

# Indice de confinement de l'air intérieur : des écoles aux logements

## Air stuffiness index: from schools to dwellings

Jacques Ribéron<sup>1</sup>, Olivier Ramalho<sup>1</sup>, Mickaël Derbez<sup>1</sup>, Mickaël Derbez<sup>1</sup>, Bruno Berthineau<sup>1</sup>, Guillaume Wyart<sup>1</sup>, Séverine Kirchner<sup>1</sup>, Corinne Mandin<sup>1</sup>

### Résumé

Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) a proposé en 2007 un indice de confinement de l'air pour les salles de classe, fondé sur la mesure de la concentration en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Sur une échelle de 0 à 5, cet indice, appelé ICONÉ, reflète l'adéquation du renouvellement d'air d'une pièce à sa densité d'occupation. Il prend en compte à la fois les fréquences de situation de confinement, mais également leur intensité. Appliqué à la surveillance réglementaire de la qualité de l'air dans les écoles et lieux d'accueil de la petite enfance, cet indice s'est révélé être un outil pertinent et utile aux gestionnaires soucieux d'améliorer les conditions de ventilation de leurs locaux.

Le présent article montre comment cet indice conçu pour les écoles peut être appliqué à l'habitat, en insistant sur la spécificité de ce lieu de vie, les conditions d'occupation des pièces étant très différentes de celles des salles de classe. Selon l'état d'occupation des pièces, l'état des portes intérieures et des fenêtres, ouvertes ou fermées, l'indice de confinement est très différent d'un logement à l'autre. Les chambres sont systématiquement plus confinées que les séjours. Un indice de confinement relatif à l'ensemble du logement exige des mesures dans les différentes pièces. Aussi, en première approche, il est proposé de se limiter au confinement de l'air dans la chambre principale du logement, en période nocturne, sur une durée d'une semaine.

### Mots-clés

aération, ventilation, gestion, CO<sub>2</sub>, occupation, variabilité spatiale

### Abstract

An air stuffiness index for classrooms, based on the measurement of the carbon dioxide concentration (CO<sub>2</sub>), was developed in 2007 by the scientific and technical center for building (CSTB). So-called ICONÉ, the index ranges from 0 to 5 and reflects the balance between air exchange rate and room's occupancy density. It takes into account both the occurrence and the intensity of CO<sub>2</sub> concentrations. ICONÉ is now used in the mandatory control of indoor air quality in schools and nurseries. It is a relevant and useful tool for building managers to improve ventilation conditions.

This paper presents how this index can be applied to housing, considering the fact that rooms types and occupancies are very different from classrooms. The air stuffiness index may be rather different from one dwelling to another, because of different occupancy conditions and various states of indoor doors and windows, opened or closed. The air in the bedrooms is generally stuffier than in living rooms. Applying the index at the whole dwelling scale is challenging. By default, it is suggested to assess the air stuffiness only in the main bedroom, during the night over one week.

### Keywords

airing, ventilation, management, CO<sub>2</sub>, occupancy, spatial variability

(1) Université Paris-Est, Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), Direction Santé Confort.  
jacques.riberon@cstb.fr - olivier.ramalho@cstb.fr - mickael.derbez@cstb.fr - bruno.berthineau@cstb.fr - guillaume.wyart@cstb.fr - severine.kirchner@cstb.fr - corinne.mandin@cstb.fr

## Introduction

Émis par les êtres vivants présents dans un espace clos, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est un marqueur du confinement de l'air de ce dernier. Une concentration élevée en dioxyde de carbone dans l'air d'un local indique une mauvaise adéquation du renouvellement de l'air de ce local à sa densité d'occupation. Concomitamment, ce renouvellement de l'air inadapté implique une dégradation de la qualité de l'air intérieur puisqu'à l'instar du CO<sub>2</sub>, les autres substances présentes dans l'air intérieur ne sont pas évacuées (Ramalho *et al.*, 2015). La mesure de la concentration en CO<sub>2</sub> s'effectuant aisément avec un analyseur portatif et compact, l'évaluation du confinement de l'air intérieur, et donc indirectement de la qualité de l'air intérieur, est relativement facile.

Dans le cadre du programme de recherche de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI), le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) a proposé en 2007 un indice de confinement de l'air dans les écoles (ICONE) basé sur la mesure en continu du CO<sub>2</sub> et calculé sur les périodes pendant lesquelles le local est occupé (Ribéron, Derbez *et al.*, 2011). Cet indice prend une valeur comprise entre 0 et 5, 0 correspondant à un confinement nul et 5 à un confinement extrême. L'indice de confinement ICONE fait partie des trois indicateurs retenus pour la surveillance réglementaire de la qualité de l'air intérieur dans les écoles et lieux d'accueil de la petite enfance telle que définie dans le décret n° 2011-1728 du 2 décembre 2011 relatif à la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public (*Journal Officiel de la République Française*, 2012). L'indice ICONE peut également être calculé à partir de données issues de simulations numériques, permettant ainsi de tester rapidement la pertinence d'un grand nombre de situations de ventilation et d'en déduire les meilleures stratégies.

L'existence d'un indice de confinement de l'air pour les logements présenterait un intérêt indéniable, pouvant répondre à différents objectifs tels que le suivi de la qualité du renouvellement de l'air au regard des conditions d'occupation, la sensibilisation des occupants à la ventilation des logements, ou encore le test de l'efficacité du renouvellement d'air pour différents systèmes de ventilation, notamment les systèmes asservis. L'objectif du présent travail visait donc à examiner comment l'indice ICONE, conçu pour les écoles et crèches, pouvait s'adapter à l'habitat, et à évaluer les limites de son champ d'application.

## 1. Matériels et méthodes

### 1.1. Fonction et qualités d'un indicateur

Avant de construire tout indicateur, il convient d'aborder quelques notions générales sur ce concept et de traiter des caractéristiques attendues de l'indicateur à construire, sans quoi celui-ci ne pourra pas remplir pleinement sa fonction. Au sens lexicographique du terme, un « indicateur » est ce qui renseigne sur la valeur d'une grandeur. Un indicateur peut être un appareil, un instrument ou bien une variable donnant des informations sur un phénomène. Etymologiquement parlant, « indicateur » (lat. *indicare*), « indice » (lat. *indicium*) et « index » (lat. *index, indicis*) sont trois mots qui ont la même racine latine *indicare*. « L'index » est le doigt qui montre, mais signifie également indice en langue anglo-saxonne. « L'indice » est le signe apparent, le moyen de preuve ; c'est un nombre permettant de résumer, de caractériser la variation relative d'une grandeur complexe entre deux situations dont l'une sert de référence. « Indicateur » et « indice » recouvrent ici le même concept. Le mot « indicateur » sera utilisé pour parler plus conceptuellement d'outil d'évaluation et d'aide à la décision, tandis que le mot « indice » le sera pour la formulation mathématique de l'indicateur.

Le rôle d'un indicateur est d'être porteur d'une information destinée à être communiquée à une cible, à un public. L'indicateur remplit deux fonctions principales : d'une part, vis-à-vis du traitement de l'information, il réduit le nombre de paramètres nécessaires pour rendre compte d'une situation, et d'autre part, vis-à-vis de la cible visée, il simplifie la compréhension de l'information et son interprétation. Lorsqu'on examine un enregistrement journalier ou hebdomadaire de concentrations en CO<sub>2</sub> au sein d'une pièce, on observe d'importantes variations de plusieurs centaines, voire milliers de ppm en quelques dizaines de minutes en raison des variations des conditions d'aération et d'occupation de cette pièce. Sans recours à un indicateur, il n'est pas possible d'apprécier simplement le degré de confinement de cette pièce.

Un indicateur efficace doit satisfaire aux conditions requises d'un bon outil de mesure, c'est-à-dire avoir des qualités métrologiques : il doit être valide (l'indicateur mesure-t-il réellement ce qu'il est censé mesurer ?) et fiable (reproductibilité). Il doit également être sensible et refléter effectivement les variations de ce qu'il est censé synthétiser ou mesurer. L'indicateur doit être compréhensible, simple et utilisable par tous les acteurs visés.

L'indicateur doit être pertinent, c'est-à-dire qu'il doit répondre à des objectifs visés. ICONE vise à évaluer le degré de confinement de l'air d'une pièce, c'est-

à-dire à apprécier la qualité du renouvellement de l'air au regard des conditions d'occupation de cette pièce. En fonction de la valeur de l'indice sur l'échelle d'évaluation, l'utilisateur de cet outil peut être amené à prendre des décisions pour améliorer la situation en réduisant le degré de confinement de l'air. Outre l'objectif directement lié à la qualité de l'air, l'indicateur permet de comparer des situations entre elles et par-delà des stratégies d'aération et de ventilation (Ribéron et Derbez, 2011).

## 1.2. Construction de l'indice ICONE

La construction d'un indice de confinement de l'air fondé sur des données de concentrations en CO<sub>2</sub> a nécessité des choix dont il convient de rappeler les fondements. Quelle échelle utiliser pour l'indice ? Quels seuils de CO<sub>2</sub> retenir pour sa construction ? Quelle période minimale d'occupation faut-il considérer pour que le calcul soit pertinent ?

L'indice ICONE prend en compte à la fois la fréquence des situations de confinement, mais également leur intensité en proposant deux seuils de valeurs de concentrations en CO<sub>2</sub>, revenant ainsi à pratiquer une partition des valeurs en trois classes : valeurs inférieures au premier seuil (classe 0), valeurs entre les deux seuils (classe 1) et valeurs supérieures au second seuil (classe 2). Historiquement, la limitation des concentrations en CO<sub>2</sub> visait à satisfaire des exigences de confort olfactif. De façon similaire, il a été proposé de construire un indice de confinement dont la variation en fonction du CO<sub>2</sub> serait de même nature que celle des relations utilisées en psychophysique entre l'intensité d'une sensation et la valeur du stimulus. Le modèle de Fechner, établi en 1860, utilise une relation logarithmique entre sensation et stimulus (Fechner, 1860).

La formulation suivante a ainsi été proposée pour l'indice de confinement :

$$N = \alpha \log(c_0 f_0 + c_1 f_1 + c_2 f_2) \quad (\text{équation 1})$$

où  $f_i$  sont les proportions de valeurs de CO<sub>2</sub> en chacune des trois classes.

Par définition :

$$f_0 + f_1 + f_2 = 1 \quad (\text{équation 2})$$

Quatre hypothèses sont nécessaires pour déterminer les coefficients  $\alpha$ ,  $c_0$ ,  $c_1$  et  $c_2$ .

Les deux premières hypothèses fixent les limites de la valeur attribuée à cet indice. On a proposé que cet indice puisse prendre une valeur allant de 0 à 5. 0 correspond à la situation la plus favorable (confinement nul ; 100 % des concentrations en CO<sub>2</sub> inférieures au premier seuil, i.e. en classe 0), et 5 correspond à la situation la plus défavorable (confinement extrême ; 100 % des concentrations en CO<sub>2</sub> supérieures au second seuil, i.e. en classe 2).

Cela implique :

$$\alpha \log c_0 = 0 \text{ d'où : } c_0 = 1 \quad (\text{équation 3})$$

$$\alpha \log c_2 = 5 \quad (\text{équation 4})$$

D'après les équations (2) et (3), l'équation (1) s'écrit :

$$N = \alpha \log(1 + (c_1 - 1)f_1 + (c_2 - 1)f_2) \quad (\text{équation 5})$$

Les troisième et quatrième hypothèses sont les suivantes : une valeur de 2,5 correspond soit à 100 % des concentrations en CO<sub>2</sub> en classe 1, soit à un tiers des concentrations en CO<sub>2</sub> en classe 2 et deux tiers en classe 0. Ainsi, les situations en classe 2 pèsent trois fois plus que les situations en classe 1.

$$\text{On a ainsi :} \quad (\text{équation 6}) \\ 2,5 = \log c_1 = \alpha \log(2/3 + c_2/3)$$

$$\text{De l'équation (6),} \quad (\text{équation 7}) \\ \text{on déduit : } (c_2 - 1) = 3(c_1 - 1)$$

Des équations (4) et (6), on déduit :

$$\log c_2 / \log c_1 = 5/2,5, \text{ soit : } c_2 = c_1^2 \quad (\text{équation 8})$$

En injectant l'équation (8) dans l'équation (7), on aboutit à l'équation suivante :

$$c_1^2 - 3c_1 + 2 = 0 \quad (\text{équation 9})$$

La seule racine possible de l'équation (8) est  $c_1 = 2$

L'équation (5) de l'indice de confinement peut ainsi s'écrire :

$$N = \alpha \log(1 + f_1 + 3f_2) \quad (\text{équation 10})$$

D'après l'équation (6), on trouve :  $\alpha = 2,5 / \log 2$

Au final, la formule de l'indice ICONE peut ainsi s'écrire :

$$N = 8,3 \log(1+f_1+3f_2) \quad (\text{équation 11})$$

Une étude de sensibilité sur le poids de la classe 2 a été effectuée à l'aide d'un jeu de données de concentrations en CO<sub>2</sub>, mesurées dans une école maternelle pendant 6 jours, au mois de novembre et au pas de temps de 10 minutes. Le jeu de données de concentrations en présence des enfants était constitué de 294 enregistrements compris entre 380 et 2 100 ppm (Ribéron *et al.*, 2007). L'étude de sensibilité a montré que la pondération proposée (poids de 3 par rapport à la classe 1) était pertinente. De même, l'échelle a fait l'objet de tests sur le même jeu de données. Les résultats ont montré qu'une échelle en 6 points, de 0 à 5, apparaissait pertinente. Une échelle trop grande, par exemple en 9 points, risquerait de conduire à une distribution de l'indice très irrégulière, avec des valeurs différentes pour des situations de confinement réellement identiques. De même, une échelle plus courte ne permettrait pas de distinguer aisément deux situations différentes de confinement de l'air.

La concentration limite en CO<sub>2</sub> exigée dans le Règlement Sanitaire Départemental Type (RSDT) pour les locaux tertiaires où il est interdit de fumer est de 1 300 ppm (*Journal Officiel de la République Française*, 1985). Pour être en cohérence avec le RSDT, on a retenu comme seuils limites des classes les valeurs 1 000 ppm et 1 700 ppm qui encadrent la valeur réglementaire de 1 300 ppm. Ainsi, dans l'équation (11),  $f_1$  représente la proportion de valeurs de concentrations en CO<sub>2</sub> comprises entre 1 000 ppm et 1 700 ppm et  $f_2$  la proportion de valeurs supérieures à 1 700 ppm. Par ailleurs, 1 000 ppm est la valeur proposée au XIX<sup>e</sup> siècle par l'hygiéniste Max von Pettenkofer (1858), qui reste encore à ce jour la base des exigences de ventilation dans de nombreux pays.

Pour faciliter l'interprétation des résultats de confinement de l'air, le mode d'expression traduisant l'état du confinement en fonction de l'indice ICONE est présenté dans le tableau 1.

L'incertitude sur le calcul de l'indice ICONE dépend de l'incertitude sur la mesure du CO<sub>2</sub> et de l'incertitude sur la détermination de la plage d'occupation des pièces. À partir des corrélations entre les valeurs de l'indice ICONE et celles des concentrations en CO<sub>2</sub>, on évalue l'incertitude liée à la mesure à deux ou trois dixièmes de point. L'incertitude due à une occupation non correctement renseignée peut être de quelques dixièmes de point. Ainsi, on estime que l'incertitude globale sur le calcul d'ICONE peut alors être comprise entre deux et cinq dixièmes de point. C'est pourquoi l'indice est présenté avec un arrondi au nombre entier le plus proche (Ribéron *et al.*, 2012).

Le décret relatif à la mesure des polluants au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public stipule que lorsque l'indice est égal à 5, des investigations complémentaires doivent être menées dans l'établissement et le préfet de département doit être informé (*Journal Officiel de la République Française*, 2012).

### 1.3. Application de l'indice ICONE lors de la campagne pilote de la surveillance réglementaire de la qualité de l'air intérieur dans les écoles et crèches (2009-2011)

Dans le cadre de la phase pilote de la surveillance réglementaire de la qualité de l'air dans les écoles et crèches (Michelot *et al.*, 2011), l'indice ICONE a été calculé dans 896 salles de classe ou d'activités de 310 établissements (Ramalho *et al.*, 2013). Les mesures se sont déroulées sur deux semaines de classe (lundi-vendredi). Les calculs ont montré qu'un minimum de deux jours de présence était nécessaire et ont conduit à recommander une période d'intégration de 4,5 jours, non nécessairement consécutifs. Si la période intégrée d'occupation est trop courte, l'indice ICONE n'est pas représentatif de la situation à observer. Si elle est trop longue, par exemple plusieurs mois, elle risque d'intégrer des comportements d'ouverture de fenêtres très différents entre le début et la fin de période en raison du changement des conditions climatiques, rendant l'indice non représentatif d'un comportement unique vis-à-vis de l'ouverture des fenêtres.

Tableau 1. État du confinement de l'air intérieur suivant la valeur de l'indice ICONE.  
*Indoor air stuffiness according to the ICONE index score.*

ICONE	État du confinement	Incertaince
0	Confinement nul	+ 0,2
1	Confinement faible	± 0,2
2	Confinement moyen	± 0,3
3	Confinement élevé	± 0,3
4	Confinement très élevé	± 0,3
5	Confinement extrême	± 0,3

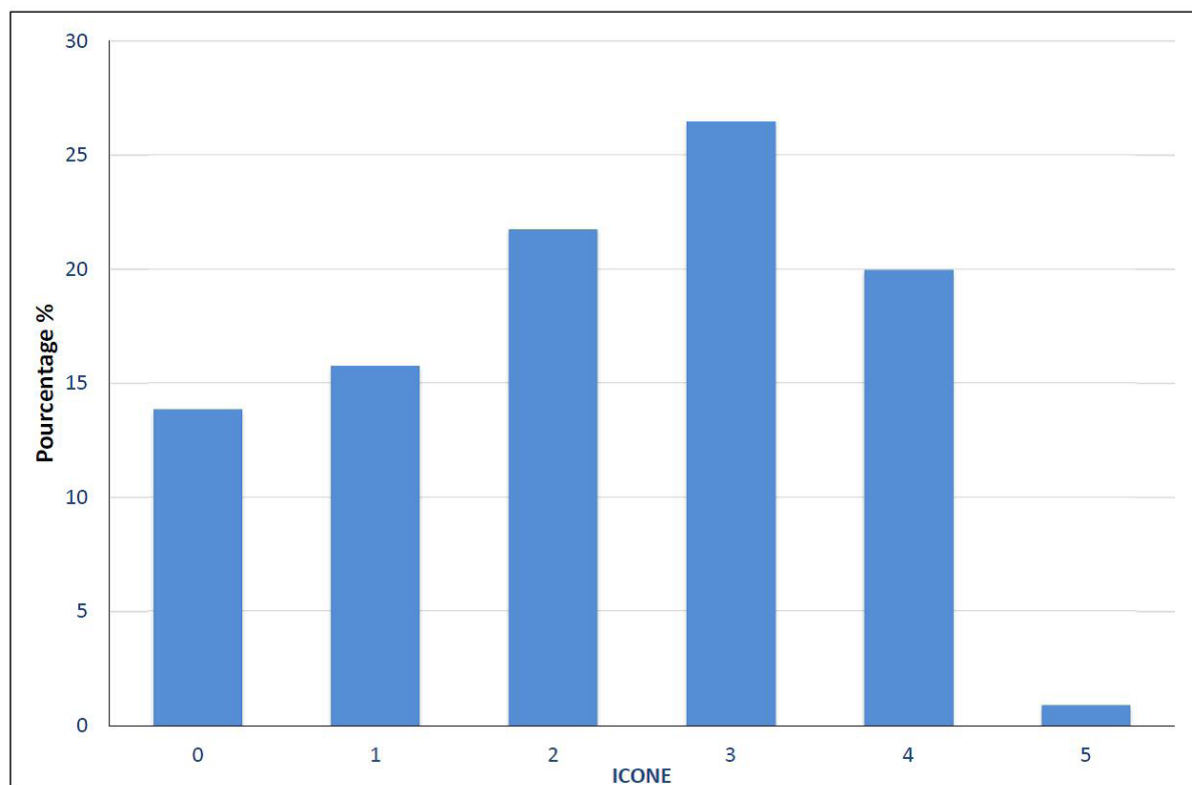


Figure 1. Distribution des indices ICONE dans les 896 classes et salles d'activités des crèches ayant participé à la phase pilote de la surveillance réglementaire (2009-2011).

*Distribution of ICONE indexes in the 896 classrooms and day-care center playrooms from the French IAQ legislation pilot survey (2009-2011).*

La distribution des indices ICONE est présentée sur la figure 1. Le mode (27 %) se situe à 3 et correspond à une situation de confinement « élevé ». La moitié de l'échantillon a un indice inférieur ou égal à 2, correspondant à des situations de confinement « nul » (14 %), « faible » (16 %) ou « moyen » (22 %). Les situations préoccupantes de confinement de l'air – ICONE égal à 4 ou 5 – sont moins fréquentes (21 % des cas). Les résultats montrent la pertinence du choix d'un indice en six points.

Pour 218 des 310 établissements, deux salles ou plus ont été instrumentées, et jusqu'à 17 classes dans une école élémentaire (tableau 2). Le plus fréquemment, deux salles ont été instrumentées pour les crèches et les écoles maternelles, et quatre salles de classe pour les écoles élémentaires. L'écart maximum des valeurs de l'indice ICONE observé entre les différentes salles d'un même établissement est de 4 dans une crèche et une école élémentaire en période de chauffe. Pour la crèche, il correspond à l'écart de confinement entre une salle d'activité et une salle de sommeil (normalement hors protocole). Dans le cas de l'école, sept des huit salles de classe instrumentées présentaient le même indice de confinement

(4) ; la dernière avait un confinement nul (0). L'écart le plus fréquemment rencontré est de 1, quel que soit le type d'établissement (tableau 2). La proportion d'établissements avec un écart supérieur à 1 (situation hétérogène) est plus importante dans les écoles élémentaires (49 %) que dans les écoles maternelles (23 %) et les crèches (24 %). De même, un écart de confinement nul entre les pièces est plus rare dans les écoles élémentaires (16 %) que dans les crèches ou écoles maternelles (35 % et 33 % respectivement). La variabilité spatiale observée au sein d'un même établissement est essentiellement liée aux différentes stratégies d'aération adoptées par chaque enseignant.

#### 1.4. Spécificités du confinement de l'air dans l'habitat

Même si le concept de confinement de l'air intérieur peut être étendu à toute pièce d'un bâtiment, on relève d'importantes différences dans la problématique entre bâtiment d'enseignement et habitat.

La première des différences tient à la nature des sources en dioxyde de carbone. Dans les salles de classe comme dans beaucoup de bâtiments ter-

Tableau 2. Écart maximal observé ( $\Delta_{\max}$  ICONE) de l'indice de confinement entre deux salles d'un même établissement en période de chauffe.

*Maximum difference ( $\Delta_{\max}$  ICONE) of the air stuffiness index between the rooms of a same school or nursery during the heating season.*

$\Delta_{\max}$ ICONE	Global	Crèches	Maternelles	Élémentaires
0	57 (26 %)	18 (35 %)	23 (33 %)	16 (16 %)
1	85 (39 %)	21 (41 %)	30 (44 %)	34 (35 %)
2	56 (26 %)	9 (18 %)	14 (20 %)	33 (34 %)
3	18 (8 %)	2 (4 %)	2 (3 %)	14 (14 %)
4	2 (1 %)	1 (2 %)	0 (0 %)	1 (1 %)
5	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
Nombre d'établissements	218	51	69	98
Nombre maximal de salles instrumentées	17	10	8	17
Mode du nombre de salles instrumentées	2	2	2	4

tières, sauf à de rares exceptions, les seules sources de CO<sub>2</sub> sont d'origine métabolique, alors que dans l'habitat, les appareils à combustion ainsi que le tabagisme contribuent aux concentrations en CO<sub>2</sub>. L'indice ICONE<sup>1</sup> appliqué à l'habitat ne reflétera ainsi pas strictement le confinement de l'air si le CO<sub>2</sub> mesuré n'est pas exclusivement d'origine métabolique et surévaluera le niveau de confinement. Cependant, dans la mesure où gaz de combustion et fumée de tabac sont des polluants de l'air intérieur, cette surévaluation ne peut être que bénéfique pour une amélioration de la qualité de l'air intérieur.

Par ailleurs, alors que pour les bâtiments à usage d'enseignement, la réglementation sur la ventilation s'exprime en débit d'air neuf par personne (CSTB, 1988) ou même directement en concentration limite de CO<sub>2</sub> (*Journal Officiel de la République Française*, 1985), l'exigence dans l'habitat s'exprime en taux de renouvellement d'air des pièces principales du logement (*Journal Officiel de la République Française*, 1969) ou en débit d'air extrait par pièce de service (*Journal Officiel de la République Française*, 1983). Ainsi, une même valeur réglementaire de débit de ventilation peut conduire à des valeurs différentes de concentrations en CO<sub>2</sub> si le taux d'occupation de la pièce est différent. L'indice de confinement de l'air dans le logement doit donc plus être considéré comme un outil pédagogique d'aide à la gestion de l'aération et de la ventilation du logement que comme un outil réglementaire.

(1) Par souci de simplification, on garde la terminologie ICONE pour l'indice de confinement de l'air dans l'habitat.

Enfin, l'indice ICONE dans les écoles est calculé en présence des enfants. Il est assez aisé de renseigner leur présence dans une salle de classe. Dans l'habitat, à part la nuit dans les chambres, les occupants sont plus nomades, et il est beaucoup plus délicat de renseigner la présence de chaque membre du ménage dans chaque pièce. Les variations spatiales du CO<sub>2</sub> dans le logement sont donc examinées ci-après et leur impact sur l'indice ICONE évalué.

On propose de conserver la même formulation mathématique de l'indice appliqué au logement que celle utilisée pour les écoles. La pertinence du maintien d'une échelle de 0 à 5 et des seuils de classe de 1 000 ppm et 1 700 ppm est étudiée. *A priori*, il semble pertinent de conserver ces seuils car ils correspondent approximativement aux niveaux de CO<sub>2</sub> obtenus dans une chambre ventilée à 15 m<sup>3</sup>/h. En effet, la réglementation sur l'aération des logements fixe des exigences de débits d'air extrait qui, rapportés aux débits d'air neuf entrant dans les pièces de vie, se situent autour de 15 m<sup>3</sup>/h par pièce principale (*Journal Officiel de la République Française*, 1983).

### 1.5. Variabilité spatiale de l'indice de confinement de l'air dans l'habitat

Une campagne de mesure de la concentration en dioxyde de carbone a été réalisée au cours de l'hiver 2010-2011 dans 10 logements situés en région parisienne : 6 maisons et 4 appartements. Elle avait pour objectif d'apprécier la variabilité spatiale des concentrations en CO<sub>2</sub> au sein d'un même logement.

Pour chaque logement, les concentrations en CO<sub>2</sub> ont été mesurées pendant environ deux semaines dans différentes pièces, généralement dans le séjour et dans une ou plusieurs chambres, avec l'appareil Lum'Air et sur un pas de temps de 10 minutes (Ribéron, Cochet *et al.*, 2011 ; Ribéron, Ramalho *et al.*, 2013). Les budgets espace-temps précis de chaque occupant ont été renseignés pour chaque pièce instrumentée du logement. Pour apprécier le degré d'homogénéité du confinement au sein d'un logement donné, un indicateur ΔICONE a été utilisé. Il correspond à la valeur absolue de l'écart des indices entre deux pièces d'un logement, corrigé des incertitudes liées à la mesure.

ΔICONE se calcule comme suit :

$$EIC = |ICONE_{séjour} - ICONE_{chambre}| - (I_{séjour} + I_{chambre})$$

(équation 12)

où  $I_{séjour}$  et  $I_{chambre}$  sont respectivement les incertitudes des indices ICONE du séjour et de la chambre, pouvant être égales à 0,2 ou 0,3.

L'indicateur d'homogénéité est égal à :

$$\Delta ICONE = EIC \text{ si } EIC \geq 0$$

$$\Delta ICONE = 0 \text{ si } EIC < 0$$

On retient comme critère d'homogénéité :

$$\Delta ICONE \leq 0,5.$$

Ensuite, la variabilité spatiale des concentrations en CO<sub>2</sub> a été analysée à une échelle plus fine, sur le pas de temps de 10 minutes, vis-à-vis des paramètres explicatifs suivants : état d'occupation des pièces, état des portes, état des fenêtres.

### 1.6. Indice ICONE dans les logements français

La méthode de calcul de l'indice de confinement ICONE a été appliquée aux données de la campagne nationale « Logements » de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI). Cette campagne nationale, menée entre 2003 et 2005, a porté sur un échantillon de 567 logements représentatifs du parc des 25 millions de résidences principales en France métropolitaine continentale et a permis de caractériser le parc de logements et les niveaux de pollution intérieure (Kirchner *et al.*, 2007). La campagne incluait des mesures de CO<sub>2</sub> réalisées pendant une semaine complète incluant le weekend, sur un pas de temps de 10 minutes, avec l'appareil Q-Trak (TSI Inc. modèle 8552). La mesure avait lieu dans la chambre de référence, occupée par un ou deux adultes en général. En parallèle, le budget espace-temps de chaque occu-

pant du logement était renseigné sur le même pas de temps.

À partir des concentrations en CO<sub>2</sub> et du profil d'occupation, plusieurs hypothèses de calcul de l'indice de confinement dans le logement sur la semaine sont possibles. Dans cette démarche exploratoire, elles ont toutes été explorées (Ramalho *et al.*, 2011). Ces hypothèses de calcul sont les suivantes :

- la période de la journée prise en compte dans le calcul :
- toute la journée y compris la nuit ;
- exclusivement la nuit (de 1 heure à 5 heures du matin) ;
- la prise en compte ou non des weekends :
- semaine complète (LV+WE) ;
- jours ouvrés uniquement (LV) ;
- weekend uniquement (WE) ;
- le calcul de l'occupation :
- au moins un occupant présent dans la chambre de référence (source directe de CO<sub>2</sub>) ;
- au moins un occupant présent dans le logement (source diffuse de CO<sub>2</sub>). Le logement est restreint aux pièces suivantes pour le calcul : chambres, cuisines, salons, séjours, salles de bains. Toute occupation dans d'autres pièces du logement n'est pas prise en compte.

Compte tenu du paramétrage de ces hypothèses, douze calculs différents de l'indice de confinement sont possibles pour chaque logement.

## 2. Résultats

### 2.1. Variabilité spatiale de l'indice de confinement de l'air dans l'habitat

La durée médiane des enregistrements dans les 10 logements était de 13,5 jours. Le nombre de pièces de vie expérimentées par logement était compris entre 2 et 4. Les durées d'occupation des chambres sur l'ensemble de l'expérimentation étaient comprises entre 0,8 et 7,8 jours, avec une valeur médiane de 5,0 jours. Les séjours étaient deux fois moins occupés : durées cumulées comprises entre 1,4 et 4,6 jours, avec une médiane à 2,5 jours. Les indices ICONE sont présentés dans le tableau 3, ainsi que les ΔICONE utilisés pour évaluer l'homogénéité entre pièces. Dans quatre logements, le confinement de l'air était nul ou faible (ICONE = 0 ou 1). Dans la maison MAIVS, les concentrations en CO<sub>2</sub> n'ont été mesurées que dans les chambres ; on y observe le plus fort confinement : chambres très ou extrêmement confinées (ICONE = 4 ou 5).

Tableau 3. Indice de confinement pour chaque pièce instrumentée et écart entre pièces.  
*Air stuffiness index for each investigated room and difference between rooms.*

Logement	Séjour	Chambre_1	Chambre_2	Chambre_3	$\Delta$ ICONE1	$\Delta$ ICONE2	$\Delta$ ICONE3
APPCG	2	3	nm	nm	0,3	nm	nm
APPMA	0	3	nm	nm	2,3	nm	nm
APPRF	0	1	nm	nm	0,1	nm	nm
APPXD	1	4	nm	nm	2,0	nm	nm
MAIAH	0	1	0	1	0,5	0	0,1
MAIBC	0	3	1	nm	2,7	0,7	nm
MAICB	0	1	1	nm	0,7	0,4	nm
MAING	1	3	nm	nm	1,6	nm	nm
MAISC	0	1	0	0	0,5	0	0
MAIVS	nm	5	4	4	0,4	0,3	nm

A : appartement ; M : maison ; nm : CO<sub>2</sub> non mesuré

Le tableau 3 montre que 6 logements sur 10 peuvent être considérés homogènes au regard de l'indice ICONE. Ce résultat est remarquable compte tenu de la densité d'occupation très différente du séjour et de la chambre. Les logements les plus hétérogènes sont l'appartement APPMA et la maison MAIBC. La maison MAICB a été classée homogène, même si elle est à la limite de l'hétérogénéité : séjour et chambre\_1 sont légèrement hétérogènes ( $\Delta$ ICONE1 = 0,7), alors que séjour et chambre\_2 sont homogènes ( $\Delta$ ICONE2 = 0,4). Dans les situations d'hétérogénéité, les chambres apparaissent systématiquement plus confinées que les séjours.

L'analyse plus fine de la variabilité spatiale des concentrations en CO<sub>2</sub> a montré que l'ouverture d'une porte favorise l'homogénéisation des concentrations en CO<sub>2</sub>. Il en est de même de l'ouverture combinée

fenêtre et porte intérieure. En revanche, l'ouverture d'une fenêtre avec toutes portes fermées conduit à une situation plus hétérogène (Ribéron *et al.*, 2013).

## 2.2. Valeurs de l'indice ICONE dans les logements français

L'indice de confinement a été calculé dans près de 490 logements de l'échantillon initial de 567 logements, qui disposaient à la fois de concentrations en CO<sub>2</sub> et de données d'occupation valides. Le nombre de logements pris en compte varie en fonction des paramètres retenus, les données étant plus ou moins complètes selon les paramètres.

La distribution des concentrations en CO<sub>2</sub> ayant servi de base aux calculs de l'indice de confinement est présentée dans le tableau 4.

Tableau 4. Distribution des concentrations en CO<sub>2</sub> (ppm) dans la chambre de référence des logements (OQAI, 2003-2005).  
*Descriptive statistics of the main bedroom CO2 concentrations (ppm) (French IAQ observatory survey, 2003-2005).*

	CO <sub>2</sub> jour (5h10-0h50)	CO <sub>2</sub> nuit (1h-5h)
Moyenne	771	1 162
Percentile 5	425	470
Percentile 25	551	724
Médiane	703	1 000
Percentile 75	895	1 458
Percentile 95	1 414	2 430
Nombre de logements	490	490



Les résultats des calculs de l'indice de confinement selon les différentes hypothèses retenues sont présentés dans le tableau 5. Pour chaque calcul, la distribution des valeurs, exprimée au travers des différents percentiles (P5 à P95) et au travers de la valeur moyenne et de l'écart-type, est fournie. Les résultats sont exprimés sous forme de l'indice brut avec 1 chiffre après la virgule, afin de mettre en évidence les écarts liés aux hypothèses de calcul. L'expression finale de l'indice de confinement et son interprétation doivent s'effectuer sur la base d'un chiffre arrondi au nombre entier. Les deux dernières colonnes du tableau 5 fournissent le nombre de logements en situation de confinement extrême et le pourcentage par rapport à l'échantillon.

Quel que soit le mode de calcul, l'indice de confinement varie de 0 à 5. De la même façon, pour pratiquement l'ensemble des modes de calcul, plus de 25 % des logements présentent un confinement nul (ICONE = 0). La valeur médiane de l'indice de confinement varie selon le mode de calcul ; il en est de même du nombre de logements en situation de confinement extrême (ICONE = 5).

Les indices de confinement intégrés uniquement la nuit sont globalement plus élevés que ceux intégrant l'ensemble de la journée, à la fois en termes de valeurs médianes (ICONE de 1,4 à 1,6 pour la nuit contre ICONE de 0,8 à 1,5 pour l'ensemble de la journée) et également en termes de nombre de logements en situation de confinement extrême (entre 9 et 11 % des logements concernés en intégrant uniquement la nuit contre 1 à 5 % en intégrant l'ensemble de la journée). Ce résultat est cohérent

car la densité d'occupation du logement peut être différente entre le jour et la nuit, et certainement plus élevée durant la nuit. Par ailleurs, la stratégie d'aération du logement varie également entre le jour et la nuit.

Le calcul de l'indice de confinement varie assez peu selon que l'on prend en compte la semaine complète (LV + WE) ou uniquement les jours ouvrés (LV) ou encore uniquement le weekend (WE). Ceci implique que la densité d'occupation et/ou les conditions d'aération varient assez peu selon le jour de la semaine. Une légère baisse de l'indice est toutefois observée lorsque seul le weekend est pris en compte.

Enfin, les valeurs de l'indice de confinement sont significativement plus élevées (test non paramétrique de Kruskal-Wallis,  $p < 0,01$ ) lorsque l'occupation est déterminée au niveau de la chambre (médiane de 1,2 à 1,5) que lorsqu'elle est déterminée dans l'ensemble du logement (médiane de 0,8 à 1,0) pendant toutes les heures de la journée. En effet, durant la nuit, l'occupation dans le logement se réduit le plus souvent à l'occupation des chambres. De ce fait, le calcul de l'indice de confinement conduit à des distributions similaires.

La figure 2 présente la distribution des indices ICONE calculés à partir des concentrations en CO<sub>2</sub> mesurées dans la chambre principale, pendant la période nocturne – de 1 heure à 5 heures du matin – durant la semaine de mesure et sur les seules périodes de présence des occupants.

Tableau 5. Distribution de l'indice de confinement calculé selon différents modes pour les logements de la campagne nationale « Logements » (OQAI, 2003-2005).

*Distribution of the air stuffiness indexes in the French housing survey (French IAQ observatory survey, 2003-2005).*

Période d'intégration	Jours pris en compte	Critère d'occupation	Nombre de logements	Indice de confinement brut ICONE									ICONE = 5	
				Moyenne	Écart-type	min	P5	P25	P50	P75	P95	max	Nombre de logements	% de logements
Jour+Nuit	LV+WE	Logement	487	1,3	1,2	0	0	0,1	1,0	2,1	3,6	5,0	3	0,6 %
Jour+Nuit	LV	Logement	486	1,3	1,2	0	0	0,1	1,0	2,1	3,6	5,0	4	0,8 %
Jour+Nuit	WE	Logement	454	1,2	1,3	0	0	0	0,8	2,1	3,7	5,0	6	1,3 %
Nuit	LV+WE	Logement	481	1,8	1,7	0	0	0	1,6	3,0	4,8	5,0	45	9,4 %
Nuit	LV	Logement	476	1,8	1,7	0	0	0	1,6	3,1	4,9	5,0	50	10,5 %
Nuit	WE	Logement	441	1,6	1,7	0	0	0	1,4	2,8	4,9	5,0	40	9,1 %
Jour+Nuit	LV+WE	Chambre	481	1,7	1,5	0	0	0,1	1,5	2,8	4,4	5,0	17	3,5 %
Jour+Nuit	LV	Chambre	479	1,7	1,5	0	0	0,1	1,5	2,8	4,4	5,0	22	4,6 %
Jour+Nuit	WE	Chambre	447	1,6	1,6	0	0	0	1,2	2,7	4,5	5,0	20	4,5 %
Nuit	LV+WE	Chambre	477	1,8	1,7	0	0	0	1,6	3,1	4,8	5,0	45	9,4 %
Nuit	LV	Chambre	471	1,8	1,7	0	0	0	1,6	3,1	4,9	5,0	49	10,4 %
Nuit	WE	Chambre	431	1,7	1,7	0	0	0	1,5	2,9	4,9	5,0	43	10,0 %

P= percentile

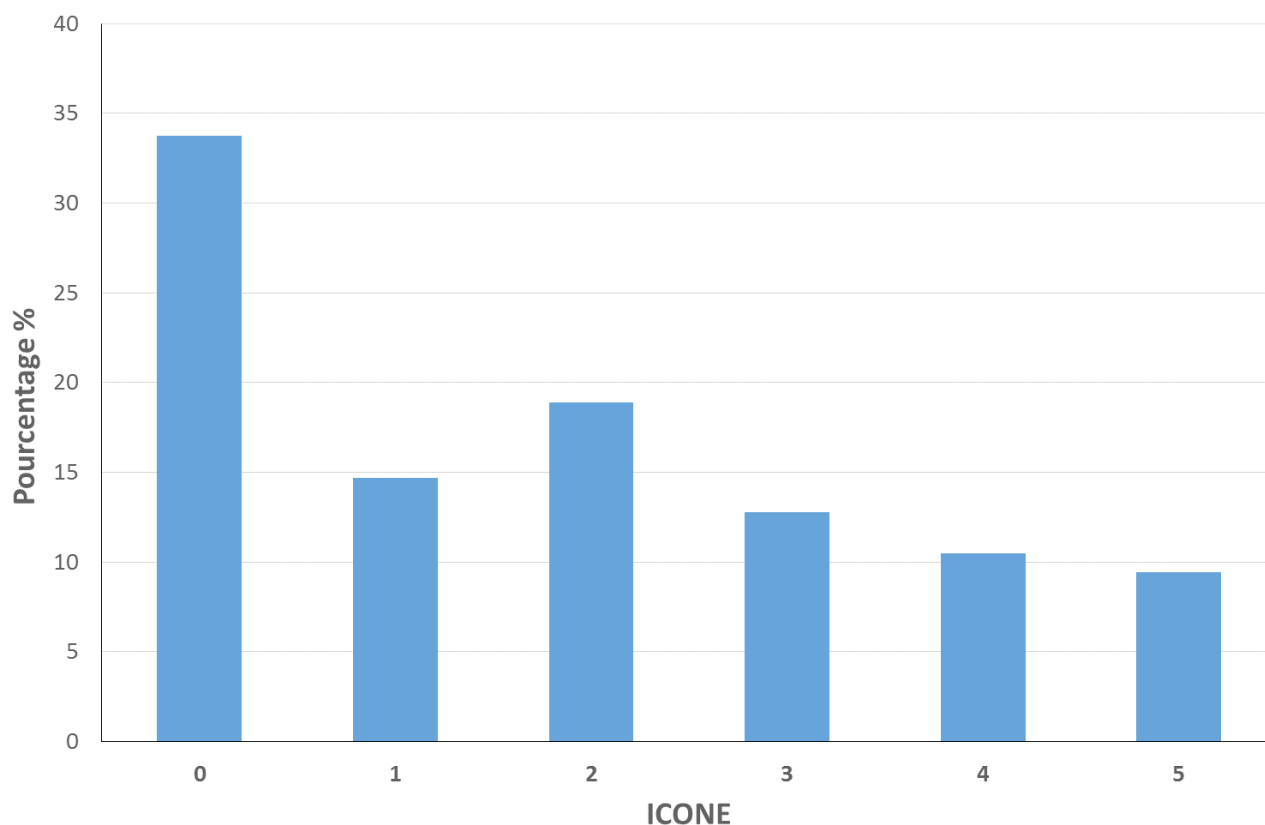


Figure 2. Distribution des indices de confinement ICONE dans les chambres en période nocturne (n = 477).  
*Distribution of ICONE indexes during night in the bedrooms (n= 477).*

Même si elle n'est pas symétrique, la distribution des indices ICONE dans l'habitat couvre bien l'ensemble de la plage de 0 à 5. Cette analyse confirme l'intérêt de cet indice et de son échelle de 0 à 5. Elle conforte aussi les seuils de CO<sub>2</sub> proposés initialement pour les écoles.

La distribution des valeurs de l'indice montre un mode pour la valeur 0 (confinement nul), alors que dans le cas des écoles, le mode se situe à 3 (confinement élevé). Cette différence s'explique en partie par des spaciosités très différentes entre les chambres et les salles de classe. En effet, le volume d'une chambre par personne est approximativement trois fois plus important que celui d'une salle de classe par personne.

## Conclusion

L'étude de la variabilité spatiale du confinement de l'air dans 10 logements a montré que selon les conditions d'aération (i.e. état des portes et des fenêtres) et d'occupation du logement, ce dernier pouvait être considéré comme homogène ou non au regard de l'indice de confinement. On

ne peut donc pas, à partir des données d'une seule pièce, en déduire le confinement de l'ensemble du logement. De plus, on constate que les chambres sont systématiquement plus confinées que les séjours.

Par ailleurs, l'indice de confinement ICONE a été calculé dans les logements de la campagne nationale de l'OQAI (2003-2005) selon différentes hypothèses : la période prise en compte jour/nuit ; la prise en compte ou non du weekend ; l'occupation dans le logement ou dans la chambre. Quel que soit le mode de calcul, l'indice de confinement varie de 0 à 5 et plus de 30 % des logements présentent un confinement nul. La valeur médiane de l'indice de confinement est de 1 ou 2 selon les hypothèses de calcul. Les variations les plus importantes sont observées sur le nombre de logements en situation de confinement extrême variant de 3 à 22 logements (1 à 5 %) en calculant l'indice de confinement sur l'ensemble de la journée, et de 40 à 50 (9 à 11 %) en calculant l'indice de confinement uniquement la nuit entre 1 h et 5 h du matin.

Les résultats n'ont pas montré de différences significatives entre les jours de la semaine, il n'y a donc

pas de raison de privilégier un jour par rapport à un autre. En revanche, le confinement est plus élevé la nuit que le reste de la journée, et plus élevé dans la chambre qu'en considérant l'occupation dans tout le logement.

En conclusion, l'extrapolation aux logements de l'indice ICONNE établi pour les écoles est pertinente, et il est proposé de retenir pour le calcul dans les logements les conditions suivantes :

- calcul sur l'ensemble de la semaine du lundi au dimanche ;
- calcul exclusivement sur les périodes nocturnes, entre 1 heure et 5 heures du matin ;
- calcul prenant en compte la chambre pour une mesure réalisée dans cette pièce.

Vu le temps passé dans la chambre – plus de 50 % du temps passé dans le logement (Zeghnoun et Dor, 2008) –, essentiellement en période nocturne, le choix de retenir l'occupation nocturne de la chambre permet de déterminer un indice de confinement dans les conditions les plus défavorables et de garantir une robustesse des données (renseignement de l'occupation plus fiable). Même si les résultats ont montré un confinement homogène entre pièces dans un logement sur deux, on ne peut pas généraliser cette information. L'approche, certes restrictive, d'exprimer le confinement de l'air dans la chambre principale du logement en période nocturne apparaît simple à mettre en œuvre, moins coûteuse et conservative pour l'évaluation de la qualité de l'air intérieur.

*Les auteurs remercient le ministère en charge de l'Environnement pour le financement de ces travaux, ainsi que Anthony Grégoire, statisticien au CSTB, pour la validation et la fourniture des données.*

### Références bibliographiques

CSTB. (1988). Exemples de solutions pour faciliter l'application du règlement relatif aux équipements et aux caractéristiques thermiques dans les bâtiments autres que d'habitation. Ventilation. *Cahiers du CSTB*, n° 2286, livraison 293, octobre.

Fechner GT. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Erster Theil (336 Seiten), Zweiter Theil (571 Seiten). Leipzig, Druck und Verlag von Breitkopf und Härtel.

Journal Officiel de la République Française. (1969). Arrêté du 22 octobre 1969 relatif à l'aération des logements. 30 octobre.

Journal Officiel de la République Française. (1982, 1983). Arrêté du 24 mars 1982 modifié. Dispositions relatives à l'aération des logements du 27 mars 1982 et du 15 novembre 1983.

Journal Officiel de la République Française. (1985). Règlement Sanitaire Départemental Type. Circulaires du 9 août 1978, 26 avril 1982, 20 janvier 1983 et 18 mai 1984. n° 1448.

Journal Officiel de la République Française. (2012). Décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public. 6 janvier.

Kirchner S, Arènes JF, Cochet C *et al.* (2007). État de la qualité de l'air dans les logements français. *Environnement, Risques & Santé*, n° 6 (4), p. 259-269.

Michelot N, Mandin C, Ramalho O *et al.* (2011). Campagne pilote de surveillance de la qualité de l'air dans les écoles et crèches en France. Résultats de la première phase, *Pollution Atmosphérique*, n° 211, p. 267-79. <http://dx.doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.456>

Pettenkofer M. (1858). *Über den Luftwechsel in Wohngebäuden* (126 Seiten). München, Cotta'schen Buchhandlung.

Ramalho O, Wyart G, Ribéron J. (2011). Taux de renouvellement d'air nocturne dans les écoles et crèches de la campagne pilote de surveillance 2009- 2011 et indices de confinement dans les logements de la campagne nationale 2003- 2005. *Rapport CSTB*, n° ESE-Santé/-120R, novembre.

Ramalho O, Mandin C, Ribéron J, Wyart G. (2013). Air stuffiness and air exchange rate in French schools and day-care centres. *International Journal of Ventilation*, n° 12(2), p. 175-180.

Ramalho O, Wyart G, Mandin C *et al.* (2015). Association of carbon dioxide with indoor air pollutants and exceedance of health guideline values. *Building and Environment*, n° 93, p. 115-124.

Ribéron J, Derbez M. (2011). Ventilation dans les logements, les écoles et les crèches. *Pollution Atmosphérique*, n° 212, p. 365-72. <http://dx.doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.358>

Ribéron J, Derbez M, O'Kelly P, Garrigue J. (2007). Étude d'intervention sur l'aération par ouverture des fenêtres. Étude de faisabilité. *Rapport CSTB*, n° ESE/Santé-OQAI-64, novembre.

Ribéron J, Derbez M, Lethrosne M, Kirchner S. (2011). Impact of airing behaviour on air stuffiness in schools and daycare centres: development of a specific tool for ventilation management. *12<sup>th</sup> International conference on indoor air quality and climate, Indoor Air'2011*, Austin (USA), June 5-10. Short communication.

Ribéron J, Cochet V, Ramalho O *et al.* (2011). Développement d'un module de confinement de l'air intérieur pour les logements. *Rapport CSTB*, n° ESE-Santé-114, octobre.

Ribéron J, Ramalho O, Mandin C, Cochet V. (2012). Guide d'application pour la surveillance du confinement de l'air dans les établissements d'enseignement, d'accueil de la petite enfance et d'accueil de loisirs, *Rapport CSTB DESE/Santé*, n° 086R, mai, 10 p. [En ligne] : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/document130382>

Ribéron J, Ramalho O, Berthineau B *et al.* (2013). Taux de renouvellement d'air par infiltration et niveau de confinement dans les bâtiments. *Rapport CSTB*, n° DSC-Expologie-051R, juillet, 98 p.

Zeghnoun A, Dor F. (2008). Description du budget espace-temps et estimation de l'exposition de la population française dans son logement. Institut de veille sanitaire (InVS) – Observatoire de la qualité de l'air intérieur, novembre, 40 p. [En ligne] : [http://www.invs.sante.fr/publications/2010/exposition\\_co\\_logement/rapport\\_expo\\_logement.pdf](http://www.invs.sante.fr/publications/2010/exposition_co_logement/rapport_expo_logement.pdf)