



**HAL**  
open science

## Élaboration d'indices de la qualité de l'air intérieur - phase 1 : inventaire des indices disponibles

Séverine Kirchner, Béatrice Jédor, Corinne Mandin

### ► To cite this version:

Séverine Kirchner, Béatrice Jédor, Corinne Mandin. Élaboration d'indices de la qualité de l'air intérieur - phase 1 : inventaire des indices disponibles. CSTB - Centre scientifique et technique du bâtiment, France. 2006. <hal-05374853>

**HAL Id: hal-05374853**

**<https://hal.science/hal-05374853v1>**

Submitted on 20 Nov 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# **OBSERVATOIRE DE LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR**

## **ELABORATION D'INDICES DE LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR : Phase 1 : Inventaire des indices disponibles**

**RAPPORT FINAL  
DECEMBRE 2006**

**Décision Y05.35-SU 000 292 DU 02/11/2005**

**DDD-SB/2006-065**  
**DECEMBRE 2006**

## **OBSERVATOIRE DE LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR**

### **ELABORATION D'INDICES DE LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR :**

#### **Phase 1 : Premiers Indices « Logement »**

**Séverine KIRCHNER <sup>1</sup>**

**Béatrice JÉDOR <sup>1</sup>**

**Corinne MANDIN <sup>2</sup>**

**Avec la collaboration des membres du Groupe de Travail « Indices »**

<sup>1</sup> Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

<sup>2</sup> Institut National de l'Environnement et des Risques Industriels (INERIS)

## TABLE DES MATIERES

<b>RESUME .....</b>	<b>5</b>
<b>Introduction générale .....</b>	<b>7</b>
<b>CHAPITRE 1 Organisation du travail .....</b>	<b>8</b>
<b>1 Introduction .....</b>	<b>9</b>
<b>2 Mise en place d'un groupe de travail.....</b>	<b>9</b>
<b>3 Réunions du Groupe de Travail.....</b>	<b>10</b>
<b>CHAPITRE 2 Etat des lieux des indices de qualité de l'air intérieur existants.....</b>	<b>11</b>
<b>1 Introduction .....</b>	<b>13</b>
<b>2 Etat des lieux des indicateurs d'environnement intérieur disponibles.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Indoor Air Pollution Index, Indoor Discomfort Index, Indoor Environmental Index</b>	<b>13</b>
2.1.1 Indoor Air Pollution Index.....	13
2.1.2 Indoor Discomfort Index .....	15
2.1.3 Indoor Environmental Index.....	16
2.1.4 Symptômes des occupants .....	16
2.1.5 Discussion.....	17
<b>2.2 Indice LHVP.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3 Indice « Aéroport de Paris » .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4 Indice CLIM 2000.....</b>	<b>21</b>
<b>2.5 Indice IAQ et Indice BILGA.....</b>	<b>21</b>
<b>2.6 Indice GAPI.....</b>	<b>22</b>
<b>2.7 Indoor Environment Index .....</b>	<b>23</b>
<b>2.8 Méthode d'estimation multicritère.....</b>	<b>26</b>
2.8.1 Recueil des données.....	27
2.8.2 Classement des bâtiments critère par critère.....	27
2.8.3 Agrégation et classement des bâtiments .....	28
<b>2.9 Indice semi-quantitatif de l'exposition à l'humidité et aux moisissures .....</b>	<b>28</b>
2.9.1 Surveillance épidémiologique .....	29
2.9.2 Evaluation environnementale .....	29
2.9.3 Association entre l'IEI et les symptômes respiratoires.....	30
2.9.4 Discussion.....	31
<b>2.10 Indice humidité .....</b>	<b>32</b>
2.10.1 Symptômes des occupants .....	32
2.10.2 Evaluation de l'environnement intérieur.....	32
2.10.3 Indice .....	33
<b>2.11 Evaluation du caractère irritant de l'air intérieur .....</b>	<b>34</b>
<b>2.12 Synthèse .....</b>	<b>36</b>
<b>3 Références bibliographiques .....</b>	<b>36</b>

<b>4</b>	<b><i>Annexes</i></b> .....	<b>37</b>
	<b><i>CHAPITRE 3 Analyse critique des indices existants</i></b> .....	<b>42</b>
<b>1</b>	<b><i>Introduction</i></b> .....	<b>43</b>
<b>2</b>	<b><i>Analyse critique des indices existants</i></b> .....	<b>43</b>
2.1	<b>Indoor Air Pollution Index</b> .....	<b>43</b>
2.2	<b>Indoor Discomfort Index</b> .....	<b>44</b>
2.3	<b>Indoor Environmental Index</b> .....	<b>44</b>
2.4	<b>Indice LHVP</b> .....	<b>44</b>
2.5	<b>Indice « Aéroport de Paris »</b> .....	<b>45</b>
2.6	<b>Indice CLIM 2000</b> .....	<b>45</b>
2.7	<b>Indice IAQ et Indice BILGA</b> .....	<b>46</b>
2.8	<b>Indice GAPI</b> .....	<b>46</b>
2.9	<b>Indoor Environment Index</b> .....	<b>46</b>
2.10	<b>Caractère irritant de l'air (Ineris)</b> .....	<b>47</b>
2.11	<b>Synthèse de l'analyse critique</b> .....	<b>47</b>
	<b><i>Conclusion générale</i></b> .....	<b>49</b>

## RESUME

L'objectif du travail à mener était de définir une méthodologie d'élaboration d'indices de qualité d'air intérieur attendus comme vecteurs forts d'appropriation de la problématique de la qualité d'air intérieur par les parties concernées : maîtres d'ouvrages, gestionnaires de parcs de bâtiments, acteurs de la construction en général ainsi que le public.

Le ou les indices qui seront élaboré par l'OQAI devront répondre à deux fonctions principales :

- la **communication**, il s'agit d'apporter au public visé une information précise et fiable ;
- la **gestion**, il s'agit de disposer d'outils d'évaluation des situations et des actions menées de façon à suivre leur évolution.

Les lieux visés par ce(s) indice(s) de qualité d'air intérieur sont pour l'instant les logements. L'extrapolation de ces indices à l'ensemble d'un parc immobilier ou à d'autres lieux sera par la suite étudiée.

Les indices construits devront permettre de suivre la qualité de l'air intérieur du logement (notamment sur des critères sanitaires) dans le temps (pour connaître l'influence de travaux d'amélioration par exemple) mais aussi de classer les logements d'un parc immobilier entre eux ou éventuellement par rapport à un référentiel (qui sera à définir). Destinés en premier lieu aux gestionnaires de parc immobilier, ces indices devront être simples à mettre en œuvre et peu coûteux.

Un groupe de travail a été mis en place pour élaborer de tels indices. Ses réflexions ont d'abord porté sur l'état de l'art des indices existants réalisé par l'INERIS et complété par le CSTB dans le cadre de ce travail. Cette bibliographie montre que les nombreux indices existants associent symptômes et qualité de l'air intérieur mais aussi qualité de l'environnement intérieur (polluants, confort thermique, luminosité...). Ils concernent majoritairement les bureaux et ne sont pas forcément transposables aux logements. Deux catégories d'indices se dégagent : les indices nécessitant la mesure de polluants (chimiques, microbiologiques) et de paramètres de confort (température, humidité relative...) et ceux calculés à partir d'inspections visuelles du bâtiment (variables descriptives). Les incertitudes quant aux impacts sanitaires et aux niveaux à ne pas dépasser (valeurs de référence de qualité d'air intérieur) amènent à des indices souvent hétérogènes, basé sur des valeurs référence différentes. Les formules proposées ne sont par ailleurs pas toujours cohérentes (problème d'unité de mesure, addition de paramètres de qualité d'air différents, etc) et intègre des pondérations entre les paramètres pas toujours explicites. L'absence de retour d'expérience sur l'utilisation de la plupart de ces indices rend difficile leur évaluation. Les échanges avec un gestionnaire de patrimoine qui a développé et mis en œuvre un indice de qualité d'air intérieur pour la gestion des plaintes montre par ailleurs que son attente n'est pas principalement focalisée sur les indices de qualité d'air en tant que tels mais plutôt sur des outils de diagnostics et de prescriptions.

Une première réflexion a été menée au sein du groupe de travail afin de proposer des pistes de développement d'indices aux utilisateurs. Pour éviter les mesures et analyses de polluants longues à mettre en œuvre et coûteuses, l'indice « idéal » serait un indice basé sur le recueil de données descriptives associées à des mesurages faciles à mettre en œuvre.

Un tel indice nécessite l'identification de déterminants de la qualité de l'air intérieur et la disponibilité de valeurs de référence françaises. La recherche des facteurs et situations de pollution est engagée à l'OQAI sur la base des données de la campagne nationale Logements. Par ailleurs l'élaboration de valeurs guides nationales est en cours dans le cadre de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail (AFSSET). Parallèlement une réflexion sur la qualification du renouvellement d'air dans les logements, pouvant être utilisée pour partie dans la construction d'un indice de qualité d'air, a également été menée.

A ce stade de l'étude, il apparaît essentiel d'interviewer un panel d'acteurs (gestionnaires ou usagers des bâtiments) susceptibles d'utiliser les indices de qualité d'air intérieur afin de connaître plus précisément leurs attentes et les contraintes liées à la mise en place de tels indices. Ce travail sera effectué en 2007.

## INTRODUCTION GENERALE

L'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur vise à mettre en place un dispositif permanent de collecte de données sur les polluants présents dans les atmosphères intérieures des différents lieux de vie (logements, écoles, bureaux, transports,...). Il contribue à une meilleure connaissance des niveaux d'exposition des populations à la pollution et à l'identification des sources en vue d'élaborer des mesures de prévention et de réduction des risques sanitaires.

Dans ce cadre un programme spécifique sur le développement d'indices<sup>1</sup> de qualité d'air intérieur est en cours en cohérence avec l'une des sous-actions de l'action 14 du Plan National Santé Environnement « Mieux connaître les déterminants de la qualité de l'air intérieur ».

L'objectif du travail à mener est de disposer d'indicateurs (de descripteurs) adaptés aux différentes typologies du parc de bâtiments et apparaissant comme des vecteurs forts d'appropriation de la problématique de la qualité d'air intérieur par les parties concernées : maîtres d'ouvrages, gestionnaires de parcs de bâtiments, acteurs de la construction en général ainsi que le public.

Il s'agit d'agréger des informations (mesures, données descriptives, ressentis...) dans le but de **communiquer, informer et sensibiliser** les acteurs non spécialistes sur la pollution dans les bâtiments à différentes échelles (du logement au parc de bâtiments).

Les indices visés serviront notamment à :

- Évaluer des bâtiments ou des parcs de bâtiments : estimation immobilière, évaluation environnementale
- Gérer des bâtiments : suivi de la qualité des biens immobiliers, prévention des désordres, intégration dans les procédures qualité
- Évaluer l'impact de politiques publiques ou de travaux d'amélioration des bâtiments

Les espaces intérieurs visés sont les locaux à pollution non spécifique (logements, bureaux, écoles, hôpitaux,...). Compte tenu de la complexité de la notion d'indice de qualité d'air intérieur, la méthodologie d'élaboration des indices s'est portée dans un premier temps sur les logements en situation d'occupation. Ces derniers ont été étudiés en priorité du fait des données nouvelles disponibles dans le cadre de la campagne nationale Logements de l'OQAI.

Les indices construits devront permettre de suivre la qualité de l'air intérieur des logements dans le temps (pour connaître l'influence de travaux d'amélioration par exemple) mais aussi de classer les logements d'un parc immobilier entre eux ou éventuellement par rapport à un référentiel (qui sera à définir). Destinés en premier lieu aux gestionnaires de parc immobilier, ces indices devront être simples à mettre en œuvre et peu coûteux.

Par la suite, l'extrapolation des indices à l'ensemble d'un parc immobilier ou à d'autres lieux sera étudiée.

---

<sup>1</sup> Un indice a pour finalité d'aider à comprendre l'état d'un système et son évolution ; il quantifie et simplifie un phénomène souvent complexe. Ce peut être un nombre ou une façon simple de représenter des données.

# **CHAPITRE 1**

## **ORGANISATION DU TRAVAIL**

**Béatrice JÉDOR**

**CSTB**  
**Division Santé**

## 1 INTRODUCTION

Dans le cadre du programme d'actions de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, un Groupe de Travail sur la thématique « Indices de la Qualité de l'Air Intérieur » a été mis en place.

## 2 MISE EN PLACE D'UN GROUPE DE TRAVAIL

Le groupe de travail « Indices de la Qualité de l'Air Intérieur » regroupe 14 personnes de 7 organismes différents regroupant des expertises complémentaires pour prendre en compte les aspects sanitaires, environnementaux (pollution de l'air et bâtiments), sociologiques et méthodologiques (notamment statistiques).

Membres	Organismes
Isabella ANNESI-MAESANO	INSERM – U707
Lionel CHARLES	FRACTAL
Bernard COLLIGNAN	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
Bruno COUTY	Aéroports de Paris (ADP)
Cédric DUBOUDIN	Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail (AFSSET)
Patrick ELIAS	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
Béatrice JEDOR	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
Séverine KIRCHNER	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
Yvon LE MOULLEC	Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris (LHVP)
Corinne MANDIN	Institut National de l'Environnement et des Risques Industriels (INERIS)
Jean-Robert MILLET	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
Luc MOSQUERON	Institut National de l'Environnement et des Risques Industriels (INERIS)
Jacques RIBERON	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
Isabelle ROUSSEL	Association de Prévention de la Pollution Atmosphérique (APPA) Rhône-Alpes
Nathalie WEISS	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

**Tableau 1** : Membres du groupe de travail Indices

### **3 REUNIONS DU GROUPE DE TRAVAIL**

La coordination et le pilotage du Groupe de Travail est assuré par le CSTB.

Le Groupe de Travail « Indices de la qualité de l'air intérieur » s'est réuni deux fois depuis sa constitution, le 22 juin et le 19 octobre 2006.

La première réunion a été l'occasion de faire le point sur les nombreux indices de la qualité de l'air intérieur existants. Cet état de l'art a été réalisé par l'INERIS dans le cadre de sa participation au projet CIRCE. L'analyse critique de ces indices a été effectuée par les membres du groupe de travail afin de dégager les pistes pour le développement des indices visés dans le présent travail.

Lors de la seconde réunion, un retour d'expérience sur le développement et l'utilisation d'un indice de qualité de l'air dans des bureaux au sein de l'entreprise Aéroport de Paris a été présenté et discuté au groupe de travail. Plusieurs pistes ont ensuite été discutées pour l'élaboration d'un ou plusieurs indices.

## **CHAPITRE 2**

### **ETAT DES LIEUX DES INDICES DE QUALITE DE L'AIR INTERIEUR EXISTANTS**

**Béatrice JÉDOR** <sup>1 et 2</sup>

**Corinne MANDIN**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>**INERIS**

**Institut National de l'Environnement et des Risques Industriels**

<sup>2</sup>**CSTB**

**Centre Scientifique et Technique du Bâtiment**



## **1 INTRODUCTION**

Un état de l'art sur les indices de qualité de l'air intérieur existants a été réalisé par l'INERIS en début d'année dans la cadre de sa participation au projet de recherche CIRCE (Cancer, Inégalités Régionales et Cantonales et Environnement).

Cet état de l'art a été complété par d'autres indices recueillis par le CSBT pour l'étude de l'élaboration d'indices.

L'ensemble de cette recherche documentaire est présentée ci-après.

## **2 ETAT DES LIEUX DES INDICATEURS D'ENVIRONNEMENT INTERIEUR DISPONIBLES**

Les indices (ou indicateurs) de qualité d'air intérieur sont présentés successivement. Dans le cas où certains indices sont issus d'un même indice, ils sont regroupés dans la même partie.

### **2.1 INDOOR AIR POLLUTION INDEX, INDOOR DISCOMFORT INDEX, INDOOR ENVIRONMENTAL INDEX**

Ces trois indicateurs ont été élaborés aux Etats-Unis à la fin des années 90 par les équipes de DJ Moschandreas et de SC Sofuoglu. Ces indicateurs ont été construits à partir des données collectées lors de l'étude BASE (Building Assessment Survey Evaluation) de l'US-EPA<sup>2</sup>.

#### **2.1.1 INDOOR AIR POLLUTION INDEX**

L'Indoor Air Pollution Index (IAPI) a été élaboré récemment (1999) aux Etats-Unis dans le but d'apprécier l'environnement intérieur des bureaux et de faciliter la communication entre occupants et gestionnaires des locaux. Cet indice est calculé à partir de huit polluants de l'air intérieur : monoxyde de carbone, formaldéhyde, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, bactéries, champignons, CO<sub>2</sub> et COV totaux (Moschandreas et Sofuoglu, 1999, Sofuoglu et Moschandreas, 2003, Moschandreas et Sofuoglu, 2004). L'indice original utilisait les concentrations en radon à la place des concentrations en CO<sub>2</sub>. Ce remplacement a été effectué pour deux raisons : les niveaux en CO<sub>2</sub> sont liés au taux de ventilation de l'immeuble et le radon n'implique pas d'effets à court terme, effets qui sont étudiés dans le cadre de l'élaboration de cet indice.

Ces polluants sont regroupés en famille pour former une structure arborescente.

---

<sup>2</sup> L'étude BASE a été conduite entre 1994 et 1998 dans 100 bâtiments de bureaux, représentatifs du parc de bureaux américains, répartis sur 10 zones géographiques aux Etats-Unis. Les concentrations (HCHO, COV, CO, CO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, champignons, bactéries, température, humidité relative), les conditions de travail et les symptômes ont été relevés suivant un protocole standardisé. Des informations complémentaires et les publications concernant cette étude sont disponibles sur le site de l'US-EPA : [http://www.epa.gov/iaq/largebldgs/base/base\\_publications.html](http://www.epa.gov/iaq/largebldgs/base/base_publications.html)

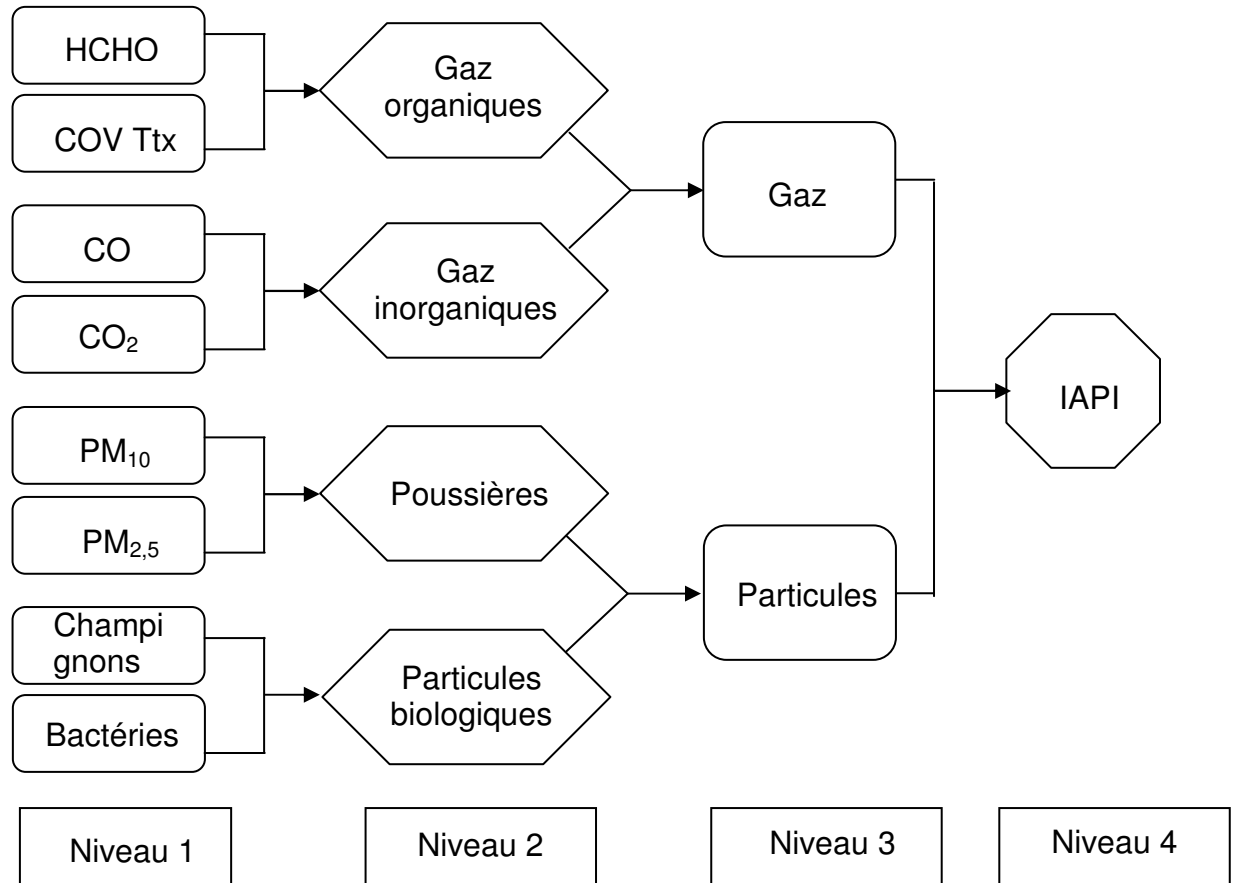


Figure 1 : Structure arborescente de l'indice IAPI

L'IAPI est calculé d'après la formule suivante :

$$IAPI = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K 10 \left[ 1 - \frac{C_{i,j,k}^{\max} - C_{i,j,k}^{obs}}{C_{i,j,k}^{\max} - C_{i,j,k}^{\min}} \left( \frac{C_{i,j,k}^{dmc} - C_{i,j,k}^{obs}}{C_{i,j,k}^{dmc}} \right) \right] \quad (1)$$

pour  $C^{\max} > C^{obs}$  et  $C^{dmc} > C^{obs} > C^{\min}$

avec : I = le nombre de groupes au niveau 3

J = le nombre de groupes du niveau 2 dans chaque groupe de niveau 3

K = le nombre de polluants (niveau 1) dans chaque groupe de niveau 2

$C^{\max}$  = concentrations maximales issues de l'étude BASE

$C^{\min}$  = concentrations minimales issues de l'étude BASE

$C^{obs}$  = concentrations mesurées dans le bâtiment

$C^{dmc}$  (démarcation concentrations) = concentrations limites (valeurs guides ou standards)

$C_{i,j,k}$  = concentration du polluant k du groupe j (niveau 2) du groupe i (niveau 3)

Les concentrations minimales et maximales issues de l'étude BASE sont présentées dans les Annexes de ce chapitre.

Les contraintes de calcul de l'indice IAPI sont les suivantes :

- $C^{obs} = C^{max}$  et  $C^{obs} = C^{dmc}$  quand  $C^{max} < C^{obs}$
- $C^{obs} = C^{dmc}$  quand  $C^{dmc} < C^{obs} \leq C^{max}$
- $C^{obs} = C^{min}$  quand  $C^{obs} < C^{min}$

Les concentrations « limites » sont des standards, des valeurs guides ou des suggestions de niveaux de polluants associés à des effets sanitaires. Ainsi, le poids d'un polluant est déterminé par ses effets sanitaires *via* les valeurs limites. Les valeurs limites retenues dans le cadre de cette étude sont les suivantes (Tableau 2) :

Polluant	Valeur limite	Source
Bactéries	500 ufc/m <sup>3</sup>	OMS (1993)
Champignons	500 ufc/m <sup>3</sup>	OMS (1988) ; Health and Welfare Canada (1993)
Formaldéhyde	60 µg/m <sup>3</sup>	Health and Welfare Canada (1987)
COV totaux	200 µg/m <sup>3</sup>	Molhave (1990)
CO	10 mg/m <sup>3</sup>	OMS (2000)
CO <sub>2</sub>	1000 ppm	ASHRAE*
PM <sub>2,5</sub>	40 µg/m <sup>3</sup>	Health and Welfare Canada (1987) ; Norwegian Directorate of Health (1991)
PM <sub>10</sub>	150 µg/m <sup>3</sup>	NAAQS* (1997)

**Tableau 2 : Valeurs limites ( $C^{dmc}$ ) utilisées dans le calcul de l'IAPI**

L'indice IAPI, nombre sans unité, est compris entre 0, pollution très faible et très bonne QAI, et 10, pollution maximale et très mauvaise QAI.

La décomposition de l'indice en sous-indices permet d'identifier le ou les polluants dominants.

### 2.1.2 INDOOR DISCOMFORT INDEX

L'Indoor Discomfort Index (IDI) est établi dans les bâtiments de bureaux à partir de deux variables caractéristiques du confort intérieur que sont la température (T) et l'humidité relative (RH) (Moschandreas et Sofuoglu, 2004).

L'IDI est un nombre sans unité compris entre 0 et 10. Un indice élevé traduit un confort médiocre tandis qu'un indice faible traduit un confort satisfaisant.

$$IDI = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L 10 \frac{|CA_{i,opt} - CA_{i,obs}|}{CA_{i,ucl} - CA_{i,lcl}} \quad (2)$$

pour  $25\% < CA_{RH,obs} < 65\%$  et  $16^{\circ}\text{C} < CA_{T,obs} < 28^{\circ}\text{C}$

avec :

L = nombre de variables de confort (température et humidité relative) L = 2

i = T et RH

Les auteurs prennent comme valeurs optimales de confort ( $CA_{opt}$ )  $22^{\circ}\text{C}$  et 45% d'humidité relative et considèrent que les intervalles de confort sont de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  et  $\pm 10\%$  autour de ces valeurs.

$CA_{ucl}$  = limite supérieure de l'intervalle de confort

$$CA_{RH,ucl} = 55\% \quad CA_{T,ucl} = 25^{\circ}\text{C}$$

$CA_{lcl}$  = limite inférieure de l'intervalle de confort

$$CA_{RH,lcl} = 35\% \quad CA_{T,lcl} = 19^{\circ}\text{C}$$

De plus, en dehors des zones de validité de la formule, on considère que :

$$\text{si } CA_{RH,obs} < 25\% \text{ alors } CA_{RH,obs} = 25\%$$

$$\text{si } CA_{RH,obs} > 65\% \text{ alors } CA_{RH,obs} = 65\%$$

$$\text{si } CA_{T,obs} < 16^{\circ}\text{C} \text{ alors } CA_{T,obs} = 16^{\circ}\text{C}$$

$$\text{si } CA_{T,obs} > 28^{\circ}\text{C} \text{ alors } CA_{T,obs} = 28^{\circ}\text{C}$$

### 2.1.3 INDOOR ENVIRONMENTAL INDEX

Cet indice IEI (sans unité) est la moyenne arithmétique des indices IAPI et IDI. Il permet de prendre en compte les polluants de l'air intérieur (indice IAPI) et les caractéristiques de confort (IDI) (Moschandreas et Sofuoglu, 2004).

$$IEI = \frac{IAPI + IDI}{2} \quad (3)$$

### 2.1.4 SYMPTOMES DES OCCUPANTS

Les occupants des bureaux de l'étude BASE ont été interrogés sur 19 symptômes : yeux secs, respiration sifflante, maux de tête, maux de gorge, difficultés respiratoires, infection des sinus, toux, fatigue oculaire, tension, douleurs au niveau du dos, étournements, sensations de déprime, souffle court, difficultés de concentration, nausées, peau sèche, fatigue, vertiges et douleurs au niveau des mains.

Ils ont répondu à la question suivante : « Pendant les 4 dernières semaines où vous étiez au travail, combien de fois avez-vous éprouvé chacun de ces symptômes tout en travaillant dans ce bâtiment ? »

- jamais durant les 4 dernières semaines ;
- 1-3 jours durant les 4 dernières semaines ;
- 1-3 jours par semaine durant les 4 dernières semaines ;
- tous les jours travaillés ou presque.

Plusieurs paramètres ont été utilisés pour étudier les associations entre les indices et les symptômes :

- ✓ POPS : pourcentage d'occupants présentant au moins un symptôme persistant (c'est-à-dire au minimum 1 à 3 jours par semaine durant les quatre dernières semaines)
- ✓ POPS2 : pourcentage d'occupants présentant au moins deux symptômes persistants
- ✓ MOSS : nombre maximum de symptôme parmi les occupants
- ✓ BSI : Indice des Symptômes du Bâtiment (Building Symptom Index)

#### Associations avec les symptômes des occupants

Pour associer les IEI aux POPS2 correspondants, deux modèles de régressions linéaires ont été formulés, l'un à partir des moyennes du groupe (Mean), l'autre à partir des moyennes mobiles (Moving Average MA).

Mean POPS2 = 3,34 \* Mean IEI + 48,7 (R<sup>2</sup>=0,67 et p=0,001) modèle « moyennes groupe »

MA POPS2 = 3,63 \* MA IEI + 46,2 (R<sup>2</sup>=0,79 et p=0,001) modèle « moyennes mobiles »

La vérification des modèles s'est faite à partir des données de 24 bâtiments de l'étude BASE non utilisées pour l'élaboration des indices. Les indices IEI, IAPI, IDI et POPS2 ont été calculées pour ces 24 bâtiments. Les POPS2 de chaque bâtiment ont également été estimés à partir des deux modèles de régression puis comparés aux valeurs précédemment calculées (à partir des observations). Les ratios POPS2 estimé sur POPS2 observé ont été utilisés pour évaluer la performance des modèles. Un ratio compris entre 0,5 et 1,5 indique une performance acceptable du modèle. Avec le modèle « moyennes de groupe », le ratio d'un des bâtiments est en dehors de cet intervalle. Pour les bâtiments restants, la moyenne des ratios est de 1,02 (écart-type = 0,17). La performance du modèle « moyennes mobiles » est meilleure que celle du modèle « moyennes du groupe », car les ratios de tous les bâtiments sont compris entre 0,75 et 1,25 (ratio moyen = 1 et écart-type = 0,12).

## **2.1.5 DISCUSSION**

### **Outils de communication**

Les distributions de l'IAPI, de l'IDI et de l'IEI ont été estimées par des simulations de Monte-Carlo à partir des résultats de l'étude BASE. Les distributions cumulées constituent un outil de communication car elles permettent de caractériser et classer l'environnement intérieur d'un bâtiment de bureaux comparativement aux bâtiments de

l'étude BASE représentatifs du parc américain. Les spécialistes de l'air intérieur disposent ainsi d'outils facilitant la communication avec le public, les occupants et les décideurs.

### **Outil de management**

La réalisation de mesures, de prélèvements et d'analyses de polluants de l'air pouvant être très coûteuse et difficile, les responsables préfèrent se tourner vers d'autres méthodes alternatives pour évaluer la qualité de l'air de leur bâtiment.

Puisque l'association entre l'IEI et les symptômes des occupants du bâtiment (POPS2) est régie par une simple régression linéaire régissant, il est possible d'estimer l'indice IEI à partir de POPS2 (lui-même facile à obtenir par questionnaire) sans force de la force dans l'association :

$$\text{Mean IEI} = 0,30 * \text{Mean POPS2} - 14,6$$

$$\text{MA IEI} = 0,28 * \text{MA POPS2} - 12,7 \quad \text{pour POPS2} \geq 60\%$$

La deuxième équation est recommandée car elle repose sur les valeurs fortes de l'IEI et par conséquent elle offre une plus grande protection aux occupants.

Le même type de relation a été établi pour l'indice IAPI (Sofuoglu et Moschandreas, 2003) :

$$\text{Mean IAPI} = 0,25 * \text{Mean POPS} - 14,3$$

Suite à cette première évaluation de l'environnement intérieur à partir de questionnaires, les personnes compétentes peuvent décider de réaliser des prélèvements.

### **Conclusion**

Les auteurs rappellent que, d'une part, ces modèles ont été élaborés et évalués dans des bâtiments de bureaux et que leur pertinence dans l'évaluation de la qualité de l'environnement intérieur n'a pas été testée dans d'autres types de locaux (logements, écoles, hôpitaux,...). D'autre part, l'inclusion d'autres polluants dans la formulation des indices pourrait ou non améliorer le modèle ; cependant un tel ajout augmenterait le nombre de mesures de polluants et par là même le coût limitant ainsi l'utilisation de ces indices (Moschandreas et Sofuoglu, 2004).

L'estimation de l'IEI dans le bâtiment investigué permettra de mieux cerner les éventuelles actions à mener. A partir des résultats de l'étude BASE, les bâtiments peuvent être classés dans trois catégories :

- ✓ Si  $\text{IEI} < 3,6$  : la relation entre IEI et POPS2 de l'étude BASE est modérément forte car le coefficient de corrélation entre les valeurs de POPS2 observés et estimés n'est que de 0,39. Cela suggère que les symptômes ne sont alors pas imputables à une mauvaise qualité de l'environnement intérieur. Aucune action plus poussée n'est donc à envisager puisque le modèle ne permet pas de relier la qualité intérieure aux symptômes.

- ✓ Si  $3,6 < I_{EI} < 6$  : le modèle peut être utilisé comme un outil de management pour améliorer la qualité de l'environnement intérieur. Des examens plus poussés peuvent être envisagés.
- ✓ Si  $I_{EI} > 6$  : La pollution de l'air contribue à l'apparition des symptômes et il est recommandé de mener une investigation plus poussée avec prélèvements et analyses de l'air. A partir de ces mesures, les indices  $I_{EI}$ ,  $I_{DI}$ ,  $I_{API}$  et les sous-indices pourront être calculés. Ensuite, la contribution de chaque variable dans les indices sera estimée. Ainsi, l'identification des variables prépondérantes permettra de cibler les actions d'amélioration de la QAI prioritaires.

## 2.2 INDICE LHVP

Cet indice réalisé par le Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris (LHVP) prend en compte trois marqueurs et les compare à des valeurs de référence (Castanet, 1998) :

- monoxyde de carbone ; seuil de perception de la fumée de tabac (5 ppm) ;
- dioxyde de carbone ; seuil de confinement des locaux (1000 ppm) ;
- dénombrement total bactérien (DTB) ; valeur de référence à 1000 ufc/m<sup>3</sup>.

$$IQ = \frac{[CO]}{5} + \frac{[CO_2]}{1000} + \frac{DTB}{1000}$$

Cet indice ne prend pas en compte la durée d'exposition et n'est pas utilisable dans les locaux à pollution spécifique.

### Interprétation :

- $IQ < 3$  : le système de ventilation ou d'aération est considéré comme étant performant vis-à-vis des sources de polluants ;
- $IQ > 3$  : le système de ventilation ou d'aération est mal adapté.

## 2.3 INDICE « AEROPORT DE PARIS »

L'indice de qualité d'air intérieur élaboré par Aéroport de Paris (Couty, communication personnelle) s'applique pour les **bureaux**. L'indice global est la combinaison d'un indice de **confort** ( $I_c$ ) et d'un indice de **pollution** ( $I_p$ ) :

$$I_c = (2 \times I_{TH} + 3 \times I_{CO_2}) / 5$$

prend en compte la température, l'humidité relative et le CO<sub>2</sub>

$$I_p = (3 \times I_{CO} + 3 \times I_{NO_2} + 6 \times I_{PM_{10}}) / 12$$

Ou  $I_p = (3 \times I_{CO} + 6 \times I_{PM10}) / 9$  en l'absence de mesure de  $NO_2$

$$I_g = (2 \times I_p + I_c) / 3$$

Les indices  $I_c$ ,  $I_p$  et  $I_g$  varient de 1 (très bonne qualité de l'air) à 10 (qualité de l'air très mauvaise). Ils sont calculés **sur une journée de travail** avec un **pas de temps de 1 heure**.

Ces polluants ont été choisis pour des questions de métrologie (analyseurs facilement utilisables, fiables nuisances sonores,...).

### Calcul des sous-indices :

Le **sous-indice  $I_{TH}$**  a été établi à partir du diagramme de confort hygrothermique (Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France « Allergie respiratoire, asthme, environnement » 1993).

Le **sous-indice  $I_{CO_2}$**  a été établi à partir de 3 valeurs

- < 400 ppm (indice 1) : concentration de fond extérieure
- > 1000 ppm (indice 6) : valeur limite fixée pour les locaux par le Code du travail (circulaire du 9/08/78)
- > 1300 ppm (indice 8) : valeur limite pour les locaux où il est interdit de fumer (circulaire du 9/08/78)

Le **sous-indice  $I_{NO_2}$**  est identique à celui calculé pour l'indice ATMO

- > 200  $\mu g/m^3$  (indice 8) : valeur OMS sur 1 heure (seuil de recommandation et d'information)
- > 400  $\mu g/m^3$  (indice 10) : seuil d'alerte pour l'air ambiant (1 heure)

Le **sous-indice  $I_{CO}$**  a été établi à partir de :

- 10 ppm (indice 6) : valeur OMS sur 8 heures
- 25 ppm (indice 8) : valeur OMS sur 1 heure
- 50 ppm (indice 10) : valeur OMS sur 30 minutes

Le **sous-indice  $I_{PM10}$**  : les concentrations intérieures étant souvent plus élevées qu'à l'extérieur, les concentrations affectées aux indices sont le double de celles de l'indice ATMO.

### Rendu des résultats :

Une répartition de l'indice global en fonction du nombre d'heures peut être proposée ainsi que son évolution au cours de la campagne de mesure (idem pour  $I_c$  et  $I_p$ ).

Dans tous les cas des prescriptions accompagnent le rendu des résultats de mesures de l'indice.

## 2.4 INDICE CLIM 2000

Cet indice a été développé par EDF dans le cadre de CLIM 2000 (Castanet, 1998). Il est égal à la moyenne des concentrations de 4 polluants pondérées par leur Valeur à Risques Limités<sup>3</sup> (VRL) respectives :

- dioxyde de carbone, VRL = 4500 mg/m<sup>3</sup> ;
- monoxyde de carbone, VRL = 30 mg/m<sup>3</sup> sur 1 heure ;
- dioxyde d'azote, VRL = 0,4 mg/m<sup>3</sup> sur 1 heure ;
- formaldéhyde, VRL = 0,06 mg/m<sup>3</sup> sur 1 à 24h.

$$I_{CLIM\ 2000} = \frac{1}{4} \left( \frac{[CO_2]}{4500} + \frac{[CO]}{30} + \frac{[NO_2]}{0,4} + \frac{[HCHO]}{0,06} \right)$$

### Interprétation :

-  $0 < I_{CLIM\ 2000} < 1$  : l'air est jugé de bonne qualité, en moyennes les VRL ne sont pas atteintes ;

-  $1 < I_{CLIM\ 2000} < 2$  : l'air est considéré comme pollué, en moyenne les VRL sont atteintes voire dépassées ;

-  $I_{CLIM\ 2000} > 2$  : l'air est jugé comme dangereux, en moyenne les concentrations dépassent le double des VRL.

## 2.5 INDICE IAQ ET INDICE BILGA

Les effets des polluants sont considérés sans interactivité (Castanet, 1998). Cet indice est basé sur la comparaison entre une exposition cumulée et deux valeurs seuils, la Valeur à Risques Limités (VRL)<sup>4</sup> et la Valeur à Risques Importants (VRI)<sup>5</sup> (voir annexes de ce chapitre). Il a été développé dans le cadre d'une étude menée sur le développement d'un code de simulation hygrothermique et aéraulique, BILGA, intégrant les transferts de polluants. Cette étude a été réalisée par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), le Centre d'Etude du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP), Electricité de France (EDF), la Fédération Nationale du Bâtiment (FNB) et Gaz de France (GDF).

---

<sup>3</sup> Valeur à Risques Limités : pour des expositions inférieures à cette valeur, les risques sanitaires sont limités voire nuls ou inconnus.

<sup>4</sup> Valeur à Risques Limités : pour des expositions inférieures à cette valeur, les risques sanitaires sont limités voire nuls ou inconnus.

<sup>5</sup> Valeur à Risques Importants : pour des expositions supérieures à cette valeur, les risques sanitaires sont prouvés et se traduisent généralement par des lésions irréversibles, des maladies chroniques, voire le décès.

La formule de calcul de l'indice est la suivante :

$$IAQ(P, T) = \frac{E_{moy}^P - VRL_T^P}{VRI_T^P - VRL_T^P}$$

Avec

$E_{moy}^P$  l'exposition moyenne au polluant P sur la période d'exposition T correspondant à un séjour dans la pièce ;

$VRL_T^P$  la valeur à risques limités du polluant P pour une durée d'exposition T ;

$VRI_T^P$  la valeur à risques importants du polluant P pour une durée d'exposition T.

Si  $E_{moy}$  est inférieur ou égal à VRL alors l'indice devient :

$$IAQ(P, T) = \frac{E_{moy}^P - VRL_T^P}{VRL_T^P}$$

#### Interprétation :

- Comparaison à 1 :
  - $0 < IAQ(P, T) < 1$  : le risque sanitaire lié au polluant P sur la durée d'exposition T est limité ;
  - $IAQ(P, T) \geq 1$  : le risque sanitaire lié au polluant P sur la durée d'exposition T est important.
- Identification de la valeur maximale des indices : détermination de l'indice BILGA :

$$I_{BILGA} = \max [IAQ(P, T)]$$

- $I_{BILGA} < 0$  : qualité de l'air excellente ;
- $I_{BILGA} = 0$  : le risque dans le logement étudié est insignifiant ;
- $0 < I_{BILGA} < 1$  : le risque sanitaire est limité ;
- $I_{BILGA} \geq 1$  : le risque sanitaire dans le logement est inacceptable.

## 2.6 INDICE GAPI

Cet indice a été créé pour le suivi de la contamination organique dans les environnements contrôlés de type salles blanches (Cariou et Guillot, 2005). Cet indice global fournit une seule valeur prenant en compte les différents COV présents, leur concentration et leur impact potentiel.

$$GAPI = \sum_i W_i C_i$$

Avec  $C_i$  : la concentration dans l'air du composé organique volatil  $i$

$W_i$  : le coefficient d'impact du même composé  $i$

#### Calcul du coefficient d'impact $W_i$

Plusieurs caractéristiques  $n$  du composé  $i$  peuvent être prises en compte, le coefficient d'impact est alors :

$$W_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n X_{i,j}}$$

$X_i$  est calculé pour chaque COV et traduit l'impact sanitaire. Il peut être déterminé en se basant sur :

- le pouvoir cancérigène du polluant :

Groupe	Caractéristiques	$X_i$
1	Cancérigène certain	8
2A	Cancérigène probable	5
2B	Cancérigène possible	4
3	Non classé	2
4	Non Cancérigène	1

- les phrases de risques des fiches de l'INRS (concernant le pouvoir irritant de la substance par exemple) :

$$X_i = 2^q$$

Avec  $q$  le nombre de phrases de risques retrouvées

#### Interprétation :

Cet indice est transposable à tous types de milieux. Il permet de suivre l'évolution de la qualité de l'air intérieur : une augmentation de l'indice GAPI traduit une détérioration de la qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment.

## 2.7 INDOOR ENVIRONMENT INDEX

L'*Indoor Environment Index* (IEI) a été développé par le Département Architecture de l'Université de Taiwan au début des années 2000 (Chiang et Lai, 2002).

Au début de l'étude, 48 items ont été retenus, à partir d'une revue de la littérature, pour caractériser la qualité de l'environnement intérieur. Après considération de la faisabilité et du coût des mesures, seuls 23 paramètres ont été sélectionnés. Ces indicateurs d'appréciation de la qualité de l'environnement intérieur sont répartis dans huit catégories physico-environnementales (Tableau 3).

Ensuite ces catégories ont été classées selon leur influence suivant la méthode du Processus Analytique de Hiérarchie (AHP). En parallèle, douze experts (5 architectes, 3 ingénieurs et 4 professeurs) ont été consultés sur des aspects pratiques et sur la situation actuelle des logements.

Ainsi, seules les catégories de plus forts poids, qui correspondaient également à celles du consensus d'experts, ont été retenues (Tableau 3). Après ajustement, les poids (Wx) des cinq catégories prédominantes sont respectivement : 0,290 pour la QAI, 0,208 pour le confort thermique, 0,203 pour l'acoustique, 0,164 pour la luminosité et 0,135 pour les CEM.

Catégorie Physico-environnementale (x)	Indicateurs d'appréciation (i)
<b>Acoustique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Niveau de pression acoustique égalisé pendant la journée <math>L_{eq}D</math> (bureaux)</li> <li>✓ Niveau de pression acoustique égalisé sur 24h <math>L_{eq}24H</math> (logements)</li> </ul>
<b>Luminosité</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Eclairage moyen</li> <li>✓ <i>Eclairage artificiel moyen</i></li> <li>✓ Ratio d'uniformité de l'éclairage</li> <li>✓ <i>Ratio d'uniformité de l'éclairage artificiel</i></li> <li>✓ Ratio d'utilisation de la lumière du jour</li> </ul>
<b>Confort thermique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Température intérieure différentes saisons</li> <li>✓ Humidité intérieure</li> <li>✓ Vitesse de l'air intérieur</li> <li>✓ PMV<sup>6</sup></li> </ul>
<b>Qualité de l'air intérieur (QAI)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ CO      ✓ CO<sub>2</sub>      ✓ COV</li> <li>✓ PM<sub>10</sub>    ✓ Formaldéhyde</li> <li>✓ <i>Taux de ventilation</i></li> <li>✓ <i>Taux de renouvellement d'air</i></li> </ul>
<b>Qualité de l'eau</b>	✓ <i>Qualité de la ressource</i>
<b>Surface végétalisée</b>	✓ <i>Ratio de la surface végétalisée</i>
<b>Vibrations</b>	✓ <i>Facteur d'exposition du corps aux vibrations</i>
<b>Champs Electromagnétiques (CEM)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Intensité du champ électrique (50/60 Hz)</li> <li>✓ Flux magnétique (50/60 Hz)</li> </ul>

**Tableau 3 : Catégories physico-chimiques et indicateurs d'appréciation utilisés pour le calcul de l'Indoor Environment Index**

*Note : Les indicateurs en italique n'ont pas été retenus*

<sup>6</sup> Le P.M.V. (Predicted Mean Vote) est un indice qui prédit la satisfaction moyenne d'un groupe de personnes sur une échelle de sensations thermiques (+3 : très chaud, +2 : chaud, +1 : légèrement chaud, 0 : ni chaud ni froid, -1 : légèrement froid, -2 : froid, -3 : très froid).

L'indice IEI est la somme des  $S_x$ , score évalué des catégories physico-environnementales  $x$ , multiplié par  $W_x$ , poids des catégories physico-environnementales  $x$ .

$$IEI (AHP) = \sum S_x W_x \quad (4)$$

$x$  = catégorie = acoustique, luminosité, confort thermique, QAI et champs électromagnétique

$$IEI (AHP) = 0,203 S_{acoustique} + 0,164 S_{luminosité} + 0,208 S_{thermal} + 0,29 S_{qai} + 0,135 S_{cem}$$

Chaque catégorie regroupe plusieurs mesures  $i$ . A chaque mesure  $i$  est associé un score  $S_{xi}$  égal à 20, 40, 60, 80 ou 100 selon le niveau de risque ; plus la mesure est médiocre, plus le score est faible. Les scores de chaque indicateur sont regroupés dans le Tableau 4 suivant :

Indicateurs	Unité	Score $S_{xi}$ correspondant à l'indicateur $i$				
		20	40	60	80	100
<b>Acoustique</b>						
Leq 24h (pour les logements)	dB (A)	> 55 ≥	> 50 ≥	> 45 ≥	> 40 ≥	
Leq journée (pour les bureaux)	dB (A)	> 59 ≥	> 56 ≥	> 53 ≥	> 50 ≥	
<b>Luminosité</b>						
Eclairage moyen ambiant	Lx	< 70 ≤	< 150 ≤	< 300 ≤	< 500 ≤	
Eclairage moyen du visage (bureaux)	Lx	< 500 ≤	< 750 ≤	< 1000 ≤	< 1500 ≤	
Rapport d'uniformité de l'éclairage du visage	--	< 0,5 ≤	< 0,6 ≤	< 0,7 ≤	< 0,8 ≤	
Ratio d'utilisation de la lumière du jour	--	< 0,5 ≤	< 0,7 ≤	< 1 ≤	< 2 ≤	
<b>Confort thermique</b>						
Température intérieure été	°C	> 29 ≥	> 28 ≥	> 27 ≥	> 26 ≥	
		< 21 ≤	< 22 ≤	< 23 ≤	< 24 ≤	
Température intérieure printemps et automne	°C	> 28 ≥	> 27 ≥	> 26 ≥	> 25 ≥	
		< 20 ≤	< 21 ≤	< 22 ≤	< 23 ≤	
Température intérieure hiver	°C	> 27 ≥	> 26 ≥	> 25 ≥	> 24 ≥	
		< 19 ≤	< 18 ≤	< 17 ≤	< 16 ≤	
Humidité Relative intérieure	%	> 90 ≥	> 80 ≥	> 70 ≥	> 60 ≥	
		< 30 ≤	< 35 ≤	< 40 ≤	< 45 ≤	
Vitesse de l'air	m/s	> 0,45 ≥	> 0,35 ≥	> 0,25 ≥	> 0,15 ≥	
PMV	--	> 2 ≥	> 1,5 ≥	> 1 ≥	> 0,5 ≥	
		< -2 ≤	< -1,5 ≤	< -1 ≤	< -0,5 ≤	
<b>Qualité de l'Air Intérieur</b>						
PM <sub>10</sub> (24h)	mg/m <sup>3</sup>	> 350 ≥	> 150 ≥	> 50 ≥	> 25 ≥	
CO (8h)	ppm	> 15 ≥	> 9 ≥	> 4,5 ≥	> 2 ≥	

CO2 (8h)	ppm	> 2500 ≥	> 1000 ≥	> 800 ≥	> 600 ≥
Formaldéhyde (8h)	ppb	> 1000 ≥	> 100 ≥	> 16 ≥	> 8 ≥
COV (8h)	mg/m <sup>3</sup>	> 3 ≥	> 0,3 ≥	> 0,1 ≥	> 0,5 ≥
<b>Champs électromagnétiques</b>					
Intensité champ électrique très basse fréquence	kV/m	> 25 ≥	> 19 ≥	> 12 ≥	> 5 ≥
Flux magnétique très basse fréquence	μT	> 1600 ≥	> 1100 ≥	> 600 ≥	> 100 ≥

**Tableau 4 :** Scores  $S_{xi}$  correspondant à la valeur de l'indicateur mesuré et utilisés pour le calcul de l'Indoor Environment Index

Si l'un des scores  $S_{xi}$  est strictement inférieur à 60, alors le score de la catégorie  $x$  ( $S_x$ ) est égal au minimum des scores des indicateurs de cette catégorie ( $S_{xi}$ ) afin de se placer dans les conditions environnementales intérieures les plus défavorables. Si tous les  $S_{xi}$  sont supérieurs ou égaux à 60, alors  $S_x$  est égal à la moyenne arithmétique des  $S_{xi}$ .

$$si \exists i, S_{xi} < 60 \text{ alors } S_x = \min(S_{xi}) \quad \text{sinon } S_x = \frac{1}{n} \sum_1^n S_{xi}$$

Les scores des cinq catégories sont alors réintroduits dans l'équation (4).

Cet indice permet d'évaluer quantitativement la qualité de l'environnement intérieur du logement existant à partir des valeurs des principaux indicateurs d'environnement intérieur.

## 2.8 METHODE D'ESTIMATION MULTICRITERE

Cette méthode (Roulet *et al.*, 2003, Roulet *et al.*, 2005) permet de mener une évaluation globale d'un bâtiment en prenant en compte les critères suivants :

- la consommation énergétique,
- le confort,
- la santé des occupants.

Cette méthode a été développée dans le cadre du projet européen HOPE et a été testée sur 164 bâtiments étudiés dans ce projet<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> HOPE : Healthy Optimisation Protocol for Energy-efficient building ; 98 bâtiments d'habitation et 66 bâtiments de bureaux répartis dans 9 pays européens, dont la moitié est supposée avoir une faible consommation énergétique.

Pour plus d'informations sur le déroulement du projet consultez le site Internet <http://hope.epfl.ch>  
 >Project>Work Package 3 et >Results>Multidisciplinary field study

## 2.8.1 RECUEIL DES DONNEES

La consommation énergétique de chaque bâtiment est recueillie auprès des gestionnaires des bâtiments et rapportée à la superficie du bâtiment (kWh/m<sup>2</sup>).

La perception du confort (confort thermique, qualité de l'air, éclairage et bruits) est recueillie par questionnaires remplis par les occupants en été et en hiver. Chaque type de confort est caractérisé par plusieurs items décrivant le confort à l'intérieur du bâtiment. Chaque item est noté sur une échelle de 1 à 7 (voir annexes de ce chapitre).

Pour caractériser le bâtiment, les réponses de tous les occupants sont moyennées pour chaque item.

L'évaluation de la santé des occupants se fait par questionnaire. Chaque occupant répond à la question suivante « avez-vous ressenti l'un des symptômes suivants au moins deux fois ? Vous sentez-vous mieux en dehors du bâtiment ? » Un symptôme qui disparaît en quittant le bureau ou le logement est considéré comme étant lié au bâtiment.

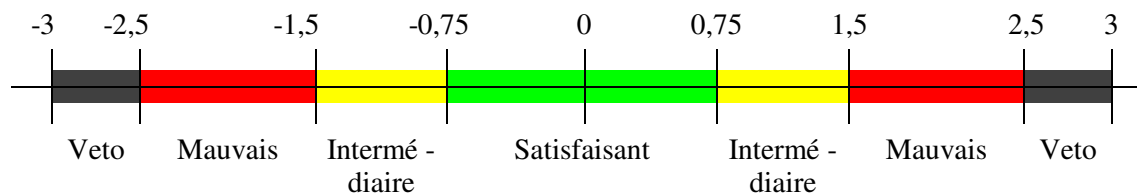
Les symptômes suivis dans les bureaux sont : yeux secs, yeux qui piquent ou qui pleurent, nez bouché, goutte au nez, gorge sèche, léthargie ou fatigue, maux de tête, peau irritée ou sèche. Dans les logements, les éternuements et les difficultés respiratoires s'ajoutent à cette liste.

A partir des réponses, le *Building Symptom Index* (BSI) est calculé en faisant la moyenne du nombre de symptômes par occupant.

## 2.8.2 CLASSEMENT DES BATIMENTS CRITERE PAR CRITERE

Les bâtiments sont triés en plusieurs catégories : mauvais ou non satisfaisant (rouge) d'un côté, bon ou satisfaisant (vert) de l'autre. Une classe « veto » (noir) regroupe les bâtiments pour lesquels un critère est très mauvais. Les situations peu claires sont rassemblées dans une classe intermédiaire ou incertaine (jaune).

Pour ce qui concerne la perception du confort, l'échelle 1-7 est recentrée autour de zéro (en soustrayant 4 aux moyennes obtenues).



Selon leurs performances énergétiques, les bâtiments sont classés en trois catégories :

- < 150 kWh/m<sup>2</sup> = satisfaisant
- > 250 kWh/m<sup>2</sup> = non satisfaisant
- > 500 kWh/m<sup>2</sup> = inacceptable (veto)

Les bâtiments peuvent également être classés en fonction de l'état de santé des occupants à partir des BSI :

Veto : le BSI du bâtiment est supérieur à BSI moyen plus 2 écarts-types (calculé à partir de tous les bâtiments)

Satisfaisant : < 35 % du BSI du plus mauvais bâtiment

Inacceptable :  $\geq 70$  % du BSI du plus mauvais bâtiment

A noter que les seuils des logements sont différents de ceux des bureaux.

### 2.8.3 AGREGATION ET CLASSEMENT DES BATIMENTS

Pour donner le même poids à la consommation énergétique, au confort et à la santé des occupants, les items relatifs à chaque type de confort sont agrégés en premier pour obtenir une classe de confort pour la température, une pour la luminosité, une pour la qualité de l'air et une pour le bruit. Ces 4 classes sont ensuite agrégées pour former une seule classe « confort ». Puis les trois critères (confort, énergie et santé) sont agrégés.

- Le bâtiment est satisfaisant (vert) si plus de 50 % des critères sont « verts » et s'il n'y a aucun veto.
- Le bâtiment est non satisfaisant (rouge) :
  - si plus de 50 % des critères sont « rouges » ;
  - ou si moins de 50 % des critères sont verts et plus d'un tiers sont rouges ;
  - ou s'il y a au moins un veto.
- Le bâtiment est noir si plus d'un tiers des critères sont assortis d'un veto
- Le bâtiment est jaune ou inclassable dans les autres cas.

## 2.9 INDICE SEMI-QUANTITATIF DE L'EXPOSITION A L'HUMIDITE ET AUX MOISSURES

Face aux difficultés de mesures des bioaérosols et à l'inadéquation d'une appréciation dichotomique de la présence de moisissures (présence/absence), des méthodes semi-quantitatives d'appréciation de l'exposition, basées sur une classification visuelle et olfactive (humidité/moisissures), constituent une alternative efficace pour les études épidémiologiques dans les bâtiments humides (Park *et al.*, 2004).

En 2002, le *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) a investigué 13 bâtiments d'une université aux Etats-Unis afin d'examiner les liens entre les symptômes respiratoires des employés et leurs expositions environnementales aux moisissures et à l'humidité dans les locaux.

## 2.9.1 SURVEILLANCE EPIDEMIOLOGIQUE

323 employés à temps complet de l'université ont répondu entièrement au questionnaire<sup>8</sup> (caractéristiques démographiques, diagnostic respiratoire, données sur les symptômes et fraction de temps passé dans chaque pièce).

Les données sur les symptômes respiratoires supérieurs (irritation de la gorge, symptômes au niveau du nez et des sinus) et inférieurs (respiration sifflante, difficultés respiratoires, souffle court, quinte de toux), en lien avec le bâti et survenus durant les 12 derniers mois ont été recueillies. Sont considérés comme ayant un lien avec le bâtiment, les symptômes ayant entraîné un arrêt de travail ou l'augmentation de la prise de médicaments pendant les jours travaillés.

L'étude a également porté sur les membres d'un département contraints de déménager 8 mois avant l'étude, à cause du nombre élevé de maladies respiratoires, d'un bâtiment endommagé vers trois des bâtiments de témoins.

## 2.9.2 EVALUATION ENVIRONNEMENTALE

Treize bâtiments ont été inspectés. Les infiltrations et dégâts des eaux sont courants dans sept d'entre eux (bâtiments-cas). Les 6 autres bâtiments ont peu ou pas de problèmes d'eau et constituent le groupe témoin. 558 et 163 pièces ont été investiguées respectivement dans les « bâtiments-cas » et dans les « bâtiments-témoins ».

Dans chacune de ces salles, réparties sur tous les étages, quatre facteurs environnementaux (tâches d'eau, moisissures visibles, odeurs de moisi, humidité) ont été relevés dans sept zones de chaque pièce (plafonds ; murs ; fenêtres ; sols ; systèmes de chauffage, climatisation, ventilation, système de conditionnement d'air ; conduites d'eau ; mobilier).

Les traces d'humidité de chaque zone (tâches d'eau) sont classées sur une échelle allant de 0 à 3 selon leur étendue (0=pas de tâche ; 1= tâches sur 5% de la surface ; 2=5-30% ; 3= >30%). La moyenne (AWSS) est ensuite calculée pour chaque pièce.

Les moisissures visibles sont notées quelque soit leur emplacement.

Les odeurs de moisi sont évaluées selon l'échelle : aucune odeur, odeur légère ou forte.

Deux combinaisons ont été créées affectant différents coefficients aux facteurs environnementaux selon leur prédominance dans la pièce investiguée :

(i) combinaison « tâches d'eau » = 1 (si tâches d'eau) + 0,5 (si moisissures visibles) + 0,5 (si odeur de moisi) + 0,5 (si humidité)

(ii) combinaison « moisissures » = 0,5 (si traces d'eau) + 1 (si moisissures visibles) + 0,5 (si odeur de moisi) + 0,5 (si humidité)

L'exposition individuelle des employés est alors estimée par la formule suivante :

$$\text{Individual Exposure Index (IEI)} = \sum_{i=1}^k (E_i \times TF_i)$$

<sup>8</sup> Elaboré à partir de l'European Community Respiratory Health Survey et American Thoracic Society Questionnaires

Où :

$i$  : pièce spécifique

$TF_i$  : fraction de temps passé par chaque individu dans la pièce  $i$  durant le dernier semestre.

$E_i$  peut prendre différentes valeurs :

0 (absence) ou 1 (présence) pour les facteurs environnementaux

AWSS (traces d'humidité)

Ou la valeur d'une de deux combinaisons des 4 facteurs environnementaux dans la pièce  $i$ .

### 2.9.3 ASSOCIATION ENTRE L'IEI ET LES SYMPTOMES RESPIRATOIRES

Les odds ratios des symptômes respiratoires ont été calculés pour chaque indice d'exposition à partir des réponses des 323 employés interrogés. Les odds ratios sont regroupés dans le **Tableau 5**.

Symptômes respiratoires liés au bâtiment		Tâches d'eau					Combinaisons	
		Variable continue (AWSS)	Tâches	Moisissures visibles	Odeurs de moisi	Humidité	« tâches d'eau »	« moisissures »
Système respiratoire inférieur	Respiration sifflante	<b>2,3</b> (1,1-4,5)	2,6 (0,7-9,2)	<b>2,0</b> (1,1-3,7)	1,1 (0,5-2,3)	1,2 (0,3-4,5)	1,8 (0,9-3,5)	1,7 (0,9-3,4)
	Difficulté respiratoire	1,9 (0,9-3,8)	1,9 (0,5-6,9)	<b>2,6</b> (1,3-4,9)	1,01 (0,5-2,2)	1,0 (0,2-4,2)	1,8 (0,9-3,8)	<b>2,2</b> (1,1-4,6)
	Souffle court	1,7 (0,8-3,7)	6,3 (0,8-51,1)	<b>2,6</b> (1,3-5,1)	1,4 (0,7-3,2)	3,3 (0,9-11,9)	<b>2,7</b> (1,2-6,1)	<b>2,5</b> (1,2-5,4)
	Toux	1,3 (0,6-2,6)	3,2 (0,7-14,4)	1,5 (0,8-2,8)	1,7 (0,8-3,6)	1,0 (0,2-4,5)	1,5 (0,7-3,2)	1,7 (0,8-3,6)
Système respiratoire supérieur	Nez	1,5 (0,8-2,8)	<b>4,4</b> (1,2-15,3)	<b>1,7</b> (1,0-3,0)	1,1 (0,6-2,1)	1,7 (0,5-6,0)	<b>2,4</b> (1,3-3,2)	<b>2,5</b> (1,3-4,7)
	Sinus	1,6 (0,9-2,9)	<b>3,8</b> (1,1-13,4)	<b>2,0</b> (1,2-3,4)	1,3 (0,7-2,5)	0,8 (0,2-2,9)	1,8 (1,0-3,4)	<b>2,2</b> (1,2-4,1)
	Irritation gorge	<b>2,4</b> (1,3-4,4)	2,0 (0,7-5,6)	1,3 (0,7-2,1)	<b>2,3</b> (1,2-4,3)	1,5 (0,4-5,1)	1,6 (0,9-3,0)	1,5 (0,8-2,8)

**Tableau 5 : Odds ratios ajustés des symptômes respiratoires pour chaque indice d'exposition à l'humidité et aux moisissures**

Notes : Odds ratios ajustés sur les variables de confusion (âge, sexe, tabagisme, allergies,...)  
 Les odds ratios en gras sont statistiquement significatifs ( $P < 0,05$ ).

L'indice IEI issu de AWSS ou des moisissures visibles est un meilleur prédicateur des symptômes liés au bâtiment que l'indice IEI issu des odeurs de moisi ou de l'humidité (cf. **Tableau 5**).

D'après les modèles multivariés, l'indice IEI-AWSS est plus significativement associé à l'augmentation des respirations sifflantes (OR=2,3) et des irritations de la gorge (OR=2,4), alors que l'indice IEI-moisissures visibles est associé à une augmentation significative des respirations sifflantes (OR=2), difficultés respiratoires (OR=2,6), souffle court (OR=2,6), irritation du nez (OR=1,7) ou des sinus (OR=2). En ce qui concerne les combinaisons, les associations sont significatives avec les difficultés respiratoires, le souffle court, les irritations du nez ou des sinus.

De plus, les odds ratios des symptômes augmentent nettement avec l'augmentation des quartiles de l'IEI (respiration sifflante et symptômes au niveau du nez avec IEI – AWSS ; souffle court et irritation de la gorge avec IEI – combinaison moisissure).

#### 2.9.4 DISCUSSION

Trois éléments suggèrent l'existence d'une relation entre la prévalence des symptômes et les conditions environnementales dans le bâtiment :

- la prévalence et les moisissures sont plus élevées dans les bâtiments endommagés que dans les bâtiments de référence ;
- la diminution des symptômes chez les occupants déplacés dans des locaux non endommagés suggère que leurs symptômes étaient liés à l'environnement intérieur ;
- le modèle statistique montre une relation exposition/réponse entre l'indice semi-quantitatif et les symptômes respiratoires.

L'utilisation d'une échelle continue d'exposition a permis de diminuer le biais dû au choix arbitraire du critère d'exposition dichotomique. Après pondération par la fraction de temps passé dans chaque pièce, les IEI sont des variables continues. Ainsi, les relations entre exposition et effets ont pu être étudiées.

Cependant, il existe au moins trois biais dans l'estimation de l'exposition des occupants :

- 1) l'exposition est sous-estimée si la rénovation a supprimé les traces d'eau visibles mais pas les réservoirs microbiens ;
- 2) l'indice d'exposition perd de sa fiabilité en cas de contradiction entre les hygiénistes ;
- 3) l'exposition des occupants dans les bâtiments de référence a pu être mal classifiée dans la mesure où l'exposition était considérée comme nulle dans les salles non investiguées.

Toutefois, l'avantage de cette approche basée sur l'observation est son efficacité comparativement aux méthodes de prélèvements d'échantillons traditionnelles. La grande variabilité spatiale et temporelle de la flore fongique nécessite un nombre important de prélèvements (approche longue et coûteuse) pour obtenir des mesures représentatives de l'exposition.

Ainsi, l'indice IEI semble être un outil efficace pour apprécier les expositions dans les bâtiments humides et les effets engendrés.

## **2.10 INDICE HUMIDITE**

Un indice empirique des dommages causés par l'humidité a été développé afin de réduire la subjectivité de l'évaluation de ces dommages dans les logements (Haverinen *et al.*, 2003). La base de données a été produite à partir d'un échantillon de 164 maisons, examinées par des ingénieurs et à partir de questionnaires portant sur la santé remplis par les occupants. Parmi ces 164 maisons, 114 maisons ont des problèmes d'humidité visibles et 50 n'ont pas de traces visibles d'humidité.

80% de l'échantillon ont été utilisés pour établir un indice en lien avec les symptômes respiratoires. Les 20% restant ont permis de vérifier le modèle final.

### **2.10.1 SYMPTOMES DES OCCUPANTS**

La santé respiratoire des occupants est caractérisée par une seule variable qui est la somme de l'occurrence, durant l'année précédant l'investigation :

- des infections respiratoires,
- des infections du système respiratoire inférieur,
- et des symptômes irritatifs<sup>9</sup>.

Il est reconnu que ces symptômes sont des indicateurs plus sûrs de l'excès de moisissures que les symptômes « généraux » (maux de tête, fatigue, difficulté de concentration, eczéma,...). Ces données sont recueillies par questionnaire avant le début des investigations.

### **2.10.2 EVALUATION DE L'ENVIRONNEMENT INTERIEUR**

Chaque zone endommagée est caractérisée par son étendue (m<sup>2</sup>) et par 4 autres variables :

- le type d'observation (moisissure visible, autres signes d'humidité, humidité élevée) ;
- sa durée (0-3 ans, 3-10 ans, > 10 ans) ;
- son emplacement (pièce principale, intérieur, extérieur) associé au temps passé par les occupants à proximité ;

---

<sup>9</sup> Dans cette étude, les symptômes et les infections retenus sont les suivants :

- Infections respiratoires : amygdalite, sinusite, otite, bronchite, pneumonie
- Symptômes respiratoires inférieurs : toux grasse ou sèche, toux nocturne, dyspnée, respiration sifflante
- Symptômes irritatifs : saignement du nez récurrent, rhinite, gorge endolorie, enrouement, toux, irritation des yeux.

- le type du support (bois, panneau, plâtre).

Un rang ( $V_i$ ) est attribué à chaque variable et chaque variable est divisée en trois catégories auxquelles sont associés des coefficients de corrélation ( $v_{ij}$ ).

### 2.10.3 INDICE

L'expression empirique utilisée pour estimer l'indice est la suivante :

$$I_{bld} = \frac{\sum_{n=0}^N \left[ A_n \left( \sum_{i=1}^4 V_{ik} v_{ij} \right) / \sum_{i=1}^4 V_i \right]}{A_{bld}} \times s$$

Avec :

bld = logement (building)

N = nombre total de dommages observés dans le logement

n = numéro du dommage

$A_n$  = surface estimée du dommage n ( $m^2$ )

$V_i$  = rang de la variable i,  $i=1, \dots, 4$

$v_{ij}$  = poids de la catégorie j,  $j=1, \dots, 3$  ;  $\sum v_{ij} = V_i$

S = facteur sans unité,  $s=200$

$A_{bld}$  = surface estimée du bâtiment ( $m^2$ ),  $A_{bld}=5 \times$  surface au sol ( $m^2$ )

Pour les logements de référence, l'indice est nul, puisque  $A_n$  est égal à zéro.

Les combinaisons possibles ont été simulées et les valeurs  $V_i$  et  $v_{ij}$  de la combinaison présentant la plus forte association entre l'indice et le score des symptômes a été retenue (**Tableau 6**).

Variables	$V_1$ Type d'observation			$V_2$ Durée			$V_3$ Localisation			$V_4$ Matériel endommagé		
	Rang	12			10			8			4	
Poids	$v_{11}$	$v_{12}$	$v_{13}$	$v_{21}$	$v_{22}$	$v_{23}$	$v_{31}$	$v_{32}$	$v_{33}$	$v_{41}$	$v_{42}$	$v_{43}$
		6	4	2	5	3,5	1,5	4	3	1	2	1,5

Catégorie	Moissure visible	Autres signes d'humidité	Humidité élevée	3-10 ans	0-3 ans	> 10 ans	Pièce principale	Autre zone intérieure	Extérieur	Bois de construction	Panneau	Plâtre,...
-----------	------------------	--------------------------	-----------------	----------	---------	----------	------------------	-----------------------	-----------	----------------------	---------	------------

**Tableau 6 : Rangs et poids des variables retenus pour le calcul de l'indice empirique d'humidité**

L'indice est fortement associé aux symptômes de santé. Il peut être utilisé comme indicateur d'exposition induite par l'humidité dans les logements.

Il constitue un outil pratique pour estimer quantitativement et plus objectivement, les éventuels problèmes de moisissures dans les logements et leurs effets sur la santé des occupants. Il peut également être utile pour l'entretien des bâtiments, la prise de décision et l'évaluation des risques.

## 2.11 EVALUATION DU CARACTERE IRRITANT DE L'AIR INTERIEUR

Cet indice quantifie le potentiel d'irritation sensorielle de l'air intérieur. Il a été construit en 2001 en France suite à des problèmes de santé (irritation des yeux, des voies respiratoires supérieures, maux de tête) apparus dans certaines écoles et supposés être attribuables à la présence de polluants irritants dans l'air tels que les aldéhydes, acides organiques, COV, SO<sub>2</sub> ou NH<sub>3</sub> (Mandin *et al.*, 2003, Meininghaus *et al.*, 2003).

Un polluant dont la concentration est inférieure à sa Valeur Toxicologique de Référence (VTR) est considéré comme ne présentant pas de risque pour la santé (pour une durée d'exposition donnée en accord avec la VTR utilisée). Les VTR utilisées dans l'élaboration de cet indice correspondent aux effets irritatifs probables liés à une exposition courte (ou aiguë) c'est-à-dire entre quelques minutes et plusieurs jours.

Quand elles existent, les valeurs guides internationales (OMS) de l'exposition aiguë sont choisies (formaldéhyde, SO<sub>2</sub>). Sinon, les valeurs guides proposées par le *Nordic Committee on Building Regulations* sont prises en compte (acide organique, propanal, butanal, hexanal, octanal, ammonium). Enfin, les VTR des polluants, pour lesquels aucune valeur guide nationale ou internationale n'est disponible, (acétaldéhyde, pentanal et heptanal) sont obtenues en divisant la valeur 0,03\*RD<sub>50</sub><sup>10</sup> par 10 (population sensible).

Le **Tableau 7** regroupe les valeurs guides (VTR) des polluants cibles.

Composé	Valeur guide (µg/m <sup>3</sup> )	
Formaldéhyde	100 (30 min)	OMS, 2000
SO <sub>2</sub>	500 (10 min)	
Acide formique	2000	Nordic

<sup>10</sup> RD<sub>50</sub> = concentration entraînant une diminution de 50% du taux respiratoire chez la souris. Il a été montré que des irritations légères apparaissent à 0,1 x RD<sub>50</sub>, et que les effets sont mineurs ou inexistant à 0,01 x RD<sub>50</sub>. En pratique, 0,03 x RD<sub>50</sub> est la valeur limite recommandée pour l'exposition professionnelle (Meininghaus *et al.*, 2003).

Acide acétique	2500	Committee on Building Regulations
Acide propionique	3000	
Acide butyrique	4000	
Propanal	4000	
Butanal	3000	
Hexanal	3000	
Octanal	4000	
NH <sub>3</sub>	4000	
Acétaldéhyde	20000	Tentative
Pentanal	12000	
Heptanal	12000	

**Tableau 7 :** Composés cibles et valeurs guides retenues pour estimer le caractère irritant de l'air

A l'intérieur, les personnes sont exposées à des mélanges de polluants. Les effets irritatifs des différents composés sont considérés comme étant additifs. Ainsi, les effets irritants de ce mélange peuvent être traduits par le paramètre S, somme des concentrations en polluants C<sub>i</sub> divisées par les VTR<sub>i</sub> correspondantes :

$$S = \sum_i \frac{C_i}{VTR_i}$$

Si S reste inférieur à 1, il est raisonnable de penser que les irritations ne sont pas dues à la présence de composés inclus dans le mélange étudié.

Cependant, plusieurs aspects limitant doivent être considérés :

- selon le type d'analyseur, les concentrations mesurées ne sont pas nécessairement représentatives de l'exposition de toutes les personnes à tout instant. Les pics de pollution peuvent échappés aux prélèvements ;
- les techniques de prélèvement et d'analyse ne permettent pas à l'heure actuelle de prélever, identifier et quantifier tous les composés irritants potentiellement présents dans l'air (en particulier, les composés réactifs sont peu détectés à l'intérieur car leur temps de vie est très court) ;
- une humidité relative réduite et un apport en air frais insuffisant peuvent également contribués à des symptômes irritatifs ;
- les facteurs psychologiques peuvent également jouer un rôle important selon le contexte.

## 2.12 SYNTHÈSE

La recherche bibliographique montre qu'il existe déjà un certain nombre d'indices pour la QAI :

- Etats-Unis pour les bureaux
- France pour les écoles et autres lieux (INERIS, LHVP, Ecoles des Mines d'Alès,...)
- Taiwan pour les logements (modélisation)

Les indices existant à l'heure actuelle associent les symptômes des occupants à la **qualité de l'air intérieur** mais également à l'**environnement intérieur** au sens large (polluants, confort thermique, luminosité, acoustique,...).

Les informations nécessaires à la construction de ces indices proviennent de **bases de données** existantes ou d'**échantillons** de logements et/ou bureaux. Dans ce cas, les indices sont construits à l'aide de **tests expérimentaux** pour les associer aux symptômes décrits. Les formules sont ensuite **validées** sur d'autres échantillons.

Les indices actuels concernent en majorité les bureaux et ne sont pas forcément transposables aux logements selon les auteurs.

Ces différents indices peuvent être classés en deux groupes :

- les indices nécessitant la **mesure des polluants** chimiques et microbiologiques, de la température ou du taux d'humidité ;
- et les indices calculés à partir d'**inspection visuelle** du bâtiment et basés sur des **variables descriptives**, c'est le cas des indices « purement » biologiques, cette approche pallie la difficulté des mesures microbiologiques.

Enfin, **aucun retour d'expérience** n'est disponible sur les différents indices de qualité d'air intérieur présentés. En effet, aucune publication ne fait état d'une utilisation postérieure de ces indices. Il est ainsi très difficile d'estimer la faisabilité des indices et surtout leur adéquation avec des besoins spécifiques.

## 3 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Cariou S. and Guillot J.M.** (Ecole des Mines d'Alès), Utilisation d'un indice global de la qualité de l'air intérieur pour suivre l'ensemble des COV présents et leur impact sur la santé humaine. *Air Pur*, 2005, n°69.
- Castanet S.**, *Contribution à l'étude de la ventilation et de la qualité de l'air intérieur des locaux*, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées (INSA), 1998
- Chiang C. M. and Lai C. M.** A study on the comprehensive indicator of indoor environment assessment for occupants' health in Taiwan. *Building and Environment*, April 2002, vol.37, n°4, pp.387-392
- Guerin M., Gosselin P., Cordier S., et al.**, *Environnement et Santé Publique: Fondements pratiques*. 2003, Edisem (Montréal), Tec&Doc (Paris): Montréal, Paris. p. 1023.
- Haverinen U., Vahteristo M., Pekkanen J., et al.** Formulation and validation of an empirical moisture damage index. *Environmental Modeling & Assessment*, December 2003, vol.8, n°4, pp.303-309

- Mandin C., Meininghaus R. and Cicolella A.** Use of sensory irritation potential index to characterize improvement of indoor air quality in French schools by ventilation. *Healthy Buildings*, 2003, pp.388-391
- Meininghaus R., Kouniali A., Mandin C., et al.** Risk assessment of sensory irritants in indoor air - a case study in a French school. *Environment International*, January 2003, vol.28, n°7, pp.553-557
- Moschandreas D. and Sofuoglu S. C.** The Indoor Air Pollution Index. *Indoor Air 99*, 1999, Edinburgh, Scotland, vol.2, pp.261-266
- Moschandreas D. J. and Sofuoglu S. C.** The indoor environmental index and its relationship with symptoms of office building occupants. *Journal of the Air & Waste Management Association*, November 2004, vol.54, n°11, pp.1440-1451
- Mosqueron L. and Nedellec V.,** *Inventaire des données françaises sur la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments*, 2001. Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur. 173p.
- Mosqueron L. and Nedellec V.,** *Inventaire des données françaises sur la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments : actualisation sur la période 2001-2004*, 2004. Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur. 61p.
- Park J. H., Schleiff P. L., Attfield M. D., et al.** Building-related respiratory symptoms can be predicted with semi-quantitative indices of exposure to dampness and mold. *Indoor Air*, November 2004, vol.14, n°6, pp.425-433
- Roulet C. A., Flourentzou F. and Greuter G.** Multicriteria Analysis Methodology of Health, IEQ and Energy Use for Sustainable Buildings. *Healthy Buildings*, 2003, Singapore, vol.3, pp.574-579
- Roulet C. A., Johner N., Oostra B., et al.** Multi-criteria analysis of health, comfort and energy-efficiency of buildings. *Indoor Air*, 2005, pp.1174-1178
- Sofuoglu S. C. and Moschandreas D. J.** The link between symptoms of office building occupants and in-office air pollution: the Indoor Air Pollution Index. *Indoor Air*, December 2003, vol.13, n°4, pp.332-343

## 4 ANNEXES

**Annexe 1 :**  
**Principaux résultats de l'étude BASE**

	<b>HCHO</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<b>COV</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<b>CO</b> $\text{mg}/\text{m}^3$	<b>CO<sub>2</sub></b> ppm	<b>PM<sub>10</sub></b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<b>PM<sub>2,5</sub></b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<b>Champi - gnons</b> ufc/m <sup>3</sup>	<b>Bactéries</b> ufc/m <sup>3</sup>	<b>Tempéra - ture</b> °C	<b>Humidité Relative</b> %
<b>Moyenne</b>	15,7	2168	0,136	573	12,6	8	62,9	46,1	20,7	44,9
<b>Médiane</b>	14,8	1613	0,001	528	11,7	6,9	42,3	39,1	21,2	46
<b>Ecart-type</b>	8,3	1664	0,34	127	6	3,8	68,3	26,1	2	15,8
<b>Minimum</b>	3,4	159	0	381	3,6	2,4	3,5	0	15,7	13,2
<b>Maximum</b>	43,6	9820	2,413	983	42,1	24,7	333,3	134,3	25,5	74,4
<b>Distribution</b>	W	LN	LN	G	LN	LN	LN	G	W	N
<b>Paramètres</b>	L = 2,68 Sc = 14,46 Sh = 1,59	$\mu = 2178$ $\sigma = 1793$	$\mu = 0,249$ $\sigma = 7,747$	L = 355 Sc = 78 Sh = 2,81	$\mu = 12,6$ $\sigma = 5,8$	$\mu = 7,98$ $\sigma = 3,87$	$\mu = 66,8$ $\sigma = 94,2$	L = 0 Sc = 19,1 Sh = 2,42	L = 11,2 Sc = 10,3 Sh = 5,39	$\mu = 44,9$ $\sigma = 15,8$
<b>5<sup>e</sup> percentile (C<sup>min</sup>)</b>	5	515	0,0001	411	5,5	3,4	6,9	10,2	17,5	19
<b>95<sup>e</sup> percentile (C<sup>max</sup>)</b>	32,2	5490	0,599	824	23,5	15,3	216	103,2	24,2	70,8

Note : G : distribution Gamma ; LN : distribution Log-normale ; N : distribution Normale ; W : distribution de Weibull

L : paramètre de position ; Sh : paramètre d'échelle ; Sc : paramètre de forme

**Annexe 2 :**  
**Valeurs à Risques Limités et Valeurs à Risques Importants de quelques composés**  
**(d'après Castanet, 1998)**

Polluant	VRL (mg/m <sup>3</sup> )	Durée (h)	VRI (mg/m <sup>3</sup> )	Durée (h)	Source	Année
CO <sub>2</sub>	9 000	8	12 000	24	EPA	1981
	4 940	24			ASHRAE	
	6 300	24			Canada	
	4 500	24			OMS	
	9 885	24			OMS	
	2 965	24			IEA	
	1 800	24			Japon	
CO	115	0,25	30	24	OMS	1987
	55	0,5			OMS	1987
	29	1			OMS	1987
	11,5	8			OMS	1987
	11	24			OMS	1987
	31	1			Canada	1986
	14	8			Canada	1986
	30	8			ASHRAE	1973
	10	8			ASHRAE/EPA	1989
	40	1			ASHRAE/EPA	1989
	17	24			US NAVY	
	1	24			URSS	
	NO <sub>2</sub>	0,19			24	0,31
0,30		1	OMS	1984		
0,12		24	OMS	1984		
0,08		24	OMS	1987		
0,21		1	OMS	1987		
0,40		1	NRCC	1984		
0,20		24	NRCC	1984		
0,48		1	NRCC	1986		
0,10		24	NRCC	1986		
0,10		24	EPA	1986		
0,10		24-365	EPA	1989		
0,47		1	Californie	1989		
0,15		24	Pays-Bas	1986		
0,04		24	Japon			
0,19		1	Suède			
0,10		24	Suède			
0,05		24-365	Suède			

<b>Polluant</b>	<b>VRL (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Durée (h)</b>	<b>VRI (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Durée (h)</b>	<b>Source</b>	<b>Année</b>
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,90	1	0,80	24	Canada	1981
	0,30	24			Canada	1981
	0,06	24-365			Canada	
	0,40	24			ASHRAE	1973
	0,365	24			ASHRAE	1981
	0,08	24-365			ASHRAE	
	0,125	24			OMS	1987
	0,05	24-365			OMS	

**Annexe 3 :**  
*Items relatifs au confort dans le cadre de l'estimation multi-critères*

Type de confort	Item	Niveau 1	Niveau 7
<b>Confort thermique</b>	Température	Confortable	Inconfortable
	Température *	Trop chaud	Trop froid
	Température	Constante	Variable dans la journée
	Mouvements d'air *	Trop calme	Trop de courants d'air
<b>Qualité de l'air</b>	Qualité de l'air *	Sec	Humide
	Qualité de l'air	Frais	Etouffant
	Qualité de l'air	Sans odeur	Avec odeurs
	Qualité de l'air	Satisfaisant	Non satisfaisant
<b>Luminosité</b>	Lumière naturelle	Satisfaisant	Non satisfaisant
	Luminosité naturelle		
	Lumière artificielle		
	Luminosité artificielle		
<b>Bruits</b>	Bruits provenant de l'extérieur	Satisfaisant	Non satisfaisant
	Bruits dus aux équipements		
	Autres bruits provenant de l'intérieur du bâtiment		
	Bruits (perception globale)		
<b>Confort global</b>	Vibrations dans le bâtiment	Satisfaisant	Non satisfaisant
	Confort global		

Note : les items marqués d'un astérisque sont évalués sur une échelle bipolaire, la meilleure note est 4, 1 et 7 n'étant pas satisfaisants.

## **CHAPITRE 3**

### **ANALYSE CRITIQUE DES INDICES EXISTANTS**

**Béatrice JÉDOR**

**Avec la collaboration des membres du Groupe de Travail « Indices »**

**CSTB  
Division Santé**

## 1 INTRODUCTION

Lors de la réunion du groupe de travail Indices du 22 Juin 2006, l'ensemble des indices présentés dans le chapitre précédent ont fait l'objet d'une analyse critique. Les points forts et les points faibles de chaque indice ont été dégagés lors de cette réunion et sont présentés dans ce chapitre.

## 2 ANALYSE CRITIQUE DES INDICES EXISTANTS

### 2.1 INDOOR AIR POLLUTION INDEX

$$I_{API} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K 10 \left[ 1 - \frac{C_{i,j,k}^{\max} - C_{i,j,k}^{obs}}{C_{i,j,k}^{\max} - C_{i,j,k}^{\min}} \left( \frac{C_{i,j,k}^{dmc} - C_{i,j,k}^{obs}}{C_{i,j,k}^{dmc}} \right) \right]$$

Cet indice est dépendant de l'échantillon de bureaux à partir duquel il a été construit car il intègre les concentrations maximales et minimales de l'échantillon ( $C_{\max}$  et  $C_{\min}$ ). Il a un sens pour les bureaux ayant participé à l'enquête mais peut-il être utilisé pour d'autres bureaux ?

L'I<sub>API</sub> est compris entre 0 et 1 mais sa variabilité est inconnue.

*Points faibles :*

- l'indice a été construit pour les bureaux et n'a pas été testé dans les logements ;
- l'étude d'un nouveau logement (ou bureau) nécessite un nombre élevé de mesures ;
- l'indice est dépendant de l'échantillon initial.

*Points forts :*

- quasiment tous les polluants utilisés dans le calcul de l'indice ont été mesurés pendant la campagne nationale logements de l'OQAI (hormis les champignons et bactéries). Cet indice pourrait éventuellement être utilisé pour classer les logements enquêtés les uns par rapport aux autres.

## 2.2 INDOOR DISCOMFORT INDEX

$$IDI = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L 10 \frac{|CA_{i,opt} - CA_{i,obs}|}{CA_{i,ucl} - CA_{i,lcl}}$$

L'indice ne se base que sur des paramètres de confort (température et humidité relative).  
Le choix des intervalles de confort (19 à 25°C et 35 à 55%) peut être discuté.

## 2.3 INDOOR ENVIRONMENTAL INDEX

$$IEI = \frac{IADI + IDI}{2}$$

*Points faibles :*

- l'absence de pondération, l'indice « confort » (IDI) et l'indice « polluants » (IADI) ont le même poids.

## 2.4 INDICE LHVP

$$IQ = \frac{CO}{5} + \frac{CO_2}{1000} + \frac{DTB}{1000}$$

*Points faibles :*

- le dénombrement total bactérien est très dépendant de l'heure de mesure ;
- CO, CO<sub>2</sub> et DTB sont additionnés sans pondération alors qu'ils ne représentent pas du tout la même chose ;
- problème dans la comparaison à la valeur 3 : si CO et DTB sont nuls alors le CO<sub>2</sub> peut atteindre 3000 ppm et IQ sera considéré comme bon puisque inférieur à 3.

*Points forts :*

L'utilisation de trois marqueurs de confinement peut être intéressante pour le suivi de l'efficacité d'une ventilation (professionnel de la ventilation).

## 2.5 INDICE « AEROPORT DE PARIS »

$$I_c = (2 \times I_{TH} + 3 \times I_{CO_2}) / 5$$

### *Points forts :*

- indice calculable rapidement
- évolution au cours de la journée permet de voir l'influence de l'occupation, de la ventilation, du ménage sur l'indice

### *Points faibles :*

- peu de campagnes de mesures à l'heure actuelle pour faire des comparaisons
- pas de différence entre l'été et l'hiver pour les seuils de température
- pas de validation scientifique
- choix arbitraire des seuils de  $PM_{10}$

### *Discussion :*

La comparaison de l'**indice Ip** avec et sans la mesure de  $NO_2$  n'est pour l'instant pas possible du fait du faible nombre de campagne de mesures. Dans le cas des bureaux, le  $NO_2$  constitue un traceur de la pollution extérieure car il n'y a pas de source intérieure (gazinière,...) et car  $NO_2$  entre relativement bien dans les bâtiments.

La concentration en **CO** dans l'air extérieur varie entre 0 et 0,5 ppm. Compte tenu du fait qu'il n'y a pas de source spécifique de CO dans les bureaux, le CO détecté dans les bureaux est apporté par l'air extérieur. Une concentration intérieure en CO de 3 à 4 ppm montre que la prise d'air extérieure est mal placée (proche d'aires de stationnement par exemple).

Il n'existe pas de valeur de référence pour les **PM<sub>10</sub>** sur 1 heure.

Les sous-indices permettent d'identifier la source du problème de qualité de l'air éventuel tandis que l'indice global permet de communiquer sur la qualité de l'air intérieur. Toutefois, l'interprétation est toujours plus facile à partir des mesures en continu.

Le retour d'expérience d'ADP sur la mise en œuvre de cet indice montre que les **prescriptions et les conseils** sont vivement attendus par les employés pour améliorer la qualité de l'air intérieur.

## 2.6 INDICE CLIM 2000

$$I_{CLIM} = \frac{1}{4} \left( \frac{CO_2}{4500} + \frac{CO}{30} + \frac{NO_2}{0,4} + \frac{HCHO}{0,06} \right)$$

### *Points faibles :*

- problème d'additivité

L'utilisation de cet indice peut être intéressante pour le suivi de l'efficacité d'une ventilation (professionnel de la ventilation).

## 2.7 INDICE IAQ ET INDICE BILGA

$$IAQ(P, T) = \frac{E_{moy}^P - VRL_T^P}{VRI_T^P - VRL_T^P}$$

VRL : Valeur à Risques Limités, pour des expositions inférieures à cette valeur, les risques sanitaires sont limités voire nuls

VRI : Valeur à Risques Importants, pour des expositions supérieures à cette valeur, les risques sanitaires sont prouvés et se traduisent généralement par des lésions graves irréversibles, des maladies chroniques, voire le décès.

## 2.8 INDICE GAPI

$$GAPI = \sum W_i C_i$$

avec

$$W_i = \sqrt[n]{\prod X_{ij}}$$

Les concentrations mesurées ne sont pas comparées à des valeurs de référence. Quelle unité doit être utilisée ?

La détermination du Xi basée sur le pouvoir cancérigène (CIRC) et les phrases de risques de l'INRS peut être intéressante.

## 2.9 INDOOR ENVIRONMENT INDEX

$$IEI(AHP) = \sum S_x W_x$$

$$IEI = 0,29 S_{QAI} + 0,208 S_{therm} + 0,203 S_{acoust} + 0,164 S_{lum} + 0,135 S_{CEM}$$

*Points faibles :*

- trop de catégories : QAI, confort thermique, acoustique, luminosité, CEM ;
- trop de paramètres : un paramètre mauvais peut être masqué par les autres paramètres et l'indice paraître bon ;
- seuils de coupure pour  $S_x$  sont définis de façon arbitraire.

## 2.10 CARACTERE IRRITANT DE L'AIR (INERIS)

$$S = \sum_i \frac{C_i}{VTR_i}$$

Cet indice est calculé *a posteriori* quand des problèmes de santé ont été décelés chez les enfants. Il correspond à une évaluation des risques sanitaires. Seuls les risques aigus et l'aspect irritant des polluants sont pris en compte.

Si S est supérieur à 1, il peut y avoir des risques sanitaires, mais dans ce cas aucune démarche n'est proposée pour supprimer ce risque.

## 2.11 SYNTHESE DE L'ANALYSE CRITIQUE

Il ressort des discussions 4 points essentiels concernant :

- la construction de l'indice et le calcul de l'indice,
- la pondération des polluants les uns par rapport aux autres,
- les valeurs de référence utilisées,
- l'utilisation de l'indice

### **Construction et calcul des indices :**

Basé le plus souvent sur la **mesure de polluants** et/ou de **paramètres de confort** plus ou moins nombreux selon les indices, le problème du coût d'utilisation des indices est rarement évoqué dans les publications.

Pour certains indices, la formule de l'indice est **dépendante de l'échantillon** à partir duquel elle a été élaborée lorsque les concentrations mesurées sont comparées aux concentrations min et max de cet échantillon. L'utilisation de tels indices pour un bâtiment ne faisant pas partie de l'échantillon de départ est difficile à envisager.

### **Pondération des paramètres de l'indice :**

Plusieurs options sont prises pour prendre en compte simultanément des paramètres hétérogènes en termes d'impact :

- les polluants et les paramètres de confort sont pris en compte avec le même poids dans le calcul de l'indice ; les effets du polluant sur la santé sont rarement pris en compte
- certains coefficients d'impact sont calculés à partir du pouvoir cancérigène de la substance (classe du CIRC) et du nombre de phrases de risque des fiches de l'INRS
- les coefficients de pondération sont parfois déterminés statistiquement.

**Valeurs de référence :**

Les valeurs de référence auxquelles sont comparées les mesures effectuées sont très variées :

- intervalles de confort fixes pour la température et l'humidité. Or ce critère de confort varie d'une zone géographique à l'autre, d'une saison à l'autre
- valeurs de toxicologie de référence (VTR), lorsqu'elles existent
- seuil de perception de la fumée de tabac pour le CO (5 ppm de CO)
- seuil de confinement pour le CO<sub>2</sub> (1000 ppm de CO<sub>2</sub>)
- Valeurs à Risques Limités
- seuils déterminés par les « auteurs » de l'indice : valeurs différentes pour le même polluant selon les indices considérés

• **Définition de l'indice :**

- placement sur une échelle (de 0 – bonne QAI à 1 – mauvaise QAI par exemple)
- comparaison à une valeur
- comparaison par rapport à un échantillon qui a permis de construire l'indice

Aucune information n'est disponible sur l'utilisation de ces indices et leur appropriation par les utilisateurs, aucun retour d'expérience n'étant documenté.

## **CONCLUSION GENERALE**

Les indices visés ont pour objectif de suivre la qualité de l'air intérieur du logement dans le temps (pour connaître l'influence de travaux d'amélioration par exemple) mais aussi de classer les logements d'un parc immobilier entre eux ou éventuellement par rapport à un référentiel (qui sera à définir). Destinés en premier lieu aux gestionnaires de parc immobilier, ces indices devront être simples à mettre en œuvre et peu coûteux.

Un groupe de travail a été mis en place pour élaborer de tels indices. Ses réflexions ont d'abord porté sur **l'état de l'art des indices existants** réalisé par l'INERIS et complété par le CSTB dans le cadre de ce présent travail. Cette bibliographie montre que les indices associent symptômes et qualité de l'air intérieur mais aussi qualité de l'environnement intérieur (polluants, confort thermique, luminosité...). Ils concernent majoritairement les bureaux et ne sont pas forcément transposables aux logements. Deux catégories d'indices se dégagent : les indices nécessitant la mesure de polluants (chimiques, microbiologiques) et de paramètres de confort (température, humidité relative...) et ceux calculés à partir d'inspections visuelles du bâtiment (variables descriptives). L'absence de retour d'expérience sur l'utilisation de ces indices est cependant à déplorer, aucune information sur la faisabilité et surtout l'appropriation de ces indices par les acteurs du bâtiment n'étant disponible. Ces indices sont généralement basés sur la comparaison avec des valeurs cibles (différentes en fonction des indices, aucune valeur guide réglementaire n'étant disponible sur l'air intérieur), les formules proposées ne sont pas toujours cohérentes : problème d'unité de mesure, addition de paramètres de qualité d'air non homogènes notamment en terme d'effet sanitaire, etc.

Il est intéressant de préciser que la question de **la pertinence de l'élaboration de tels indices** ne fait pas consensus à ce jour dans la communauté scientifique. La complexité, le nombre de paramètres de la QAI et le manque de connaissances scientifiques rendent difficile, voire impossible, une approche uniquement basée sur des indices et des valeurs de référence. Pour cette raison, ces indices ne pourraient être mis en œuvre que de manière spécifique pour des catégories particulières de bâtiments ou de populations. Enfin un premier échange avec un gestionnaire de patrimoine qui a développé et mis en œuvre un indice de qualité d'air intérieur pour la gestion des plaintes montre que son attente n'est pas principalement focalisée sur les indices de qualité d'air en tant que tels mais bien plutôt sur des outils de diagnostics et de prescriptions.

Les pistes d'élaboration d'indices de qualité d'air ont été discutées. Pour éviter les mesures et analyses de polluants longues à mettre en œuvre et coûteuses, l'indice « idéal » serait un indice basé sur le seul remplissage d'un questionnaire construit à partir des déterminants de la pollution intérieure. Un tel indice pourrait être développé sur la base des résultats de la campagne nationale logements de l'OQAI qui offre des données intéressantes pour la recherche des déterminants de la qualité de l'air intérieur. Par ailleurs une réflexion sur la qualification du renouvellement d'air dans les logements, pouvant être utilisée pour partie dans la construction d'un indice de qualité d'air, a été menée.

Suite à ces premiers travaux, il apparaît essentiel de mieux définir les attentes des utilisateurs potentiels d'indices de qualité d'air intérieur. **L'interview d'un panel d'acteurs** (gestionnaires ou usagers des bâtiments) susceptibles d'utiliser les indices de qualité d'air intérieur sera effectuée début 2007 afin de définir un cahier des charges qui permettra de répondre aux questions posées et estimer les contraintes liées à la mise en place de tels indices.