

Modélisation des transferts aérauliques en situation de confinement

*Bases théoriques et éléments de
validation*

Mars 2011

CERTU
Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme, et les constructions
publiques
9 rue Juliette Récamier
69456 LYON

Téléphone : 04 72 74 59 09
Télécopie : 04 72 74 59 50
Responsable de l'étude : Jacques Salager

Modélisation des transferts aérauliques en situation de confinement

Bases théoriques et éléments de validation

Mars 2011

CETE de Lyon
46 Rue St Théobald, BP 128
38081 L'ISLE d'ABEAU cedex
Département Villes et Territoires, Groupe Habitat Urbanisme Construction,
Domaine Construction
Gaëlle Guyot, gaelle.guyot@developpement-durable.gouv.fr
Rémi Carrié, remi.carrie@developpement-durable.gouv.fr
Arnaud Bidart, Éric Lozinguez

ISRN EQ-CT69-DVT/RE- - 08 - 106 - - FR

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	9
INTRODUCTION	11
1 BASES THÉORIQUES ET HYPOTHÈSES DE L'OUTIL CONFINE DE MODELISATION DES TRANFERTS AÉRAULIQUES EN SITUATION DE CONFINEMENT	12
1.1 Représentation du bâtiment	12
1.2 Hypothèses du modèle aéraulique	12
1.2.1 Le vent.....	12
1.2.2 Le tirage thermique	16
1.2.3 Débit d'air entre deux zones adjacentes	17
1.3 Système mathématique à résoudre	18
1.4 Résolution numérique du système	19
2 VALIDATION D'UN OUTIL DE MODELISATION DES TRANFERTS AÉRAULIQUES EN SITUATION DE CONFINEMENT	21
2.1 Cas test n°1.....	21
2.2 Cas test n°2.....	24
2.3 Cas test n°3a.....	26
2.4 Cas test n°3b	28
2.5 Cas test n°4a.....	29
2.6 Cas test n°4b	31
2.7 Bilan sur la validation	32
CONCLUSION	33
REMERCIEMENTS	33
RÉFÉRENCES	34
ANNEXE 1 : CRITÈRES DE CONVERGENCE DE CONTAM ET DE CONFINE	35
ANNEXE 2 : APPLICATION DE LA MÉTHODE A UN AUTRE OUTIL DE MODÉLISATION	37

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Représentation schématique de la maison d'étude, source : [8].....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 2 : Représentation schématique de la maison d'étude, source : [6].....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 3 : Représentation schématique du bâtiment d'étude, source : [6]</i>	<i>29</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1. Coefficients adimensionnels de pression de vent proposés dans la norme NF EN 15242 [3].....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 2 : Paramètres de la couche limite atmosphérique (ASHRAE, 2001, p. 16.3, [2]) ...</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 3 : Paramètres caractéristiques d'un profil du vent de type « logarithmique » (AICVF, 1985, p. 46, [1]).....</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 4 : Paramètres de Monin selon la classe de stabilité atmosphérique, source : Haven and Spicer ([4]).....</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 5 : Paramètres de Monin selon le type de terrain utilisés couramment dans les études de dangers</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 6 : Parois prises en compte dans le modèle CONFINE.....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 7 : Températures fixées dans les différentes zones du bâtiment test.....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 8 : Données du cas Test n°1.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 9 : Résultats du cas Test n°1, source : fichier Test validation – Anisotherme – 3z explicit.prj</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 10 : Résidus de convergence des simulations</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 11 : Comparaison des concentrations (mg/m³) en polluant dans les différentes zones</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 12 : Données du cas Test 2</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 13 : Résultats du cas Test 2, source : fichier Validation – cas A bis –3z isoT.prj.....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 14 : Résidus de convergence des simulations</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 15 : Comparaison des concentrations (mg/m³) en polluant dans les différentes zones</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 16 : Écarts sur les débits interzones, source : fichier Validation –3F12 isoT-2.5vh.prj</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 17 : Résidus de convergence des simulations</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 18 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 19 : Écarts sur les débits interzones, source : fichier Validation-5D11 isoT 0.6vh.prj</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 20 : Résidus de convergence des simulations</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 21 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 22 : Écarts sur les débits interzones, source : fichier Validation – 5D21 isoT 5vh.prj</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 23 : Résidus de convergence des simulations</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 24 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 25 : Écarts sur les débits interzones, source : fichier Validation-10D22 non isoT 2.5vh.prj</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 26 : Résidus de convergence des simulations</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 27 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....</i>	<i>31</i>

RÉSUMÉ

Ce document propose une modélisation simplifiée de type « code en pression » des mouvements d'air dans une situation de confinement passif et une méthode de validation d'outils qui reposerait sur cette approche.

Le modèle « CONFINE », développé par le CETE de Lyon, suppose que le bâtiment peut être décomposé en 3 zones aérauliques : le local confiné, les combles non-aménagés, le reste du bâti. L'équilibre des transferts de masses d'air dans chaque zone permet d'obtenir les débits d'air véhiculés entre chaque zone, en supposant que les défauts peuvent être répertoriés en 10 catégories selon les zones qu'ils mettent en contact et l'exposition des parois au vent. Une fois les débits d'air déterminés, le bilan massique du polluant dans chaque zone permet le calcul de la concentration dans chaque zone.

La méthode de validation proposée repose sur une comparaison des résultats obtenus - débits interzones, concentrations dans les zones, résidus pour le calcul des débits - sur plusieurs cas testant la plupart des équations du modèle à valider avec les résultats du code CONTAM développé par le National Institute of Standards and Technology (NIST).

Les écarts entre les débits calculés par les deux modèles sont très faibles, de l'ordre de 0.5 %. Les écarts sur les concentrations sont inférieurs à 4.5 %, avec un écart maximum de 0.7 % pour la concentration dans le local de confinement. L'écart sur les débits peut atteindre 20 % dans le cas de très faibles débits, ceci étant dû à la linéarisation des faibles débits dans CONTAM. Toutefois, sur les cas testés, ces écarts à faible débit n'ont pas d'influence sur les concentrations, car ils représentent une faible part du débit global d'infiltration dans le local confiné.

INTRODUCTION

L'objet de ce document est de présenter les bases théoriques et les hypothèses d'une modélisation possible des mouvements d'air dans une situation de confinement passif et d'en proposer une méthode de validation.

L'outil « CONFINE », développé par le CETE de Lyon, repose sur une représentation simplifiée du bâtiment et une modélisation des échanges aérauliques similaire à celle adoptée dans les modèles de « zone », appelés parfois « codes en pression ». La simulation aéraulique prend en compte les données climatiques ainsi que les caractéristiques aérauliques et géométriques des parois.

La méthode de validation repose sur une comparaison des résultats obtenus sur plusieurs cas testant la plupart des équations du modèle à valider avec les résultats du code CONTAM développé par le National Institute of Standards and Technology (NIST). La méthode de validation a été appliquée à l'outil CONFINE¹ et devra être appliquée à tout logiciel de modélisation des transferts aérauliques utilisé dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT), comme le prévoit le complément technique PPRT relatif aux effets toxiques [7].

¹ Versions VBA 2.3(2007), 2.4.2.2.d, 2.4.2.2.i (2009), 3.7(2010).

1 BASES THÉORIQUES ET HYPOTHÈSES DE L'OUTIL CONFINÉ DE MODELISATION DES TRANSFERTS AÉRAULIQUES EN SITUATION DE CONFINEMENT

1.1 Représentation du bâtiment

Le bâtiment est décomposé en 3 zones aérauliques :

- le local confiné ;
- les combles non aménagés ;
- le reste du bâtiment.

Dans cette représentation géométrique simplifiée, il est important que certaines caractéristiques comme le volume des zones, les surfaces, et leur perméabilité à l'air soient globalement préservées, par rapport au bâtiment réel étudié. Dans le cas contraire, des hypothèses pénalisantes doivent être prises pour ne pas sous dimensionner la protection des personnes.

Des exemples de représentation de bâtiments en 3 zones sont donnés dans le reste du document.

1.2 Hypothèses du modèle aéraulique

Les phénomènes moteurs généralement retenus pour modéliser les transferts aérauliques en bâtiment sont : le vent ; le tirage thermique induit par les gradients de masse volumique de l'air ; les systèmes de ventilation mécanique. Ces trois phénomènes génèrent des flux d'air indissociables : notamment, tous les trois ont un effet sur les différences de pression de part et d'autre des défauts d'étanchéité de l'enveloppe et donc sur les flux d'air parasites. **En matière de confinement passif, les systèmes de ventilation sont supposés à l'arrêt et les débits d'air associés sont supposés annulés.** Il reste donc à intégrer les effets du vent et du tirage thermique sur les écoulements à travers les inétanchéités de l'enveloppe.

1.2.1 Le vent

Le vent modifie la pression au niveau d'un orifice donnant sur l'extérieur. Classiquement, dans les modèles aérauliques de « zone », on utilise des coefficients de pression disponibles dans la littérature pour déduire la pression sur une façade. Pour la surface i , et pour une incidence de vent donnée, le coefficient de pression est défini par :

$$C_{p,i} = \frac{p_{surf,i}}{0,5 \rho v^2} \quad (1)$$

où :

$p_{surf,i}$ est la pression provoquée par le vent au niveau de la surface i (Pa),
 ρ est la masse volumique de l'air extérieur (kg/m^3), et
 v est la vitesse du vent sur le bâtiment (m/s).

Les coefficients $C_{p,i}$ dépendent donc de l'exposition des façades par rapport à la direction du vent (Tableau 1).

Par ailleurs, la vitesse du vent est généralement corrigée pour prendre en compte les différences entre des données issues de stations météorologiques, c'est-à-dire, généralement en site ouvert et plat, et la vitesse à proximité du bâtiment considéré. De nombreux auteurs proposent des relations pour réaliser cette correction. Dans l'outil CONFINE du CETE de Lyon, l'utilisateur a le choix entre trois relations.

❖ La relation proposée par ASHRAE (2001, p. 16.3, [2]) :

$$v_{bat} = v_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{a_{met}} \left(\frac{H_{bat}}{\delta_{bat}} \right)^{a_{bat}} \quad (2)$$

où :

v est la vitesse du vent (m/s),
 H est la hauteur à laquelle la vitesse du vent est évaluée (m),
 δ est l'épaisseur de la couche limite due au vent (m),
 a est un exposant déduit du type de terrain (-),
 met est un indice relatif à la station météorologique
 bat est un indice relatif au bâtiment.

Les paramètres a et δ sont déterminés à l'aide du Tableau 2.

❖ Une première loi de type « logarithmique » :

$$v_{bat} = v_{met} a \ln\left(\frac{H_{bat}}{z_0}\right) \quad (3)$$

où a et z_0 représentent un coefficient et une rugosité spécifiques à la nature du terrain (Tableau 3). Dans ce cas, la vitesse v_{met} représente la vitesse à 10 m sur un site ouvert (station météo).

❖ Une deuxième loi de type « logarithmique ». Cette loi est intégrée par souci d'homogénéité avec les hypothèses classiquement retenues dans les études de danger² concernant le profil du vent. Cette loi repose sur la relation de Businger ([4]) et la longueur de Monin-Obukov.

Dans le cadre des PPRT, cette loi doit être utilisée.

$$u_a(z) = \frac{u^*}{K} \left[\ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad (4)$$

² Les études de danger (EDD) sont réalisées par les exploitants qui démontrent ainsi leur maîtrise des risques à la source.

où :

- u^* est la vitesse de friction (m/s),
- K est la constante de Von Karman, 0.4 (-),
- z_0 est la longueur de rugosité (m),
- L est la longueur de Monin-Obukov (m).

La longueur de Monin-Obukov L est calculée selon la formule d'Haven and Spicer (Équation 5, [4]) et dépend de la rugosité du terrain z_0 et de la stabilité atmosphérique. La classe de stabilité atmosphérique est exprimée par une lettre allant de A (instable) à F (stable). Pour la classe de stabilité D (neutre), $L=10^5$ m. Les coefficients a et b de Monin dépendent de la stabilité atmosphérique (Tableau 4).

$$L = a_{Monin} z_0^{b_{Monin}} \quad (5)$$

La forme de la relation de Busigner Ψ dépend également de la classe de stabilité atmosphérique.

Pour des conditions instables (A,B,C) :

$$\psi\left(\frac{z}{L}\right) = \psi(a) = 2 \ln\left(\frac{1+a}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+a^2}{2}\right) - 2 \tan^{-1} a + \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

avec

$$a = \left(1 - 15 \frac{z}{L}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

Pour des conditions neutres (D) :

$$\psi\left(\frac{z}{L}\right) = 0 \quad (8)$$

Pour des conditions stables (E, F) :

$$\psi\left(\frac{z}{L}\right) = -2 \frac{z}{L} \quad (9)$$

La vitesse de friction est calculée à partir de la vitesse météorologique mesurée à une hauteur de référence $z_{réf}$ souvent égale à 10 m.

$$u^* = \frac{K u_a(z_{réf})}{\ln\left(\frac{z_{réf} + z_0}{z_0}\right) - \Psi\left(\frac{z_{réf}}{L}\right)} \quad (10)$$

Partie de façade	Protection	Coefficients adimensionnels de pression de vent				
		Au vent C_{p1}	Sous le vent C_{p2}	Toit (suivant la pente) C_{p3}		
				< 10°	10° – 30°	> 30°
Basse	Ouverte	+ 0,50	– 0,70	– 0,70	– 0,60	– 0,20
	Normale	+ 0,25	– 0,50	– 0,60	– 0,50	– 0,20
	Protégée	+ 0,05	– 0,30	– 0,50	– 0,40	– 0,20
Moyenne	Ouverte	+ 0,65	– 0,70	– 0,70	– 0,60	– 0,20
	Normale	+ 0,45	– 0,50	– 0,60	– 0,50	– 0,20
	Protégée	+ 0,25	– 0,30	– 0,50	– 0,40	– 0,20
Haute	Ouverte	+ 0,80	– 0,70	– 0,70	– 0,60	– 0,20

Tableau 1. Coefficients adimensionnels de pression de vent proposés dans la norme NF EN 15242 [3]

Catégorie de terrain	Description	Exposant a (-)	Epaisseur de couche limite δ (m)
1	Centres de grandes villes, dans lesquels au moins 50% des bâtiments ont une hauteur > 21 m soit sur plus de 2 km soit sur plus de 10 fois la hauteur du bâtiment en amont	0.33	460
2	Aires urbaines et périurbaines, espaces boisés, ou autres terrains avec de nombreuses obstructions resserrées ayant la taille de maisons individuelles ou plus, soit sur plus de 2 km soit sur plus de 10 fois la hauteur du bâtiment en amont	0.22	370
3	Terrain ouvert avec des obstructions dispersées dont la hauteur est généralement inférieure à 10 m, comprenant les terrains ouverts typiques des alentours des stations météorologiques	0.14	270
4	Terrains plats sans obstruction exposés à un vent s'écoulant sur une distance d'au moins 1.6 km sur l'eau, et sur une distance soit de 500 m soit de 10 fois la hauteur du bâtiment sur terre	0.10	210

Tableau 2 : Paramètres de la couche limite atmosphérique (ASHRAE, 2001, p. 16.3, [2])

Catégorie de terrain	Description	Coefficient a (-)	Rugosité z_0 (m)
1	Zones urbaines, bois et forêts	0.266	1.000
2	Bocage dense, petits bois, banlieue pavillonnaire	0.240	0.400
3	Campagne avec cultures élevées (maïs, vigne, petits arbres fruitiers), bocage, habitat dispersé	0.229	0.250
4	Rase campagne plate ou légèrement ondulée avec des obstacles épars (maisons, arbres, haies)	0.202	0.070
5	Cultures basses Prairies plates à herbes rases sans arbres ni construction	0.182	0.020
6	Grande étendue d'eau (océan, mer, lac)	0.166	0.005

Tableau 3 : Paramètres caractéristiques d'un profil du vent de type « logarithmique » (AICVF, 1985, p. 46, [1])

Classe de stabilité	A	B	C	E	F
a_{Monin}	-11.4	-26	-123	123	26
b_{Monin}	0.1	0.17	0.3	0.3	0.17

Tableau 4 : Paramètres de Monin selon la classe de stabilité atmosphérique, source : Haven and Spicer ([4])

Catégorie de terrain	Description	Rugosité z_0 (m)
1	Zone urbaine/industrielle pas trop dense ni trop haute	0.95
2	Habitat dispersé	0.183

Tableau 5 : Paramètres de Monin selon le type de terrain utilisés couramment dans les études de dangers

1.2.2 Le tirage thermique

Quant au tirage thermique, il convient de corriger les pressions en prenant en compte la variation de pression avec la hauteur. Dans l'hypothèse d'équilibre hydrostatique :

$$P(h) = P_0(h_{\text{ref}}) + p(h) = P_0(0) - \rho_0 g h_{\text{ref}} + p(h_{\text{ref}}) - \rho g (h - h_{\text{ref}}) \quad (11)$$

où :

- P est la pression absolue (Pa),
- p est la pression relative à la pression atmosphérique à hauteur identique (Pa),
- ρ est la masse volumique de l'air (kg/m^3),
- g est l'accélération de la pesanteur ($= 9.81 \text{ m/s}^2$),
- h est la hauteur du défaut par rapport au sol (m),
- h_{ref} est la hauteur de référence de la zone (m),
- 0 est un indice désignant une caractéristique de l'atmosphère.

Pour évaluer la masse volumique en fonction de la température, on utilise la relation suivante :

$$\rho \approx \frac{P_0}{RT} \quad (12)$$

où :

T est la température (K),

P₀ est la pression atmosphérique en conditions normales (101 325 Pa)

R est une constante issue de la loi des gaz parfaits (R = 287.055 J kg⁻¹ K⁻¹).

1.2.3 Débit d'air entre deux zones adjacentes

Enfin, le débit volumique d'air passant par un petit orifice tel qu'un défaut d'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment soumis à une différence de pression peut être exprimé par une relation du type :

$$q_{vl,i,j} = C < P_{t,j} - P_{t,i} >^n \quad (13)$$

où :

q_{vl} est le débit volumique d'air (m³ s⁻¹)

C est le coefficient de perméabilité à l'air du défaut (m³ s⁻¹ Pa⁻ⁿ)

P_t est la pression totale de part et d'autre du défaut intégrant les effets du vent et du tirage thermique (Pa)

n est un exposant caractéristique de l'écoulement, variant entre 0.5 pour un écoulement inertiel et 1 pour un écoulement laminaire. Dans CONFINE, cet exposant est pris égal à 2/3.

i,j sont des indices relatifs aux zones de part et d'autre du défaut, et

<a>ⁿ = signe(a) |a|ⁿ par convention.

Il en résulte que pour un défaut situé entre les zones i et j à une hauteur h_k par rapport au sol :

$$q_{vl,i,j,k} = C_{i,j,k} < p_j(h_{ref,j}) - \rho_j g(h_k - h_{ref,j}) - \rho_0 g h_{ref,j} + 0.5 \rho_j C_{p,j,k} v^2 - p_i(h_{ref,i}) + \rho_i g(h_k - h_{ref,i}) + \rho_0 g h_{ref,i} - 0.5 \rho_i C_{p,i,k} v^2 >^n \quad (14)$$

où :

k est un indice propre au défaut en question.

Dans CONFINE, seul ce type d'ouverture est pris en compte. De plus, CONFINE suppose que la perméabilité des parois peut être résumée à un seul défaut d'étanchéité affecté à chaque type de parois, celles-ci étant classées selon leur orientation et les milieux qu'elles séparent. Les types de parois pris en compte sont répertoriés dans le Tableau 6. L'exposant est forfaitisé à 2/3, valeur moyenne constatée sur de nombreuses constructions.

Le débit massique passant dans ce même orifice dépend du sens de l'écoulement, car c'est la masse volumique de l'air de la zone d'où vient le flux qui doit être prise en compte :

$$\begin{aligned} q_{m,i,j,k} &= \rho_j q_{vl,i,j,k} \text{ si } q_{vl,i,j,k} > 0 \\ q_{m,i,j,k} &= \rho_i q_{vl,i,j,k} \text{ si } q_{vl,i,j,k} \leq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Indice	Type de paroi	Exposition au vent
a	Séparant le local confiné de l'extérieur	Exposé au vent
b	Séparant le local confiné de l'extérieur	Toiture
c	Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent
d	Séparant le local confiné des combles	Sans objet
e	Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet
f	Séparant les combles de l'extérieur	Toiture
g	Séparant les combles du reste du bâtiment	Sans objet
h	Séparant le reste du bâtiment de l'extérieur	Exposé au vent
i	Séparant le reste du bâtiment de l'extérieur	Toiture
j	Séparant le reste du bâtiment de l'extérieur	Abrité du vent

Tableau 6 : Parois prises en compte dans le modèle CONFINE.

1.3 Système mathématique à résoudre

Il s'agit de déterminer les pressions de référence inconnues dans les 3 zones du modèle. Pour cela, sur chaque zone, l'équation de bilan massique doit être respectée, i.e. les flux massiques d'air entrants et sortants doivent s'équilibrer. Cette équation prend la forme générique suivante indiquant que la somme algébrique des débits massiques reçus dans la zone i doit être nulle :

$$\sum_{j,k} q_{m,i,j,k} = 0 \quad (16)$$

Nous avons donc un système non-linéaire de 3 équations à 3 inconnues (p_1, p_2, p_3). Sa résolution permet de déterminer les pressions de référence dans les 3 zones du bâtiment. Pour fixer les idées, en conditions isothermes, les équations à résoudre sont les suivantes :

Zone 1. Local confiné :

$$C_a <0.5 C_{p,exposé} \rho_0 v^2 - p_1 >^n + C_b <0.5 C_{p,toiture} \rho_0 v^2 - p_1 >^n + C_c <0.5 C_{p,abrité} \rho_0 v^2 - p_1 >^n + C_d <p_2 - p_1 >^n + C_e <p_3 - p_1 >^n = 0$$

Zone 2. Combles non aménagés :

$$C_f <0.5 C_{p,toiture} \rho_0 v^2 - p_2 >^n + C_d <p_1 - p_2 >^n + C_g <p_3 - p_2 >^n = 0$$

Zone 3. Reste du bâtiment :

$$C_h <0.5 C_{p,exposé} \rho_0 v^2 - p_3 >^n + C_i <0.5 C_{p,toiture} \rho_0 v^2 - p_3 >^n + C_j <0.5 C_{p,abrité} \rho_0 v^2 - p_3 >^n + C_g <p_2 - p_3 >^n + C_e <p_1 - p_3 >^n = 0$$

avec les conventions suivantes :

$C_{p,exposé}$	coefficient de pression du vent sur les façades exposées
$C_{p,toiture}$	coefficient de pression du vent sur le toit
$C_{p,abrité}$	coefficient de pression du vent sur les façades abritées
C_{indice}	coefficient de perméabilité de la paroi désignée par l'indice ($m^3/s Pa^{-n}$)
n	exposant de l'écoulement ($n=2/3$)

p_1, p_2, p_3	pressions de référence dans les zones 1,2,3 (Pa)
ρ_0	masse volumique de l'air (1.2041 kg/m ³ à 293.15 K)
v	vitesse du vent au niveau du bâtiment (m/s).

Les flux de polluants dans les différentes zones sont obtenus en multipliant le flux d'air correspondant par la concentration du polluant dans la zone d'où provient l'air. On peut alors écrire le système suivant d'équations différentielles de premier ordre :

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = \sum_j (q_{v,entrant,i,j} C_j) - q_{v,sortant,i} C_i \quad (17)$$

pour $i = 1, 2, 3$

avec les conventions suivantes :

C_i, C_j	concentrations dans les zones i et j (kg/m ³)
$q_{v,entrant,i,j}$	débit d'air en provenance de la zone j entrant dans la zone i (m ³ /s)
$q_{v,sortant,i}$	débit d'air sortant de la zone i (m ³ /s)
$\sum_j$	somme pour les indices j
V_i	volume de la zone i (m ³).

La résolution de ce système permet de déterminer l'évolution de la concentration en polluant dans les différentes zones.

1.4 Résolution numérique du système

Dans l'outil CONFINE du CETE de Lyon, la résolution des trois équations non linéaires à trois inconnues (pressions de référence $\{p_1, p_2, p_3\}$) se fait en utilisant une méthode numérique de type Newton-Raphson. Le critère de convergence absolue retenu est le suivant :

$$\sum_i \frac{\left(\sum_j q_{i,j} \right)^2}{\left(\sum_j S_{i,j} \cdot v_{ref,i} \cdot \rho_0 \right)^2} < \varepsilon_1 \quad (18)$$

où

$q_{i,j}$	débit massique entrant (>0) ou sortant (<0) de la zone i depuis ou vers la zone j (kg/h)
v_{ref}	vitesse de référence de la zone i (m/h)
$S_{i,j}$	surface de la paroi séparant la zone i de la zone j (m ²).

La vitesse de référence est introduite pour assurer la convergence des débits concernant le local de confinement, qui peuvent être de très faibles débits. Les valeurs $v_{ref} = 1.8$ m/h pour le local et $v_{ref} = 18$ m/h pour les deux autres zones donnent de très bons résultats en terme de rapidité et de qualité de la convergence.

Un deuxième critère de convergence permet de rejeter la solution proposée si la somme des débits qui entrent dans une zone est trop différente de la somme de ceux qui sortent.

$$\max_i \left| \frac{\sum_j q_{entrant} - \sum_j q_{sortant}}{\sum_j q_{entrant}} \right| < \varepsilon_2 \quad (19)$$

Les critères ε_1 et ε_2 sont pris respectivement égaux à 10^{-5} et 2 %.

La qualité de la convergence peut être évaluée grâce au calcul des **résidus** de chaque zone i entre les débits entrant et sortant :

$$résidu_i(\%) = r_i(\%) = \left| \frac{\sum_j q_{entrant} - \sum_j q_{sortant}}{\sum_j q_{entrant}} \right| \quad (20)$$

Plus le résidu est faible, meilleure est la qualité de la convergence puisque l'on approche de l'équilibre parfait entre les débits massiques entrants et sortants.

2 VALIDATION D'UN OUTIL DE MODELISATION DES TRANSFERTS AERAULIQUES EN SITUATION DE CONFINEMENT

La méthode de validation repose sur une comparaison des résultats obtenus sur six cas testant la plupart des équations du modèle à valider avec les résultats du code CONTAM développé par le National Institute of Standards and Technology (NIST).

Les indicateurs retenus portent sur les écarts constatés sur les débits interzones, sur les concentrations dans les zones, en particulier sur la concentration maximale atteinte dans le local de confinement, et sur les résidus constatés pour le calcul des débits.

La méthode de validation développée dans cette partie, a été appliquée à l'outil CONFINE, mais peut être appliquée à tout autre outil de modélisation des transferts aérauliques en situation de confinement.

Dans tous les cas test, les bâtiments sont supposés sans protection vis à vis du vent.

2.1 Cas test n°1

Ce cas test ne représente pas une situation particulière de confinement, ni même une géométrie ou des conditions météorologiques réalistes. La géométrie et les conditions ont été choisies de façon à tester la plupart des équations utilisées.

Les caractéristiques des défauts d'étanchéité sont données dans le Tableau 8.

La concentration extérieure est en forme de créneau d'une heure à 5000 ppm.

Les volumes sont respectivement pour le local de confinement, les combles et le reste du bâti : 30 ; 50 et 120 m³.

Les conditions de température sont les suivantes :

Zone	Local confiné	Combles non-aménagés	Reste du bâti	Extérieur
Température (K)	273.15	278.15	283.15	293.15

Tableau 7 : Températures fixées dans les différentes zones du bâtiment test

La vitesse du vent est fixée à 5 m/s pour un terrain de catégorie 3 pour le vent météo, et de catégorie 2 à proximité du bâtiment au sens de la loi puissance (Tableau 2). La hauteur de bâtiment prise pour l'évaluation de la vitesse du vent au niveau du bâtiment est de 15 m. Dans CONTAM [9], ceci se traduit par un coefficient A_0 (local terrain constant) de 0.71678 et un exposant de 0.22.

Il ressort du Tableau 9 que l'écart entre les débits calculés par CONFINE et par CONTAM est très faible, de 0.65 % maximum. Concernant le calcul des concentrations en polluant dans les différentes zones, le Tableau 11 montre que l'écart est plus important mais reste inférieur à 3.24%, et inférieur à 0.33 % pour la concentration du local de confinement.

Tous les résidus de CONFINE et de CONTAM sont inférieurs à 10⁻⁵ (Tableau 10).

	Exposition au vent	Hauteur du défaut (m)	Perméabilité à 1 Pa (L/s)	Coefficient de pression (-)
Surfaces				
A - Séparant le local confiné de l'extérieur	Exposé au vent	2.5	0.7262	0,5
B - Séparant le local confiné de l'extérieur	Toiture	2.5	0.8583	-0,6
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	0	1.1224	-0,7
D - Séparant le local confiné des combles	Sans objet	5	1.5185	
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	1.5	1.9146	
F - Séparant les combles de l'extérieur	Toiture	6	102.5197	-0,6
G - Séparant les combles du reste du bâti	Sans objet	5	3.2630	
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	1.5	3.6157	0,5
I - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Toiture	2.5	3.7921	-0,6
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	1.5	4.1449	-0,7

Tableau 8 : Données du cas Test n°1

	Débit massique (kg/h)	Débit massique (kg/h)	Écarts (%)
Surfaces	CONFINE	CONTAM	
A - Séparant le local confiné de l'extérieur	13.3564	13.3568	0.00%
B - Séparant le local confiné de l'extérieur	-5.0645	-5.0639	-0.01%
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	-14.2637	-14.2611	-0.02%
D - Séparant le local confiné des combles	8.5525	8.5481	-0.05%
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	-2.5806	-2.5799	-0.03%
F - Séparant les combles de l'extérieur	6.7767	6.7607	-0.24%
G - Séparant les combles du reste du bâti	1.7757	1.7873	0.65%
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	62.8508	62.8540	0.01%
I - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	-24.4335	-24.4295	-0.02%
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	-39.2222	-39.2170	-0.01%

Tableau 9 : Résultats du cas Test n°1, source : fichier Test validation – Anisotherme – 3z explicit.prj

Zone	Débit massique entrant CONFINE (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONFINE (%)	Débit massique entrant CONTAM (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONTAM (%)
Local confiné	21,909	0,000 %	21,905	0,000 %
Combles non-aménagés	8,552	0,000 %	8,548	0,000 %
Bâti (hors zone confinée et combles)	65,431	0,000 %	65,434	0,000 %

Tableau 10 : Résidus de convergence des simulations

	Temps (h)	CONFINE	CONTAM	Écarts (%)
Local	1h	1466,67	1460,26	-0,44%
	2h	939,00	934,30	-0,50%
Bâti	1h	1775,52	1835,01	3,24%
	2h	1179,01 552,48	1216,02	3,04%
Combles	1h		562,13	1,72%
	2h	527,98	535,00	1,31%
<i>Maximum (Cmax)</i>	Cmax (mg/m³)	1478,00	1473,18	-0,33%
	t (Cmax) (h)	1,02		-0,82%

Tableau 11 : Comparaison des concentrations (mg/m³) en polluant dans les différentes zones

2.2 Cas test n°2

Ce cas test est basé sur la modélisation des échanges aérauliques dans une maison individuelle en conditions isothermes, avec prise en compte d'une vitesse de vent en façade égale à la vitesse de vent météorologique de 5 m/s.

Le bâtiment est constitué d'un rez-de-chaussée de 2.50 m de hauteur avec des combles non-aménagés (Figure 1). Les volumes sont de 27 m³ pour la zone confinée, de 97.5 m³ pour la zone des combles et de 250.5 m³ pour la zone du reste du bâti.

Les caractéristiques des défauts d'étanchéité sont données dans le Tableau 12.

Le nuage toxique est en forme de créneau d'une heure de concentration 4640 ppm.

Le Tableau 13 montre que les écarts sur le calcul des débits interzones, entre CONFINE et CONTAM, sont inférieurs à 10⁻⁵. Les écarts sur les concentrations sont inférieurs à 0.7 % (Tableau 16).

Tous les résidus de CONFINE et de CONTAM sont inférieurs à 10⁻⁵ (Tableau 14).

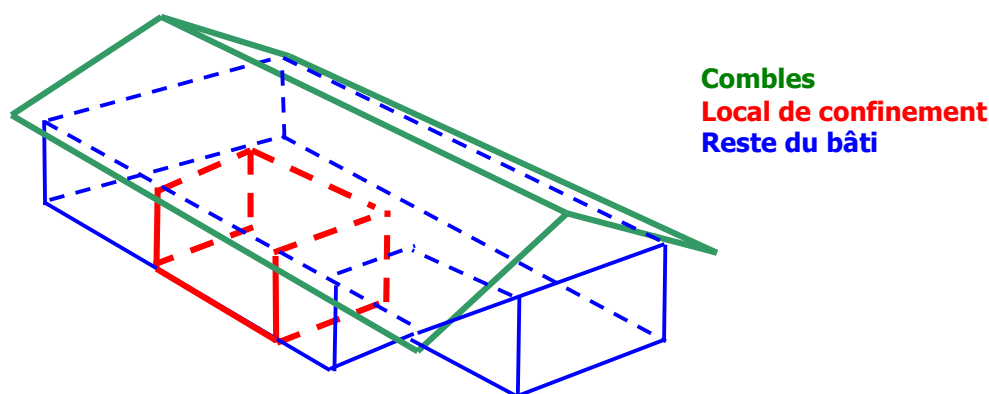


Figure 1 : Représentation schématique de la maison d'étude, source : [8]

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Perméabilité à 1 Pa (L/s)	Coefficient de pression (-)
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	0,0558	-0,7
D - Séparant le local confiné des combles	Sans objet	0,0803	
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	0,1955	
F - Séparant les combles de l'extérieur	Toiture	541,7006	-0,6
G - Séparant les combles du reste du bâti	Sans objet	22,0913	
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	8,3339	0,5
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	15,2677	-0,7

Tableau 12 : Données du cas Test 2

Défaut d'étanchéité	Débit massique (kg/h)	Débit massique (kg/h)	Écart(%)
	CONFINE	CONTAM	
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	-0,3821	-0,3821	0,00%
D - Séparant le local confiné des combles	-0,2115	-0,2115	0,00%
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	0,5936	0,5936	0,00%
F - Séparant les combles de l'extérieur	-99,772	-99,7712	0,00%
G - Séparant les combles du reste du bâti	99,5605	99,5597	0,00%
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	224,4556	224,456	0,00%
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	-124,3014	-124,303	0,00%

Tableau 13 : Résultats du cas Test 2, source : fichier Validation – cas A bis –3z isoT.prj

Zone	Débit massique entrant CONFINE (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONFINE (%)	Débit massique entrant CONTAM (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONTAM (%)
Local confiné	0,594	0,000 %	0,594	0,000%
Combles non-aménagés	99,772	0,000 %	99,771	0,000%
Bâti (hors zone confinée et combles)	224,456	0,000 %	224,456	0,000%

Tableau 14 : Résidus de convergence des simulations

	Temps (h)	CONFINE	CONTAM	Écart (%)
Local	1h	24,69	24,70	0,04%
	2h	55,96	55,80	-0,29%
Bâti	1h	2440,46	2440,00	-0,02%
	2h	1177,50	1170,00	-0,64%
Combles	1h	875,39	876,00	0,07%
	2h	1326,53	1320,00	-0,49%
Maximum (Cmax)	Cmax (mg/m ³)	55,96	55,80	-0,29%
	t (Cmax) (h)	2,00	2,00	0,00%

Tableau 15 : Comparaison des concentrations (mg/m³) en polluant dans les différentes zones

2.3 Cas test n°3a

Ce cas test est basé sur la modélisation des échanges aérauliques d'une maison individuelle en conditions isothermes, avec prise en compte d'une vitesse de vent en façade de 2.262 m/s.

Le local de confinement est abrité du site industriel et possède un taux de renouvellement d'air de 2.5 vol/h à 50Pa.

Les valeurs de perméabilité à l'air sont : pour les combles, $Q_{4Pa_surf} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ par m^2 ; pour le bâti, $Q_{4Pa_surf} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$ par m^2 .

Le nuage toxique est en forme de créneau d'une heure et de concentration 5000 ppm.

Le Tableau 13 montre que les écarts sur le calcul des débits interzones, entre CONFINE et CONTAM, sont inférieurs à 0.5%, mise à part pour le débit concernant la surface D. L'écart de 18 % observé sur ce débit s'explique par le fait qu'il s'agit d'un très faible débit. (Nous reviendrons sur ce point en partie 2.7). L'influence sur les concentrations reste très faible, puisque les écarts sont inférieurs à 0.5 %.

Tous les résidus de CONFINE et de CONTAM sont inférieurs à 10^{-5} (Tableau 17).

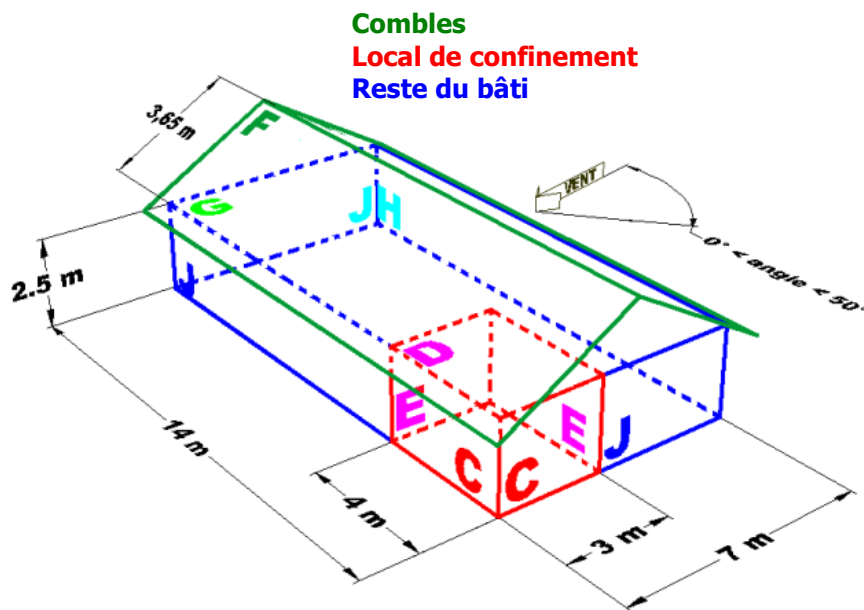


Figure 2 : Représentation schématique de la maison d'étude, source : [6]

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Débit massique (kg/h)	Débit massique (kg/h)	Écarts(%)
		CONFINE	CONTAM	
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	-1,1242	-1,119	-0,46%
D - Séparant le local confiné des combles	Sans objet	0,0563	0,0459	-18,39%
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	1,0679	1,0731	0,48%
F - Séparant les combles de l'extérieur	Toiture	-34,865	-34,8619	-0,01%
G - Séparant les combles du reste du bâti	Sans objet	34,9213	34,9079	-0,04%
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	71,2298	71,2092	-0,03%
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	-35,2406	-35,2282	-0,04%

Tableau 16 : Écarts sur les débits interzones, source : fichier Validation -3F12 isoT- 2.5vh.prj

Zone	Débit massique entrant CONFINE (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONFINE (%)	Débit massique entrant CONTAM (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONTAM (%)
Local confiné	1,124	0,000%	1,119	0,000%
Combles non-aménagés	34,921	0,000%	34,908	0,000%
Bâti (hors zone confinée et combles)	71,230	0,000%	71,209	0,000%

Tableau 17 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m3)				
	Temps (h)	CONFINE	CONTAM	Écarts (%)
Local	1h	18,43	18,50	0,38%
	2h	49,69	49,60	-0,18%
Bâti	1h	1203,89	1200,00	-0,32%
	2h	927,12	923,00	-0,45%
Combles	1h	293,61	294,00	0,13%
	2h	621,92	620,00	-0,31%
Maximum (Cmax)	Cmax (mg/m3)	49,69	49,60	-0,18%
	t (Cmax) (h)	2,00	2,00	0,00%

Tableau 18 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones

2.4 Cas test n°3b

Ce cas test est proche du cas test n°3a. Trois éléments sont changés :

- La vitesse de vent en façade est calculée à partir de conditions météorologiques 5D. Pour le calcul de la vitesse de vent en façade, la loi de Monin-Obukov a été retenue avec une longueur de rugosité de 0.183 m (habitat dispersé), ainsi qu'une hauteur de bâtiment de 3.54 m ;
- Le local de confinement est exposé au site industriel ;
- Le nuage toxique est un créneau de durée 1 heure et de concentration 5000 ppm et la concentration à ne pas dépasser dans le local pendant deux heures de confinement est égale à 190 ppm.

Le Tableau 19 montre que les écarts sur le calcul des débits interzones, entre CONFINE et CONTAM, sont inférieurs à 0.06 %. Les écarts sur les concentrations sont inférieurs à 0.9 % (Tableau 21).

Tous les résidus de CONFINE et de CONTAM sont inférieurs à 10^{-5} (Tableau 20).

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Débit massique (kg/h)	Débit massique (kg/h)	Écarts(%)
		CONFINE	CONTAM	
A - Séparant le local confiné de l'extérieur	Exposé au vent	1,3759	1,375	-0,06%
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	-0,4036	-0,4034	-0,06%
D - Séparant le local confiné des combles	Sans objet	-0,446	-0,4457	-0,06%
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	-0,5262	-0,5259	-0,06%
F - Séparant les combles de l'extérieur	Toiture	-38,222	-38,2122	-0,03%
G - Séparant les combles du reste du bâti	Sans objet	37,776	37,7664	-0,03%
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	103,2298	103,203	-0,03%
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	-65,9801	-65,9624	-0,03%

Tableau 19 : Écarts sur les débits interzones, source : fichier Validation-5D11 isoT 0.6vh.prj

Zone	Débit massique entrant CONFINE (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONFINE (%)	Débit massique entrant CONTAM (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONTAM (%)
Local confiné	1,376	0,000%	1,375	0,000%
Combles non-aménagés	38,222	0,000%	38,212	0,000%
Bâti (hors zone confinée et combles)	103,756	0,000%	103,729	0,000%

Tableau 20 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m3)				
	Temps (h)	CONFINE	CONTAM	Écarts (%)
Local	1h	186,89	187,00	0,06%
	2h	182,20	181,00	-0,66%
Bâti	1h	1645,06	1640,00	-0,31%
	2h	1118,18	1110,00	-0,74%
Combles	1h	435,30	436,00	0,16%
	2h	850,55	848,00	-0,30%
Maximum (Cmax)	Cmax (mg/m3)	189,15	188,00	-0,61%
	t (Cmax) (h)	1,02	1,01	-0,99%

Tableau 21 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones

2.5 Cas test n°4a

Ce cas test repose sur l'étude des échanges aérauliques d'un bâtiment collectif en conditions isothermes, avec prise en compte d'une vitesse de vent en façade calculée selon la relation de Businger ([4]) et la longueur de Monin-Obukov, à partir de conditions météorologiques 5D. Pour le calcul de la vitesse de vent en façade, une longueur de rugosité de 0.95 m (zone urbaine/industrielle) a été retenue, ainsi qu'une hauteur de bâtiment de 12 m.

Les dimensions du bâtiment sont données en Figure 2. Le local de confinement est exposé au site industriel au niveau de la façade de largeur 10m et a un taux de renouvellement d'air de 5 vol/h à 50 Pa. Le coefficient de pression en toiture est supposé égal à -0.6 (protection normale, [3]).

La perméabilité à l'air de la zone bâti est prise égale à $Q_{4Pa_surf} = 3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$.

Le nuage toxique est un créneau de durée 1 heure et de concentration 5000 ppm.

Le Tableau 22 montre que les écarts sur le calcul des débits interzones, entre CONFINE et CONTAM, sont inférieurs à 0.2 %. Les écarts sur les concentrations sont inférieurs à 0.5 % (Tableau 24).

Tous les résidus de CONFINE et de CONTAM sont inférieurs à 10^{-5} (Tableau 23).

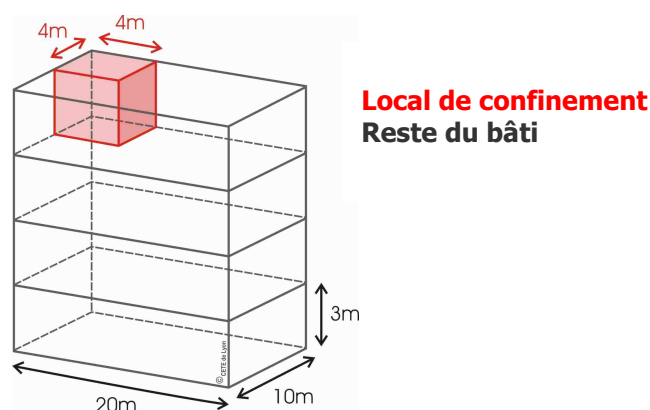


Figure 3 : Représentation schématique du bâtiment d'étude, source : [6]

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Débit massique (kg/h)	Débit massique (kg/h) CONTAM	Écarts(%)
CONFINE				
A - Séparant le local confiné de l'extérieur	Exposé au vent	21,8415	21,8077	-0,15%
B - Séparant le local confiné de l'extérieur	Toiture	-4,3242	-4,3177	-0,15%
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	-6,257	-6,2473	-0,16%
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	-11,2603	-11,2428	-0,16%
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	1101,2724	1101,35	0,01%
I - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Toiture	42,4305	42,3979	-0,08%
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	-1154,9633	-1154,99	0,00%

Tableau 22 : Écarts sur les débits interzones, source : fichier Validation – 5D21 isoT 5vh.prj

Zone	Débit massique entrant CONFINE (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONFINE (%)	Débit massique entrant CONTAM (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONTAM (%)
Local confiné	21,842	0,000%	21,808	0,000%
Bâti (hors zone confinée et combles)	1154,963	0,000%	1154,901	0,000%

Tableau 23 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m3)				
	Temps (h)	CONFINE	CONTAM	Écarts (%)
Local	1h	1575,56	1580,00	0,28%
	2h	1095,33	1090,00	-0,49%
Bâti	1h	1663,36	1660,00	-0,20%
	2h	1126,69	1120,00	-0,60%
Maximum (Cmax)	Cmax (mg/m3)	1589,22	1590,00	0,05%
	t (Cmax) (h)	1,02	1,01	-0,82%

Tableau 24 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones

2.6 Cas test n°4b

Ce cas test est proche du cas test n°4a. Quatre éléments sont changés :

- La vitesse de vent en façade est calculée à partir de conditions météorologiques 10D ;
- Les conditions ne sont pas isothermes car la température extérieure est prise égale à 0°C ;
- Le local de confinement est abrité du site industriel ;
- Son taux de renouvellement d'air est de 2.5 vol/h à 50 Pa.

Le Tableau 25 montre que les écarts sur le calcul des débits interzones, entre CONFINE et CONTAM, sont inférieurs à 0.4 %. Les écarts sur les concentrations sont inférieurs à 0.7 % (Tableau 27).

Tous les résidus de CONFINE et de CONTAM sont inférieurs à 10^{-5} (Tableau 26).

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Hauteur du défaut (m)	Débit massique (kg/h)		Écarts(%)
			CONFINE	CONTAM	
B - Séparant le local confiné de l'extérieur	Toiture	12	1,6527	1,6474	-0,32%
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	10.5	-9,9107	-9,8795	-0,31%
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	10.5	8,2579	8,2321	-0,31%
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	10.5	3460,3213	3460,7200	0,01%
I - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Toiture	12	-316,9436	-316,9860	0,01%
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	10.5	-3135,1197	-3135,5000	0,01%

Tableau 25 : Écarts sur les débits interzones, source : fichier Validation-10D22 non isoT 2.5vh.prj

Zone	Débit massique entrant CONFINE (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONFINE (%)	Débit massique entrant CONTAM (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONTAM (%)
Local confiné	9,911	0,000%	9,880	0,000%
Bâti (hors zone confinée et combles)	3460,321	0,000%	3460,718	0,000%

Tableau 26 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m3)				
	Temps (h)	CONFINE	CONTAM	Écarts (%)
Local	1h	386,40	386,52	0,03%
	2h	578,42	575,56	-0,49%
Bati	1h	3294,55	3299,23	0,14%
	2h	985,92	978,93	-0,71%
Maximum (Cmax)	Cmax (mg/m3)	578,42	575,56	-0,49%
	t (Cmax) (h)	2,00	1,99	-0,42%

Tableau 27 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones

2.7 Bilan sur la validation

La méthode de validation montre que les écarts entre les débits calculés par les deux modèles sont très faibles, de l'ordre de 0.5 %, et que les écarts sur les concentrations sont inférieurs à 4.5 %. Cependant, une grande part de l'écart constaté sur les concentrations entre CONFINE et CONTAM s'explique par le fait que les résultats de CONTAM en terme de concentration ne peuvent être extraits avec plus de trois chiffres significatifs.

Dans un seul cas (Tableau 16), les écarts entre CONFINE et CONTAM sur les débits deviennent importants. Ce cas peut se présenter lorsque certains débits sont très faibles. Cet écart important peut s'expliquer par une linéarisation des très faibles débits dans CONTAM qui est effectuée à la fois pour des raisons physiques et pour faciliter la convergence. Toutefois, les conséquences de ces écarts sur les concentrations restent très faibles. En effet, dans l'exemple du cas 3a (Tableau 16), le débit en question est de l'ordre de 0.05 kg/h, ce qui représente seulement 5 % du débit global du local de confinement.

CONCLUSION

La méthode de validation appliquée à l'outil CONFINE montre que les écarts entre les débits calculés par les deux modèles sont très faibles, de l'ordre de 0.5 %, avec une excellente convergence de CONFINE puisque l'erreur relative entre les débits entrant et sortant de chaque zone reste toujours inférieure à 10^{-5} . Les écarts sur les concentrations sont inférieurs à 4.5 %, mais seraient peut être inférieurs si la précision des données extraites de CONTAM pouvait être augmentée. L'écart maximum est de 0.7 % pour la concentration dans le local de confinement.

Dans le cas de très faibles débits, l'écart entre les débits calculés par CONFINE et ceux calculés par CONTAM peut atteindre 20 %. Ceci est dû à la linéarisation des petits débits dans CONTAM. Toutefois, sur les cas testés, ces écarts sur les faibles débits n'ont pas d'influence sur les concentrations, car ils représentent une faible part du débit global d'infiltration dans le local confiné.

Le principe de la méthode appliquée à la validation de CONFINE peut être appliqué à tout autre outil de modélisation des transferts aérauliques en situation de confinement. Il s'agira alors de modéliser avec ce nouvel outil tous les cas tests présentés et de comparer les résultats obtenus avec ceux de CONTAM.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier W. Stuart Dols et George Walton du NIST pour leur aide précieuse pour l'utilisation de CONTAM.

RÉFÉRENCES

- [1] AICVF. 1985. Aéraulique. *Principes de l'aéraulique appliqués au génie climatique. Collection des guides de l'AICVF*. PYC édition, Ivry-sur-Seine, France.
- [2] ASHRAE. 2001. *2001 ASHRAE Handbook: Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
- [3] EN 15242. 2007. *Méthodes de calcul pour la détermination des débits d'air dans les bâtiments y compris l'infiltration. Ventilation des bâtiments*. Août 2007.
- [4] Businger, J. A., Wyngaard, J. C., Izumi, Y., and Bradley, E. F.: 1971, *Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer*, J. Atmos. Sci. 28, 181–189.
- [5] Havens, J., and Spicer, T.O., *Development of an atmospheric dispersion model for heavier-than-air mixtures (DEGADIS model)*, Vols. 1- 3, University of Arkansas (1985)
- [6] Ministère de l'Écologie MEEDDAT, PPRT. *Complément technique sur la vulnérabilité aux effets toxiques*, INERIS – CERTU - CETE de Lyon, 2008.
- [7] Ministère de l'Écologie MEEDDAT, PPRT. *Complément technique sur la vulnérabilité aux effets toxiques. Rapport d'études sur la modélisation de la pénétration des polluants dans le bâtiment*, CETE de Lyon .
- [8] Voisin, G., Influence de la perméabilité à l'air des bâtiments sur la pénétration de polluants extérieurs toxiques dans un local de confinement. *Étude numérique et expérimentale pour le développement d'un outil opérationnel de prévention du risque toxique*. INSA de Lyon – CETHIL - CETE de Lyon, mémoire de master MEGA génie civil, 2007, 80p.
- [9] Walton, G.G., Dols, S.W. 2006. CONTAM 2.4b. *User Guide and Program Documentation*. NIST. NISTIR 7251. Gaithersburg, MD.

ANNEXE 1 : CRITÈRES DE CONVERGENCE DE CONTAM ET DE CONFINE

Rappels

Dans l'outil CONFINE du CETE de Lyon, les critères de convergence retenus sont les suivants :

$$\sum_i \frac{\left(\sum_j q_{i,j} \right)^2}{\left(\sum_j S_{i,j} \cdot v_{réf,i} \cdot \rho_0 \right)^2} < \varepsilon_1 \quad (18)$$

$$\max_i \left| \frac{\sum_j q_{entrant} - \sum_j q_{sortant}}{\sum_j q_{entrant}} \right| = \max_i \left| \frac{\sum_j q_{j,i}}{\sum_j q_{entrant}} \right| < \varepsilon_2 \quad (19)$$

Les critères ε_1 et ε_2 sont pris respectivement égaux à 10^{-5} et 2 %.

Dans CONTAM, le critère de convergence est le suivant pour chaque zone i :

$$\forall i \frac{\left| \sum_j q_{j,i} \right|}{\sum_j |q_{j,i}|} < \varepsilon \quad (21)$$

avec un test pour éviter la division par zéro:

$$\sum_j |q_{j,i}| < \varepsilon_0 \quad (22)$$

Dans les simulations réalisées, $\varepsilon = 10^{-5}$ et $\varepsilon_0 = 10^{-6} \text{ kg.s}^{-1}$.

Nous avons vu que la qualité de la convergence, dans CONFINE comme dans CONTAM, peut être estimée par la valeur des résidus (20).

$$\text{résidu}_i(\%) = r_i(\%) = \left| \frac{\sum_j q_{entrant} - \sum_j q_{sortant}}{\sum_j q_{entrant}} \right| = \frac{\left| \sum_j q_{j,i} \right|}{\sum_j q_{j,i,entrant}} \quad (20)$$

Comparaison de l'exigence sur la convergence dans CONFINE et dans CONTAM

De ce point de vue, le critère (21) de CONTAM est moins exigeant que le critère (19) de CONFINE. En effet, le critère de convergence (21) met en jeu une fraction (rapport de sommes des débits) qui correspond en ordre de grandeur à la moitié de la fraction mise en jeu dans le critère de convergence (19). Dans CONTAM, cette fraction doit être inférieure à 10^{-5} alors que dans CONFINE la fraction doit être inférieure à seulement 10^{-2} .

$$\begin{aligned} ODG \left(\max_i \left| \frac{\sum_j q_{entrant} - \sum_j q_{sortant}}{\sum_j q_{entrant}} \right| \right) &= ODG \left(\max_i \left| \frac{\sum_j q_{j,i}}{\sum_j q_{entrant}} \right| \right) \\ &= ODG \left(\frac{\left| \sum_j q_{j,i} \right|}{\sum_j |q_{j,i}| / 2} \right) = 2 \times ODG \left(\frac{\left| \sum_j q_{j,i} \right|}{\sum_j |q_{j,i}|} \right) \end{aligned}$$

Équation 1 : Comparaison en ordre de grandeur (ODG) des critères de convergence (19) et (21)

ANNEXE 2 : APPLICATION DE LA MÉTHODE A UN AUTRE OUTIL DE MODÉLISATION

Le principe de la méthode appliquée à la validation de l'outil de modélisation du CETE de Lyon peut être appliqué à tout autre outil de modélisation des transferts aérauliques en situation de confinement. Il s'agira alors de modéliser avec ce nouvel outil tous les cas tests présentés.

Les résultats obtenus en terme de débits, de résidus et de concentrations, seront comparés aux résultats obtenus dans les mêmes conditions avec CONTAM.

La qualité des résultats obtenus avec ce nouvel outil de modélisation pourra être ensuite évaluée par rapport à la qualité des résultats obtenus avec CONFINE.

Sur les six cas tests, les trois tableaux de comparaison des résultats (débits, résidus sur les débits, et concentrations) seront remplis.

CETE
de Lyon

département
Villes et Territoires

**46, rue Saint-Théobald
BP 128
38081 l'Isle d'Abeau
cedex**

téléphone :
04 74 27 51 03

télécopie :
04 74 27 51 18

mél : [dvt.cete-lyon
@equipement.gouv.fr](mailto:dvt.cete-lyon@equipement.gouv.fr)

**Le CETE de Lyon
appartient au Réseau
Scientifique et Technique
de l'Équipement**

