

Indicateur lumineux du confinement de l'air intérieur : suivi expérimental dans 70 salles de classe

Light indicator for indoor air stuffiness: experimental survey in 70 classrooms

Claire Dassonville¹, Corinne Mandin^{1,*}, Jacques Ribéron¹,
Guillaume Wyart¹, Olivier Ramalho¹, Séverine Kirchner¹

Résumé

Dans les salles de classe, il est nécessaire de renouveler l'air pendant la présence des enfants pour éviter un confinement de l'air trop important pouvant être à l'origine d'effets sanitaires et d'une baisse de performance des écoliers. En l'absence de système mécanique de ventilation, ce renouvellement de l'air nécessite une ouverture régulière des ouvrants, en veillant toutefois à limiter l'exposition aux contraintes extérieures (bruit, froid, etc.). Afin d'optimiser cette ouverture, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) a mis au point, dans le cadre du programme scientifique de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI), un indicateur lumineux du confinement de l'air intérieur, basé sur la mesure en continu du dioxyde de carbone et un affichage tricolore immédiat. Il permet ainsi d'alerter l'enseignant sur l'état de confinement dans la salle de classe en temps réel. Cet indicateur a été déployé dans 70 salles de classes d'écoles maternelles et élémentaires de trois régions françaises aux climats contrastés, de février à juin 2010. L'étude a montré la bonne appropriation de cet outil par les enseignants. Néanmoins, des freins à l'aération par ouverture des fenêtres subsistent encore, tout comme l'arrêt de l'indicateur lumineux conduit rapidement à un retour aux pratiques qui précédaient son utilisation. En tout état de cause, l'utilisation de l'indicateur lumineux a montré une réduction du confinement de l'air intérieur (diminution de l'indice de confinement ICON de 0,5 à 1,5 point). À ce titre, et même s'il ne constitue pas une solution adaptée à toutes les situations et toutes les personnes, cet outil fait partie des moyens aujourd'hui disponibles de sensibilisation vis-à-vis de la qualité de l'air intérieur dans les lieux d'enseignement.

Mots-clés

air intérieur, école, confinement, aération, gestion

Abstract

In classrooms, it is necessary to ventilate during occupation in order to avoid air stuffiness that is associated with health effects and low school performance. In the absence of a mechanical ventilation system, the air exchange requires a regular window opening, while preventing from outdoor disturbances (noise, cold, etc.). To optimize this opening, the Scientific and technical centre for building (CSTB) developed, as part of the scientific program of the Observatory of indoor air quality (OQAI), a light indicator to visualize the air stuffiness in classrooms, based on the on-line measurement of carbon dioxide. It lets the teacher know the status of air stuffiness in the classroom in real time. This indicator was tested from February to June 2010 in 70 classrooms located in three French regions with various climates. The study showed the good acceptance of this tool by teachers, even if limitations to window opening still exist. And, after withdraw of the light indicator, the behavior rapidly turns back as it was before the use of the tool. However, the use of the light indicator showed a reduction of the air stuffiness index ICON by 0.5 to 1.5. As such, even if it may not be an adequate tool for all situations, it belongs to the current means of awareness on indoor air quality issue in schools.

Keywords

indoor air, school, stuffiness, ventilation, management

(1) Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
– Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI)/université Paris-Est
(*) Correspondance : corinne.mandin@cstb.fr

1. Contexte et objectifs

Compte tenu des sources connues de pollution intérieure et des populations sensibles accueillies dans les écoles, le bon renouvellement de l'air dans les salles de classe représente aujourd'hui un véritable enjeu de santé publique. La surveillance obligatoire de la qualité de l'air intérieur dans les lieux d'enseignement et d'accueil collectif d'enfants prévoit la mesure du confinement de l'air en plus de celle de deux polluants chimiques (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).

La phase pilote pour tester la faisabilité d'une telle surveillance à l'échelle nationale, a été menée entre septembre 2009 et juin 2011 dans 310 écoles et crèches volontaires, réparties dans toute la France (Michelot *et al.*, 2011). Elle a mis en évidence un confinement de l'air intérieur très élevé voire extrême dans 9,1 % des salles de classe des écoles maternelles et dans 33 % des classes d'écoles élémentaires (Ribéron et Derbez, 2011 ; Ramalho *et al.*, 2013). Parallèlement, les descriptifs techniques de ces établissements ont montré qu'une faible proportion d'entre eux (environ 20 %) était équipée de systèmes mécaniques de ventilation dans les salles de classe. Ce faible pourcentage a été confirmé lors d'une enquête par questionnaire menée par le bureau d'études Sépia-Santé dans le cadre du programme de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) entre janvier et avril 2010 auprès de directeurs et d'enseignants d'un échantillon de 466 écoles maternelles et élémentaires, représentatif de ces écoles en France métropolitaine continentale (Guillam *et al.*, 2011). Le renouvellement de l'air des classes repose ainsi principalement sur l'ouverture des ouvrants vers l'extérieur (fenêtres, portes et portes-fenêtres). Or cette ouverture est dans certains cas peu pratiquée : les enseignants déclarent qu'elle est plus occasionnelle (56 %) que fréquente (32 %) en période hivernale (Guillam *et al.*, 2011). Toujours dans cette même étude, parmi huit propositions visant à faciliter l'ouverture des fenêtres, c'est l'utilisation d'une alarme lumineuse qui a été la plus citée ; elle a été plébiscitée par près de la moitié des enseignants (48 %).

La présente étude visait donc à étudier, d'une part, l'acceptation d'un indicateur lumineux de confinement de l'air intérieur par des enseignants, et d'autre part, l'efficacité de cet indicateur lumineux pour la réduction du confinement de l'air des classes.

2 Matériel et méthode

2.1 Indicateur lumineux du confinement : l'appareil Lum'Air®

L'indicateur lumineux de confinement de l'air intérieur utilisé est l'appareil Lum'Air® (Ribéron et Kirchner, 2009 ; Ribéron *et al.*, 2011) (photo 1). Il mesure en continu toutes les 10 minutes les concentrations en dioxyde de carbone (CO₂) par absorption dans l'infrarouge non dispersif. Émis par la respiration humaine, le CO₂ est usuellement utilisé pour évaluer le taux de renouvellement de locaux occupés.



Photo 1. Lum'Air® : appareil dédié à la mesure et à la gestion du confinement de l'air dans les écoles.

Lum'Air®: apparatus dedicated to the air stuffiness measurement and control in schools.Crédit

Photo : Arnaud Bouissou, MEDDE

L'appareil Lum'Air®, conçu par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) dans le cadre de l'OQAI, a une double fonction. La première est le calcul de l'indice de confinement, appelé ICONE (Indice de CONfinement d'air dans les Écoles), également développé par le CSTB. Cet indice permet, à partir de mesures de CO₂ à l'intérieur d'une pièce et des budgets espace-temps-activités (BETA) des occupants de la pièce instrumentée, d'évaluer le niveau de confinement de l'air de la pièce à l'aide d'une note sur une échelle de 0 à 5. La note 0 correspond au confinement nul (niveau de CO₂ toujours inférieur à 1 000 ppm), c'est la situation la plus favorable ; la note 5 correspond à un confinement extrême (niveau de CO₂ toujours supérieur à 1 700 ppm), situation la plus défavorable. La seconde fonction est l'indication en temps réel du niveau de confinement par des voyants lumineux permettant à l'occupant de la pièce de gérer l'ouverture des ouvrants. Le voyant vert indique que l'air de la pièce n'est pas confiné (niveau de CO₂ inférieur à 1 000 ppm) ; l'orange indique que l'air commence à devenir confiné (niveau de CO₂ compris entre

1 000 et 1 700 ppm) ; enfin le rouge indique que l'air est confiné (niveau de CO₂ supérieur à 1 700 ppm), il est alors vivement recommandé d'ouvrir les fenêtres pour renouveler l'air.

L'utilisation de l'appareil Lum'Air® a été testée dans 70 classes de 18 écoles.

2.2 Choix des établissements et des salles de classe

Les 18 écoles (9 maternelles et 9 élémentaires) étaient réparties dans trois zones géographiques aux climats différents : la ville de Nantes (département de la Loire-Atlantique) représentant le climat océanique, Clermont-Ferrand et son agglomération (département du Puy-de Dôme) pour le climat continental, et la ville des Pennes-Mirabeau (département des Bouches-du-Rhône) pour le climat méditerranéen.

Six écoles par région (3 maternelles et 3 élémentaires) ont été choisies sur la base du volontariat. Elles devaient compter au moins quatre salles de classe. Aucun autre critère de sélection n'a été retenu.

Les salles ont été choisies de manière à être contrastées, notamment vis-à-vis de leur orientation (rue, jardin), leur volume et le niveau scolaire des enfants. La sélection s'est faite après acceptation de l'enseignant et confirmation de l'occupation pendant les périodes de prélèvement ciblées. Dans les écoles maternelles, les salles de repos ont été exclues des prélèvements, tout comme les salles polyvalentes et ateliers pour activités diverses dans les écoles élémentaires.

2.3 Protocoles d'étude

2.3.1 Mesure des concentrations en CO₂ et stratégie d'enquête

Idéalement, l'appareil Lum'Air® doit être positionné dans la salle de classe, dans la zone d'occupation des enfants, à la hauteur de leurs voies respiratoires. En pratique, il a été placé à un endroit sécurisé à proximité d'une prise électrique et visible des adultes en charge des enfants, à une hauteur au-dessus du sol comprise entre 50 cm et 2 m. Il était recommandé d'éloigner l'appareil des sources intenses de chaleur (émetteurs de chauffage) d'au moins 50 cm et du rayonnement solaire direct. Il ne devait pas non plus être positionné dans le flux direct de l'air venant de l'extérieur (fenêtres), ni près de la porte du couloir de la salle.

Afin de répondre aux objectifs de l'étude et d'étudier différentes situations, deux protocoles d'étude ont été déployés, respectivement dans 2 et 4 écoles par région (4 classes par école).

Le protocole 1 visait à évaluer le niveau d'acceptation du dispositif lumineux, notamment son éventuel caractère intrusif, et la compréhension de la démarche, son efficacité pour la réduction du confinement de l'air intérieur et l'efficacité de l'appropriation d'habitude d'ouverture des fenêtres après retrait de l'appareil. Il se déroulait en trois phases dans quatre salles de classe de deux écoles, une maternelle et une élémentaire, dans chacune des trois régions, soit au total 6 écoles et 24 classes :

- **la phase 1** était la **phase de référence**, sans affichage lumineux de l'indicateur de confinement. Elle se déroulait pendant deux semaines, du lundi matin 8 h 30 au vendredi après-midi 17 h, juste après les vacances scolaires de février. Peu d'informations étaient délivrées aux adultes en charge des enfants pour ne pas modifier leur comportement. À la fin de la période, l'enquêteur allait sur site pour décharger les données et activer l'affichage lumineux ;
- **la phase 2** était la **phase d'affichage lumineux de l'indicateur de confinement**. Elle se déroulait pendant les deux semaines suivantes, du lundi matin 8 h 30 au vendredi après-midi 17 h. Une note d'information et d'utilisation de l'indice de confinement était remise aux enseignants. Dans cette note se trouvaient les consignes d'ouverture et de fermeture des fenêtres selon la couleur du voyant lumineux de l'appareil. À la fin de la période, l'enquêteur retournait sur site pour décharger les données et désactiver l'affichage lumineux ;
- **la phase 3** ou « **phase de relâchement** » était à nouveau une phase sans affichage lumineux de l'indicateur de confinement. Elle se déroulait sur une durée de quatre semaines du lundi matin 8 h 30 au vendredi après-midi 17 h : les deux semaines précédant et suivant respectivement les vacances scolaires de Pâques. Il était précisé aux enseignants que le suivi du protocole d'étude nécessitait la désactivation de l'affichage lumineux du confinement et qu'ils pouvaient conserver leurs habitudes d'aération acquises pendant la phase où cet affichage lumineux était activé. Cette phase visait en effet à connaître l'éventuel changement de comportement des enseignants face à l'ouverture des fenêtres lorsqu'ils ne sont plus guidés par l'indicateur de confinement.

Le protocole 2 visait à évaluer l'acceptation du dispositif lumineux sur le long terme, notamment l'éventuel caractère intrusif de l'appareil, le changement de comportements et leur maintien dans le temps. Il se déroulait sur six semaines (vacances scolaires de Pâques exclues) dans quatre salles de classe de quatre écoles, deux maternelles et deux élémentaires, dans chacune des trois régions (soit au total 12 écoles et 48 salles de classe). Le Lum'Air® avec affichage lumineux du confinement était installé dans la classe du lundi matin 8 h 30 au vendredi après-midi 17 h. Une

note d'information et d'utilisation de l'indice de confinement était remise aux enseignants au démarrage des mesures.

La température et l'humidité relative extérieures ont été renseignées à partir des données des stations météorologiques les plus proches des établissements scolaires (station Météo-France ou bien de l'opérateur le cas échéant).

2.3.2 Questionnaires

Afin de pouvoir calculer l'indice de confinement de l'air ICONÉ sur les périodes d'occupation des classes, chaque enseignant a documenté les nombres d'enfants et d'adultes dans la classe pendant toute la durée des campagnes de mesure. Ce questionnaire constituait le budget espace-temps-activités (BETA), complété sur un pas de temps de 30 minutes.

Un questionnaire, intitulé « indicateur allumé », était complété par l'enquêteur par interview de chaque adulte en charge des enfants dans les salles instrumentées, à la fin des phases où l'indicateur lumineux de confinement était activé. Il permettait d'expliquer, à l'aide de questions à choix ouvert, les raisons pour lesquelles les enseignants avaient suivi ou non les consignes d'ouverture ou de fermeture des fenêtres délivrées par l'indicateur de confinement d'air. Il permettait aussi de recueillir leur avis sur les avantages et les inconvénients de cet appareil.

Un questionnaire, intitulé « indicateur éteint » ou « de relâchement » était complété par l'enquêteur par interview de chaque adulte en charge des enfants dans les salles instrumentées, à la fin de la troisième phase dans le cadre du protocole 1. Il permettait d'expliquer les raisons pour lesquelles les enseignants avaient conservé ou non les habitudes d'aération acquises pendant la période où l'affichage lumineux de l'indicateur de confinement était activé.

Un questionnaire descriptif du bâtiment et des classes instrumentées (environnement extérieur, équipements, revêtements, etc.) était complété par l'enquêteur.

2.3.3 Calcul de l'indice ICONÉ

Le confinement de l'air des classes a été qualifié au moyen de l'indice ICONÉ calculé selon la formule suivante, à partir des concentrations en CO_2 mesurées pendant les périodes d'occupation exclusivement :

$$\text{ICONÉ} = \left(2, \frac{5}{\log_{10}(2)} \right) \log_{10}(1 + f_1 + 3f_2)$$

f_1 : proportion de concentrations comprises entre 1 000 et 1 700 ppm pendant l'occupation.

f_2 : proportion de concentrations supérieures à 1 700 ppm pendant l'occupation.

Lorsque qu'une partie des BETA était manquante (i.e. temps d'occupation renseigné par l'enseignant inférieur à 15 heures, observé dans environ un quart des situations), l'indice ICONÉ a été calculé sur un temps d'occupation de la classe conforme à l'emploi du temps hebdomadaire de celle-ci.

La température extérieure moyenne a varié pendant les phases des protocoles, et il a été montré une relation entre celle-ci et l'indice ICONÉ, à savoir une diminution de 6 % de l'indice ICONÉ pour une augmentation de 10 °C de la température extérieure. Une telle relation s'explique notamment par le fait que lorsque la température extérieure augmente, les occupants des locaux ouvrent plus facilement les fenêtres, conduisant à la diminution du confinement et donc de l'indice ICONÉ. Cette relation entre ICONÉ et la température extérieure a été confirmée avec les données de la phase pilote de la surveillance réglementaire conduite dans 310 écoles et crèches en 2009-2011 (Michelot *et al.*, 2011). Ainsi, de manière à normaliser les ICONÉ, les indices en « phase allumée » et « phase de relâchement » ont été corrigés via l'ajout d'un coefficient égal à $0,06 \Delta T$, où ΔT correspond à la différence entre la température extérieure moyenne pendant la phase considérée et la température extérieure moyenne pendant la phase de référence.

2.3.4 Saisie et traitement statistique

Les BETA ont été saisis sous Excel, et les questionnaires aux enseignants sous Epidata version 3.1 (Lauritsen JM).

Le test statistique non paramétrique de Wilcoxon a été utilisé sous XLSTAT pour comparer les indices ICONÉ entre les différentes phases.

3 Résultats

Les suivis expérimentaux ont eu lieu de février à juin 2010, uniquement en période de cours. Seules 46 classes au lieu des 48 attendues ont été instrumentées dans le cadre du protocole 2, représentant un total de 70 classes pour l'étude. Parmi les 18 écoles, trois disposaient d'un système de ventilation mécanique contrôlée.

3.1 Acceptation de l'indicateur lumineux

76 questionnaires « indicateur allumé » ont été renseignés sur 80 enseignants concernés (plusieurs enseignants dans certaines classes). Dans les quatre cas non renseignés, il s'agissait de classes avec deux enseignants dont un seul a répondu.

Sur les 76 enseignants ayant répondu au questionnaire « indicateur allumé », 69 (91 %) ont apprécié le dispositif. Ceux qui n'étaient pas satisfaits évoquent principalement une mauvaise visibilité des voyants lumineux. Ensuite, lorsqu'on les interroge sur les avantages et les inconvénients de l'appareil, 9 (12 %) ne lui trouve que des inconvénients, 59 (80 %) au moins un avantage et 6 (8 %) sont sans opinion. Quatre avantages sont principalement évoqués par les enseignants lors de l'utilisation de l'indicateur lumineux : il s'agit d'une prise de conscience de la nécessité d'ouvrir les fenêtres, de la visualisation de la qualité de l'air, d'une aide à la gestion des ouvrants et enfin d'un aspect pédagogique avec une sensibilisation des enfants (figure 1).

Quatre principaux inconvénients ressortent des questionnaires (figure 2) : la dissipation des enfants pendant le cours, les contraintes associées au respect des consignes, l'impossibilité d'ouvrir les fenêtres dues aux conditions météorologiques et la lassitude en partie liée à l'inertie de l'indicateur lumineux. En effet, après ouverture des fenêtres, le temps nécessaire pour que le voyant redevienne vert peut être assez long (plus d'une demi-heure) selon le niveau de CO₂ atteint, le temps mis par l'enseignant pour réagir et ouvrir les fenêtres après passage au rouge, et les conditions météorologiques. Dans ce cas, l'enseignant ne voit pas rapidement de conséquences à son action.

3.2 Incitation à l'ouverture des fenêtres via l'indicateur lumineux

95 % des enseignants ayant répondu au questionnaire « indicateur allumé » ont déclaré avoir utilisé l'affichage lumineux. Seuls quatre enseignants (5,3 %) ne l'ont pas utilisé parce qu'ils n'y ont pas pensé, n'avaient pas le temps, ne voulaient pas ouvrir les

fenêtres à chaque passage à l'orange, ou ont trouvé le remplissage du questionnaire BETA trop contraignant.

Parmi les enseignants déclarant avoir utilisé l'indicateur lumineux, seuls 17 % ont appliqué systématiquement les consignes d'ouverture (réponse « oui toujours » pour chaque consigne d'ouverture). En effet, entre 50 % et 70 % des enseignants selon les régions n'ont pas ouvert systématiquement les fenêtres lorsque l'indicateur passait à l'orange et un peu moins, entre 30 % et 60 %, lorsque l'indicateur passait au rouge (figure 3).

La principale raison pour laquelle les enseignants n'ouvrent pas systématiquement les fenêtres lorsque l'indicateur lumineux passe à l'orange ou au rouge (figure 4) est l'inconfort thermique (ou la crainte que les enfants prennent froid), suivi du fait qu'ils ne pensent pas à le regarder, et l'inconfort sonore. La pénibilité n'est évoquée que par trois enseignants.

3.3 Efficacité de l'indicateur lumineux sur le confinement de l'air intérieur

La Figure 5 présente les indices de confinement de l'air intérieur, pour chaque salle de classe instrumentée dans chacune des trois régions, dans le cadre du protocole 1. Ainsi, l'indice ICONE est présenté en période de référence, puis en phase « indicateur allumé », et enfin durant chacune des deux phases avec l'indicateur éteint.

Globalement, quels que soient le protocole suivi et la région d'expérimentation, les salles de classe se sont avérées peu confinées, avec des indices ICONE tous strictement inférieurs au score de 4.

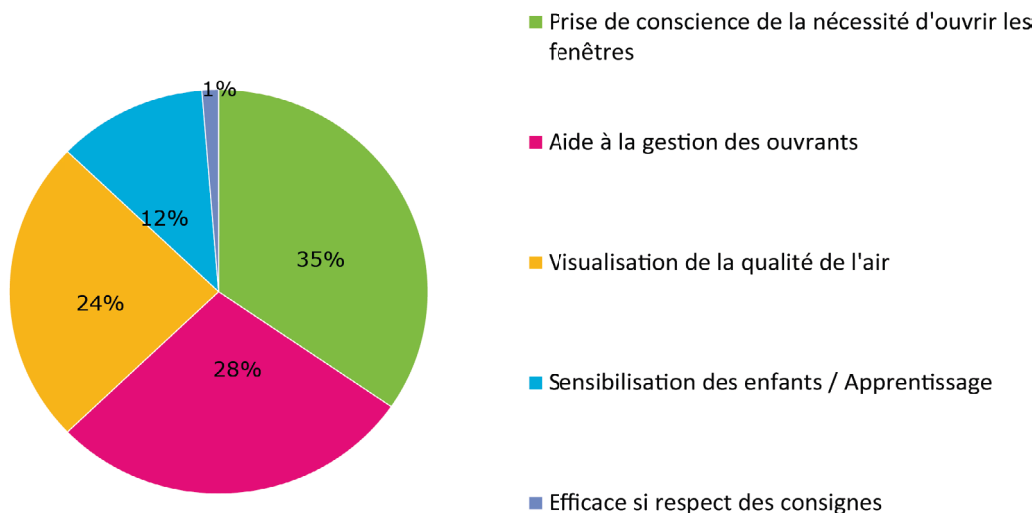


Figure 1. Avantages de l'utilisation du LumAir® par les enseignants (n = 78 réponses ; plusieurs réponses par enseignant).
Advantages of the light indicator (n= 78 responses; more than one response for each teacher).

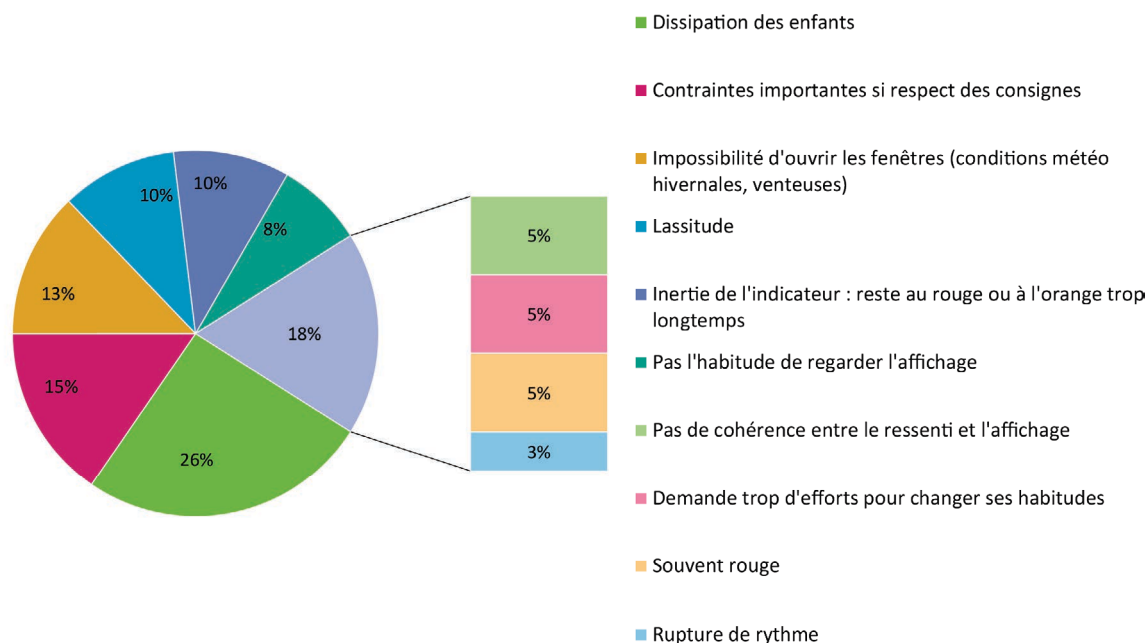


Figure 2. Inconvénients de l'utilisation de l'indicateur lumineux par les enseignants (n = 39 réponses).

Drawbacks of the light indicator (n = 39 responses).

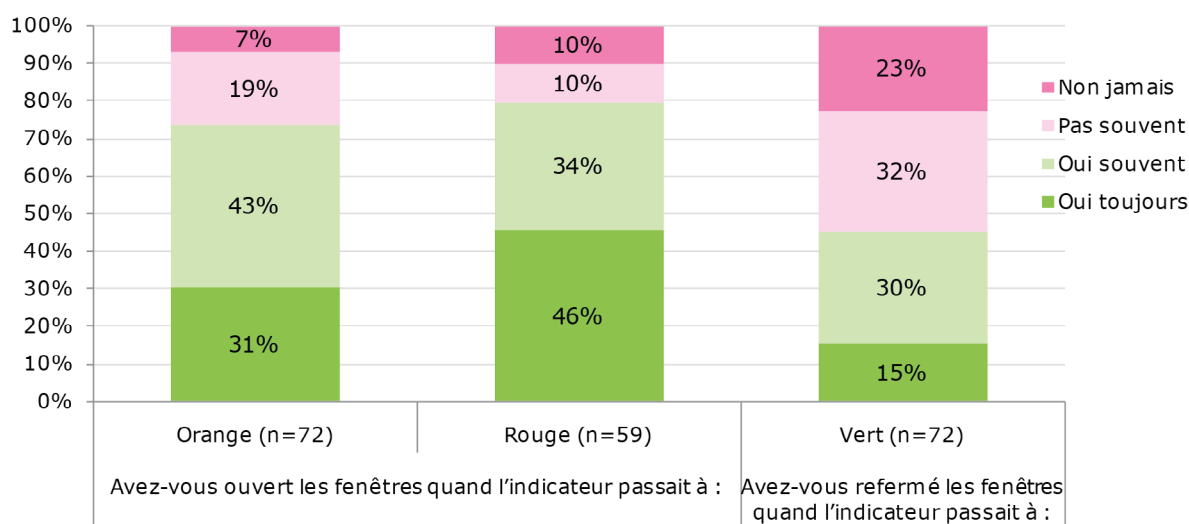


Figure 3. Pratiques d'aération des enseignants en fonction de l'affichage lumineux.

Window opening and light indicator.

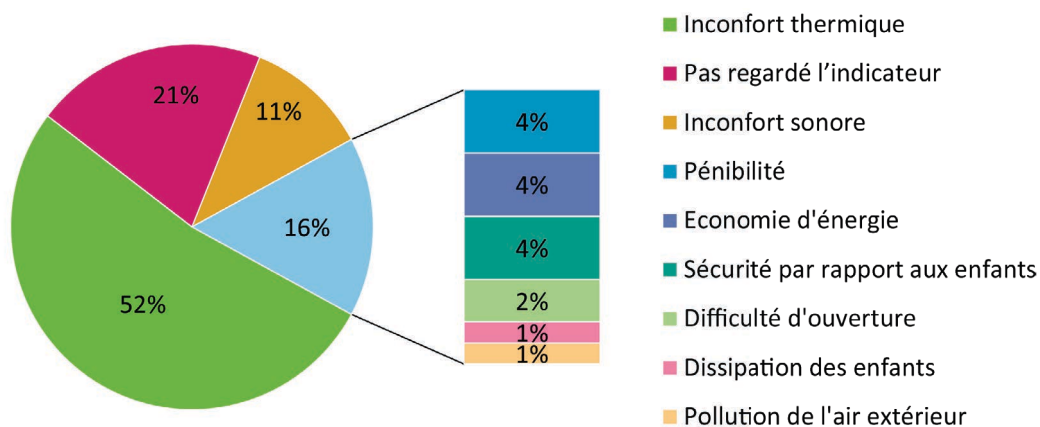
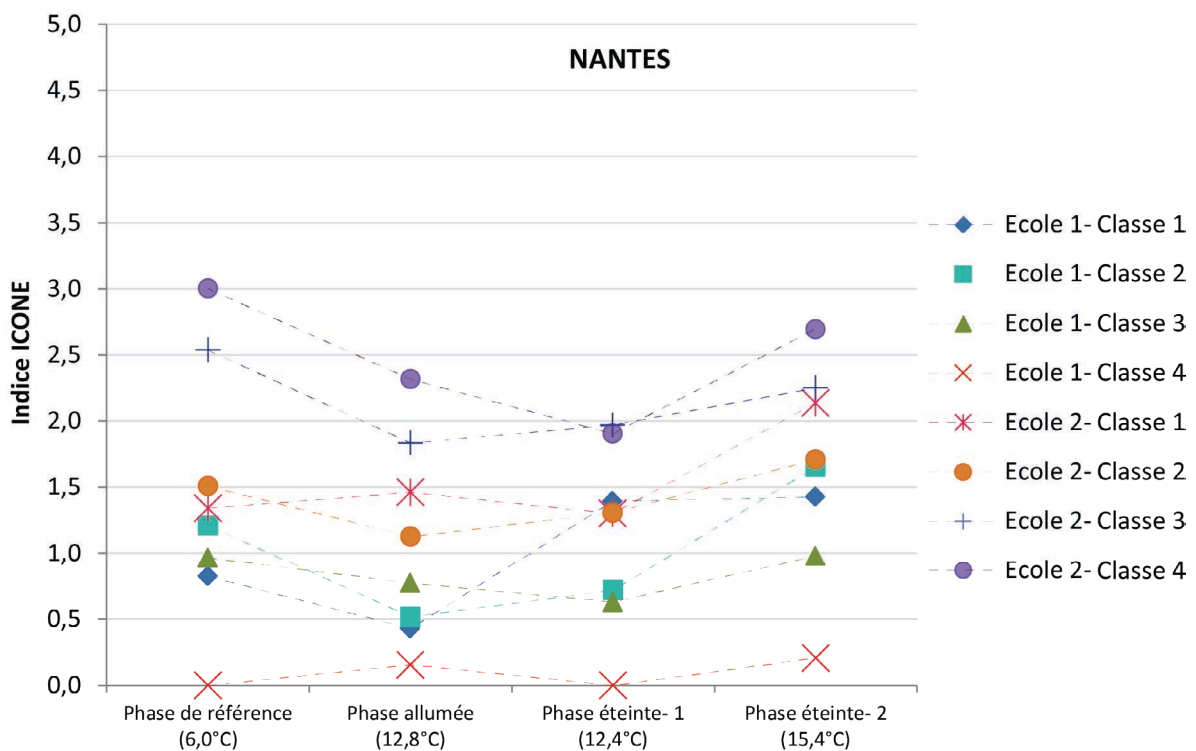
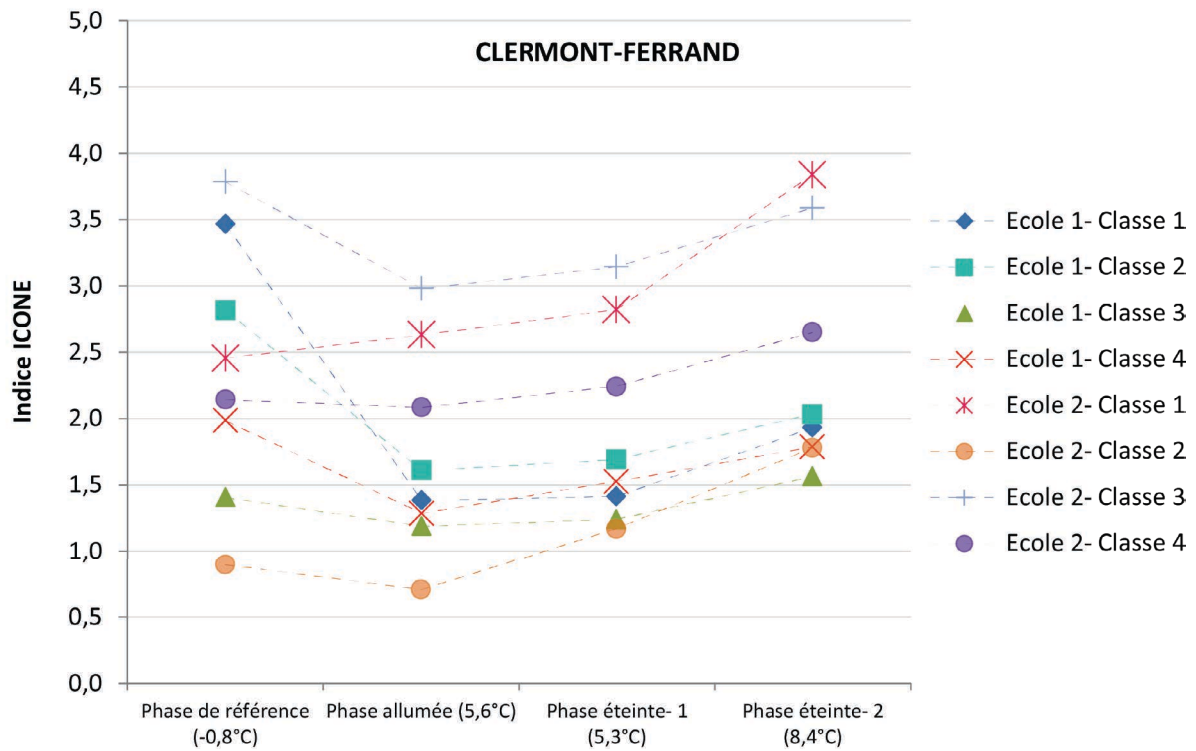


Figure 4. Raisons pour lesquelles les enseignants n'ouvrent pas les fenêtres lorsque l'indicateur passe à l'orange ou au rouge (n = 81 réponses).

Reasons why teachers do not open the windows when the light is turning orange or red (n = 81 responses).



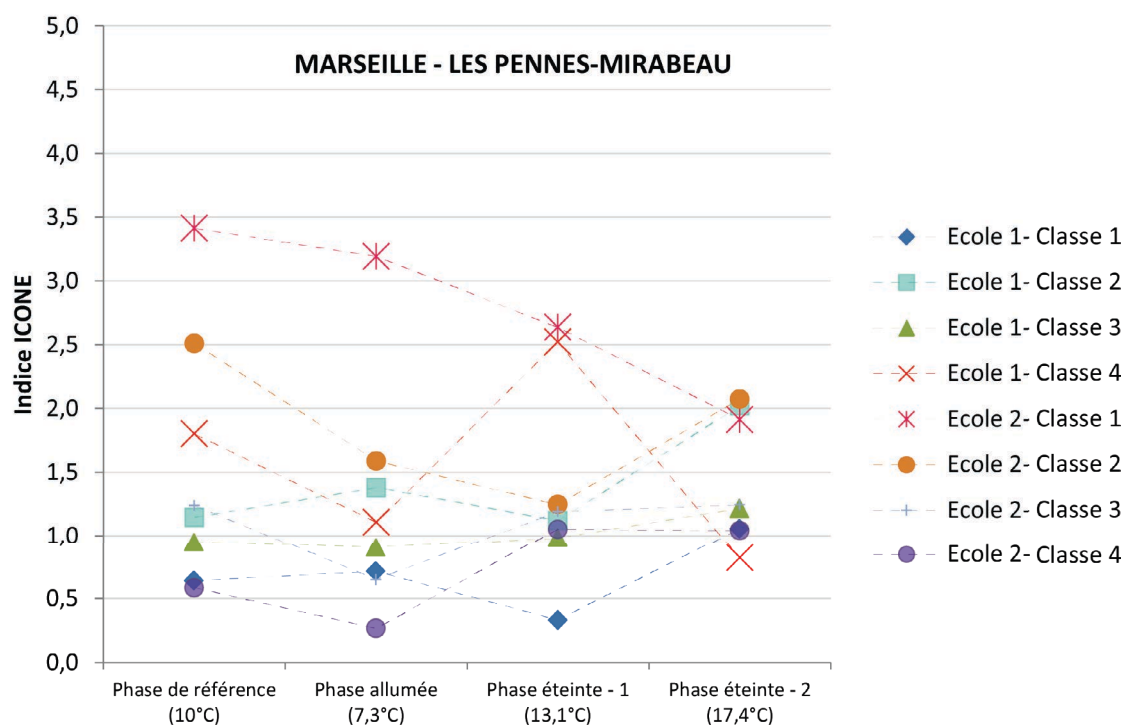


Figure 5. Indice ICONe calculé sur les 4 périodes de dix jours dans les salles de classe des écoles 1 et 2 de chaque région selon le protocole 1.

Les températures indiquées sous les graphiques correspondent aux moyennes, sur chaque période de dix jours, des températures extérieures moyennes journalières fournies par Météo France.

Le score de l'indice ICONe est mentionné sur la gauche du graphique : 0 – pas de confinement ; 1 – confinement faible ; 2 – confinement moyen ; 3 – confinement élevé ; 4 – confinement très élevé ; 5 – confinement extrême

Les indices ICONe sont normalisés par rapport à la température extérieure moyenne pendant la phase de référence.

Figure 5. Air stuffiness index calculated over 4 periods of ten days in the classrooms (SLC) of the schools 1 and 2 in each climatic region according to the protocol 1.

Outdoor temperatures (10-days mean) are represented below the graphics.

The ICONe index score is noted on the left axis: 0 – non stuffy air; 1 – low air stuffiness; 2 moderate air stuffiness; 3 high air stuffiness; 4 – very high air stuffiness; 5 - extreme air stuffiness

The ICONe index scores are adjusted for outdoor mean temperature during the reference phase.

4 Discussion

La distribution des écarts d'ICONe entre les différentes phases est présentée dans le tableau 1. On observe, sur les trois régions, que l'indice ICONe diminue significativement (test de Wilcoxon, $p < 0,02$) lorsque l'indicateur lumineux est activé, par rapport à la période de référence (affichage lumineux éteint). Sur les trois régions, il n'y a pas de différence significative des indices ICONe entre la phase allumée et la première phase éteinte. Par contre, l'indice ICONe tend à augmenter entre la phase allumée et la seconde phase éteinte après les vacances scolaires avec une médiane des écarts égale à 0,31 (test de Wilcoxon, $p < 0,056$). Enfin, les indices ICONe restent un peu plus faibles en seconde phase éteinte par rapport à la phase de référence.

Presque tous les enseignants déclarent avoir utilisé l'affichage de l'indicateur lumineux. On peut rappeler que tous les enseignants étaient volontaires pour participer à l'étude, ce qui peut introduire un biais dans les résultats. Malgré une très bonne adhésion au dispositif, peu d'enseignants ont suivi systématiquement l'ensemble des consignes d'ouverture, et la principale raison était l'inconfort thermique avec la crainte des courants d'air et que les enfants ne prennent froid. Comme attendu, en condition hivernale, les enseignants ont réduit leurs fréquences d'aération alors qu'avec des conditions climatiques plus favorables, les conditions de ventilation étaient meilleures comme observé dans les écoles instrumentées entre mai et juin. L'inconfort thermique était

Tableau 1. Distribution des écarts entre les indices ICONÉ des différentes phases (n = 24).

Distribution of the ICONÉ value differences between the different phases (n= 24).

	Écart entre les phases « allumée » et de référence	Écart entre la première phase éteinte et la phase « allumée »	Écart entre la deuxième phase éteinte et la phase « allumée »	Écart entre la deuxième phase éteinte et la phase de référence
Minimum	-2,08	-0,76	-1,99	-1,99
Percentile 5	-1,16	-0,55	-0,87	-1,45
Percentile 25	-0,70	-0,15	-0,12	-0,69
Médiane	-0,35	0,11	0,31	-0,21
Percentile 75	-0,05	0,21	0,55	0,08
Percentile 90	0,16	0,54	0,92	0,44
Percentile 95	0,23	0,91	1,06	0,83

également la première raison de ne pas ouvrir les fenêtres dans les écoles, rapportée dans l'étude de Guillam *et al.* (2011).

Pour la moitié des enseignants, il semble qu'il n'y ait pas de contrainte importante à une utilisation permanente dans les salles de classe, même si le respect des consignes est le deuxième inconvénient évoqué après la dissipation des enfants. Pour certains d'entre eux, l'inertie de l'indicateur lumineux, même après ouverture des fenêtres, a entraîné une lassitude et au final un non-respect des consignes d'ouverture. Comme pistes d'amélioration du dispositif, un affichage lumineux plus intense, ainsi qu'une alarme sonore au passage à la couleur rouge de la diode sont évoqués par les enseignants. De plus, 47 % d'entre eux proposent un appareil sans fil qui serait facilement installé et déplaçable dans la salle de classe.

Ces résultats sont cohérents avec ceux d'une étude menée aux Pays-Bas à l'hiver 2004-2005 qui avait pour objectif de déterminer l'efficacité de trois outils visant à améliorer le comportement d'aération dans les écoles primaires : des conseils d'aération personnalisés, un dispositif d'avertissement lumineux basé sur la mesure en continu du CO₂ (diode rouge s'illuminant au-dessus de 1 200 ppm) ou un module d'enseignement intitulé « Air extérieur, rentre et jouons ! » (Geelen *et al.*, 2008). Les auteurs ont observé un pourcentage similaire (95 %) d'enseignants déclarant avoir utilisé l'appareil lumineux. Les pourcentages de satisfaction étaient plus faibles pour les deux autres moyens (80 % pour le module d'enseignement et 60 % pour les conseils d'aération personnalisés). À l'instar de ce qui a été observé dans la présente étude, deux tiers des enseignants ont respecté partiellement les consignes d'aération, principalement à cause de problèmes d'inconfort (présence de courants d'air et d'air froid).

Un changement de comportement des enseignants a été observé après activation de l'affichage lumineux par rapport à la phase de référence, y compris après ajustement sur les différences de température extérieure entre les périodes. Ces résultats confirment les premières données obtenues par Derbez *et al.* (2009) dans six établissements scolaires d'Ile-de-France où il apparaissait qu'en période d'indicateur lumineux activé, les indices ICONÉ étaient significativement plus faibles qu'en phase de référence sur l'ensemble des bâtiments. Aux Pays-Bas, Geelen *et al.* (2008) ont aussi observé une influence du dispositif sur la diminution des concentrations en dioxyde de carbone dans les salles de classe.

Il semble aussi que les enseignants perdent assez rapidement leurs habitudes d'aération puisqu'on note une augmentation de l'indice ICONÉ en seconde phase éteinte après les vacances scolaires. Geelen *et al.* (2008) ont aussi montré que les niveaux de CO₂ dans les salles de classe augmentaient une semaine après le retrait du dispositif à affichage tricolore qui avait été mis en place une semaine. D'après ces auteurs, l'effet sur la diminution des niveaux de CO₂ d'une mallette éducative impliquant les enfants de 7 à 10 ans dans les stratégies de ventilation semble plus stable dans le temps. Dans la présente étude, 12 % des enseignants soulignent l'aspect pédagogique de l'indicateur lumineux avec l'information, la sensibilisation et la participation des enfants aux stratégies de ventilation. Il serait donc intéressant d'associer le dispositif à un outil pédagogique permettant à l'enseignant et aux enfants de combiner des stratégies d'aération pour tendre vers une meilleure qualité d'air dans la salle de classe. Cet outil serait en revanche plus difficilement utilisable en maternelle. Une phase plus longue d'utilisation de l'indicateur lumineux aurait peut-être aussi permis de limiter le « relâchement » observé, dans la présente étude comme dans celle de Geelen *et al.* (2008).

5 Conclusion

L'étude a confirmé l'intérêt d'un indicateur lumineux pour, d'une part, sensibiliser les enseignants à l'ouverture des fenêtres et, d'autre part, grâce à cette ouverture, réduire le confinement de l'air intérieur des classes. Même si des différences sont apparues entre les différentes zones climatiques, elles ne sont pas de nature à remettre en cause l'intérêt d'un tel dispositif dans toutes les salles de classe. Pour optimiser son efficacité, une combinaison de la visualisation du confinement avec une sensibilisation plus large à la fois des enseignants, mais également des écoliers, à la qualité de l'air intérieur est souhaitable. On peut penser qu'avec la mise en place de la surveillance obligatoire de la qualité de l'air intérieur dans les établissements recevant du public, et plus particulièrement d'ici 2018 dans les écoles et lieux d'accueil collectif des enfants, cette prise de conscience soit de plus en plus importante. Cette sensibilisation générale est d'autant plus importante que dans certains

cas de forte pollution de l'air extérieur, le recours à l'indicateur lumineux pour favoriser le renouvellement d'air par ouverture des fenêtres n'est pas la solution à préconiser en priorité, et d'autres stratégies pour garantir une bonne qualité d'air intérieur doivent être envisagées.

Les auteurs remercient les partenaires opérateurs qui ont réalisé les enquêtes de terrain : ATMO Auvergne, Air Pays de La Loire et Conseil Habitat Santé. Les auteurs remercient également l'ensemble des enseignants ayant participé à l'étude, ainsi que les maires ayant accepté l'instrumentation de leurs écoles. Enfin, ils remercient les ministères en charge du Logement, de la Santé et de l'Écologie, ainsi que l'ADEME et le CSTB, pour le financement de cette étude dans le cadre du programme de travail de l'OQAI.

Références bibliographiques

- Derbez M, Ribéron J, Pignon C *et al.* Étude d'intervention sur l'aération par ouverture des fenêtres dans les lieux d'enseignement et d'accueil de la petite enfance. Rapport final n° ESE-SB-2009-100, 2009, 147 p.
- Geelen LM, Huijbregts MA, Ragas AM *et al.* Comparing the effectiveness of interventions to improve ventilation behavior in primary schools. *Indoor Air* 2008 ; 18(5) : 416-24.
- Guillam MT, Ezannic J, Ségala C *et al.* Enquête descriptive nationale sur les écoles et les crèches et leurs pratiques d'aération. Rapport n° ESE/2011-113, 2011, 110 pages. Téléchargeable sur <http://www.oqai.fr>
- Michelot N, Mandin C, Ramalho O *et al.* Campagne pilote de surveillance de la qualité de l'air dans les écoles et crèches en France. Résultats de la première phase. *Pollution Atmosphérique* 2011 ; 211 : 267-79.
- Ramalho O, Mandin C, Ribéron J, Wyart G. Air stuffiness and air exchange rate in French schools and day-care centers. *International Journal of Ventilation* (Accepted).
- Ribéron J, Derbez M. Ventilation dans les logements, les écoles et les crèches. *Pollution Atmosphérique* 2011; 212: 365-72.
- Ribéron J, Derbez M, Lethrosne M, Kirchner S. Impact of airing behaviour on air stuffiness in schools and daycares centres: Development of a specific tool for ventilation management. *Proceedings 12th International conference on indoor air quality and climate*, Austin, USA, June 2011.
- Ribéron J, Kirchner S. Process of control and management of indoor air stuffiness, Patent n° FR 09 52971 INPI (French Patent and Trademark Office), 2009.