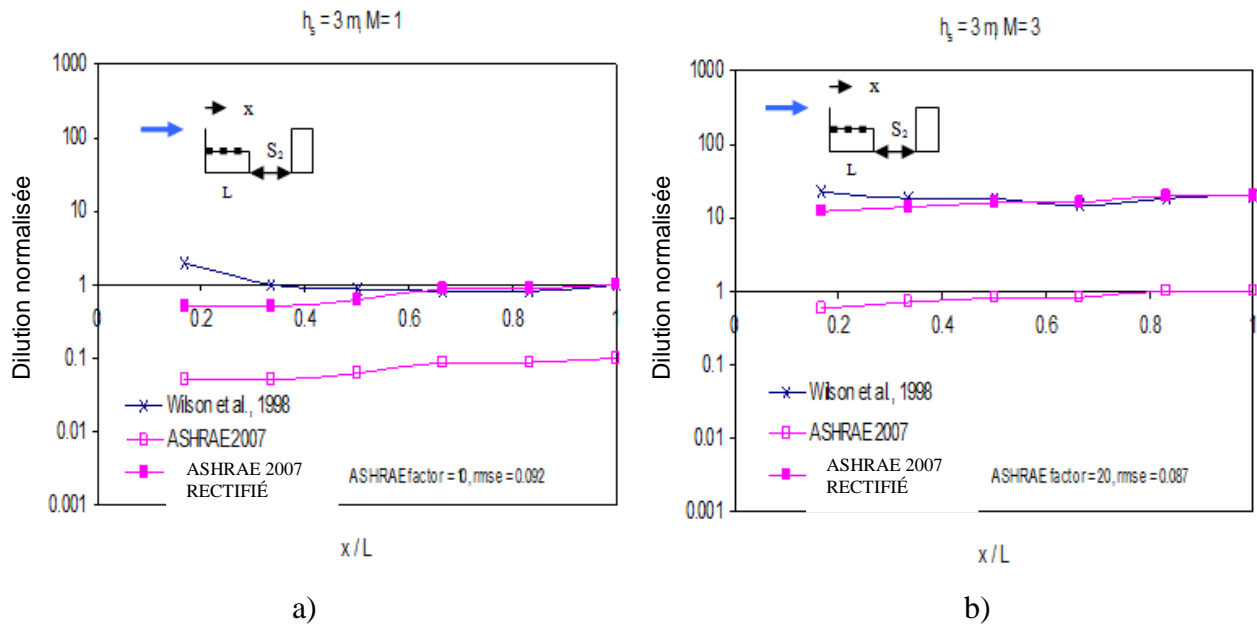


Figure F4 – Validation du modèle avec les données de soufflerie de Wilson *et al.* (1998) sur un bâtiment émetteur de faible hauteur à toit plat pour $X_s = 0$: a) $M = 1$; b) $M = 3$.