

Modélisation des transferts aérauliques en situation de confinement

*Bases théoriques et éléments de
validation*

Août 2008



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



Ministère
de l'Écologie, de l'Énergie,
du Développement durable
et de l'Aménagement
du territoire

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

Aout 2008

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
Rémi Carrié, tél 04 74 27 51 61, remi.carrie@developpement-durable.gouv.fr
Gaëlle Guyot, tél 04 74 27 51 67, gaelle.guyot@developpement-durable.gouv.fr

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

SOMMAIRE

RESUME	9
INTRODUCTION	11
1 BASES THEORIQUES ET HYPOTHESES DE L'OUTIL CONFINE DE MODELISATION DES TRANFERTS AERAULIQUES 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 AERAULIQUES EN SITUATION DE CONFINEMENT	21
2.1 Cas test n°1.....	21
2.2 Cas test n°2.....	23
2.3 Cas test n°3a.....	25
2.4 Cas test n°3b	27
2.5 Cas test n°4a.....	28
2.6 Cas test n°4b	30
2.7 Bilan sur la validation	31
CONCLUSION	32
REMERCIEMENTS	32
REFERENCES	33
ANNEXE 1 : CRITERES DE CONVERGENCE DE CONTAM ET DE CONFINE	34
ANNEXE 2 : APPLICATION DE LA METHODE A UN AUTRE OUTIL DE MODELISATION	36

LISTE DES FIGURES

Figure 2 : Représentation schématique de la maison d'étude, source : [8].....	23
Figure 3 : Représentation schématique de la maison d'étude, source : [6].....	25
Figure 4 : Représentation schématique du bâtiment d'étude, source : [6]	28

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Coefficient de pression du vent proposés dans la norme NF EN 13465 [3].....	15
Tableau 2 : Paramètres de la couche limite atmosphérique (ASHRAE, 2001, p. 16.3, [2])...	15
Tableau 3 : Paramètres caractéristiques d'un profil du vent de type « logarithmique » (AICVF, 1985, p. 46, [1]).....	16
Tableau 4 : Paramètres de Monin selon la classe de stabilité atmosphérique, source : Haven and Spicer ([5]).....	16
Tableau 5 : Parois prises en compte dans le modèle CONFINE.....	18
Tableau 6 : Températures fixées dans les différentes zones du bâtiment test.....	21
Tableau 7 : Comparaison des débits calculés par CONFINE et CONTAM sur le cas test n°1, source : fichier Test validation – Anisotherme – 3z.explicit.prj	22
Tableau 8 : Résidus de convergence des simulations	22
Tableau 9 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....	22
Tableau 10 : Écarts sur les débits interzones, source : fichier Validation – cas A bis –3z isoT.prj	24
Tableau 11 : Résidus de convergence des simulations	24
Tableau 12 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....	24
Tableau 13 : Écarts sur les débits interzones, source : fichier Validation –3F12 isoT- 2.5vh.prj	26
Tableau 14 : Résidus de convergence des simulations	26
Tableau 15 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....	26
Tableau 16 : Écarts sur les débits interzones, source : fichier Validation-5D11 isoT 0.6vh.prj	27
Tableau 17 : Résidus de convergence des simulations	27
Tableau 18 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....	28
Tableau 19 : Écarts sur les débits interzones, source : fichier Validation – 5D21 isoT 5vh.prj	29
Tableau 20 : Résidus de convergence des simulations	29
Tableau 21 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....	29
Tableau 22 : Écarts sur les débits interzones, source : fichier Validation-10D22 non isoT 2.5vh.prj	30
Tableau 23 : Résidus de convergence des simulations	30
Tableau 24 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....	31
Tableau 25 : Écarts sur les débits interzones calculés avec un nouvel outil de modélisation, nommé outil X.....	36
Tableau 26 : Résidus de convergence des simulations	37
Tableau 27 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....	37

<i>Tableau 28 : Écart sur les débits interzones calculés avec un nouvel outil de modélisation, nommé outil X.....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 29 : Résidus de convergence des simulations</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 30 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 31 : Écart sur les débits interzones calculés avec un nouvel outil de modélisation, nommé outil X.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 32 : Résidus de convergence des simulations</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 33 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 34 : Écart sur les débits interzones calculés avec un nouvel outil de modélisation, nommé outil X.....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 35 : Résidus de convergence des simulations</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 36 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 37 : Écart sur les débits interzones calculés avec un nouvel outil de modélisation, nommé outil X.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 38 : Résidus de convergence des simulations</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 39 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 40 : Écart sur les débits interzones calculés avec un nouvel outil de modélisation, nommé outil X.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 41 : Résidus de convergence des simulations</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 42 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones.....</i>	<i>42</i>

RESUME

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 reposeraient 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, la résolution des équations d'équilibre massique des débits de polluants 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.

« 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 CONFINE, et pourra être appliquée à toute version ultérieure de CONFINE ou à d'autres logiciels de modélisation des transferts aérauliques en situation de confinement utilisés dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT).

1 BASES THEORIQUES ET HYPOTHESES DE L'OUTIL CONFINE DE MODELISATION DES TRANSFERTS AERAIQUES 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 et leur perméabilité à l'air soient globalement préservées, par rapport au bâtiment réel étudié.

Des exemples de représentation de bâtiments en 3 zones sont donnés dans le reste du document (Figure 2).

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.** 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 (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 CONFINE, l'utilisateur a le choix entre trois relations.

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

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

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 danger¹ concernant le profil du vent. Cette loi repose sur la relation de Businger ([4]) et la longueur de Monin-Obukov.

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

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).

¹ Les études de danger (EDD) sont réalisées par les exploitants qui démontrent ainsi leur maîtrise des risques à la source.

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) :

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

avec

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

Pour des conditions neutres (D) :

$$\psi = 0 \quad (8)$$

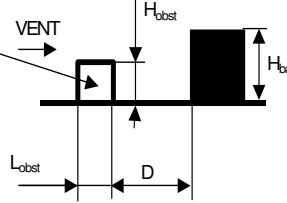













Pour des conditions stables (E, F) :

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

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.

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

Coefficients de pression du vent

Type de bâtiment	Protection		Façade exposée au vent	Façade latérale et abritée du vent	Toiture selon la pente		
		Obstacle si $H_{obs}/H_{bat} > 0.3$ et $L_{obs}/H_{bat} > 0.3$					
Hauteur du bâtiment < 15 m		ouverte $D/H_{obs} > 4$	+ 0,50	- 0,70	- 0,70	- 0,60	- 0,20
15 m < Hauteur du bâtiment < 50 m ou Hauteur du bâtiment > 50 m mais l'obstacle est plus haut que le bâtiment		normale $1.5 < D/H_{obs} < 4$	+ 0,25	- 0,50	- 0,60	- 0,50	- 0,20
		forte $D/H_{obs} < 1.5$	+ 0,05	- 0,30	- 0,50	- 0,40	- 0,20
		ouverte $D/H_{obs} > 4$	+ 0,65	- 0,70	- 0,70	- 0,60	- 0,20
Hauteur du bâtiment > 50 m et l'obstacle est moins haut que le bâtiment		normale $1.5 < D/H_{obs} < 4$	+ 0,45	- 0,50	- 0,60	- 0,50	- 0,20
		forte $D/H_{obs} < 1.5$	+ 0,25	- 0,30	- 0,50	- 0,40	- 0,20
		ouverte $D/H_{obs} > 4$	+ 0,80	- 0,70	- 0,70	- 0,60	- 0,20
Hauteur du bâtiment > 50 m et l'obstacle est moins haut que le bâtiment		normale $1.5 < D/H_{obs} < 4$	+ 0,60	- 0,50	- 0,60	- 0,50	- 0,20
		forte $D/H_{obs} < 1.5$	+ 0,40	- 0,30	- 0,50	- 0,40	- 0,20
		ouverte $D/H_{obs} > 4$	+ 0,80	- 0,70	- 0,70	- 0,60	- 0,20

Ce tableau est tiré des paragraphes 5.1 et 5.2 et l'annexe A4 de la norme NF EN 13465 "Ventilation des bâtiments - Méthodes de calcul pour la détermination des débits d'air dans les logements"

La réglementation thermique 2000 fait référence à cette norme (paragraphe 4.2 du chapitre I des règles Th-C) et les valeurs de coefficients de pression sur les façades sont tirées également de cette norme (Tableau n° 24 du paragraphe 5.64 du chapitre II des règles Th-C).

Tableau 1. Coefficient de pression du vent proposés dans la norme NF EN 13465 [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) Cultures basses	0.202	0.070
5	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	-17.2	-26	-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])

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 :

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

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,

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 5. L'exposant est généralement 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 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 5 : 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 :

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

Zone 2. Combles non aménagés :

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

Zone 3. Reste du bâtiment :

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

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)
Σ _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 CONFINE, on cherche, grâce au solveur d'Excel utilisé en mode Newton, les valeurs de pressions de référence {p₁, p₂, p₃} qui minimisent une somme normalisée des écarts des débits sur chaque zone. Le critère de convergence absolue retenu est le suivant :

$$\sum_i \frac{\left(\sum_j q_{i,j} \right)^2}{\left(\sum_j S_{i,j} \cdot v_{ref,i} \cdot \rho_0 \right)^2} < \epsilon_1 \quad (18)$$

où

q _{i,j}	débit massique entrant (>0) ou sortant (<0) de la zone i depuis ou vers la zone j (kg/h)
v _{réf}	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_{réf} = 1.8 m/h pour le local et v_{réf} = 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.

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.

Le bâtiment est constitué d'un rez-de-chaussée de 2.50 m de hauteur avec des combles non-aménagés. Les volumes sont de 30 m³ pour la zone confinée, de 51.5 m³ pour la zone des combles et de 215 m³ pour la zone du reste du bâti.

Les caractéristiques des défauts d'étanchéité sont données dans le Tableau 7.

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 6 : 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 7 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 9 montre que l'écart est plus important mais reste inférieur à 4.4 %, et inférieur à 0.5 % pour la concentration du local de confinement.

Tous les résidus de CONFINE et de CONTAM sont inférieurs à 10⁻⁵ (Tableau 8).

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Hauteur du défaut (m)	Perméabilité à 1 Pa (L/s)	Débit massique (kg/h)		Écart (%)
				CONFINE	CONTAM	
A - Séparant le local confiné de l'extérieur	Exposé au vent	2.5	0.7262	13.3565	13.3564	0.00%
B - Séparant le local confiné de l'extérieur	Toiture	2.5	0.8583	-5.0642	-5.0645	-0.01%
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	0	1.1224	-14.2634	-14.2637	-0.02%
D - Séparant le local confiné des combles	Sans objet	5	1.5185	8.5530	8.5525	-0.05%
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	1.5	1.9146	-2.5818	-2.5806	-0.03%
F - Séparant les combles de l'extérieur	Toiture	6	102.5197	6.7880	6.7767	-0.24%
G - Séparant les combles du reste du bâti	Sans objet	5	3.2630	1.7691	1.7757	0.65%
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	1.5	3.6157	62.8520	62.8508	0.01%
I - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Toiture	2.5	3.7921	-24.4312	-24.4335	-0.02%
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	1.5	4.1449	-39.2201	-39.2222	-0.01%

Tableau 7 : Comparaison des débits calculés par CONFINE et CONTAM sur le 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 8 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m ³)				
	Temps (h)	CONFINE	CONTAM	Écart (%)
Local	1h	1466,66	1460,26	-0,44%
	2h	938,96	934,30	-0,50%
Bâti	1h	1768,20	1835,01	3,78%
	2h	1165,81	1216,02	4,31%
Combles	1h	552,40	562,13	1,76%
	2h	527,62	535,00	1,40%
Maximum (C _{max})	C _{max} (mg/m ³)	1477,99	1473,18	-0,33%
	t (C _{max}) (h)	1,02	1,01	-0,82%

Tableau 9 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones

2.2 Cas test n°2

Les échanges aérauliques d'une maison individuelle ont été étudiés ([8]) 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 2). 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 10.

Le Tableau 10 montre que les écarts sur le calcul des débits interzones, entre CONFINE et CONTAM, sont inférieurs à 0.02 %. Les écarts sur les concentrations sont inférieurs à 0.7 % (Tableau 13).

Tous les résidus de CONFINE et de CONTAM sont inférieurs à 10⁻⁵ (Tableau 11).

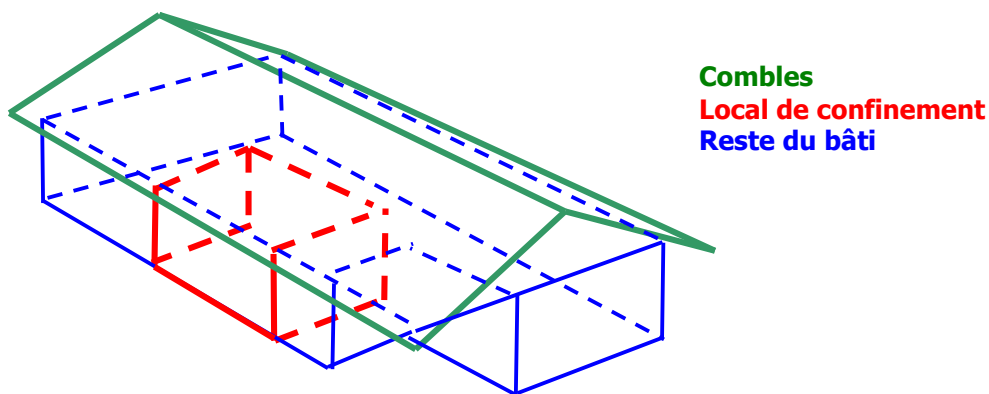


Figure 2 : Représentation schématique de la maison d'étude, source : [8]

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Perméabilité à 1 Pa (L/s)	Débit massique (kg/h) CONFINE	Débit massique (kg/h) CONTAM	Écart(%)
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	0,0558	-0,3821	-0,3821	0,00%
D - Séparant le local confiné des combles	Sans objet	0,0803	-0,2115	-0,2115	-0,02%
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	0,1955	0,5936	0,5936	-0,01%
F - Séparant les combles de l'extérieur	Toiture	541,7006	-99,7720	-99,7700	0,00%
G - Séparant les combles du reste du bâti	Sans objet	22,0913	99,5605	99,5600	0,00%
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	8,3339	224,4556	224,4560	0,00%
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	15,2677	-124,3014	-124,3030	0,00%

Tableau 10 : Écart sur les débits interzones, 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 11 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m ³)					
	Temps (h)	CONFINE	CONTAM	Écart(%)	
Local	1h	24,69	24,70	0,06%	
	2h	55,96	55,80	-0,29%	
Bâti	1h	2440,46	2440,00	-0,02%	
	2h	1177,50	1170,00	-0,64%	
Combles	1h	875,41	876,00	0,07%	
	2h	1326,54	1320,00	-0,49%	
Maximum (Cmax)	Cmax (mg/m³)	55,96	55,80	-0,29%	
	t (Cmax) (h)	2,00	2,00	0,00%	

Tableau 12 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones

2.3 Cas test n°3a

Les échanges aérauliques d'une maison individuelle ont été étudiés ([6]) 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 3F.

Le bâtiment est constitué d'un rez-de-chaussée de 2.50 m de hauteur avec des combles non-aménagés (Figure 3). Les volumes sont de 30 m³ pour la zone confinée, de 51.5 m³ pour la zone des combles et de 215 m³ pour la zone du reste du bâti. Le local de confinement est abrité du site industriel et a une perméabilité à l'air de 2.5 vol/h à 50Pa.

Les caractéristiques des défauts d'étanchéité sont données dans le Tableau 13.

Ce tableau 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 le défaut 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 14).

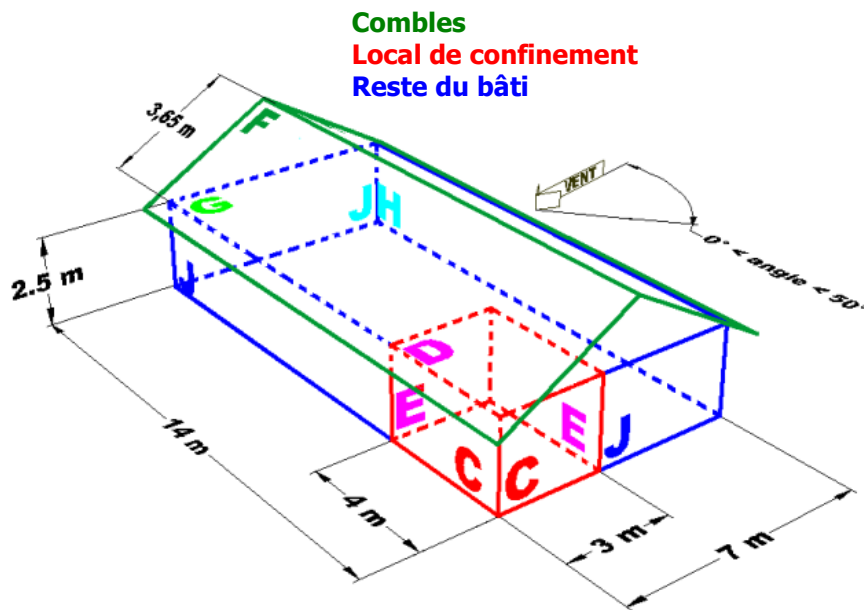


Figure 3 : Représentation schématique de la maison d'étude, source : [6]

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Perméabilité à 1 Pa (L/s)	Débit massique (kg/h) CONFINE	Débit massique (kg/h) CONTAM	Écart(%)
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	0,5715	-1,1242	-1,1190	-0,46%
D - Séparant le local confiné des combles	Sans objet	0,3919	0,0563	0,0459	-18,38%
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	0,5715	1,0679	1,0730	0,48%
F - Séparant les combles de l'extérieur	Toiture	337,9841	-34,8650	-34,8600	-0,01%
G - Séparant les combles du reste du bâti	Sans objet	18,9606	34,9213	34,9100	-0,03%
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	7,7165	71,2298	71,2092	-0,03%
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	11,5748	-35,2406	-35,2282	-0,04%

Tableau 13 : 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 14 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m3)					
	Temps (h)	CONFINE	CONTAM	Écarts (%)	
Local	1h	18,43	18,50	0,37%	
	2h	49,69	49,60	-0,19%	
Bâti	1h	1203,89	1200,00	-0,32%	
	2h	927,12	923,00	-0,44%	
Combles	1h	293,61	294,00	0,13%	
	2h	621,92	620,00	-0,31%	
Maximum (Cmax)	Cmax (mg/m3)	49,69	49,60	-0,19%	
	t (Cmax) (h)	2,00	2,00	0,00%	

Tableau 15 : 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 ;
- Le local de confinement est exposé au site industriel ;
- Sa perméabilité à l'air est de 0.6 vol/h à 50 Pa.

Les caractéristiques des défauts d'étanchéité sont données dans le Tableau 16.

Ce tableau montre que les écarts sur le calcul des débits interzones, entre CONFINE et CONTAM, sont inférieurs à 0.07 %. Les écarts sur les concentrations sont inférieurs à 0.9 % (Tableau 18).

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

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Perméabilité à 1 Pa (L/s)	Débit massique (kg/h)		Écarts(%)
			CONFINE	CONTAM	
A - Séparant le local confiné de l'extérieur	Exposé au vent	0,0784	1,3759	1,3750	-0,06%
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	0,0588	-0,4036	-0,4034	-0,06%
D - Séparant le local confiné des combles	Sans objet	0,0941	-0,4460	-0,4457	-0,07%
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	0,1372	-0,5262	-0,5259	-0,06%
F - Séparant les combles de l'extérieur	Toiture	337,9841	-38,2220	-38,2100	-0,03%
G - Séparant les combles du reste du bâti	Sans objet	18,9606	37,7760	37,7700	-0,02%
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	5,5118	103,2298	103,2030	-0,03%
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	13,7795	-65,9801	-65,9624	-0,03%

Tableau 16 : 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 17 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m ³)				
	Temps (h)	CONFINE	CONTAM	Écarts (%)
Local	1h	186,89	187,00	0,06%
	2h	182,20	181,00	-0,66%
Bâti	1h	1645,18	1640,00	-0,31%
	2h	1119,13	1110,00	-0,82%
Combles	1h	435,31	436,00	0,16%
	2h	850,80	848,00	-0,33%
Maximum (C _{max})	C_{max} (mg/m³)	189,149522	188,00	-0,61%
	t (C_{max}) (h)	1,02	1,01	-0,82%

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

2.5 Cas test n°4a

Les échanges aérauliques d'un bâtiment collectif ont été étudiés ([6]) 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.

Le bâtiment est de 12 m de hauteur sans combles (Figure 3). Les volumes sont de 48 m³ pour la zone confinée et de 2352 m³ pour la zone du reste du bâti. Le local de confinement est exposé au site industriel et a une perméabilité à l'air de 5 vol/h à 50 Pa.

Les caractéristiques des défauts d'étanchéité sont données dans le Tableau 19.

Ce tableau 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 21).

Tous les résidus de CONFINE et de CONTAM sont inférieurs à 10⁻⁵ (Tableau 20).

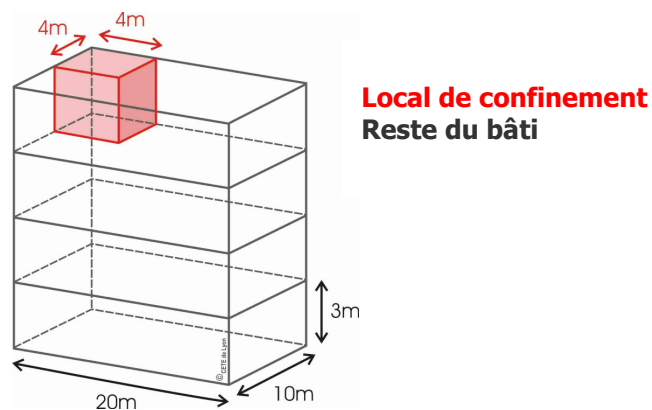


Figure 4 : Représentation schématique du bâtiment d'étude, source : [6]

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Perméabilité à 1 Pa (L/s)	Débit massique (kg/h) CONFINE	Débit massique (kg/h) CONTAM	Écart (%)
A - Séparant le local confiné de l'extérieur	Exposé au vent	0,7368	21,8415	21,8077	-0,15%
B - Séparant le local confiné de l'extérieur	Toiture	0,9824	-4,3242	-4,3177	-0,15%
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	0,7368	-6,2570	-6,2473	-0,16%
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	2,4560	-11,2603	-11,2400	-0,18%
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	35,7165	1101,2724	1101,3500	0,01%
I - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Toiture	60,8504	42,4305	42,3979	-0,08%
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	190,4881	-1154,9633	-1154,9900	0,00%

Tableau 19 : Écart 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 20 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m ³)				
	Temps (h)	CONFINE	CONTAM	Écart (%)
Local	1h	1575,56	1580,00	0,28%
	2h	1095,33	1090,00	-0,49%
Bâti	1h	1660,47	1660,00	-0,03%
	2h	1120,46	1120,00	-0,04%
Maximum (C _{max})	C _{max} (mg/m ³)	1589,22	1590,00	0,05%
	t (C _{max}) (h)	1,02	1,01	-0,82%

Tableau 21 : 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 ;
- Sa perméabilité à l'air est de 2.5 vol/h à 50 Pa.

Les caractéristiques des défauts d'étanchéité sont données dans le Tableau 22.

Ce tableau 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 24).

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

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Perméabilité à 1 Pa (L/s)	Débit massique (kg/h)		Écarts(%)
			CONFINE	CONTAM	
B - Séparant le local confiné de l'extérieur	Toiture	0,4912	1,6527	1,6474	-0,32%
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	0,7368	-9,9107	-9,8795	-0,31%
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	1,2280	8,2579	8,2320	-0,31%
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	39,6850	3460,3213	3460,7200	0,01%
I - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Toiture	60,8504	-316,9436	-316,9860	0,01%
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	190,4881	-3135,1197	-3135,5000	0,01%

Tableau 22 : Écarts sur les débits interzones, source : fichier Validation-10D22 non isoT 2.5vh.prj

Zone	Débit massique entrant CONFINE		Débit massique entrant CONTAM	
	(kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONFINE (%)	(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 23 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m ³)				
	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%
<i>Maximum (C_{max})</i>	C_{max} (mg/m³)	578,42	575,56	-0,49%
	t (C_{max}) (h)	2,00	1,99	-0,42%

Tableau 24 : 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 la méthode de comparaison employée ne permet pas d'extraire des résultats de CONTAM avec plus de trois chiffres significatifs.

Dans certains cas (Tableau 13), les écarts entre CONFINE et CONTAM sur les débits deviennent importants. Ces cas se présentent 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 13), 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 augmenter. 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.

REFERENCES

- [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 13465. 2004. *Méthodes de calcul pour la détermination des débits d'air dans les logements. Ventilation des bâtiments*. Juin 2004.
- [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, à paraître en 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, à paraître en 2008.
- [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 : CRITERES DE CONVERGENCE DE CONTAM ET DE CONFINE

Rappels

Dans CONFINE, 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 METHODE A UN AUTRE OUTIL DE MODELISATION

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 suivants seront remplis.

Cas test 1

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Hauteur du défaut (m)	Perméabilité à 1 Pa (L/s)	Débit massique (kg/h)		Écart (%)
				Outil X	CONTAM	
A - Séparant le local confiné de l'extérieur	Exposé au vent	2.5	0.7262	.	13.3564	.
B - Séparant le local confiné de l'extérieur	Toiture	2.5	0.8583	.	-5.0645	.
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	0	1.1224	.	-14.2637	.
D - Séparant le local confiné des combles	Sans objet	5	1.5185	.	8.5525	.
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	1.5	1.9146	.	-2.5806	.
F - Séparant les combles de l'extérieur	Toiture	6	102.5197	.	6.7767	.
G - Séparant les combles du reste du bâti	Sans objet	5	3.2630	.	1.7757	.
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	1.5	3.6157	.	62.8508	.
I - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Toiture	2.5	3.7921	.	-24.4335	.
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	1.5	4.1449	.	-39.2222	.

Tableau 25 : Écart sur les débits interzones calculés avec un nouvel outil de modélisation, nommé outil X

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

Tableau 26 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m ³)				
	Temps (h)	Outil X	CONTAM	Écarts (%)
Local	1h	.	1460,26	.
	2h	.	934,30	.
Bâti	1h	.	1835,01	.
	2h	.	1216,02	.
Combles	1h	.	562,13	.
	2h	.	535,00	.
<i>Maximum (Cmax)</i>	Cmax (mg/m³)	.	1473,18	.
	t (Cmax) (h)	.	1,01	.

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

Cas test 2

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Perméabilité à 1 Pa (L/s)	Débit massique (kg/h) Outil X	Débit massique (kg/h) CONTAM	Écart(%)
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	0,0558	.	-0,3821	.
D - Séparant le local confiné des combles	Sans objet	0,0803	.	-0,2115	.
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	0,1955	.	0,5936	.
F - Séparant les combles de l'extérieur	Toiture	541,7006	.	-99,7700	.
G - Séparant les combles du reste du bâti	Sans objet	22,0913	.	99,5600	.
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	8,3339	.	224,4560	.
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	15,2677	.	-124,3030	.

Tableau 28 : Écart sur les débits interzones calculés avec un nouvel outil de modélisation, nommé outil X

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

Tableau 29 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m ³)				
	Temps (h)	Outil X	CONTAM	Écart(%)
Local	1h	.	24,70	.
	2h	.	55,80	.
Bâti	1h	.	2440,00	.
	2h	.	1170,00	.
Combles	1h	.	876,00	.
	2h	.	1320,00	.
Maximum (C _{max})	C _{max} (mg/m ³)	.	55,80	.
	t (C _{max}) (h)	.	2,00	.

Tableau 30 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones

Cas test 3a

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Perméabilité à 1 Pa (L/s)	Débit massique (kg/h) Outil X	Débit massique (kg/h) CONTAM	Écart(%)
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	0,5715	.	-1,1190	.
D - Séparant le local confiné des combles	Sans objet	0,3919	.	0,0459	.
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	0,5715	.	1,0730	.
F - Séparant les combles de l'extérieur	Toiture	337,9841	.	-34,8600	.
G - Séparant les combles du reste du bâti	Sans objet	18,9606	.	34,9100	.
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	7,7165	.	71,2092	.
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	11,5748	.	-35,2282	.

Tableau 31 : Écart sur les débits interzones calculés avec un nouvel outil de modélisation, nommé outil X

Zone	Débit massique entrant Outil X (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant Outil X (%)	Débit massique entrant CONTAM (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONTAM (%)
Local confiné	.	.	1,119	0,005%
Combles non-aménagés	.	.	34,910	0,012%
Bâti (hors zone confinée et combles)	.	.	71,210	0,004%

Tableau 32 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m ³)				
	Temps (h)	Outil X	CONTAM	Écart(%)
Local	1h	.	18,50	.
	2h	.	49,60	.
Bâti	1h	.	1200,00	.
	2h	.	923,00	.
Combles	1h	.	294,00	.
	2h	.	620,00	.
<i>Maximum (Cmax)</i>	Cmax (mg/m³)	.	49,60	.
	t (Cmax) (h)	.	2,00	.

Tableau 33 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones

Cas test 3b

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Perméabilité à 1 Pa (L/s)	Débit massique (kg/h) Outil X	Débit massique (kg/h) CONTAM	Écart(%)
A - Séparant le local confiné de l'extérieur	Exposé au vent	0,0784	.	1,3750	.
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	0,0588	.	-0,4034	.
D - Séparant le local confiné des combles	Sans objet	0,0941	.	-0,4457	.
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	0,1372	.	-0,5259	.
F - Séparant les combles de l'extérieur	Toiture	337,9841	.	-38,2100	.
G - Séparant les combles du reste du bâti	Sans objet	18,9606	.	37,7700	.
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	5,5118	.	103,2030	.
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	13,7795	.	-65,9624	.

Tableau 34 : Écarts sur les débits interzones calculés avec un nouvel outil de modélisation, nommé outil X

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

Tableau 35 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m3)				
	Temps (h)	Outil X	CONTAM	Écarts (%)
Local	1h	.	187,00	.
	2h	.	181,00	.
Bâti	1h	.	1640,00	.
	2h	.	1110,00	.
Combles	1h	.	436,00	.
	2h	.	848,00	.
<i>Maximum (Cmax)</i>	Cmax (mg/m3)	.	188,00	.
	t (Cmax) (h)	.	1,01	.

Tableau 36 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones

Cas test 4a

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Perméabilité à 1 Pa (L/s)	Débit massique (kg/h) Outil X	Débit massique (kg/h) CONTAM	Écart(%)
A - Séparant le local confiné de l'extérieur	Exposé au vent	0,7368	.	21,8077	.
B - Séparant le local confiné de l'extérieur	Toiture	0,9824	.	-4,3177	.
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	0,7368	.	-6,2473	.
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	2,4560	.	-11,2400	.
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	35,7165	.	1101,3500	.
I - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Toiture	60,8504	.	42,3979	.
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	190,4881	.	-1154,9900	.

Tableau 37 : Écart sur les débits interzones calculés avec un nouvel outil de modélisation, nommé outil X

Zone	Débit massique entrant Outil X (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant Outil X (%)	Débit massique entrant CONTAM (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONTAM (%)
Local confiné	.	.	21,808	0,000%
Bâti (hors zone confinée et combles)	.	.	1154.901	0,000%

Tableau 38 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m3)				
	Temps (h)	Outil X	CONTAM	Écart(%)
Local	1h	.	1580,00	.
	2h	.	1090,00	.
Bâti	1h	.	1660,00	.
	2h	.	1120,00	.
Maximum (Cmax)	Cmax (mg/m3)	.	1590,00	.
	t (Cmax) (h)	.	1,01	.

Tableau 39 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones

Cas test 4b

Défaut d'étanchéité	Exposition au vent	Perméabilité à 1 Pa (L/s)	Débit massique (kg/h) Outil X	Débit massique (kg/h) CONTAM	Écart(%)
B - Séparant le local confiné de l'extérieur	Toiture	0,4912	.	1,6474	.
C - Séparant le local confiné de l'extérieur	Abrité du vent	0,7368	.	-9,8795	.
E - Séparant le local confiné du reste du bâti	Sans objet	1,2280	.	8,2320	.
H - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Exposé au vent	39,6850	.	3460,7200	.
I - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Toiture	60,8504	.	-316,9860	.
J - Séparant le reste du bâti de l'extérieur	Abrité du vent	190,4881	.	-3135,5000	.

Tableau 40 : Écart sur les débits interzones calculés avec un nouvel outil de modélisation, nommé outil X

Zone	Débit massique entrant Outil X (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant Outil X (%)	Débit massique entrant CONTAM (kg/h)	Résidu par rapport au débit entrant CONTAM (%)
Local confiné	.	.	9,880	0,000%
Bâti (hors zone confinée et combles)	.	.	3460.718	0,000%

Tableau 41 : Résidus de convergence des simulations

Concentrations (mg/m ³)				
	Temps (h)	Outil X	CONTAM	Écart(%)
Local	1h	.	386,52	.
	2h	.	575,56	.
Bati	1h	.	3299,23	.
	2h	.	978,93	.
Maximum (Cmax)	Cmax (mg/m ³)	.	575,56	.
	t (Cmax) (h)	.	1,99	.

Tableau 42 : Comparaison des concentrations en polluant dans les différentes zones

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

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

