



**EHESP**



---

**Ingénieur du Génie Sanitaire**

Promotion : **2011-2012**

Date du jury : **Octobre 2012**

---

**Prise en compte de thématiques émergentes  
pour la campagne nationale «bureaux» de  
l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur :**

**Pertinence de la mesure des composés organiques semi-volatils &  
Evaluation de l'influence de l'environnement intérieur sur la  
performance des travailleurs**

---

**Héloïse YVERNEAU**

**Lieu de stage : CSTB Champs-sur-Marne (77)**

**Référent professionnel : Corinne MANDIN**

**Référent pédagogique : Olivier BLANCHARD**

---

## Remerciements

---

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement Séverine Kirchner, coordinatrice scientifique de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) pour m'avoir donné l'opportunité d'effectuer ce stage au sein du département Energie Santé Environnement (ESE) du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) pendant ces quatre mois.

Mes remerciements vont ensuite à Corinne Mandin qui, en tant que référente professionnelle, a su m'accorder toute l'écoute nécessaire et m'apporter en retour ses remarques pertinentes pour mener à bien ce mémoire.

Je voudrais remercier l'ensemble de l'équipe du département ESE pour leurs conseils techniques notamment Claire Dassonville, Brice Berthelot, Rukshala Anton et Rachid Ouaret.

J'ai également une pensée pour l'ensemble des stagiaires et thésards avec qui j'ai partagé amitié et complicité au sein de cet organisme pendant le déroulement de mon mémoire.

---

# Sommaire

---

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Partie 1 : Pertinence de la mesure des COSV lors de la campagne nationale de l'OQAI dans les bureaux .....</b>	<b>5</b>
1 Introduction.....	5
1.1 Présentation des COSV.....	5
1.2 Sources envisageables dans les bureaux.....	7
1.3 Voies d'exposition.....	7
2 Méthode.....	8
3 Concentrations en COSV dans les bureaux issues de la littérature.....	8
3.1 Phtalates.....	8
3.2 HAP et PCB.....	9
3.3 PBDE et HBCD.....	9
3.4 Retardateurs de flamme alternatifs : NBFR et OPFR.....	10
3.5 PFC.....	11
3.6 Bilan de la synthèse bibliographique.....	11
4 Calcul de doses d'exposition en COSV.....	12
4.1 Démarche.....	13
4.2 Résultats.....	16
4.3 Discussion.....	17
5 Conclusion.....	18
<b>Partie 2 : Evaluation de l'influence de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs lors de la campagne nationale de l'OQAI dans les bureaux .....</b>	<b>20</b>
1 Méthode.....	20
2 Etat de l'art .....	20
2.1 Méthodes d'évaluation de la performance.....	21
2.2 Liens entre différents paramètres de l'environnement intérieur et la performance.....	22
2.3 Analyses coûts-bénéfices relatives à une amélioration de la QEI .....	28
3 Analyse critique de la synthèse bibliographique.....	32
3.1 Restriction du confort thermique à la température.....	32
3.2 Prise en compte de l'effet combiné de différents paramètres environnementaux.....	34
3.3 Relations quantitatives entre certains paramètres de l'environnement intérieur et la performance .....	35

3.4	Absence de relations quantitatives pour tous les paramètres de l'environnement intérieur .....	37
3.5	Analyses coûts-bénéfices relatives à une amélioration de la QEI .....	37
4	Proposition de méthodes d'évaluation de l'impact de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs des bureaux .....	38
4.1	Méthode n°1 : Utilisation des relations quantitatives entre certains paramètres de l'environnement intérieur et la performance .....	38
4.2	Méthode n°2 : Mesures objectives de la performance.....	41
4.3	Validation de la méthode sélectionnée.....	42
4.4	Transposition au cas français des analyses coûts-bénéfices réalisées dans d'autres pays.....	44
5	Conclusion.....	45
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>47</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>49</b>
	<b>Liste des annexes .....</b>	<b>I</b>

---

## Liste des figures

---

Figure 1 : Structure des phtalates.....	6
Figure 2 : Structure du benzo(a)pyrène .....	6
Figure 3 : Structure des PCB.....	6
Figure 4 : Structure des PBDE .....	6
Figure 5 : Rapports supérieurs à deux entre la dose globale d'exposition aux COSV dans le bureau et celle dans le logement.....	17
Figure 6 : Pourcentage de variation de la performance par degré Celsius en fonction de la température intérieure (Seppänen <i>et al.</i> , 2006a) .....	24
Figure 7 : Performance normalisée en fonction de la température intérieure (Seppänen <i>et al.</i> , 2006a).....	24
Figure 8 : Pourcentage de variation de la performance par 10L/s/personne en fonction du taux d'apport d'air extérieur moyen (Seppänen <i>et al.</i> , 2006b).....	26
Figure 9 : Performance relative à un taux de 10 L/s/personne en fonction du taux d'apport d'air extérieur (Seppänen <i>et al.</i> , 2006b).....	26
Figure 10 : Performance relative en fonction de l'indice de vote moyen prévisible (Jensen <i>et al.</i> , 2009) .....	34
Figure 11 : Facteurs pouvant affecter la performance au travail, adapté de Clements-Croome (2000).....	42

---

## Liste des tableaux

---

Tableau 1 : Evaluation de l'exposition à différentes familles de COSV dans les environnements intérieurs (ng/kg/j).....	16
Tableau 2 : Description de tests de performance pouvant être réalisés dans des bureaux...22	
Tableau 3 : Scénarii d'amélioration de la QEI et méthode développée, adapté de Fisk <i>et al.</i> (2011).....	29
Tableau 4 : Bénéfices ou pertes annuels estimés résultant d'une amélioration de la QEI dans les bureaux américains, adapté de Fisk <i>et al.</i> (2011).....	31
Tableau 5 : Indice de confort thermique PMV et échelle de sensation thermique .....	33

---

## Liste des sigles utilisés

---

<b>BBzP</b>	ButylBenzylPhthalate
<b>BET</b>	Budget Espace Temps
<b>BTBPE</b>	1,2-Bis(TriBromoPhenoxy)Ethane
<b>CI</b>	Concentration Inhalée
<b>CNB</b>	Campagne Nationale Bureaux
<b>CNL</b>	Campagne Nationale Logements
<b>COSV</b>	Composés Organiques Semi-Volatils
<b>COV</b>	Composés Organiques Volatils
<b>CSTB</b>	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
<b>DBDPE</b>	DecaBromoDiPhenylEthane
<b>DBP</b>	DiButylPhthalate
<b>DEHP</b>	Di(2-EthylHexyl)Phthalate
<b>DEP</b>	DiEthylPhthalate
<b>DiBP</b>	Di(iso-Butyl)Phthalate
<b>DJE</b>	Dose Journalière d'Exposition
<b>DMP</b>	DiMethylPhthalate
<b>DPEHP</b>	DiPhenyl-EthylHexylPhosphate
<b>ESE</b>	Energie Santé Environnement
<b>EtFOSA</b>	N-EthylperFluoro-1-OctaneSulfonAmide
<b>EtFOSE</b>	2-(N-EthylperFluoro-1-OctaneSulfonamido)-Ethanol
<b>FOSA</b>	FluoroOctaneSulfonAmide
<b>FOSE</b>	FluoroOctaneSulfamidoEthanol
<b>FT</b>	FluoroTéломères
<b>HAP</b>	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
<b>HBCD</b>	HexaBromoCyclodoDécane
<b>INSEE</b>	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
<b>InVS</b>	Institut national de Veille Sanitaire
<b>IUPAC</b>	International Union of Pure and Applied Chemistry
<b>MeFOSA</b>	N-MethylperFluoro-1-OctaneSulfonAmide
<b>MeFOSE</b>	2-(N-MethylperFluoro-1-Octane Sulfonamido)-Ethanol
<b>NBFR</b>	Nouveaux Retardateurs de Flamme Bromés
<b>OPFR</b>	Retardateurs de Flamme OrganoPhosphorés
<b>OQAI</b>	Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur

<b>PBDE</b>	DiphénylEthers PolyBromés
<b>PCB</b>	PolyChloroBiphényles
<b>PFBA</b>	PerFluoroButanoate
<b>PFBS</b>	PerFluoroButane Sulfonate
<b>PFC</b>	Per- ou -PolyFluoroCarbones
<b>PFDA</b>	PerFluoroDecanoate
<b>PFDoDA</b>	PerFluoroDodecanoate
<b>PFDS</b>	PerFluoroDecane Sulfonate
<b>PFHpA</b>	PerFluoroHeptanoate
<b>PFHpS</b>	PerFluoroHeptane Sulfonate
<b>PFHxA</b>	PerFluoroHexanoate
<b>PFHxS</b>	PerFluoro-1-Hexane Sulfonate
<b>PFNA</b>	PerFluoroNonanoate
<b>PFNS</b>	PerFluoroNonane Sulfonate
<b>PFOA</b>	PerFluoroOctanoate
<b>PFOS</b>	PerFluoroOctane Sulfonate
<b>PFPA</b>	PerFluoroPentanoate
<b>PFPS</b>	PerFluoroPentane Sulfonate
<b>PFCA</b>	Carboxylates PerFluoroAlkylés
<b>PFSA</b>	Sulfonates PerFluoroAlkylés
<b>PFUnDA</b>	PerFluoroUndecanoate
<b>PMV</b>	Predicted Mean Vote
<b>POP</b>	Polluants Organiques Persistants
<b>QAI</b>	Qualité de l'Air Intérieur
<b>QEI</b>	Qualité de l'Environnement Intérieur
<b>SBM</b>	Syndrome des Bâtiments Malsains
<b>SBS</b>	Sick Building Syndrome
<b>STI</b>	Speech Transmission Index
<b>TBB</b>	2-ethylhexyl-2,3,4,5-TetraBromoBenzoate
<b>TBBPA-DBPE</b>	TetraBromoBisPhenolA-bis(2,3-DiBromoPropylEther)
<b>TBEP</b>	Tri(2-ButoxyEthyl)Phosphate
<b>TBP</b>	TriButylPhosphate
<b>TBPH</b>	bis(2-ethylhexyl)TetraBromoPhthalate
<b>TCEP</b>	Tris(2-ChloroEthyl)Phosphate
<b>TCiPP</b>	Tris(2-Chloro-iso-Propyl)Phosphate
<b>TDCPP</b>	Tris(1,3-DiChloro-2-Propyl)Phosphate

<b>TEHP</b>	Tri(2-EthylHexyl)Phosphate
<b>TEP</b>	TriEthylPhosphate
<b>TiBP</b>	TriisoButylPhosphate
<b>TPP</b>	TriPhenylPhosphate
<b>TToP</b>	TriTolylPhosphate
<b>US EPA</b>	US Environmental Protection Agency

## Introduction générale

A l'heure où les bâtiments évoluent avec de nouveaux objectifs de construction durable, la Qualité de l'Air Intérieur (QAI) est devenue un enjeu sanitaire, environnemental et économique majeur. Afin de fournir les éléments nécessaires à l'élaboration des politiques publiques permettant de prévenir et limiter les risques liés à la pollution de l'air intérieur, l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) est, depuis 2001, l'organisme français de référence dans ce domaine. Il est chargé de collecter les données relatives aux polluants présents dans les atmosphères intérieures des différents lieux de vie (logements, écoles, bureaux, etc.). Après une Campagne Nationale Logements (CNL) de mesures menée en 2003-2005 dans les habitations, l'OQAI élargit son champ d'action et démarre, en 2012, une campagne nationale dans les immeubles de bureaux en France. Le but de la Campagne Nationale Bureaux (CNB) est de dresser un état du parc français des immeubles de bureaux en termes de QAI, ainsi que de confort perçu et santé de ses occupants.

Paradoxalement, considérant le temps passé par la population active dans les bureaux, il n'existe que très peu de données publiées sur la QAI de ces environnements en France (dans de nombreux immeubles, des données existent mais elles ne sont pas communiquées et restent confidentielles). Elles sont très parcellaires et/ou anciennes (avant les années 2000). De plus, les connaissances issues d'études menées dans d'autres pays suggèrent que, du fait des activités qui s'y tiennent, il existe une typologie de pollution intérieure propre à ces environnements. Par exemple, l'utilisation d'ordinateurs, d'imprimantes et de photocopieurs a pris une importance considérable sur les lieux de travail ; ces appareils émettent des polluants tels que les Composés Organiques Volatils (COV), l'ozone, ainsi que des particules fines et ultrafines. Par ailleurs, l'utilisation de produits d'entretien, fortement émetteurs de COV, est fréquente dans les espaces de bureaux. Enfin, les immeubles de bureaux sont souvent équipés de systèmes mécaniques de ventilation et de conditionnement d'air complexes qui peuvent parfois être défaillants. De plus, l'impossibilité d'ouvrir les fenêtres dans les immeubles de grande hauteur conditionne le renouvellement et la QAI au bon fonctionnement de ces systèmes.

Les bâtiments de bureaux sont des environnements d'intérêt en termes de santé publique puisque ce sont les seconds lieux de vie, après l'habitat, pour une part importante de la population active (Zeghnoun *et al.*, 2010). Une mauvaise QAI due à des contaminants physiques, chimiques ou biologiques dans les bureaux peut être responsable de

symptômes chez les occupants des immeubles en question. De plus, ces enjeux sanitaires sont d'autant plus préoccupants que ces symptômes peuvent toucher un grand nombre de personnes, travailleurs du secteur tertiaire. Les manifestations cliniques dues à la présence de polluants sont multiples et très variées : irritations, nausées, céphalées, pathologies respiratoires, neurologiques, cardio-vasculaires, etc. Le *Sick Building Syndrome* (SBS) ou Syndrome des Bâtiments Malsains (SBM), dont les origines sont plurifactorielles et les symptômes multiples, est la pathologie la plus étudiée. Ce syndrome pourrait concerner 30 % des bâtiments dans les pays industrialisés (Perdrix *et al.*, 2005). La mauvaise QAI est l'une des causes mises en avant pour expliquer le SBM.

En parallèle à ces effets sanitaires, la QAI dans les bureaux peut également avoir un fort impact sur la performance des travailleurs. C'est ainsi que de nombreuses études ont montré que la température, la ventilation, l'éclairage ou le bruit pouvaient avoir une influence sur la rapidité et/ou la facilité d'exécution de certaines tâches (Seppänen *et al.*, 2004; Hongisto, 2007; Lan *et al.*, 2010). Ainsi, dans un environnement pollué, il faut prendre en compte non seulement les jours d'arrêt maladie mais également les difficultés des employés de bureau à se concentrer ou à effectuer leurs tâches quotidiennes engendrées par une baisse de leurs performances neuromusculaires et cognitives (Tanabe *et al.*, 2007). Ces effets sanitaires et la baisse de performance entraînent des coûts financiers non négligeables pour les sociétés. De récentes études américaines ont cherché à traduire en termes monétaires la diminution de l'impact sanitaire et l'augmentation de performance liés à une meilleure Qualité de l'Environnement Intérieur<sup>1</sup> (QEI) dans les bureaux. Les bénéfices de la mise en place de scénarii qui améliorent la QEI sont estimés à 20 milliards de dollars (Fisk *et al.*, 2011; Fisk *et al.*, 2012).

Dans ce contexte, la campagne nationale engagée dans les immeubles de bureaux par l'OQAI va contribuer à apporter des connaissances utiles pour l'évaluation et la gestion des risques sanitaires dans ces espaces.

La CNB de l'OQAI dont les protocoles ont été définis en 2009 en concertation avec un groupe de travail rassemblant plus d'une vingtaine de spécialistes (de la métrologie, de la santé et des statistiques) se déroule en deux phases successives.

La première phase, s'étalant sur la période 2012-2013, s'effectue dans 300 immeubles tirés au sort en France métropolitaine. Elle est exécutée pendant une journée par trois techniciens enquêteurs formés préalablement. Cette phase, qui devrait débiter à

---

<sup>1</sup> L'environnement intérieur comprend, outre la QAI, les conditions thermique, d'éclairage et d'acoustique (Wargocki *et al.*, 2006).

l'automne 2012, comporte différents éléments :

- ✓ Un descriptif d'éléments techniques du bâtiment, de ses équipements et de son environnement renseigné par questionnaire par les techniciens enquêteurs ;
- ✓ Un descriptif de la perception du confort des occupants via un auto-questionnaire ;
- ✓ Des mesures<sup>2</sup> dans cinq bureaux ou au niveau des postes de travail dans le cas des espaces ouverts ;
- ✓ Un questionnaire relatif aux principales composantes du bâtiment jouant un rôle dans la performance énergétique complété par les techniciens enquêteurs.

La seconde phase s'effectuera dans un sous-échantillon de 50 immeubles en 2014. Des mesures approfondies<sup>3</sup> seront réalisées dans cinq bureaux (ou postes de travail) par immeuble, pendant une semaine complète. D'autre part, le confort thermique, l'acoustique et l'éclairage seront évalués.

Ce mémoire s'inscrit dans une étape de réflexion au sujet de cette seconde phase de la CNB de l'OQAI. En effet, les protocoles ont été établis il y a quelques années et il est nécessaire de les mettre à jour à la vue des problématiques actuelles liées à la QAI.

Deux axes principaux orientent les réflexions liées à la préparation de la seconde phase de la CNB.

Tout d'abord, il s'agira de déterminer si les Composés Organiques Semi-Volatils (COSV), agents dits émergents<sup>4</sup> sont des paramètres d'intérêt dans les environnements de bureaux. En effet, ces polluants suscitent de nos jours interrogations scientifiques et inquiétudes sociétales. Lors de la préparation de la seconde phase de la CNB en 2009, malgré des suspicions naissantes face à la possible présence de COSV dans les environnements de bureaux, il n'existait que peu d'études réalisées *in situ* permettant de juger de leurs niveaux de concentration dans ces espaces. Il n'avait donc pas été prévu de mesurer les COSV dans les bureaux. Dans le cas où les COSV s'avèreraient être des polluants pertinents, une attention particulière sera portée à fournir des éléments d'aide à la décision pour permettre de sélectionner les composés d'intérêt au sein de cette famille.

Ensuite, une réflexion sera menée afin d'appréhender l'impact de l'environnement

---

<sup>2</sup> Les paramètres mesurés sont : COV et aldéhydes, particules fines, température, humidité relative et concentrations en CO<sub>2</sub>.

<sup>3</sup> Les paramètres complémentaires envisagés sont : particules ultrafines ou nanoparticules, fibres minérales artificielles et d'amiante, ozone, allergènes d'animaux, contaminations fongique et bactérienne ainsi que les débits d'air neuf.

<sup>4</sup> Le terme *émergent* correspond à des polluants d'intérêt récent et non pas nouvellement présents dans l'environnement.

intérieur sur la performance des travailleurs dans les bureaux et d'identifier les données nécessaires à une évaluation de cet impact dans la campagne de l'OQAI. En effet, à ce jour, les protocoles de la CNB ne prévoient pas encore d'évaluer cette performance. De plus, il s'agira de déterminer si les travaux d'évaluations économiques, menés dans d'autres pays, relatifs à l'augmentation de performance qui découle d'une meilleure QEI peuvent être conduits en France.

Ce mémoire s'articulera en deux parties autour de ces thématiques indépendantes.

Dans une première partie, après avoir présenté les COSV et leurs sources possibles dans les bureaux, une synthèse bibliographique exposera les niveaux de concentrations en COSV relevés dans ces environnements. Ensuite, ces données de contamination seront discutées et traduites en doses d'exposition afin de pouvoir juger de la pertinence de leur mesure dans les bureaux.

Dans une seconde partie, une revue de la littérature exposera les méthodes d'évaluation de la performance dans les bureaux, avec notamment les liens entre différents paramètres de l'environnement intérieur et la performance des travailleurs. De plus, les études de valorisation en termes monétaires de l'augmentation de performance seront présentées. Après avoir discuté des limites des différents outils disponibles, une synthèse comprenant des éléments constitutifs d'une méthode d'évaluation de l'impact de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs sera proposée. Enfin, la transposition des évaluations économiques au cas français sera argumentée.

Il est important de noter qu'au démarrage de ce mémoire, il s'agissait de lister puis, éventuellement, de hiérarchiser l'ensemble des polluants émergents. Les données relatives au confort thermique, à l'acoustique et à l'éclairage devaient également être analysées pour améliorer les protocoles existants de la CNB<sup>5</sup>. Cependant, il a rapidement été observé que les seuls polluants émergents présents dans les bureaux disposant d'une littérature suffisante et non prévus dans les protocoles de la CNB étaient les COSV. En outre, il s'est avéré que le confort thermique était un phénomène complexe, pouvant être appréhendé par plusieurs approches. Il est alors paru difficile de proposer une description complète de ces méthodes, nécessaire à la compréhension des pistes d'amélioration proposées, sans aller au détriment de la présentation des résultats relatifs aux deux axes cités précédemment. Ainsi, bien que traitées pendant ce stage, il a été décidé de ne pas développer les notions de confort dans ce manuscrit pour se concentrer sur les deux thématiques précédentes.

---

<sup>5</sup> cf. Note de cadrage établie en Mai 2012.

# Partie 1 : Pertinence de la mesure des COSV lors de la campagne nationale de l'OQAI dans les bureaux

L'objectif de cette partie est de déterminer, en actualisant les connaissances, si les COSV, polluants émergents, sont présents dans les environnements de bureaux et s'il est judicieux de les mesurer dans cet environnement intérieur grâce à un calcul de doses d'exposition.

## 1 Introduction

### 1.1 Présentation des COSV

Les COV entrent dans la composition des carburants, mais également de nombreux produits courants comme les peintures, encres, colles, etc. Ces composés, qui présentent une volatilité élevée, peuvent s'évaporer lors du stockage, de la fabrication ou de l'utilisation de produits en contenant (Destailats *et al.*, 2008). Les COV sont généralement en concentrations plus élevées à l'intérieur des bâtiments qu'en extérieur (Edwards *et al.*, 2001). Les COSV sont des molécules ayant des points d'ébullition plus élevés que les COV et sont également présents dans les environnements intérieurs (Weschler, 2009). Les COSV les plus fréquemment rencontrés dans ces derniers sont :

→ Les **phtalates** appartenant à une famille de composés chimiques constitués d'un anneau benzénique et de deux groupements carboxylates formant une structure de type diester (Figure 1). L'exposition maternelle aux phtalates pourrait affecter le statut des hormones sexuelles stéroïdiennes du fœtus et du nouveau-né (Lin *et al.*, 2011). La présence accrue de ButylBenzylPhtalate (BBzP) ou de DiButylPhtalate (DBP) dans les poussières domestiques est associée à des cas d'allergie et à des troubles respiratoires chez les enfants (Hsu *et al.*, 2012) ;

→ Les **Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques** (HAP), substances organiques possédant deux ou plusieurs cycles benzéniques fusionnés. Ils appartiennent à la sous-famille des hydrocarbures aromatiques composée de plus d'une centaine de molécules. Le benzo(a)pyrène est considéré comme étant le plus toxique des HAP (Delgado-Saborit *et al.*, 2011) (Figure 2) ;

→ Les **PolyChloroBiphényles** (PCB), composés aromatiques chlorés avec une même structure générique qui contient un noyau diphényle avec jusqu'à cinq atomes de chlore sur ces noyaux (Figure 3). La présence de ces composés pourrait être liée au développement de leucémies chez l'enfant (Ward *et al.*, 2009). Ils sont désormais interdits d'utilisation (Mills *et al.*, 2007) ;

→ Les retardateurs de flamme bromés. Les plus rencontrés sont l'**HexaBromoCyclodoDécane** (HBCD) dont il existe trois isomères et les

**DiphénylEthers PolyBromés (PBDE).** La famille des PBDE, composés aromatiques bicycliques (Figure 4), comptent 209 congénères et sont vendus sous la forme de trois formulations différentes, *i.e.* des mélanges de Penta-, Octa- et Deca- BDE (Huang *et al.*, 2010). Ces retardateurs de flamme bromés sont ubiquitaires dans l'environnement et considérés comme étant bioaccumulables (Ali *et al.*, 2012). Ces propriétés ont conduit à l'interdiction des mélanges de Penta- et d'Octa-BDE dans de nombreux pays, notamment en Europe. Ces substances ont également été listées dans la convention de Stockholm<sup>6</sup> sur les Polluants Organiques Persistants (POP). Depuis octobre 2011, les HBCD y sont également inscrits<sup>7</sup>. Ces nombreuses restrictions ont conduit au développement de **Nouveaux Retardateurs de Flamme Bromés (NBFR)** et de **Retardateurs de Flamme OrganoPhosphorés (OPFR)** ;

→Les **Per- ou Poly-FluoroCarbones (PFC)** représentant une grande catégorie de substances chimiques caractérisés par une chaîne carbonée partiellement ou totalement fluorée. Parmi ces PFC, il est possible de distinguer les composés ioniques tels les Sulfonates PerFluoroAlkylés (PFSA) et les Carboxylates PerFluoroAlkylés (PFCA) des composés neutres tels les alcools FluoroTélomères (FT), les SulfonAmides FluoroOctanes (FOSA) et les SulfonamidoEthanols FluoroOctanes (FOSE). Les composés ioniques présentent des propriétés toxiques et bioaccumulatives ; ainsi le PerFluoroOctane Sulfonate (PFOS), le PFSA le plus commercialisé, a récemment été inclus dans la liste des POP de la convention de Stockholm. De nombreux composés sont pourtant encore utilisés. Des concentrations élevées en PFOS dans le sérum seraient associées aux maladies liées à la thyroïde (Melzer *et al.*, 2010). Les composés neutres ne sont pas considérés comme persistants dans l'environnement car ils se dégradent facilement en PFSA et PFCA (Huber *et al.*, 2011).

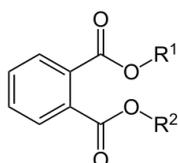


Figure 1 : Structure des phtalates

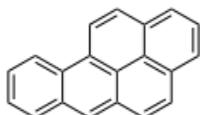


Figure 2 : Structure du benzo(a)pyrène

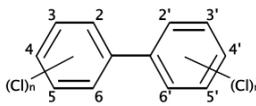


Figure 3 : Structure des PCB

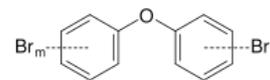


Figure 4 : Structure des PBDE

A des fins de classification, la nomenclature adoptée par l'*International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)* attribue à chaque PCB et PBDE un numéro entre 1 et 209 en fonction du degré de substitution par les atomes de chlore ou de brome et de la numérotation des atomes de carbones substitués (Mills Iii *et al.*, 2007). Cette

<sup>6</sup> La convention de Stockholm sur les POP est un accord international visant à interdire certains polluants. La convention a été signée le 22 mai 2001 dans la ville éponyme.

<sup>7</sup> <http://chm.pops.int/Home/tabid/2121/Default.aspx> (version du 03/08/2012).

numérotation sera celle retenue pour la présente étude<sup>8</sup>.

## 1.2 Sources envisageables dans les bureaux

Les phtalates, utilisés comme plastifiants, et les retardateurs de flamme, ajoutés pour diminuer les risques de propagation d'incendie dans les matériaux synthétiques, sont susceptibles d'être rencontrés dans les équipements de bureaux (ordinateurs, imprimantes, photocopieurs) mais également dans les tissus, le mobilier, *etc.* Les retardateurs de flamme contiennent des halogènes (principalement du brome) et lorsqu'il y a dégagement de chaleur, ces composés se dégradent très rapidement pour libérer des radicaux halogénés ainsi que des sous-produits comme des dioxines et des furanes (Wensing *et al.*, 2005).

Généralement, les HAP sont générés par voie pyrolytique lors d'une combustion incomplète de matière organique à haute température (éruption volcanique, incinérateurs...) ou par la voie pétrogénique ; les HAP sont alors des constituants du pétrole et du charbon. Une étude chinoise (Ren *et al.*, 2006) a cependant rapporté de fortes concentrations d'HAP associées à des particules de poussières récoltées dans des ordinateurs.

Les PCB ont été utilisés comme additifs (agents plastifiants et adhésifs), en particulier pour le revêtement de surface, les colles, *etc.*

Enfin, de par des propriétés physico-chimiques uniques, les PFC sont largement utilisés dans une grande variété d'applications industrielles qui incluent notamment le revêtement et le traitement des surfaces des équipements électroniques (Goosey *et al.*, 2011).

## 1.3 Voies d'exposition

Les COSV ont la particularité de pouvoir s'adsorber à des solides, en particulier sur de la poussière, et de se répartir entre la phase gazeuse et particulaire de l'air (Weschler *et al.*, 2010). Ainsi, dans l'environnement intérieur, les COSV se retrouvent dans deux compartiments : l'air et les poussières déposées au sol ou sur le mobilier. Ce partage peut affecter la distribution intérieure des COSV et influencer les voies par lesquelles les humains y sont exposés. Au bureau, l'exposition se fait donc par inhalation et par ingestion de poussières déposées (Julander *et al.*, 2005).

En outre, l'exposition peut également se faire par voie cutanée lors de la manipulation d'équipements de bureau contenant des COSV, notamment des PBDE (Besis *et al.*, 2012).

---

<sup>8</sup> Dans la suite et par souci de clarté, les abréviations utilisées pour les composés issus des familles présentées ne seront pas explicitées systématiquement dans le texte mais leur signification figure dans la liste des sigles en début de mémoire.

## 2 Méthode

Dans un premier temps, les concentrations en COSV relevées récemment dans les environnements de bureaux (hors bureaux sur des sites industriels) sont exposées et analysées. A cet effet, un travail de recherche<sup>9</sup> et de synthèse a été réalisé. Le recueil de la bibliographie s'est voulu le plus exhaustif possible, sans toutefois pouvoir l'être, par la compilation d'articles scientifiques sur les moteurs de recherche PubMed et Science Direct mais également par la lecture de littérature grise via Google. Cette dernière comprend, par exemple, des éléments de congrès ciblés sur la QAI, des thèses ou encore des rapports d'étude. La recherche s'est limitée aux articles publiés depuis 2009 afin de mener à bien ce travail dans le temps imparti. La formulation des additifs de type phtalates ou PBDE variant souvent entre les pays et dans le temps à cause de la variabilité des utilisations et des législations (Destailats *et al.*, 2008; Basis *et al.*, 2012), le lieu et la date des prélèvements ont été systématiquement relevés. Le recueil des valeurs médianes a été privilégié et, lorsque celles-ci n'étaient pas disponibles, les valeurs moyennes ont été retenues. Des tableaux synthétiques de ces études sont présentés en Annexe 1.

Dans un second temps, la méthode utilisée pour le calcul des doses d'exposition à partir de données de concentration sera développée en détail dans un paragraphe dédié (paragraphe 4.1).

## 3 Concentrations en COSV dans les bureaux issues de la littérature

Les publications récentes relatives aux COSV dans les bureaux sont nombreuses, notamment en Amérique du Nord et en Europe. Dans le cadre de ce mémoire, plus de 35 publications scientifiques ont été collectées. Seules 20 ont été synthétisées et analysées car les autres traitaient de thématiques non pertinentes pour la présente étude comme la métrologie, les sources d'émission, *etc.* Les résultats sont présentés dans les parties suivantes en fonction des différentes familles de COSV exposées dans le paragraphe 1.1 et pour les deux compartiments concernés (l'air et les poussières). Les concentrations correspondent à la somme de la phase gazeuse et particulaire de l'air, sauf indication contraire.

### 3.1 Phtalates

L'unique publication recensée qui traite de cette famille est une étude suédoise relatant les résultats de mesures de phtalates (DMP, DEP, DiBP, DBP, BzBP et DEHP) dans

---

<sup>9</sup> Ce travail de recherche s'appuie sur une revue de la littérature réalisée en 2012 par Melle Diana Chan, stagiaire de l'OQAI dans le cadre d'un Master 2 intitulé « COSV dans l'environnement intérieur - État des connaissances les plus récentes – Évaluation des risques sanitaires pour plusieurs substances émergentes – Contribution de l'exposition par voie cutanée ».

différents environnements intérieurs dont dix bureaux. Cette étude montre que les concentrations mesurées variaient plus au sein d'un même environnement que parmi les différents types de lieux étudiés (Bergh *et al.*, 2011). Récemment suspectés d'être toxiques pour la reproduction (Main *et al.*, 2006), le DEP et le DBP, respectivement de concentrations médianes 620 et 550 ng/m<sup>3</sup> pour une somme de 1500 ng/m<sup>3</sup> de tous les phtalates mesurés, sont les plus abondamment retrouvés dans l'air des bureaux. Concernant les poussières, ce sont les concentrations de DEHP qui sont les plus élevées (1100 µg/g pour une somme de 1300 µg/g de l'ensemble des composés mesurés).

### 3.2 HAP et PCB

Depuis 2009, ces composés ont été peu étudiés dans les bureaux : seules deux études concernent les HAP et une seule traite des PCB.

Une étude britannique présente les résultats de mesures de HAP dans l'air de différents environnements intérieurs dont des bureaux (Delgado-Saborit *et al.*, 2011). Le fluoranthène de concentration moyenne 0,42 ng/m<sup>3</sup> pour une somme de 1,5 ng/m<sup>3</sup> des seize composés mesurés est le HAP le plus abondamment retrouvé. Dans l'étude réalisée à Hong-Kong de Kang *et al.* (2010) des échantillons de poussières ont été relevés par aspirateur dans divers lieux intérieurs dont des bureaux. Les résultats ne sont pas exploitables car les concentrations rapportées en HAP sont moyennées sur l'ensemble des lieux échantillonnés qui comprennent également des écoles, des crèches, *etc.*

Parmi les cinq bureaux canadiens investigués par l'équipe de Zhang *et al.* (2011), la somme des concentrations des PCB analysés dans l'air est égale à 14 ng/m<sup>3</sup>. Le nombre d'immeubles correspondant n'est pas renseigné.

### 3.3 PBDE et HBCD

Parmi tous les COSV, les PBDE représentent la famille la plus étudiée dans les bureaux avec plus de dix publications relevées depuis 2009. Les concentrations en PBDE et les composés majoritaires rapportés dans la littérature peuvent être très variables entre les pays.

Pour l'air, les niveaux les plus élevés sont retrouvés dans des bureaux suédois avec 4020 pg/m<sup>3</sup> pour  $\sum_{10}$  PBDE<sup>10</sup> dont le 209 (Björklund *et al.*, 2012; Thuresson *et al.*, 2012). Le composé majoritaire est le congénère 209 (plus de 50 % en concentration) puis suivent les congénères 47 et 206. Des concentrations intermédiaires ont été mesurées dans des bureaux américains avec 3400 pg/m<sup>3</sup> pour  $\sum_{11}$  PBDE uniquement dans la phase

---

<sup>10</sup>«  $\sum_x$  PBDE » équivaut à « La somme de x PBDE mesurés » ; le détail des composés étant fourni dans le tableau synthétique en Annexe 1.

gazeuse de l'air (Batterman *et al.*, 2010) ainsi que dans des bureaux britanniques avec 1082 pg/m<sup>3</sup> pour  $\sum_5$  PBDE (Roosens *et al.*, 2010). Concernant l'étude de Batterman *et al.* (2010), les principaux composés détectés sont des penta-BDE (*i.e.* 71, 47, 99 et 100). Plus de 95 % de la formulation de penta-BDE serait utilisée en Amérique du Nord. Ceci est confirmé par les résultats d'une étude canadienne qui relève que les congénères 47 et 99 comptent pour 69 % des composés analysés (Zhang *et al.*, 2011). Les niveaux de concentration de cette étude canadienne sont plus faibles que les précédents (140 pg/m<sup>3</sup> pour  $\sum_{15}$  PBDE) et sont comparables à ceux d'une étude australienne qui relève des niveaux moyens de 173 pg/m<sup>3</sup> pour sept composés mesurés (Toms *et al.*, 2009).

Les tendances géographiques observées à propos des concentrations dans l'air des bureaux ne sont pas répétables en ce qui concerne les poussières. Ainsi, ce sont les dix bureaux examinés aux Etats-Unis par Batterman *et al.* (2010) qui présentent les concentrations les plus importantes (15800 ng/g pour  $\sum_{21}$  PBDE). De plus, les composés principaux sont le BDE 209, suivis des BDE 99 et 47 dont les proportions respectives sont de 44 %, 21 % et 10 %. Ces résultats présentent des concentrations plus élevées que ceux relevés par une autre étude américaine (9010 ng/g pour  $\sum_{15}$  PBDE) dont le congénère 209 est majoritaire à 46 % (Watkins *et al.*, 2011). Les niveaux rencontrés dans douze bureaux situés dans le sud de la Chine sont intermédiaires (3179 ng/g pour  $\sum_{10}$  PBDE) et varient entre 1737 et 4408 ng/g (Huang *et al.*, 2010). Le congénère 209 représente 99 % des composés mesurés. Des niveaux de concentrations similaires ont été observés entre la Suède et l'Australie avec 1200 ng/g pour  $\sum_{10}$  PBDE (Thuresson *et al.*, 2012) et 1268 ng/g pour  $\sum_8$  PBDE (Toms *et al.*, 2009). Le composé majoritaire est encore le congénère 209 à hauteur de 76 % et 70 % respectivement.

Les concentrations des trois isomères du HBCD ont été mesurées dans les poussières de 21 bureaux du sud de l'Angleterre (Abdallah *et al.*, 2009) avec des concentrations de l'ordre de quelques centaines de ng/g. Cette étude est la seule présentant ses résultats avec une distinction de ces isomères. Les deux autres études traitant du HBCD ne fournissent pas de résultats par isomère (D'Hollander *et al.*, 2010; Thuresson *et al.*, 2012).

### **3.4 Retardateurs de flamme alternatifs : NBFR et OPFR**

La seule étude récente recensée concernant les nouveaux retardateurs de flamme bromés est d'origine belge et concerne six bureaux (Ali *et al.*, 2011). Parmi les NBFR étudiés (BTBPE, DBDPE, TBB, TBPH et TBBPA-DBPE), c'est le DBDPE qui est retrouvé en plus grande quantité dans la poussière des bureaux, comptant en concentration pour plus de 50 % de la somme (égale à 1100 ng/g) des cinq composés mesurés.

L'étude suédoise (Bergh *et al.*, 2011) citée précédemment dans le paragraphe 3.1 est la seule publication récente relatant les résultats de mesures d'organophosphorés (TEP, 10 Héroïse YVERNEAU – Mémoire de l'Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique – 2012

TiBP, TBP, TCEP, TCiPP, TDCPP, TBEP, TPP, DPEPH, TEHP et TToP) dans des bureaux. Ce sont les OPFR à base de chlore (TCEP, TCiPP et TDCPP) qui sont les plus présents dans l'air, comptants en concentration pour 70 % de la somme (cette dernière étant égale à 160 ng/m<sup>3</sup>) des onze composés mesurés. Dans les poussières, le composé majoritaire est le TBEP (87 µg/g pour une somme de 140 µg/g de tous les composés mesurés).

### 3.5 PFC

Les PFC représentent la deuxième famille la plus étudiée parmi les COSV avec sept publications dans les bureaux depuis 2009.

Une étude américaine expose les résultats de mesures de PFC neutres (6:2 FTOH, 8:2 FTOH, 10:2 FTOH, EtFOSA, MeFOSA, EtFOSE et MeFOSE) dans l'air de trente environnements de bureaux (Fraser *et al.*, 2011). Ces composés ont été détectés dans plus de 90 % des bureaux analysés. Les concentrations dans l'air des fluorotélomères sont notablement plus importantes que celles des FOSA/FOSE (par exemple 9920 ng/m<sup>3</sup> pour le 8:2 FTOH comparé à 18 ng/m<sup>3</sup> pour le EtFOSE). L'étude de Huber *et al.* (2011) réalisée dans des bureaux norvégiens a abouti aux mêmes conclusions.

Dans cette étude, des PFC principalement ioniques (6:2 FTS, 8:2 FTS, PFBS, PFPS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, PFDS, PFBA, PFPA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA et PFDoDA) ont également été analysés dans les poussières de bureaux scandinaves. Tous ces composés ont été détectés dans la poussière des bureaux analysés. Le composé majoritaire est le PFDS (410 ng/g) suivi du 8:2 FTS (177 ng/g) puis du PFOS (148 ng/g). De plus, les concentrations des sulfonates sont supérieures à celles des carboxylates (601 ng/g comparée à 196 ng/g).

L'étude suédoise de Björklund *et al.* (2009) qui s'est intéressée uniquement aux PFOA et PFOS a relevé des concentrations du même ordre de grandeur (110 ng/g pour le PFOS). Ces deux composés sont également prédominants avec des concentrations respectives de 290 et 230 ng/g dans l'étude britannique de Goosey *et al.* (2011). Enfin, l'étude chinoise de Zhang *et al.* (2010) a confirmé cette tendance : le composé majoritaire détecté dans les poussières de bureaux est le PFOA avec une concentration de 390 ng/g. Toutefois, les concentrations mesurées dans des bureaux belges issues de l'étude d'Hollander *et al.* (2010) sont nettement inférieures. Parmi les composés analysés (PFOS, PFOA, PFNA, PFBS, PFBA, PFHxS, PFHxA et PFDA), la somme de ces molécules est de 10,1 ng/g et les composés majoritaires sont le PFOA et PFOS à hauteur de 2,9 et 2,2 ng/g respectivement.

### 3.6 Bilan de la synthèse bibliographique

Cette recherche bibliographique a permis de faire une synthèse de la littérature des concentrations mais également de la nature des COSV fréquemment rencontrés dans les

environnements de bureaux depuis 2009. Les COSV regroupent différentes familles chimiques de composés, la présente étude a permis de mettre en évidence plus de **130 composés** différents présents dans les bureaux.

Les concentrations peuvent être très **variables entre les pays** et aucune étude française récente<sup>11</sup> n'a été trouvée sur ce sujet ; ceci renforce la nécessité de mener une étude afin de renseigner le niveau de pollution des bureaux français pour les COSV.

De plus, dans le cadre d'une possible sélection parmi ces composés afin de réduire le nombre de composés à analyser, la présente étude a pu mettre en évidence, au sein de chaque famille chimique étudiée, le ou les **composé(s) majoritaire(s)**. Elle a également permis de renseigner dans **quel(s) compartiment(s)** chacun de ces composés pouvait se retrouver : air, poussières ou les deux. Par exemple, cette recherche bibliographique a ainsi pu souligner qu'aucune étude ne concernait les NBFR dans l'air des bureaux.

Les concentrations sont très **variables entre les composés** : elles s'échelonnent, dans les poussières, de 1,4 ng/g pour le PFUnDa à 1100 µg/g pour le DEHP et, dans l'air, de 1,3 pg/m<sup>3</sup> pour le BDE 28 à 620 ng/m<sup>3</sup> pour le DEP. Des tendances peuvent cependant être dégagées : les familles chimiques ayant les plus fortes concentrations, dans l'air et les poussières des bureaux, sont les **phtalates puis les OPFR**.

D'autre part, la présente étude a montré que toutes les classes de polluants ne suscitent pas le même intérêt au sein des équipes de recherche ; sur la vingtaine de publications étudiées, plus de la moitié concerne les PBDE.

Enfin, cette recherche a exposé le fait que certaines familles chimiques de composés n'ont jamais été étudiées dans les bureaux. Ainsi même si les sources d'émission habituelles des HAP (*i.e.* combustion) pouvaient laisser penser qu'ils seraient absents des bureaux, ils y ont toutefois été mis en évidence. Il est donc nécessaire de poursuivre les recherches concernant les niveaux de COSV dans les bureaux, notamment en ce qui concerne les muscs, les organochlorés et organoétains, les pesticides et plus particulièrement les pyréthriinoïdes, *etc.* En effet, même si ces composés sont, à ce jour, exclusivement retrouvés dans d'autres milieux intérieurs comme les logements (Bonvallot *et al.*, 2010), une veille bibliographique à leur sujet doit se poursuivre.

#### **4 Calcul de doses d'exposition en COSV**

Le paragraphe précédent a montré que de nombreux COSV étaient présents dans les environnements de bureaux. Cependant, même si la CNB a pour but de dresser un état du parc des bureaux français, la seule présence de ces composés ne justifie pas qu'il faille les mesurer. En effet les moyens sont limités et les actions doivent être priorisées,

---

<sup>11</sup> Une publication française existe sur les PBDE mais que de par sa date de parution (Juillet 2012) elle n'a pu être exploitée dans le présent mémoire (Caroline Marchand *et al.*, 2012).

en particulier entre les différents environnements intérieurs.

La comparaison des concentrations en COSV entre les bureaux et les logements ne suffit pas car le temps passé quotidiennement dans les bureaux est moindre que celui des habitations (Zeghnoun *et al.*, 2010). Ces données doivent donc être traitées en termes d'exposition plutôt qu'en concentrations pour avoir une vue claire sur le sujet. Certes, quelques publications ont calculé des doses d'exposition (Abdallah *et al.*, 2009; Roosens *et al.*, 2010; Ali *et al.*, 2011) mais elles ne concernent que certaines familles chimiques et ces calculs ne sont pas uniformes (variabilité des facteurs humains d'exposition entre les différentes études). Les doses d'exposition ont donc été déterminées par calcul et comparées entre ces deux environnements.

Cette estimation sera un élément primordial permettant de juger de la pertinence de mesurer les COSV dans les bureaux lors de la seconde phase de la CNB.

#### 4.1 Démarche

L'objectif de cette partie est de réaliser une estimation des **doses d'exposition des adultes aux COSV via les milieux intérieurs** (uniquement logements et bureaux). Les adultes pris en compte dans cette étude sont les **adultes français actifs travaillant dans des bureaux**.

##### A) *Choix des composés*

Les COSV sélectionnés sont tous les composés issus de la recherche bibliographique présentée dans le paragraphe 3. Cette liste est non exhaustive mais représente les COSV fréquemment rencontrés dans les environnements de bureaux et ayant fait l'objet de publications depuis 2009.

##### B) *Budget Espace Temps*

Le Budget Espace Temps (BET) correspond à la connaissance des lieux extérieurs et intérieurs fréquentés au cours d'une journée et des durées du temps passées dans chacun d'entre eux. D'après l'objectif de la présente étude, le temps passé dans les lieux extérieurs n'est pas une donnée nécessaire.

Les données retenues pour l'évaluation du temps passé à l'intérieur du logement proviennent de l'étude réalisée par l'Institut national de Veille Sanitaire (InVS) (Zeghnoun *et al.*, 2010). Les données de ce rapport sont récentes (issues de la CNL réalisée par l'OQAI), proviennent d'un échantillon de 1380 individus et sont représentatives du parc de logements français. Ainsi, un actif passe en moyenne 15,2 heures par jour dans son logement. L'hypothèse a été faite que le temps passé dans les bureaux est de 7 heures par jour pour correspondre à un travail hebdomadaire de 35 heures. Les données relatives au BET sont synthétisées en Annexe 2.

### C) *Voies d'exposition*

L'exposition aux COSV se fait par la voie orale (**ingestion de poussières**), **respiratoire** et cutanée (cf. paragraphe 1.3). L'exposition par la voie alimentaire est exclue de la présente étude car son centre d'intérêt est l'exposition *via* les milieux intérieurs uniquement. A la date de rédaction du présent mémoire, peu d'études se sont intéressées à l'exposition aux COSV par la voie cutanée. De plus, les taux d'absorption des COSV par voie cutanée sont peu renseignés. La voie cutanée, peu prise en compte à ce jour et ne disposant pas de modèle d'évaluation des expositions consensuel, a été volontairement écartée de ce travail. Ainsi, l'exposition des adultes aux COSV par la voie cutanée est donc négligée.

### D) *Teneurs en COSV dans les différents milieux étudiés*

Les teneurs en COSV collectées pour les bureaux ont été synthétisées en Annexe 1. Lorsque plusieurs données étaient disponibles pour un même composé, le choix s'est fait selon les critères suivants :

- 1) Géographique (les études françaises sont choisies prioritairement puis européennes car *a priori* plus proches de la situation française, ensuite américaines et enfin, si les données manquent toujours, les études des autres pays comme celles d'origine asiatique par exemple) ;
- 2) Date de l'étude (le choix se porte sur l'étude la plus récente) ;
- 3) Puissance de l'étude (les études portant sur l'échantillon de bureaux le plus important seront préférées).

Les teneurs en COSV dans les bureaux sélectionnées pour le calcul de l'exposition sont indiquées en gras dans le tableau de l'Annexe 1.

Pour les teneurs en COSV dans les logements, un travail<sup>12</sup> de recherche et de synthèse a été réalisé selon la même méthode que celle des bureaux. Les teneurs sélectionnées pour le calcul de doses d'exposition l'ont été par les mêmes critères que ceux cités ci-dessus. Les valeurs retenues ainsi que leur référence sont présentées en Annexe 2.

### E) *Facteurs humains d'exposition*

La source de données françaises la plus récente pour le poids corporel est l'enquête décennale santé 2002-2003 de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE). Ces résultats sont disponibles dans l'article de Tanguy (2007).

---

<sup>12</sup> Ce travail s'appuie également sur une revue de la littérature réalisée en 2012 par Melle Diana Chan, stagiaire de l'OQAI dans le cadre d'un Master 2 intitulé « COSV dans l'environnement intérieur - État des connaissances les plus récentes – Évaluation des risques sanitaires pour plusieurs substances émergentes – Contribution de l'exposition par voie cutanée ».

Les données concernant l'ingestion de poussières et l'inhalation d'air quotidiennes proviennent de l'*US Environmental Protection Agency* (USEPA, 2011). En accord avec de précédentes études, l'hypothèse d'une absorption totale est admise pour l'ingestion de poussières (Jones-Otazo *et al.*, 2005; Ali *et al.*, 2011). Les données relatives aux facteurs humains d'exposition sont synthétisées en Annexe 3.

#### F) Calcul des doses d'exposition

Pour chaque milieu et COSV considéré, la Dose Journalière d'Exposition (DJE) par ingestion de poussières a été calculée selon l'équation suivante (Equation 1) :

$$DJE_{i,ing} = \frac{Q_{poussières} \times F_i \times C_i}{P}$$

Avec :

DJE<sub>i,ing</sub> : dose journalière d'exposition par voie orale de la substance dans le milieu i (ng/kg/j) ;

Q<sub>poussières</sub> : quantité de poussières ingérées par jour, tous milieux confondus (mg/j) ;

F<sub>i</sub> : fraction quotidienne de temps passé dans le milieu i (sans unité) ;

C<sub>i</sub> : concentration de la substance dans les poussières du milieu i (ng/g) ;

P : poids corporel (kg).

Pour chaque milieu et COSV considéré, la DJE par inhalation a été calculée comme suit (Equation 2) :

$$DJE_{i,inh} = \frac{Q_{air} \times F_i \times C_{air\ i}}{P}$$

Avec :

DJE<sub>i,inh</sub> : dose journalière d'exposition par inhalation de la substance dans le milieu i (ng/kg/j) ;

Q<sub>air</sub> : quantité d'air inhalé par jour, tous milieux confondus (m<sup>3</sup>/j) ;

F<sub>i</sub> : fraction quotidienne de temps passé dans le milieu i (sans unité) ;

C<sub>air i</sub> : concentration de la substance dans l'air du milieu i (ng/m<sup>3</sup>) ;

P : poids corporel (kg).

Une DJE dite **globale**, qui prend en compte la voie orale et l'inhalation, peut également être calculée de la manière suivante (Equation 3) :

$$DJE_{i,globale} = DJE_{i,ing} + DJE_{i,inh}$$

Avec :

DJE<sub>i,globale</sub> : dose journalière d'exposition globale de la substance dans le milieu i (ng/kg/j).

## G) Analyse statistique des résultats

Les données ont été analysées statistiquement par le logiciel R-2.15.1 pour Windows<sup>13</sup>. L'égalité des variances entre les DJE globales pour tous les COSV analysés des logements et des bureaux a été vérifiée à l'aide d'un test de Fischer. La comparaison des variances étant nécessaire afin de déterminer quel test statistique utiliser par la suite pour comparer les moyennes des doses d'exposition.

### 4.2 Résultats

Les DJE pour chaque voie d'exposition et les DJE globales calculées pour chaque COSV et chaque milieu d'exposition (logements et bureaux) sont présentées en Annexe 4. Le Tableau 1 fournit les doses d'exposition par ingestion de poussières et par inhalation pour les familles de COSV étudiées dans les environnements intérieurs.

**Tableau 1 : Evaluation de l'exposition à différentes familles de COSV dans les environnements intérieurs (ng/kg/j)**

	DJE <sub>bureau,</sub> ing	DJE <sub>bureau,</sub> inh	DJE <sub>bureau,</sub> globale	DJE <sub>logement,</sub> ing	DJE <sub>logement,</sub> inh	DJE <sub>logement,</sub> globale
Phtalates	172,64	66,30	<b>238,94</b>	158,65	106,07	<b>264,72</b>
HAP	-	0,10	<b>0,10</b>	2,23	0,36	<b>2,59</b>
PCB	-	0,37	<b>0,37</b>	0,01	0,44	<b>0,45</b>
PBDE	0,22	0,24	<b>0,46</b>	0,54	0,02	<b>0,56</b>
HBCD	0,19	-	<b>0,19</b>	0,14	-	<b>0,14</b>
NBFR	0,15	-	<b>0,15</b>	0,12	-	<b>0,12</b>
OPFR	18,86	7,09	<b>25,95</b>	12,52	6,21	<b>18,73</b>
PFC	0,26	0,29	<b>0,55</b>	0,42	2,30	<b>2,72</b>
<b>Moyenne<sup>14</sup></b>	<b>1,42</b>	<b>0,55</b>	<b>1,96</b>	<b>1,28</b>	<b>0,85</b>	<b>2,20</b>
<b>Total</b>	<b>192,32</b>	<b>74,39</b>	<b>266,71</b>	<b>174,63</b>	<b>115,41</b>	<b>290,04</b>

Un tiret (-) correspond à une dose d'exposition non calculée par manque de données.

Conformément aux observations précédentes établies sur les concentrations (paragraphe 3.6), le Tableau 1 montre que l'exposition globale aux COSV dans les bureaux pour un adulte français actif travaillant dans un bureau est principalement due aux **phtalates** et aux **OPFR**. De par les nombreuses restrictions sur les retardateurs de flamme « traditionnels », il est envisageable que les NBFR et les OPFR vont fortement augmenter dans les prochaines années, contribuant ainsi à accroître les doses d'exposition annoncées (Ali *et al.*, 2012). De plus, l'exposition aux 130 COSV considérés dans les bureaux provient majoritairement de **l'ingestion de poussières** (plus de 70 % de l'exposition globale).

D'autre part, même si le temps quotidien passé dans les bureaux est moins important que celui passé dans les logements, **la somme des DJE globales pour tous les COSV**

<sup>13</sup> <http://cran.r-project.org/bin/windows/base/> (version du 14/08/2012).

<sup>14</sup> La moyenne a été calculée sur l'ensemble des COSV analysés et non sur les familles présentées dans le Tableau 1.

analysés dans les bureaux est du même ordre de grandeur que celle des logements (266 et 290 ng/kg/j respectivement). Ainsi, quelle que soit la famille de COSV considérée, la DJE globale reçue pour un adulte actif travaillant **dans un bureau lors de ses sept heures de travail est quasi identique** à celle reçue **lors des quinze heures passées dans son logement**. Comme les données ont montré que leurs variances sont égales, le test de Student a été utilisé pour comparer les moyennes des doses d'exposition des COSV dans les bureaux et les logements. **La moyenne des DJE globales de tous les COSV analysés dans les logements n'est pas significativement plus élevée que celle des bureaux** ( $p > 0,05$ ).

Même si pour chaque famille de COSV considérée, les DJE globales dans un bureau et dans un logement sont quasi identiques, l'analyse des doses d'exposition par composé montre que, sur 130 molécules, 63 présentent une DJE globale dans les bureaux supérieure à celle des logements. La Figure 5 présente les COSV pour lesquels le rapport entre la DJE globale dans le bureau et celle dans le logement est supérieure à deux (limite fixée arbitrairement).

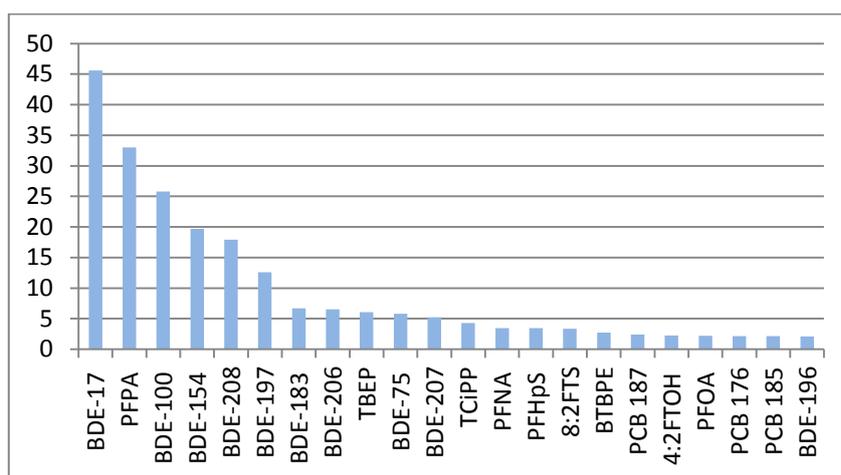


Figure 5 : Rapports supérieurs à deux entre la dose globale d'exposition aux COSV dans le bureau et celle dans le logement

Ainsi, pour 22 composés, la DJE globale dans les bureaux est deux fois plus importante que celle dans les logements. Pour certains composés, des **PBDE principalement, le milieu d'exposition majoritaire est le bureau et non le logement**.

### 4.3 Discussion

A travers le calcul des doses d'exposition, la présente étude a mis en évidence que l'exposition à un mélange de 130 COSV d'un adulte actif dans son bureau pouvait être équivalente à celle de ce même mélange dans son logement. Cependant, pour presque la moitié des COSV étudiés, la dose d'exposition au bureau est supérieure à celle du logement, jusqu'à 45 fois pour certains. Toutefois, un certain nombre d'incertitudes sont liées à ce calcul et peuvent contribuer à une sous- ou surestimation des conclusions

présentées.

Tout d'abord, les COSV choisis sont ceux ayant fait l'objet, depuis 2009, de publications dans des articles relatifs aux bureaux. Par conséquent, cette liste est non exhaustive. De plus, les composés considérés pour le calcul des doses d'exposition sont donc ceux présents dans les environnements de bureaux. Il est possible que d'autres COSV soient présents dans les logements et absents dans les bureaux. Ceci pourrait contribuer à augmenter la dose d'exposition à l'ensemble des composés appartenant à la famille des COSV dans les habitations.

Les doses d'exposition présentées dans le Tableau 1 ont été comparées entre les bureaux et les logements en faisant abstraction de la métrologie utilisée dans chacune des études de référence. Il aurait été intéressant de sélectionner des valeurs de concentration pour ces deux milieux intérieurs issues de méthodes de prélèvement et d'analyse semblables afin de s'affranchir des possibles biais liés à des métrologies différentes. Cependant, à cause de données limitées disponibles pour les logements, cette précaution n'a pu être suivie.

Les résultats présentés dans la Figure 5 sont issus, pour chaque composé, d'une seule publication et non d'une moyenne des résultats de la littérature. Or, la synthèse bibliographique a montré que les niveaux de concentration pouvaient être très variables entre les pays (*cf.* paragraphe 3.6). La cohérence des études entre elles étant discutable, la liste des composés dont la dose globale d'exposition des bureaux est plus de deux fois supérieure à celle des logements est donc à manier avec précaution.

Pour chaque substance évaluée, les données ne sont pas disponibles pour toutes les voies d'exposition considérées (*cf.* Tableau 1). La comparaison de l'exposition par ingestion par rapport à celle par inhalation pour toutes les familles de COSV n'est donc pas possible.

Enfin, la voie cutanée n'a pas été prise en compte dans cette étude. Il se pourrait cependant que cette voie contribue de façon non négligeable à l'exposition globale d'un mélange de COSV. De ce fait, l'évaluation de l'exposition globale au sens strict du terme est incomplète.

## **5 Conclusion**

La présente étude a permis de synthétiser les données récentes concernant la nature et les niveaux de concentration en COSV dans les bureaux relevés dans la littérature depuis 2009. Il en ressort que les COSV couvrent plusieurs familles chimiques, leur diversité dans les bureaux est importante (plus de 130 composés répertoriés) et leurs concentrations sont très variables entre les pays. De plus, même si le temps quotidien passé dans les bureaux est deux fois moins important que celui passé dans les

logements, la dose d'exposition à un mélange de COSV dans les bureaux est du même ordre de grandeur que celle relative à ce même mélange dans les logements. Ainsi, les COSV apparaissent comme étant des paramètres pertinents pour la seconde phase de la CNB. De nombreuses études concluent toutefois que la voie majoritaire d'exposition aux COSV serait la voie alimentaire (Besis *et al.*, 2012).

Par ailleurs, la présente étude a permis de dégager certaines pistes permettant de mieux définir les composés les plus pertinents à mesurer en fonction des objectifs souhaités pour la CNB. Afin de renseigner les concentrations des polluants majoritaires dans les bureaux, l'attention devrait se concentrer sur les phtalates et les OPFR. Au contraire, s'il s'agit de sélectionner les polluants pour lesquels l'exposition des bureaux est plus importante que celle des logements, les efforts devraient se porter notamment sur les PBDE où l'exposition à certains composés a été repérée comme étant prépondérante dans les bureaux. Enfin, si l'objet de la CNB est de balayer les différentes familles chimiques en présence, cette étude fournit les composés majoritaires pour chacune d'elles, permettant ainsi d'optimiser et de limiter les mesures.

Les composés analysés sont ceux pour lesquels l'existence a été observée dans la littérature scientifique relative aux bureaux. Or, il est important de garder à l'esprit que leur observation est directement liée à la métrologie associée. Si celle-ci est limitée (seuil de détection trop élevé, contraintes des prélèvements de poussières, *etc.*) ou inexistante, il est évident que des composés certes présents, ne peuvent être observés. Ainsi la métrologie est une limite importante à cette méthode de sélection.

D'autre part, même si le but de la CNB est de renseigner le niveau de pollution du parc de bureaux français, le fait que les COSV soient des composés particuliers, avec pour beaucoup des effets sans seuil, c'est-à-dire pour lesquels une seule exposition pourrait accroître le risque de développer des effets parfois irréversibles, ne doit pas être négligé (Besis *et al.*, 2012). Ainsi, dans les bureaux, l'exposition de femmes enceintes à certains composés comme les phtalates pourrait représenter un risque pour le développement du fœtus. Afin d'avoir une vue complète sur le sujet, il conviendrait de croiser ces données de concentrations avec la toxicité des composés. Dans cette optique, l'étude de Bonvallet *et al.* (2010) a, par exemple, établi un scoring sur un certain nombre de COSV en fonction de leur concentration dans la poussière de logements et de leur toxicité afin d'établir une liste de composés dits prioritaires.

## **Partie 2 : Evaluation de l'influence de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs lors de la campagne nationale de l'OQAI dans les bureaux**

L'objectif de cette partie est d'appréhender l'impact de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs dans les bureaux et d'identifier les données nécessaires à une évaluation de cet impact dans la CNB de l'OQAI. De plus, il s'agit de déterminer si les travaux d'évaluations économiques, menés dans d'autres pays, liés à l'augmentation de performance qui découlent d'une meilleure QEI peuvent être conduits en France.

### **1 Méthode**

Pour le présent travail, seul le terme de « **performance** » est utilisé et non celui de productivité. En effet, selon la définition de l'INSEE<sup>15</sup>, la productivité est définie comme le rapport, en volume, entre une production (donnée de sortie) et les facteurs de production ou ressources mis en œuvre pour l'obtenir (données d'entrée). La productivité peut aussi être calculée par rapport à un seul type de ressources, comme le travail ; il s'agit alors de productivité apparente du travail. Le travail peut être quantifié de plusieurs manières comme par exemple le nombre d'heures travaillées ou le nombre de personnes en emploi. La performance, au contraire, désigne la mesure de la quantité et/ou la qualité de la production d'un travailleur (Wargoeki *et al.*, 2006). Ces deux termes sont donc fortement liés : ainsi, en augmentant la performance, la contribution absolue du facteur de production du travail croît, et la productivité également.

Un travail de recherche et de synthèse a été réalisé afin d'exposer les méthodes d'évaluation de la performance, les liens entre les paramètres de l'environnement intérieur et la performance des travailleurs ainsi que les travaux économiques précédemment évoqués. Les diverses sources d'informations consultées sont : des articles scientifiques sur les moteurs de recherche Science Direct et PubMed, de la littérature grise *via* Google comme par exemple des éléments de congrès ciblés sur la QAI, des thèses ou des rapports d'étude. Les mots clés utilisés sont les suivants : « *productivity, performance, benefit-cost analysis, indoor environmental quality, air quality, offices* ». Afin de fournir une vision la plus complète possible, la recherche ne s'est pas limitée aux articles les plus récents.

### **2 Etat de l'art**

Les publications récentes relatives à la performance dans les bureaux sont nombreuses. Dans le cadre de ce mémoire, plus de 70 publications scientifiques ont été collectées. Par

---

<sup>15</sup> <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/productivite.htm> (version du 26/07/2012).

un effort de synthèse, seules sont 40 présentées et analysées dans ce mémoire. Les résultats sont présentés selon les points suivants : tout d'abord, les diverses approches d'évaluation de la performance dans les bureaux sont exposées ; puis les liens entre l'environnement intérieur et la performance sont abordés. Enfin, la méthode et les résultats des travaux économiques à propos d'une amélioration de la QEI dans les bureaux sont traités.

## 2.1 Méthodes d'évaluation de la performance

La performance peut être mesurée à partir d'enquêtes de terrain ou d'expériences en laboratoire. Il existe en pratique deux approches principales pour l'évaluation de la performance : l'approche objective et l'approche subjective (Jin *et al.*, 2012).

L'approche **objective** évalue des indicateurs de performance impartiaux (temps de réalisation, nombre d'erreurs, *etc.*) susceptibles d'être pertinents pour des tâches représentatives d'un travail de bureau tels que la dactylographie d'un texte, des calculs simples (addition, multiplication), le temps de traitement d'un appel de consommateur. Même si cette approche repose sur des données objectives et quantitatives, il est difficile de relier ces résultats aux conditions réelles de travail quotidiennes. En effet, une journée de travail est souvent composée de plusieurs tâches. De plus, il n'est pas simple de généraliser ces résultats à l'ensemble des employés de bureau dont la nature des travaux effectués peut être très variable d'un métier à l'autre.

Le Tableau 2 propose des exemples de tests de performance permettant d'évaluer différentes compétences. Ces tests sont régulièrement utilisés dans les études traitant des relations entre performance et environnement intérieur (Wargocki *et al.*, 1999; Lan *et al.*, 2011). Ceux-ci sont effectués sur ordinateur et peuvent être réalisés avec ou sans retour, c'est-à-dire que le participant ne peut continuer le test tant qu'il n'a pas corrigé ses mauvaises réponses. La durée de réalisation de ces tests ne dépasse généralement pas une heure. La vitesse (temps de réponse) et la justesse (pourcentage de bonnes réponses) sont enregistrées afin de pouvoir calculer un indice de performance (rapport du temps de réaction moyen sur la justesse des réponses).

Au contraire, l'approche **subjective** repose sur des auto-évaluations ; ainsi il est demandé aux occupants d'évaluer leur propre performance sur une échelle subjective (performance perçue). Par exemple, il peut être demandé aux participants de répondre aux questions suivantes sur une échelle en plusieurs points, de « pas du tout d'accord » à « tout à fait d'accord » :

- J'effectue efficacement mes tâches au travail ;
- Je pense que je suis productif au travail.

Cette approche ne dépend pas de la nature de la tâche effectuée mais la partialité des

sujets peut affaiblir la valeur des résultats.

**Tableau 2 : Description de tests de performance pouvant être réalisés dans des bureaux**

Tâche	Description
Saisie de texte	Ce test demande aux participants de recopier différentes parties d'un texte (une dizaine de lignes) telles qu'elles sont présentées à l'écran
Addition	Ce test demande aux participants d'additionner des colonnes de chiffres et d'entrer le résultat dans un champ en dessous de chacune d'entre elles
Raisonnement logique	Ce test utilise des affirmations du type (AB : A est précédé de B) et les participants doivent dire si les affirmations sont correctes ou fausses : <i>Exercice de transformation grammaticale</i>
Réactivité	Ce test, par exemple, associe un chiffre à une touche du clavier ; les participants doivent taper sur la bonne touche à la vue du chiffre correspondant
Mémoire	Ce test propose une liste d'une trentaine de mots ; après avoir défilé, les participants doivent en retrouver le maximum. Différentes variantes de ce test existent
Calcul mental	Additions, soustractions et multiplications
Stroop test	Ce test présente une série de mots, chacun le nom d'une couleur, mais pas systématiquement écrit de la couleur qu'ils représentent ; les participants doivent retrouver la couleur qui est écrite et non celle qu'ils voient : <i>Test d'interférence conceptuelle/linguistique</i>

## **2.2 Liens entre différents paramètres de l'environnement intérieur et la performance**

Cette partie présente les effets de différents paramètres de l'environnement intérieur (la température, la ventilation, la QAI, l'environnement visuel et acoustique) sur la performance dans les bureaux. En effet, certaines de ces données ont servi à définir des relations entre la QEI et la performance qui sont à la base des récentes études de valorisation en termes monétaires de l'augmentation de performance liée à une QEI améliorée.

### *A) Liens entre température et performance*

Une température non adaptée dans un bureau peut s'accompagner d'une fatigue, de somnolence de la part des employés et au final d'une baisse de leur activité et de leur performance (Wargocki *et al.*, 2006). Les principales études proviennent d'observations faites sur le terrain mais également dans des environnements de bureau reconstitués.

Ainsi, Niemelä *et al.* (2001) ont rapporté une baisse de la performance parmi les employés d'un centre d'appels de 1,8 % par degré Celsius quand la température était supérieure à 25°C. Dans une seconde expérience réalisée dans ce même centre d'appel (2002), les mêmes auteurs aboutissent à une baisse du même ordre de grandeur (2,2 % par degré Celsius) lorsque la température augmentait au-delà de 25°C. La différence n'est pas expliquée par les auteurs. Federspiel *et al.* (2002) ont étudié la performance

d'infirmières fournissant des conseils téléphoniques aux Etats-Unis. Ils n'ont pas trouvé de relation significative entre la température et la performance dans la zone de confort mais ont constaté une baisse de 15 % de la performance lorsque la température augmentait de 24,8 à 26°C. Enfin, Tham *et al.* (2003) ont relevé une augmentation de la performance d'employés d'un centre d'appel de 4,9 % quand la température variait de 23 à 24,5°C.

En vue de procéder à une **méta-analyse**<sup>16</sup>, Seppänen *et al.* (2006a) se sont basés sur 24 études traitant du lien entre la température intérieure et la performance au travail. Les études sélectionnées reposent toutes sur des mesures objectives de la performance mais les tâches considérées varient selon les études (lecture, dactylographie, conversation téléphonique). Parmi cette sélection, onze ont été menées sur le terrain (bureaux), neuf dans des laboratoires (chambres climatiques) et quatre dans des écoles. Pour chaque étude, le pourcentage de variation de la performance par degré Celsius en fonction de la température intérieure a été calculé et placé sur la Figure 6. Les valeurs positives en ordonnée indiquent une augmentation de la performance avec variation positive de la température. Ainsi, la Figure 6 montre que **la performance augmente avec la température jusqu'à une valeur de 21-22°C puis diminue au-delà de 23-24°C.**

Les études prises en compte sont très variables en termes de taille d'échantillon (de 9 à 500 participants) et de méthode. Les résultats des études ont donc été pondérés en fonction de la taille de l'échantillon mais également en fonction de la pertinence de l'étude par rapport aux conditions de travail. Pour cette seconde pondération, il a été considéré que les enquêtes réalisés sur site avec plusieurs tâches, et donc plus représentatives de la réalité, avaient plus de poids que celles réalisées en laboratoire et ne portant que sur une seule tâche. Différentes courbes de régression sont présentées en Figure 6 : sans aucune pondération, avec pondération en fonction de la taille de l'échantillon uniquement et avec pondération en fonction de la taille de l'échantillon et de la pertinence de l'étude.

Les valeurs de la Figure 6 peuvent être considérées comme les dérivées de la courbe donnant la performance en fonction de la température intérieure, ce qui a permis aux auteurs de déterminer l'équation de cette dernière.

L'Equation 4 ci-dessous est représentée par la courbe de régression avec les facteurs de pondération précédemment énoncés (Seppänen *et al.*, 2006a).

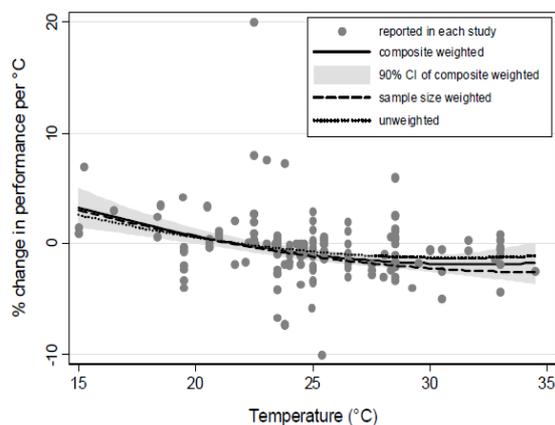
---

<sup>16</sup> Une *méta-analyse* est une analyse simultanée d'un ensemble d'études s'intéressant à la même question dans le but d'obtenir des informations qu'aucune de ces études prises isolément ne pourrait fournir.

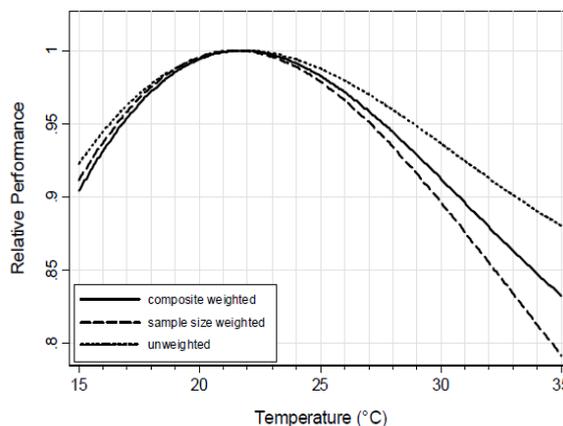
$$P = 0,1647524 T - 0,0058274 T^2 + 0,0000623 T^3 - 0,4685328 \text{ (Equation 4)}$$

Avec : P la performance relative à la valeur maximale (100 % à 21,75°C) et T la température intérieure de la pièce (°C).

La courbe d'évolution de la performance en fonction de la température est tracée en Figure 7. Ainsi, à 30°C, la performance est égale à 91 % de la performance à 22°C (qui correspond au maximum de la courbe).



**Figure 6 : Pourcentage de variation de la performance par degré Celsius en fonction de la température intérieure (Seppänen *et al.*, 2006a)**



**Figure 7 : Performance normalisée en fonction de la température intérieure (Seppänen *et al.*, 2006a)**

## B) Liens entre ventilation et performance

Les mécanismes par lesquels la ventilation affecte la performance ne sont pas vraiment connus mais il est probable qu'une augmentation du taux d'apport d'air extérieur réduit la concentration en polluants intérieurs et donc, en améliorant la QAI, réduit la prévalence des symptômes de type SBM comme le mal de tête, des difficultés de concentration et de réflexion, directement liés à la performance (Seppänen *et al.*, 1999). Les principales études proviennent d'observations sur le terrain mais également de laboratoires où le travail de bureau a été simulé.

Ainsi, Wargocki *et al.* (2000b) ont trouvé une amélioration dans la réalisation de diverses tâches telles que la dactylographie ou des tests arithmétiques lorsque le débit d'air neuf<sup>17</sup> passait de 3 à 10 L/s/personne dans un environnement pollué. De manière semblable, Bakó-Biró *et al.* (2004) ont utilisé des ordinateurs comme source de pollution et ont observé des progrès dans la réalisation de tests de performance pour des valeurs de débits d'air neuf de 15 L/s/personne comparés à 4,7 L/s/personne lors des tests avec et sans cette source. Puis, la performance d'opérateurs téléphoniques, définie comme étant le temps de communication et la vitesse de rédaction du rapport d'appel, s'améliore

<sup>17</sup> Le *débit d'air neuf* correspond à l'air entrant dans une pièce qui provient exclusivement de l'extérieur du bâtiment et pas d'un échange entre pièces ou compartiments adjacents.

(temps plus court et vitesse plus rapide) avec de forts débits d'air neuf (Federspiel *et al.*, 2004). Cette observation a été confirmée par une intervention dans un centre d'appels à Singapour où la performance d'opérateurs s'est améliorée de 9 % quand le débit d'air neuf a été augmenté de 10 à 23 L/s/personne à une température de 24,5°C (Tham, 2004).

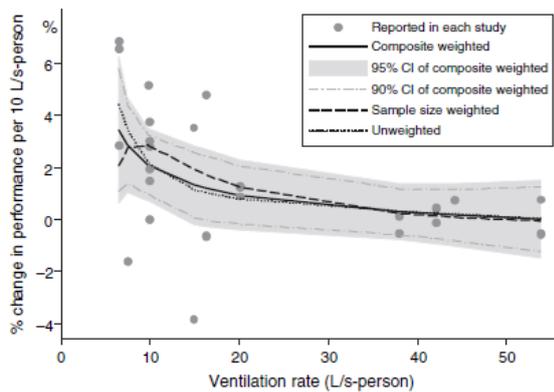
Même si la plupart des études montrent **une amélioration des performances avec une augmentation de la ventilation**, quelques exceptions existent :

- Wargocki *et al.* (2004) ont rapporté une baisse de 7,8 % dans la performance lorsque la ventilation passait de 2,5 à 25 L/s par personne. Selon les auteurs, la présence d'un filtre saturé pourrait en être la raison.
- Kaczmarczyk *et al.* (2004) constatent que l'installation de systèmes de ventilation personnels peut diminuer la quantité d'air pollué au niveau de la zone de respiration de l'utilisateur et améliorer significativement sa performance.
- Tham *et al.* (2004) remarquent que la performance est diminuée pour des forts débits d'air neuf à une température de 22,5°C. Ce résultat sera discuté dans le paragraphe 3.2.

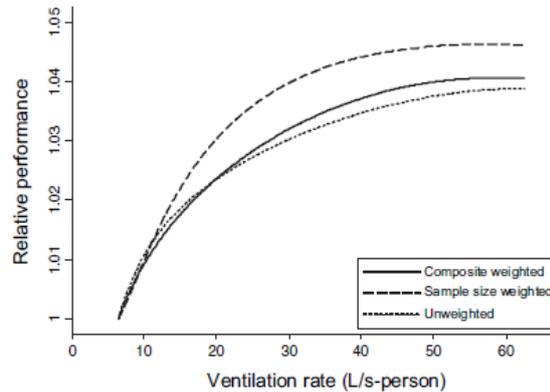
En vue de procéder à une **méta-analyse**, Seppänen *et al.* (2006b) se sont basés sur sept études traitant du lien entre la ventilation et la performance au travail. Parmi cette sélection, cinq ont été menées dans des bureaux et deux dans des laboratoires. Les études sélectionnées reposent toutes sur des mesures objectives de la performance et les résultats des études ont été pondérés en fonction de la taille de l'échantillon ainsi qu'en fonction de la pertinence de l'étude par rapport aux conditions de travail (la pertinence de l'étude a été jugée de la même manière qu'au paragraphe A. Pour chaque étude, le pourcentage de variation de la performance par tranche de 10 L/s/personne en fonction de la ventilation a été calculé et placé sur la Figure 8. Ainsi, cette dernière montre que **le fait de doubler le taux d'apport d'air extérieur pourrait améliorer la performance de 1,5 % en moyenne**. L'Equation 5 ci-dessous est utilisée pour déterminer la performance relative à une valeur de référence en fonction du taux d'apport d'air extérieur. La courbe représentant cette relation pour une valeur de référence de 10 L/s par personne est tracée en Figure 9.

$$P = \exp (-76,38 X^{-1} - 0,78 X \ln(X) + 3,87 X - (-76,38 X_R^{-1} - 0,78 X_R \ln(X_R) + 3,78 X_R)/1000) \text{ (Equation 5)}$$

Avec : P la performance relative à la valeur maximale, X le taux d'apport d'air extérieur (L/s/personne) et  $X_R$  la valeur de référence du taux d'apport d'air extérieur (L/s par personne).



**Figure 8 : Pourcentage de variation de la performance par 10L/s/personne en fonction du taux d'apport d'air extérieur moyen (Seppänen *et al.*, 2006b)**



**Figure 9 : Performance relative à un taux de 10 L/s/personne en fonction du taux d'apport d'air extérieur (Seppänen *et al.*, 2006b)**

La Figure 9 indique que la performance pourrait être de meilleure qualité jusqu'à des valeurs de 40 L/s/personne et que l'effet positif de l'augmentation du débit d'air neuf est plus élevé quand les taux initiaux sont faibles.

### C) Liens entre la QAI et performance

Les mécanismes par lesquels la QAI affecte la performance au travail n'ont pas été clairement étudiés. Il est toutefois raisonnable de penser que des occupants d'un bureau où l'air n'est pas de bonne qualité ne se sentent pas bien et donc ne travaillent pas efficacement. Ainsi des travailleurs distraits par des odeurs, des irritations ou des réactions allergiques dues à des polluants de l'air intérieur auront une performance diminuée. Récemment, quelques études ont publié leurs résultats concernant les effets d'une mauvaise QAI sur la performance. Cependant, contrairement aux paramètres précédents, la majorité des études se sont déroulées dans des laboratoires où le travail de bureau a été simulé.

Ainsi, au Danemark, Wargocki *et al.* (1999) ont relevé une amélioration de la performance de 6,5 % et de réduction du taux d'erreurs de 18 % dans des tests de dactylographie lorsque la QAI était améliorée par la suppression d'une moquette datant de 20 ans, simulant la source de pollution. Une seconde étude, avec la même méthode, a été réalisée par la suite en Suède, les résultats sont les suivants : amélioration de la performance de 1,5 % et réduction du taux d'erreurs de 15 % (Lagercrantz *et al.*, 2000).

Afin d'insister sur le besoin de contrôler les sources de pollution dans les bureaux pour améliorer la performance, une étude a montré que les effets observés dans ces deux études étaient similaires et significatifs, indépendamment du groupe de participants en jeu (Wargocki *et al.*, 2002). En effet, les études danoises et suédoises ont mis en jeu des individus différents, avec des caractéristiques différentes (âge, sexe, antécédents médicaux, *etc.*). De plus, le temps requis pour effectuer des tests de performance s'est

amélioré de 9 % quand des ordinateurs simulant une source de pollution ont été retirés du laboratoire d'étude (Bakó-Biró *et al.*, 2004).

Les expériences décrites précédemment (Wargocki *et al.*, 1999; Lagercrantz *et al.*, 2000) ont été reprises dans une étude de Wargocki *et al.* (2000a) qui a montré que la performance dans les environnements de bureaux était liée linéairement à la QAI. Ainsi la performance augmente en moyenne de 1,5 % quand la proportion de personnes non satisfaites avec la QAI est diminuée de 10 %. La satisfaction des participants a été évaluée de manière subjective, par des questionnaires. Leurs résultats indiquent que le fait de diminuer par deux le niveau de pollution, à un débit d'air neuf constant, pourrait augmenter la performance de 1,9 % (Wargocki *et al.*, 2000a).

#### D) *Liens entre environnement visuel et performance*

Les paramètres qui déterminent l'ambiance visuelle peuvent influencer la performance des travailleurs (Baron *et al.*, 1992; Chung *et al.*, 2000). Cependant il n'existe pas de relation claire entre la performance et une ambiance visuelle de mauvaise qualité. L'ambiance lumineuse, qui fait partie de l'environnement visuel, peut être définie par un certain nombre de paramètres (Frontczak *et al.*, 2010). Ces derniers comprennent l'éclairage mais également l'éblouissement, les effets stroboscopiques de la lumière, *etc.* L'étude de Smolders *et al.* (2012) a montré qu'un plus fort **éclairage** (1000 lux au lieu de 200 lux mesuré au niveau de l'œil) améliorerait non seulement la vigilance et la vitalité des travailleurs au bureau mais également leur performance. L'étude de Liebl *et al.* (2012) s'est intéressée aux effets d'une **distraction visuelle** sur la performance et le bien-être : une lumière dynamique plutôt qu'une statique (simulée par l'intermédiaire de la projection d'une image de manière stable ou non dans le champ de vision du participant) pouvait engendrer une diminution de la performance des occupants des bureaux.

L'environnement visuel ne se limite pas à l'ambiance lumineuse au sens strict du terme. Ainsi, la présence de fenêtres est considérée comme favorable sur la performance des travailleurs des bureaux, fournissant notamment des vues agréables sur l'extérieur (Newsham *et al.*, 2009; Aries *et al.*, 2010).

#### E) *Liens entre environnement sonore et performance*

De même que pour l'environnement visuel, les paramètres qui déterminent l'ambiance sonore peuvent influencer la performance des travailleurs (Kaarlela-Tuomaala *et al.*, 2009; Mak *et al.*, 2011). Colle *et al.* (1976) ont été les premiers chercheurs à étudier les effets de la parole sur la performance. Cette étude a été répétée par de nombreuses équipes de recherche et elles ont montré que la parole était considérée comme étant le son le plus dérangeant dans ces lieux de travail (Haapakangas *et al.*, 2008b; Rashid *et al.*, 2008). Ce problème est particulièrement présent dans les bureaux à espaces

décloisonnés ; en effet, le nombre relatif de bureaux avec un aménagement en « *open space* » est en constante augmentation.

De plus, des expériences réalisées en laboratoire ont montré que les effets perturbateurs n'étaient pas produits par le niveau sonore mais au contraire par **l'intelligibilité de la parole** (Venetjoki *et al.*, 2006; Schlittmeier *et al.*, 2008). Ce paramètre peut être évalué par l'indice de transmission de la parole ou *Speech Transmission Index* (STI) ; par exemple, une valeur de 0,5 exprime le fait que 50 % des syllabes seront correctement entendues (Haapakangas *et al.*, 2008a). Les études menées à partir de cet indice lors de tests de performance ont montré que celle-ci est fortement diminuée pour des valeurs élevées, c'est-à-dire pour lesquelles l'intelligibilité de la parole est presque parfaite (Hongisto, 2007). Ces auteurs ont développé un modèle pour prédire la diminution de la performance en fonction de l'indice STI. En se basant sur les résultats de la littérature, ils ont annoncé une baisse de 4 à 45 % de la performance, dépendant de la tâche étudiée, à partir d'une valeur de 0,2 pour cet indice.

### **2.3 Analyses coûts-bénéfices relatives à une amélioration de la QEI**

De récentes méta-analyses, citées dans le paragraphe 2.2, ont permis de développer des relations quantitatives entre certains paramètres de la QEI (température et ventilation notamment) et la performance au travail. Ces relations sont à la base de récentes estimations économiques d'améliorations de la QEI (Fisk *et al.*, 2011; Singh *et al.*, 2011; Fisk *et al.*, 2012). Ces estimations sont des analyses de type coûts-bénéfices visant à identifier et quantifier les conséquences positives (bénéfices) et négatives (coûts) de ces améliorations, puis à les exprimer sous forme monétaire. L'objectif de ce paragraphe est d'exposer la méthode utilisée (paragraphe A) puis les résultats obtenus (paragraphe B).

#### *A) Méthode*

Le principe général de l'étude américaine de Fisk *et al.* (2011) est d'évaluer les impacts de la mise en place de scénarii qui amélioreraient certains paramètres de la QEI. Par exemple, il s'agit d'estimer les effets en termes de performance, et donc de bénéfices, d'une augmentation théorique du débit d'air neuf jusqu'à une certaine valeur dans l'ensemble des bureaux aux Etats-Unis. Les scénarii sélectionnés ont été considérés comme réalisables de par l'état des connaissances actuelles. Seuls les scénarii ayant des impacts concernant la performance, au sens strict du terme, sont exposés<sup>18</sup>.

Les deux premiers scénarii (1a et 1b) visent à augmenter les débits d'air neuf jusqu'à des valeurs de 10 ou 15 L/s/personne. La valeur de 10 L/s/personne provient de la norme

---

<sup>18</sup> Les auteurs ont également étudié un Scénario 4 qui mesure uniquement les impacts en terme d'absentéisme au travail après la réduction de 30 % du nombre de bâtiments avec des moisissures et de l'humidité.

internationale (ASHRAE, 2007) intitulée « *Ventilation for acceptable Indoor Air Quality* ». Elle recommande ce débit d'air neuf minimal pour assurer une bonne QEI dans les bureaux selon la méthode de ventilation.

Le Scénario 2 ajoute des économiseurs qui sont des systèmes tirant parti des conditions météorologiques favorables pour réduire le refroidissement mécanique en laissant entrer dans le bâtiment l'air frais de l'extérieur, augmentant ainsi les débits d'air neuf.

Enfin le Scénario 3 élimine les températures hivernales supérieures à 23°C dans les bureaux en faisant de simples ajustements sur les thermostats par exemple.

Les impacts de ces différents scénarii incluent une augmentation de la performance mais également une réduction des symptômes de type SBM et de l'absentéisme au travail. Les bénéfices ont donc été calculés en fonction de ces différentes données de sortie. Le Tableau 3 résume la description des scénarii mis en place, les impacts évalués et la méthode générale développée.

**Tableau 3 : Scénarii d'amélioration de la QEI et méthode développée, adapté de Fisk *et al.* (2011)**

N° scénario	Description du scénario	Impacts évalués	Méthode
1a	Augmentation du débit d'air neuf jusqu'à des valeurs de 10 L/s/personne	<u>Performance</u> (Seppänen <i>et al.</i> , 2006b), <u>Symptômes de type SBM</u> (Fisk <i>et al.</i> , 2009), <u>Absentéisme au travail</u> (Milton <i>et al.</i> , 2000), <u>Energie</u> (Griffith <i>et al.</i> , 2008)	- <i>Etape 1</i> : Obtenir les valeurs initiales des paramètres de la QEI (températures et débits d'air neuf) dans le parc de bureaux américains - <i>Etape 2</i> : Obtenir les taux de prévalence des symptômes de type SBM et de l'absentéisme dans la population de travailleurs de bureaux - <i>Etape 3</i> : Pour chaque scénario, déterminer les valeurs finales des paramètres de la QEI - <i>Etape 4</i> : Calculer, pour les valeurs initiales et finales des paramètres de la QEI, les variations en termes de performance, de symptômes de type SBM ou d'absentéisme au travail - <i>Etape 5</i> : Exprimer ces variations sous forme monétaire
1b	Augmentation du débit d'air neuf jusqu'à des valeurs de 15 L/s/personne		
2	Ajout d'économiseurs		
3	Elimination des températures hivernales supérieures à 23°C	<u>Performance</u> (Seppänen <i>et al.</i> , 2006a), <u>Symptômes de type SBM</u> (Mendell <i>et al.</i> , 2009)	

Les valeurs utilisées dans l'Etape 1 (Tableau 3) proviennent d'une étude américaine réalisée à grande échelle sur 100 immeubles de bureaux représentatifs du parc américain (étude BASE). Lors de cette enquête, des mesures ont été effectuées dans chaque bâtiment pendant une durée d'une semaine, généralement soit en hiver ou en été, au niveau des postes de travail. Celles-ci incluent notamment la mesure du débit d'air neuf (Persily *et al.*, 2008) et de la température des bureaux (Mendell *et al.*, 2009).

Les taux de prévalence des symptômes de type SBM et de l'absentéisme au travail (Etape 2) proviennent également de l'étude BASE.

Les paramètres de la QEI utilisés dans l'Étape 3 proviennent de la description même des scénarii étudiés. Par exemple, pour le Scénario 1a, la valeur finale du débit d'air neuf est de 10 L/s/personne. Pour le Scénario 2, une modélisation a été effectuée par les auteurs afin de simuler les débits d'air neuf finaux suite à la mise en place d'économiseurs.

Lors de l'Étape 4, les calculs de variation de la performance, des symptômes de type SBM ou de l'absentéisme au travail proviennent de relations du même type que celles développées dans le paragraphe 2.2. Les références de toutes les relations sont données dans le Tableau 3. Ces calculs ont été menés pour chaque mesure de température ou de débit d'air neuf provenant de l'étude BASE. Par la suite, une moyenne de ces variations a été calculée.

La valorisation de ces variations en termes monétaires prend en compte des paramètres économiques comme le coût horaire du travail. D'après l'INSEE<sup>19</sup>, celui-ci correspond au coût total payé par les employeurs pour rémunérer le facteur de production du travail. Il comprend le salaire brut (avec les primes, les congés payés et les cotisations sociales) et les cotisations sociales patronales. Ce coût dépend donc de nombreux facteurs tels que l'employé (niveau de qualification, ancienneté), l'entreprise (politique des salaires) mais aussi du pays (niveau de charges). Toutefois, les détails de calcul liés à cette traduction monétaire ne sont pas développés. En effet, la description de cet aspect économique dépasse les objectifs de ce mémoire.

## B) Résultats

Pour chacun des scénarii, l'étude de Fisk *et al.* (2011) a quantifié leurs coûts de mise en place et les bénéfices associés aux impacts. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4. Cette étude montre que des interventions en QEI dans les bureaux américains pourraient non seulement empêcher l'apparition de symptômes de type SBM et prévenir l'absentéisme au travail de plusieurs millions de travailleurs mais aussi améliorer leur performance. Cela permettrait ainsi de réaliser des bénéfices de plusieurs dizaines de milliards de dollars. Parmi les impacts étudiés, les principaux gains des scénarii envisagés se situent dans l'augmentation de la performance et dans la diminution de l'absentéisme. Les bénéfices réalisés grâce à la diminution des symptômes de type SBM sont plus faibles en raison du coût médical engendré et de la fraction de travailleurs qui rencontrent ces symptômes (Fisk *et al.*, 2011). Il est important de noter que les profits réalisés par les Scénarii 1a ou 1b ne sont pas cumulables avec ceux du Scénario 2. C'est-à-dire qu'il n'est pas possible de parler de bénéfices globaux de 25,3 (13,5+11,8)

---

<sup>19</sup> <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/indice-cout-travail-industrie.htm> (version du 26/07/2012).

milliards de dollars suite à la mise en place conjointe des Scénarii 1b et 2. En effet, l'ajout d'économiseurs (Scénario 2) va permettre l'augmentation des débits d'air neuf qui est également l'objectif du Scénario 1b. Cependant, selon Fisk *et al.* (2011), en négligeant les interactions entre les impacts étudiés, il serait envisageable d'additionner les impacts des Scénarii 1a ou 1b ou 2 avec ceux du 3. En effet, les paramètres améliorés de la QEI ne sont pas les mêmes : débits d'air neuf pour les Scénarii 1a, 1b et 2 et température pour le Scénario 3. Les bénéfices réalisés pourraient alors atteindre 17 milliards de dollars.

**Tableau 4 : Bénéfices ou pertes annuels estimés résultant d'une amélioration de la QEI dans les bureaux américains, adapté de Fisk *et al.* (2011)**

N°	Bénéfices et coûts annuels quantifiés	Travailleurs concernés (millions)	Bénéfices ou pertes annuels (milliards dollars)
<b>1a</b>	Augmentation de la performance de 0,7 %	7,8	+ 4,2
	Diminution des symptômes de type SBM de 13,2 %	7,8	+ 0,06
	4,5 millions de jours d'absence évités	//	+ 1,4
	Augmentation de la consommation énergétique	//	- 0,02
	<b>TOTAL</b>		<b>+ 5,6</b>
<b>1b</b>	Augmentation de la performance de 1,1 %	12,4	+ 10,2
	Diminution des symptômes de type SBM de 18,8 %	12,4	+ 0,11
	10 millions de jours d'absence évités	//	+ 3,2
	Augmentation de la consommation énergétique	//	- 0,04
	<b>TOTAL</b>		<b>+ 13,5</b>
<b>2</b>	Augmentation de la performance de 0,47 %	20,7	+ 7,2
	Diminution des symptômes de type SBM de 7 %	20,7	+ 0,05
	15,2 millions de jours d'absence évités	//	+ 4,7
	Economies énergétiques	//	+ 0,12
	Installation des économiseurs	//	- 0,22
	<b>TOTAL</b>		<b>+ 11,8</b>
<b>3</b>	Augmentation de la performance de 0,23 %	40,4	+ 2,3
	Diminution de 7,7 millions de symptômes de type SBM	//	+ 1,1
	<b>TOTAL</b>		<b>+ 3,4</b>

Ces résultats peuvent être comparés avec les précédentes études de ces mêmes auteurs (Fisk, 2000a, b). Cependant ces comparaisons sont grossières car il existe de grandes différences dans la portée de ces deux études (Fisk, 2000a; Fisk *et al.*, 2011). Celle datant de 2000 avait utilisé une main-d'œuvre plus élargie (pas uniquement les travailleurs des bureaux) et avait également pris en compte les impacts sanitaires et les bénéfices liés à une amélioration de la performance dans les environnements résidentiels. Ainsi les gains réalisés pouvaient s'élever entre 17 et 48 milliards de dollars pour les aspects sanitaires et entre 20 et 160 milliards de dollars pour la performance. Au contraire, la seconde étude de 2011 s'est concentrée sur les bâtiments de bureaux et a sélectionné les changements les plus pertinents dans les paramètres de la QEI et dans

les impacts évalués. Les différences entre les deux publications sont donc dues au champ d'étude, plus restreint pour l'article de 2011, entraînant donc des impacts plus « faibles ».

### **3 Analyse critique de la synthèse bibliographique**

Le paragraphe précédent a exposé les liens entre l'environnement intérieur et la performance ainsi que la méthode et les résultats des travaux économiques traitant d'une amélioration de la QEI dans les bureaux. La partie suivante apporte des éléments de discussion à propos de ces thématiques. Ils permettent notamment de pouvoir ultérieurement argumenter sur la faisabilité des méthodes proposées d'évaluation de l'impact de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs des bureaux.

#### **3.1 Restriction du confort thermique à la température**

La plupart des études présentées dans le paragraphe 2.2 se concentrent sur le lien entre performance et température intérieure de la pièce. De plus, les analyses coûts-bénéfices, comme celle exposée au paragraphe 2.3, utilisent exclusivement la température dans l'élaboration de leurs scénarii d'amélioration de la QEI. Ces études et analyses restreignent ainsi la notion de confort thermique à ce seul critère physique. Or, d'après la norme NF EN 7730 (2006) qui traite du confort des occupants dans des locaux à ambiance modérée, le confort thermique est défini comme la satisfaction par rapport à l'ambiance thermique. Le confort thermique est donc une notion subjective. Cette notion peut toutefois être interprétée objectivement ; ainsi, les conditions de confort dépendent de quatre paramètres physiques de l'environnement et de deux paramètres caractéristiques de l'individu :

- ✓ Le **métabolisme**, correspondant à la production de chaleur interne au corps humain. Lorsqu'une personne est en mouvement, un métabolisme de travail correspondant à son activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos ;
- ✓ La **résistance thermique du vêtement**, représentant la résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement. Une unité appelée « clo » a été créée pour caractériser l'habillement. Les valeurs d'isolement thermique de diverses pièces de vêtements sont fournies par la norme NF EN 7730 (2006);
- ✓ La **température de l'air ambiant** ;
- ✓ La **température moyenne de rayonnement** ou rayonnement thermique tenant compte de la température des parois ;
- ✓ La **vitesse de l'air** ;
- ✓ L'**humidité de l'air**.

Différentes associations de ces facteurs peuvent conduire à une même sensation thermique. L'étude de Wyon *et al.* (1975) a montré que des sujets ayant un travail

« sédentaire » sous deux combinaisons différentes (23,2°C avec 0,6 clo et 18,7°C avec 1,15 clo) pouvaient avoir des indicateurs de performance identiques. Ainsi, des occupants peuvent ne pas ressentir de baisse de performance à des températures jugées faibles ou élevées, à condition qu'ils aient les moyens d'adaptation suffisants comme l'habillement pour maintenir un niveau de confort acceptable.

Sur la base d'expériences menées en chambres climatiques, des critères de confort thermique ont été établis tel l'indice de vote moyen prévisible<sup>20</sup> ou *Predicted Mean Vote* (PMV). Comme illustré par le Tableau 5, le PMV est l'appréciation moyenne de la sensation thermique qu'exprimerait un groupe important de personnes dans un environnement donné selon une échelle allant de « -3 » (froid) à « +3 » (chaud).

**Tableau 5 : Indice de confort thermique PMV et échelle de sensation thermique**

PMV	-3	-2	-1	0	1	2	3
<b>Sensation thermique</b>	Froid	Frais	Légèrement froid	Neutre	Légèrement tiède	Tiède	Chaud

Cet indice s'exprime en fonction des paramètres physiques et physiologiques cités ci-dessus (Fanger, 1970). Le calcul de l'indice PMV dépassant le cadre de ce mémoire, il n'est pas développé. La température est le paramètre le plus utilisé dans les études reliant l'environnement thermique et la performance. En plus de la température, il est donc nécessaire d'utiliser également d'autres critères de confort tels le PMV pour définir les conditions thermiques d'une performance optimale.

Contrairement aux liens entre la température et la performance où une trentaine d'études ont été relevées à ce sujet, peu de publications ont étudié les liens entre des indices de confort thermique et la performance. Une telle approche a été adoptée par Loveday *et al.* (1995) qui a établi un modèle déterministe reliant la performance à trois variables : la température, l'humidité et la vitesse de l'air. Roelofsen (2001) a, avec cette même approche, relevé une variation de la performance en fonction du PMV. Kosonen *et al.* (2004) ont, quant à eux, énoncé que la baisse de performance pouvait être minimisée en améliorant un critère de confort thermique tel le PMV. En rapprochant cet indice le plus possible de la valeur « -0,20 », la situation est la plus favorable à une performance maximale. Aucune relation entre le PMV et la performance ne fut établie. Plus récemment, Jensen *et al.* (2009) ont établi une relation entre le PMV et la performance à partir de données récoltées sur le terrain mais également en chambres climatiques. D'après la Figure 10, le niveau de performance optimal est atteint lorsque les occupants perçoivent leur environnement thermique comme légèrement froid (Indice « -1 » dans le Tableau 5).

<sup>20</sup> Expression française dédiée pour exprimer ce critère de confort thermique.

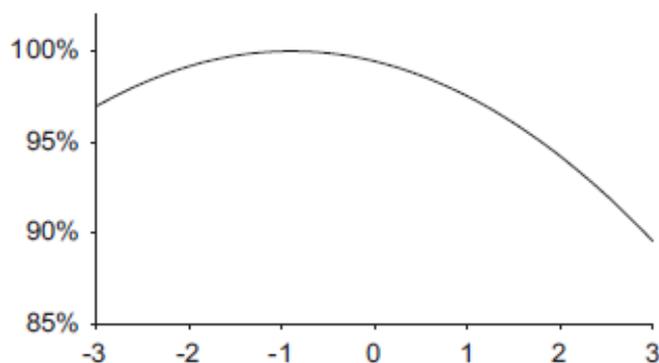


Figure 10 : Performance relative en fonction de l'indice de vote moyen prévisible (Jensen *et al.*, 2009)

Enfin, une autre relation entre ces deux variables a été créée par Lan *et al.* (2011) ; ils ont utilisé des données provenant de tests de performance pour du travail de bureau simulé. La performance optimale serait atteinte pour une valeur du PMV de « -0,25 ». L'Equation 6 ci-dessous exprime la relation entre la performance et le PMV :

$$P = -0,215 PMV - 0,5294 PMV^2 - 0,0351 + 99,865 \text{ (Equation 6)}$$

Avec : P la performance relative à la performance maximale et PMV le vote de sensation thermique.

### 3.2 Prise en compte de l'effet combiné de différents paramètres environnementaux

Peu d'études ont investigué les effets combinés de différents paramètres environnementaux alors que, paradoxalement, dans les conditions de travail normales, ces facteurs ne sont pas présents individuellement mais ont des effets combinés. Ces derniers sont souvent expliqués par la théorie de l'éveil : la performance de tâches simples est la plus élevée lorsque l'éveil est maximum alors que la performance de tâches complexes est optimale lorsque l'éveil est minimal (Hygge, 1992).

Il est d'usage de considérer que :

- l'environnement thermique a plus d'effets que l'environnement sonore (Wargocki *et al.*, 2006) ;
- de fortes chaleurs diminuent l'éveil alors qu'un fort niveau sonore l'augmente (Wargocki *et al.*, 2006).

Ainsi, en combinant de fortes chaleurs avec un fort niveau sonore, l'éveil est défavorisé et la performance lors de la réalisation de tâches complexes est meilleure que lors de la réalisation de tâches simples (Witterseh *et al.*, 2004). Pourtant, dans une expérience simulant et évaluant du travail de bureau sous les effets cumulés de l'amélioration de six différentes conditions environnementales : température, QAI, bruit du trafic et au sein de « l'open space », luminosité et accès à la lumière du jour, aucune amélioration significative n'a été observée (Clausen *et al.*, 2005).

Cependant, à ce jour, les interactions complexes entre les paramètres de l'environnement intérieur et leurs effets sur la performance ne sont pas encore bien maîtrisées.

Dans l'étude de Tham *et al.* (2004), les auteurs ont rapporté de faibles résultats de performance même pour des forts débits d'air neuf (*cf.* paragraphe 2.2). Ces observations ont été faites à une température de 22,5°C (température faible pour les conditions tropicales de Singapour) et à une humidité de 55-78 %. Ainsi ce résultat concernant la ventilation a pu être affecté par d'autres paramètres environnementaux, comme la température et l'humidité de l'air. La QEI est donc déterminée par une **combinaison de toutes ses composantes** : QAI, environnement thermique, acoustique et visuel.

### **3.3 Relations quantitatives entre certains paramètres de l'environnement intérieur et la performance**

#### *A) Points forts des relations quantitatives établies*

Les relations quantitatives établies entre la performance au travail et la température (Equation 4) ou le taux d'apport d'air extérieur (Equation 5) sont des outils très utiles permettant notamment de mener des analyses coûts-bénéfices d'une amélioration de la QEI. Ces méta-analyses présentent certains critères de qualité.

Tout d'abord les études où la performance a été évaluée de manière subjective ont été écartées ce qui permet de s'affranchir de la partialité des sujets. De plus, des facteurs de pondération selon la taille de l'échantillon et la pertinence de l'étude par rapport aux conditions de travail ont été appliqués. Ainsi, un poids plus important a été accordé aux études réalisées sur site avec une grande variété de tâches et qui incluent les caractéristiques sociales et motivationnelles représentatives d'un réel travail quotidien. Enfin, en termes d'analyse de sensibilité, les auteurs ont utilisé la meilleure régression possible et ont représenté graphiquement les résultats de leur méta-analyse en prenant en compte la qualité des études (par l'intermédiaire des pondérations présentées en Figures 6 et 8).

De plus, comme évoqué dans le paragraphe 3.2, des interactions entre les différents paramètres de l'environnement intérieur peuvent survenir et avoir des effets dans les résultats. Cependant, lors des régressions entre les paramètres explicatifs telles la température ou la ventilation et la variable à expliquer comme la performance, les auteurs ont utilisé des modèles multivariés. Ainsi les variables qui pourraient influencer le résultat sont contrôlées afin d'étudier uniquement l'impact de la variable examinée (la température ou la ventilation).

#### *B) Points faibles des relations quantitatives établies*

Bien que les relations établies semblent être de qualité, elles sont soumises, de l'avis

même de leurs auteurs, à de nombreuses limites et incertitudes.

Certaines études prises en compte dans les méta-analyses datent de **1970** (Link *et al.*, 1970). A la lumière de la forte évolution des technologies utilisées dans les bureaux, est-ce réellement pertinent ?

Plusieurs tâches relativement simples ont été incluses dans l'évaluation de la performance mais la façon dont **ces données s'adapteraient dans des environnements de bureaux actuels n'est pas claire**. Par exemple, Wargocki *et al.* (2000b) ont rapporté une amélioration dans la créativité<sup>21</sup> des travailleurs dans un bureau reconstitué avec un débit d'air neuf de 10 comparé à 3 L/s/personne. Les données issues de ces tests n'étaient pas comparables à celles des tests classiques de performance et n'ont pas été prises en compte dans la relation performance-ventilation (Equation 5). Plus récemment, l'étude de Wang *et al.* (2011) a également montré une amélioration dans des tests semblables de créativité. Ces résultats mériteraient d'être inclus dans la relation performance-ventilation. Ainsi, la créativité, qui peut être une des tâches réalisées dans des bureaux, serait comprise dans l'évaluation au sens large de la performance.

Parmi les différentes études retenues pour l'établissement de la relation performance-ventilation (Equation 5), il est possible que **les méthodes employées pour mesurer le débit d'air neuf varient** entre les études. Ainsi certains ont été déterminés grâce aux mesures de flux d'air extérieur fourni mécaniquement, qui négligent l'infiltration d'air tout comme l'apport par ouverture des fenêtres. D'autres proviennent de l'utilisation de gaz traceurs qui incluent au contraire l'infiltration d'air. Ainsi, il semble exister une variabilité dans les méthodes déployées pour mesurer les paramètres environnementaux en jeu.

Certaines études ont été publiées par les mêmes groupes de recherche et peuvent donc impliquer les mêmes participants aux tests de performance ; or **l'indépendance des études** est l'un des critères de validation d'une méta-analyse.

Comme toutes les méta-analyses, ces relations sont soumises au **biais de publication**. C'est-à-dire que les études publiées majoritairement sont celles avec des observations significatives et/ou qui vont dans le sens des résultats attendus. Ainsi les méta-analyses réalisées ont peut-être surestimé l'association entre les variables étudiées. De plus, quelle est l'exhaustivité des recherches bibliographiques effectuées pour trouver les études de référence dans la mesure où la méthode employée n'a souvent pas été exposée ?

Enfin, parmi les **critères d'inclusion** réalisés par Seppänen *et al.* (2006a ; 2006b) des

---

<sup>21</sup> Un test de créativité peut consister à demander aux participants d'imaginer et de lister de nouvelles fonctions à des objets du quotidien.

études réalisées dans des écoles ont été prises en compte dans l'élaboration des relations quantitatives. Or il existe de nombreuses différences entre l'évaluation de la performance et les tests associés pour un enfant à l'école et pour un travailleur dans un bureau (Bakó-Biró *et al.*, 2012). Par ailleurs, le nombre d'études prises en compte dans l'élaboration de la relation performance-ventilation (Equation 5) est faible : seulement sept études ont été incluses.

### **3.4 Absence de relations quantitatives pour tous les paramètres de l'environnement intérieur**

En ce qui concerne la QAI, il n'y a pas de relation clairement établie entre la performance et ce paramètre. Les chiffres donnés dans le paragraphe 2.2 sont fonction du pourcentage de personnes satisfaites ou non avec la qualité de l'air ambiant dans leur milieu de travail. Or cette notion est subjective, dépendant de la sensibilité de chacun, contrairement à la température et le débit d'air neuf qui sont des paramètres mesurables. Il faudrait utiliser différentes catégories de la QAI comme indiqué dans la norme CEN CR 1752 (1998) qui traite des débits d'air neuf à utiliser pour avoir une bonne QAI. Même si la performance a été estimée par des tests standardisés et dans un environnement le plus naturel et représentatif possible d'un bureau « réel », les conditions pour les participants ont pu être perçues différemment qu'à leur lieu de travail habituel.

### **3.5 Analyses coûts-bénéfices relatives à une amélioration de la QEI**

#### *A) Point fort*

Les analyses coûts-bénéfices récemment réalisées, dont la méthode et les résultats ont été présentés dans le paragraphe 2.3, sont des outils très performants permettant de comparer différents scénarii d'amélioration de la QEI. Elles permettent aux décideurs d'identifier le projet qui aura le plus de bénéfices au moindre coût.

#### *B) Points faibles*

Malgré l'utilité de ces analyses coûts-bénéfices, notamment celle de Fisk *et al.* (2011), celles-ci sont également soumises à de nombreuses incertitudes. Elles peuvent faire varier les résultats d'un facteur deux ou trois selon l'avis même des auteurs.

Tout d'abord, ces analyses se basent sur des relations quantitatives établies entre la performance et certains paramètres de l'environnement (Equations 4 et 5). Comme exposé dans le paragraphe 3.3, celles-ci sont elles-mêmes soumises à de nombreuses **limites et incertitudes**. De plus, les relations performance-température ou performance-ventilation présentées dans le paragraphe 2.2 sont uniques. Ainsi les coûts et bénéfices des analyses présentées précédemment ne peuvent pas être mis en perspective et discutés en fonction de différentes relations quantitatives disponibles dans la littérature.

Comme évoqué dans le paragraphe 3.2, il existe des interactions entre les différents paramètres de l'environnement intérieur et la performance. Les scénarii présentés ne se sont attachés qu'à la variation d'un seul paramètre en considérant que les autres n'influaient pas. Or, il est envisageable de penser que même en augmentant le débit d'air neuf dans des bureaux, si la température n'est pas optimum, les effets attendus ne seraient pas observés pleinement. Les **interactions entre les différents paramètres** (antagonismes ou synergies) n'ont pas été étudiées et auraient sans doute pu faire varier les résultats.

Enfin, il est discutable **qu'une somme ait été calculée par scénario** en fonction des différents impacts étudiés. Ainsi, pour chaque scénario, les bénéfices liés à la performance, aux symptômes de type SBM et à l'absentéisme au travail ont été additionnés pour aboutir à un bénéfice global. Il est possible que la température puisse influencer la performance indirectement par son impact sur la prévalence des symptômes de type SBM (Seppänen *et al.*, 2006a). Un travailleur, en inconfort thermique, qui a des symptômes tels le mal de tête aura nécessairement une baisse de la performance. Par conséquent il ne serait pas possible de cumuler les effets sur la performance et sur les symptômes de type SBM car ceux-ci sont liés.

#### **4 Proposition de méthodes d'évaluation de l'impact de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs des bureaux**

Cette synthèse propose deux méthodes d'évaluation de l'impact de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs dans les bureaux. Elle souligne pour chacune d'elles les limites et les solutions proposées. Cette synthèse conclue également sur la transposition possible, ou non, des analyses coûts-bénéfices réalisées dans d'autres pays sur le parc de bureaux français.

##### **4.1 Méthode n°1 : Utilisation des relations quantitatives entre certains paramètres de l'environnement intérieur et la performance**

###### *A) Principe et limites de la méthode*

L'analyse de la littérature scientifique a montré qu'il existe un lien entre les paramètres de l'environnement intérieur et la performance au travail. Pour certains paramètres tels que la température et le débit d'air neuf, des relations quantitatives ont été établies entre ces facteurs et la performance au travail (Equations 4 et 5). La principale finalité observée de ces relations dans la littérature est d'être un outil pour prédire l'augmentation de performance due à des paramètres environnementaux optimaux. Cependant, afin d'évaluer l'impact de l'environnement intérieur sur la performance dans les bureaux pour la CNB de l'OQAI, il est envisageable de se questionner sur la possibilité d'utiliser ces relations.

Par cette approche indirecte, l'idée est de déduire la performance à partir de mesures de certains paramètres comme la température ou le débit d'air neuf. Ces mesures sont d'ores et déjà prévues dans les protocoles de la CNB (Parat *et al.*, 2009). L'utilisation de ces relations dans des récentes analyses coûts-bénéfices suffit à justifier leur robustesse.

Cette méthode est intéressante car, en plus d'être originale et réellement novatrice, elle permettrait une économie des mesures « classiques » de la performance citées dans le paragraphe 2.1. Cependant, celle-ci présente de nombreuses limites.

Les seuls paramètres pour lesquels des relations quantitatives avec la performance ont pu être établies sont la température et le débit d'air neuf (*cf.* paragraphe 3.4). Même si des relations existent pour la température et le débit d'air neuf, le paragraphe 3.3 a présenté de nombreuses limites et incertitudes liées à leur élaboration. En outre, le paragraphe 3.1 a mis en évidence qu'au lieu de la température, il est nécessaire d'utiliser d'autres critères de confort tel le PMV pour définir les conditions thermiques d'une performance optimale. De plus, le paragraphe 3.2 a justifié que la QEI était déterminée par la combinaison de toutes ces composantes, c'est-à-dire de la QAI, de l'environnement thermique, acoustique, mais également visuel. L'impact de l'environnement intérieur sur la performance s'opère par les effets simultanés de toutes ces composantes et non par un effet unique de l'une d'entre elles. Il paraît donc discutable de devoir énoncer que la QEI serait restreinte à la température ou au débit d'air neuf sous prétexte que des relations quantitatives avec la performance n'existent que pour ces paramètres.

#### *B) Solutions proposées*

Face aux limites de cette méthode, des solutions peuvent être proposées.

→ Cette approche pourrait être envisagée si des relations étaient établies entre **la performance et un indice global de la QEI**. Elle prendrait en compte toutes les composantes de l'environnement intérieur et serait donc plus réaliste car elle permettrait d'évaluer l'impact simultané de tous ces paramètres sur la performance des travailleurs.

De nombreuses études ont fait l'objet de travaux concernant la création d'un indice global de la QEI (Humphreys, 2005; Wong *et al.*, 2008; Lai *et al.*, 2009; Cao *et al.*, 2012; Ncube *et al.*, 2012). Elles consistent à créer une relation entre la QEI perçue et les principales composantes de l'environnement intérieur : la QAI, l'environnement thermique, acoustique et visuel. Dans l'étude de Ncube *et al.* (2012) par exemple, l'indice global de la QEI ( $QEI_{index}$ ) s'exprime de la manière suivante (Equation 7) :

$$QEI_{index} = \beta_1 \times QAI_{index} + \beta_2 \times CT_{index} + \beta_3 \times CA_{index} + \beta_4 \times CV_{index}$$

Avec :

$QAI_{index}$  : index de la QAI relatif au débit d'air neuf et au niveau de pollution

$CT_{index}$  : index du Confort Thermique dépendant de l'indice PMV (cf. paragraphe 3.1)

$CA_{index}$  : index du Confort Acoustique exprimé en fonction du niveau sonore

$CV_{index}$  : index du Confort Visuel exprimé en fonction de l'intensité lumineuse

Les coefficients  $\beta_1$  à  $\beta_4$  sont des facteurs de pondération dérivés de résultats de régression multivariée. Les auteurs ont collecté les données relatives à la QEI perçue par des questionnaires distribués dans des bureaux représentatifs du parc britannique. Les paramètres physiques nécessaires au calcul des index ( $QAI_{index}$ ,  $CT_{index}$ ,  $CA_{index}$ ,  $CV_{index}$ ) ont été mesurés dans ces mêmes bureaux. Les relations dans les autres publications citées ont la même structure générale, seule la valeur des coefficients et les paramètres physiques mesurés changent.

Si des relations ont été créées entre un indice global de la QEI et ses différents facteurs contributifs, d'après la recherche bibliographique effectuée, il n'existe pas à ce jour de relation entre ces indices et la performance ( $PERF_{index}$ ) du type (Equation 8) :

$$PERF_{index} = f(QEI_{index})$$

Toutefois, il est légitime de penser que des travaux de recherche engendreront ce genre de relation. En effet, les potentialités d'un indice de performance sont très larges et dépassent le cadre du présent mémoire. Un indice fournirait la possibilité aux architectes et concepteurs de bâtiments de définir des environnements intérieurs qui permettent de satisfaire au mieux les employés pour leur garantir une performance optimale. Il permettrait de pouvoir comparer entre eux des bâtiments, non seulement sur des paramètres énergétiques mais également sur des critères de performance au travail. Afin de pouvoir envisager cette méthode dans la seconde phase de la CNB par l'OQAI, une veille bibliographique doit donc se poursuivre.

→ Une alternative à l'utilisation d'un indice global de la QEI serait d'utiliser une relation unique entre **la performance et les composantes de l'environnement intérieur**. La relation s'écrirait alors sous la forme (Equation 9) :

$$PERF_{index} = \beta_1 \times QAI_{index} + \beta_2 \times CT_{index} + \beta_3 \times CA_{index} + \beta_4 \times CV_{index}$$

D'après les recherches menées, la seule publication qui se rapproche le plus de ce type de relation est l'étude de Wiik (2011). La performance a été évaluée de manière subjective par des questionnaires distribués, en Norvège, à 500 employés de bureaux dans diverses entreprises. La QAI, le confort thermique, acoustique et lumineux ont été également appréhendés par des questionnaires. De cette manière, les participants ont exprimé leur satisfaction par rapport à ces composantes mais aucune mesure physique n'a été prise en compte pour l'établissement de cette relation.

Là encore, une veille bibliographique est fondamentale afin de se tenir informé d'une possible actualisation de ce genre de relation, avec des mesures physiques des paramètres environnementaux au lieu d'une évaluation subjective.

## 4.2 Méthode n°2 : Mesures objectives de la performance

### A) *Principe de la méthode et éléments de cadrage*

Un important travail de recherche est nécessaire dans l'objectif de pouvoir utiliser la méthode n°1 pour évaluer l'impact de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs dans la CNB. A la date de rédaction du présent mémoire, cette méthode indirecte ne paraît pas encore envisageable. Il n'est donc pas possible de s'affranchir de mesures objectives de la performance. Les mesures subjectives sont écartées car elles sont fortement affaiblies par la partialité des sujets (Clements-Croome, 2000). Cependant elles peuvent servir à compléter l'approche objective mais ne sont pas utilisées seules.

Le principal inconvénient des mesures objectives réside dans leur représentativité d'un travail réel. Même si les tâches présentées dans le paragraphe 2.1 peuvent paraître peu représentatives d'un travail réel, il est généralement admis que si celles-ci sont affectées par un environnement intérieur de mauvaise qualité, de fortes chances existent pour que le travail quotidien le soit également (Toftum *et al.*, 2005).

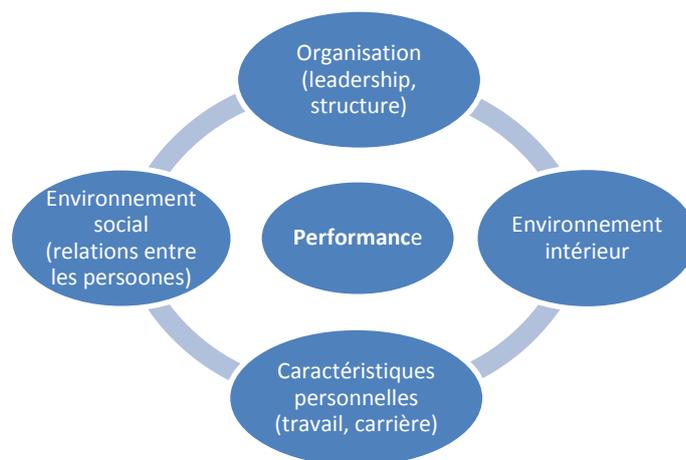
D'un côté pratique, selon ces auteurs, les tests de performance doivent être réalisés dans la mesure du possible l'après-midi pour s'assurer que les occupants aient été exposés aux conditions environnementales pendant plusieurs heures durant la matinée.

Selon Liebl *et al.* (2012), les effets des différents paramètres de l'environnement intérieur dépendent de la tâche à exécuter. L'impact d'un bruit (de voix par exemple) sur la performance est complètement différent selon que la tâche se réfère à un travail individuel sur ordinateur ou à de la communication orale entre différentes personnes. Dans ce dernier cas, il est essentiel de pouvoir clairement comprendre ce que les autres participants ont à dire. Au contraire, dans le premier cas, c'est l'exact opposé qui est désiré : la non-compréhension du bruit de voix permet de mieux se concentrer sur son propre travail informatique. Il serait ainsi intéressant de disposer d'un ensemble de tests de performance afin de balayer différentes tâches, et donc divers impacts environnementaux.

### B) *Limites de la méthode*

Des tests de performance existant dans la littérature, cette méthode paraît réaliste et faisable. Cependant celle-ci présente une limite majeure. En effet, la performance individuelle est affectée par **l'environnement de travail au sens large**. Il comprend non seulement l'environnement intérieur mais également d'autres facteurs comme la

motivation personnelle, le stress et les capacités à réaliser le travail demandé (Figure 11). En général, les emplois où il existe de nombreux ou d'intenses facteurs de stress sont reliés à de faibles satisfactions de la part des employés (Mansell *et al.*, 2006). Les occupants des bureaux avec une faible satisfaction au travail et un bien-être psycho-social sont plus susceptibles d'être absents de leur poste (Hardy *et al.*, 2003). Ainsi, les aspects psycho-sociaux et l'influence de l'environnement intérieur par les occupants semblent être d'égale importance (Wargocki *et al.*, 2006). D'après ces auteurs, les effets de l'environnement intérieur sur la performance peuvent être étudiés seulement si les autres facteurs influant la performance restent inchangés.



**Figure 11 : Facteurs pouvant affecter la performance au travail, adapté de Clements-Croome (2000)**

### C) Solutions proposées

Afin de pouvoir évaluer l'impact de l'environnement intérieur sur la performance dans les bureaux, il est essentiel de s'affranchir des facteurs de confusion tels que les aspects psycho-sociaux qui peuvent également jouer sur la performance. Ainsi, la méthode n°2 devrait prendre en compte des tests de performance objectifs mais également des questionnaires pour quantifier les aspects psycho-sociaux. Ils pourraient permettre de juger la part réellement attribuable à l'environnement intérieur dans l'évaluation de la performance.

### 4.3 Validation de la méthode sélectionnée

A la date de rédaction du présent mémoire, la méthode la plus envisageable pour évaluer l'impact de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs dans les bureaux lors de la CNB est la méthode n°2. En effet, la méthode n°1 nécessite encore un important travail de recherche. Les deux principales composantes de cette évaluation seraient :

- Des mesures de la performance grâce à des tests objectifs ;
- Des questionnaires permettant de juger l'environnement psycho-social.

Cette méthode a été confrontée à celle prévue dans le projet OFFICAIR<sup>22</sup>. Ce projet, réalisé en synergie avec la CNB de l'OQAI, est soutenu par la Commission Européenne et mené dans 13 pays européens dont la France. Il vise à documenter la QAI et le confort dans les immeubles récents en Europe.

La démarche retenue pour le projet OFFICAIR comprend également la prise en compte de l'environnement psycho-social (Edwards *et al.*, 2001). Elle permet donc de conforter les choix proposés pour la seconde phase de la CNB.

Des tests de mémoire et de réactivité réalisés sur ordinateur sont les tests de performance sélectionnés. Le test de réactivité est semblable à celui décrit dans le Tableau 2. Le test de mémoire se décompose en trois phases :

- Une liste de 20 mots apparaît sur l'écran. A la fin de la liste, les participants écrivent autant de mots que possible (Test de mémoire immédiate)
- A la fin de la session globale de test, les participants ont un temps illimité pour écrire à nouveau autant de mots que possible de la liste lors du test de mémoire immédiate (Test de mémoire à long terme)
- Toujours à la fin de la session globale de test, les participants doivent sélectionner parmi 40 mots les 20 mots de la liste du test de mémoire immédiate (Test de mémoire sélective).

L'Annexe 5 propose une illustration de ces tests de performance dans le cadre d'OFFICAIR.

Puis, l'environnement psycho-social est évalué par l'intermédiaire de questionnaires anonymes. Des extraits de ceux-ci sont exposés en Annexe 6. Ces questionnaires font partie d'un ensemble de questions traitant notamment d'informations personnelles (âge, sexe, habitudes de vie) et sur le travail (type, horaires, tâches) ainsi que d'un historique médical. Le temps de remplissage de l'intégralité du questionnaire est estimé à 50 minutes.

Pendant la réalisation de ce mémoire, une visite de terrain a été effectuée dans un des immeubles, se situant dans la région parisienne, expérimenté dans le cadre de la campagne OFFICAIR.

Avec un taux de réponse du test réalisé lors de la visite de 24 % (11 répondants sur 45 sollicités), les observations suivantes ont pu être effectuées :

- ✓ Les participants ne sont pas réticents à effectuer les tests de performance, au contraire, ceux-ci sont plutôt ludiques.
- ✓ Le principal problème réside dans les questionnaires. Ceux-ci sont jugés trop

---

<sup>22</sup> <http://www.officair-project.eu/> (version du 11/07/2012).

longs et parfois intrusifs. Or, si le questionnaire n'est pas rempli jusqu'au bout les résultats ne sont pas traités.

La comparaison de la méthode proposée avec celle adoptée par le projet européen OFFICAIR a permis de valider les choix envisagés pour l'évaluation de l'impact de l'environnement intérieur lors de la seconde phase de la CNB par l'OQAI. De plus, une visite sur le terrain a permis de dégager des pistes d'amélioration. Il sera en effet nécessaire, pour rendre réalisable le déroulement complet des questionnaires sur l'environnement psycho-social, de proposer une durée inférieure à ceux d'OFFICAIR.

#### **4.4 Transposition au cas français des analyses coûts-bénéfices réalisées dans d'autres pays**

##### *A) Données nécessaires*

Les analyses coûts-bénéfices réalisées dans d'autres pays démontrent l'évidence que des interventions en matière d'améliorations de la QEI peuvent prévenir des symptômes de type SBM et l'absentéisme chez des millions de travailleurs américains. Elles peuvent également améliorer leur performance. De plus, elles représentent un outil très performant d'aide à la décision.

D'après la méthode exposée dans le paragraphe 2.3, les données nécessaires pour effectuer ce type d'étude au sein des bureaux français sont les suivantes :

- ✓ Débits d'air neuf ;
- ✓ Température de l'air ambiant ;
- ✓ Taux de prévalence des symptômes de type SBM ;
- ✓ Taux d'absentéisme ;
- ✓ Coût horaire du travail français.

Or, les mesures de ces quatre premiers paramètres sont d'ores et déjà prévues dans les protocoles de la CNB (Parat *et al.*, 2009). Du fait des caractéristiques de l'étude BASE qui a servi de support pour ces données américaines (nombre de bureaux, temps et protocoles d'analyses), il est légitime de penser que les données françaises issues de la CNB seraient utilisables pour mener une étude avec cette même méthode. Le coût horaire du travail français est une donnée régulièrement manipulée pour des économistes. De plus, les principaux points faibles énoncés dans le paragraphe 3.5 ne sont pas liés à la méthode développée par les auteurs de ces analyses coûts-bénéfices.

Les données de base étant disponibles et la méthode validée, il est donc envisageable de considérer que les travaux d'évaluations économiques, menés dans d'autres pays, liés à l'augmentation de performance qui découlent d'une meilleure QEI peuvent être conduits en France.

Il est important de garder à l'esprit que les analyses coûts-bénéfices permettent uniquement de comparer différents scénarii d'amélioration de la QEI et, pour les décideurs, d'identifier le projet qui aura le plus de bénéfices au moindre coût. Contrairement aux symptômes de type SBM et à l'absentéisme auxquels des coûts directement liés à l'intervention des systèmes de santé ou au nombre d'heures de travail non travaillées peuvent être attribués, il n'est pas possible de faire ce parallèle pour la performance. En effet, le seul coût attribuable serait celui d'un changement, la performance elle-même ne peut être monétisée. Celle-ci ne génère pas de coût, c'est le différentiel entre une performance de référence et une performance calculée qui exprime un coût.

#### *B) Améliorations à apporter*

Différents points de discussion ont été abordés tout au long de cette partie et il est nécessaire de les prendre en compte. Tout d'abord, d'après le paragraphe 3.5, dans les travaux de Fisk *et al.* (2011), une somme a été calculée par scénario en fonction des différents impacts étudiés. Or, les bénéfices liés à la performance, aux symptômes de type SBM et à l'absentéisme au travail peuvent être additionnés mais avec précaution. Il est donc essentiel d'être prudent sur la présentation des résultats.

D'autre part, les relations quantitatives à la base de ces analyses coûts-bénéfices présentent certaines limites et incertitudes qu'il faut discuter (paragraphe 3.3). L'adaptabilité de ces relations à un environnement de bureau réel et la variabilité des méthodes de mesure des paramètres environnementaux sont notamment des points critiques.

Enfin, le paragraphe 3.1 a mis en évidence qu'il était nécessaire d'utiliser d'autres critères de confort tel le PMV, au lieu de la température, pour définir les conditions thermiques d'une performance optimale. Une relation quantitative entre la performance et le PMV a d'ailleurs été présentée (Equation 6). Le calcul du PMV étant déjà prévu dans les protocoles de la CNB (Parat *et al.*, 2009), il serait préférable d'utiliser des scénarii mettant en jeu ce paramètre plutôt que la température, ou du moins en complément.

## **5 Conclusion**

La présente étude a permis de synthétiser les données de la littérature relatives à l'évaluation de l'impact de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs des bureaux. Il apparaît que les liens entre les paramètres de l'environnement intérieur et la performance n'ont pas tous été étudiés avec la même précision. Ainsi, pour la température ou le débit d'air neuf, des relations quantitatives ont pu être établies avec la performance. Au contraire, en ce qui concerne l'impact des ambiances sonores et lumineuses sur la performance, les paramètres jouant sur la performance ne sont même

pas encore clairement définis. De plus, la méthode et les résultats des études d'évaluation économique, menées dans d'autres pays, relatives à l'augmentation de performance qui découle d'une meilleure QEI, ont été exposés. Un accent a été porté sur la mise en évidence des données de base qui serviraient à reconduire ce genre d'études appliquées au cas du parc de bureaux français.

Après avoir exposé les limites des différents outils, deux méthodes d'évaluation de l'impact de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs pour la CNB de l'OQAI ont été proposées. La première, réellement novatrice, permettant de s'affranchir de mesures de la performance en la déduisant à partir des paramètres de l'environnement intérieur, nécessite toutefois encore un important travail de recherche en amont. La seconde, plus traditionnelle, se basant sur des tests de performance objectifs, permet de répondre concrètement à l'objectif annoncé. Cependant, afin de pouvoir quantifier la part réellement attribuable à l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs, ces tests de performance doivent être couplés à des questionnaires relatifs à l'environnement psycho-social. Un des enjeux de la CNB sera alors de proposer des questionnaires dont la durée ne dissuade pas les participants de les remplir.

Enfin, l'analyse des données de base et de la méthode utilisée a permis de conclure que les travaux d'évaluations économiques, menés dans d'autres pays, pourraient être conduits en France. Cependant, de par les incertitudes liées à ces analyses, une prudence particulière devra être portée lors de la présentation et l'interprétation des résultats. De plus, une alternative a été envisagée. Afin de mieux appréhender la notion de confort thermique, l'utilisation de l'indice PMV sera préférée à la température dans la définition des scénarii d'amélioration de la QEI.

## Conclusion générale

A ce jour, en France, il existe peu d'informations publiées sur la QAI des immeubles de bureaux ainsi que le confort perçu et la santé des personnes qui y travaillent. Or, en termes de pollutions chimique, physique et biologique, des spécificités propres à ces environnements intérieurs peuvent exister. De plus, pour une part importante de la population active, le temps passé y est important. Enfin, la QAI peut avoir un impact sur la santé et les performances des occupants. C'est pourquoi l'OQAI lance une campagne nationale dans les bureaux français afin d'apporter des connaissances utiles à l'évaluation et la gestion des risques sanitaires liés à ces environnements. Dans le but de préparer la seconde phase de cette campagne en adéquation avec les problématiques actuelles et émergentes de la QAI, une phase de réflexion a été menée. Celle-ci s'est articulée autour de deux thématiques principales : la pertinence de la mesure des COSV et l'évaluation de l'impact de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs.

Une synthèse bibliographique a permis d'identifier les COSV présents dans les bureaux ainsi que leur niveau de concentration. Ces niveaux sont très variables entre les 130 COSV relevés et entre les pays. Un calcul de doses d'exposition par inhalation et ingestion a montré que l'exposition globale à un mélange de COSV dans les bureaux était comparable à celle de ce même mélange dans les logements. Ainsi les COSV semblent être des paramètres pertinents pour la seconde phase de la CNB de l'OQAI. De plus l'étude menée a permis de définir les composés à mesurer parmi les différentes familles chimiques de COSV en fonction des objectifs souhaités.

De même, un état des lieux des liens entre les paramètres de l'environnement intérieur et la performance a été effectué grâce à une revue de la littérature. Globalement, lorsque les occupants sont distraits par un environnement qu'ils jugent inconfortable, leur performance en est diminuée. Il ressort également que la QEI est le résultat d'un grand nombre de composantes, dont les effets simultanés sont mal connus, et qu'il est par conséquent ardu d'en évaluer l'influence sur la performance. D'autre part, cette dernière, contrairement à la productivité, est une notion difficilement mesurable avec certitude car elle se réfère à la quantité et/ou la qualité du travail produit. Toutefois, deux méthodes d'évaluation de l'impact de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs des bureaux ont pu être proposées. Même si l'une, pourtant novatrice, nécessite encore un important travail de recherche en amont, l'autre, plus traditionnelle, permet de fournir une réponse réaliste à l'objectif annoncé.

Plusieurs éléments relatifs aux deux thématiques étudiées méritent d'être poursuivis et améliorés. Afin d'affiner les conclusions énoncées quant au calcul de doses d'exposition d'un même mélange de COSV dans les bureaux et les logements, il pourrait être envisageable de reproduire ce calcul en prenant en compte la voie cutanée. D'autre part, afin d'avoir une vue complète sur le sujet, les données de concentration de la littérature relevées dans les bureaux pourraient être croisées et mises en perspective avec la toxicité des composés. Il est cependant probable que pour ces composés dits émergents, les valeurs toxicologiques ne soient, à ce jour, que parcellaires.

Cette étude a permis de se rendre compte que les travaux d'évaluations économiques relatifs à l'augmentation de performance qui découle d'une meilleure QEI, menés dans d'autres pays, pourraient être conduits en France à l'issue de la CNB. Ces évaluations économiques sont un outil particulièrement intéressant pour les décideurs en matière de santé publique car elles sont capables de déterminer, parmi différents projets d'amélioration de la QEI, celui qui aura le plus de bénéfices au moindre coût. Ces analyses coûts-bénéfices permettent d'identifier quels sont les leviers à actionner afin que les employés de bureau travaillent dans un environnement intérieur de meilleure qualité. De plus, une alternative à l'utilisation de la température a été proposée dans la définition des scénarii d'amélioration de la QEI dans le but de mieux appréhender la notion de confort thermique. D'autre part, pour pouvoir utiliser la méthode d'évaluation de l'impact de la QEI sur la performance qui permet de s'affranchir des mesures de la performance, une veille bibliographique sur cette thématique doit être poursuivie à la suite de ce mémoire.

En prenant en compte les COSV, polluants émergents, et en évaluant l'impact de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs des bureaux grâce à la méthode proposée, la CNB de l'OQAI, innovante et ambitieuse, fournira un référentiel le plus complet possible sur l'état du parc de bureaux français.

---

## Bibliographie

---

- Abdallah, M. A.-E. and S. Harrad (2009). "Personal exposure to HBCDs and its degradation products via ingestion of indoor dust." Environment International **35**(6): 870-876.
- NF EN ISO 7730.(2006) Ergonomie des ambiances thermiques. Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local.AFNOR
- Ali, N., A. C. Dirtu, *et al.* (2012). "Occurrence of alternative flame retardants in indoor dust from New Zealand: Indoor sources and human exposure assessment." Chemosphere(0).
- Ali, N., S. Harrad, *et al.* (2011). "'Novel' brominated flame retardants in Belgian and UK indoor dust: Implications for human exposure." Chemosphere **83**(10): 1360-1365.
- Aries, M. B. C., J. A. Veitch, *et al.* (2010). "Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort." Journal of Environmental Psychology **30**(4): 533-541.
- ASHRAE Standard 62-2007.(2007) Ventilation for acceptable indoor air quality.ASHRAE
- Bakó-Biró, Z., D. J. Clements-Croome, *et al.* (2012). "Ventilation rates in schools and pupils' performance." Building and Environment **48**(0): 215-223.
- Bakó-Biró, Z., P. Wargocki, *et al.* (2004). "Effects of pollution from personal computers on perceived air quality, SBS symptoms and productivity in offices." Indoor Air **14**(3): 178-187.
- Baron, R. A., M. S. Rea, *et al.* (1992). "Effects of indoor lighting (illuminance and spectral distribution) on the performance of cognitive tasks and interpersonal behaviors: The potential mediating role of positive affect." Motivation and Emotion **16**(1): 1-33.
- Batterman, S., C. Godwin, *et al.* (2010). "Brominated flame retardants in offices in Michigan, U.S.A." Environment International **36**(6): 548-556.
- Bergh, C., R. Torgrip, *et al.* (2011). "Organophosphate and phthalate esters in air and settled dust – a multi-location indoor study." Indoor Air **21**(1): 67-76.
- Besis, A. and C. Samara (2012). "Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the indoor and outdoor environments – A review on occurrence and human exposure." Environmental Pollution(0).
- Björklund, J. A., K. Thuresson, *et al.* (2012). "Indoor Air Is a Significant Source of Tri-decabrominated Diphenyl Ethers to Outdoor Air via Ventilation Systems." Environmental Science & Technology **46**(11): 5876-5884.
- Björklund, J. A., K. Thuresson, *et al.* (2009). "Perfluoroalkyl Compounds (PFCs) in Indoor Dust: Concentrations, Human Exposure Estimates, and Sources." Environmental Science & Technology **43**(7): 2276-2281.
- Blanchard, O., P. Glorennec, *et al.* (2012). Projet ECOS-PER, Rapport final pour l'Anses, Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique et Centre Scientifique et Technique du Bâtiment: 92 pages avec annexes.
- Bonvallot, N., C. Mandin, *et al.* (2010). "Health ranking of ingested semi-volatile organic compounds in house dust: an application to France." Indoor Air **20**(6): 458-472.
- Cao, B., Q. Ouyang, *et al.* (2012). "Development of a multivariate regression model for overall satisfaction in public buildings based on field studies in Beijing and Shanghai." Building and Environment **47**(0): 394-399.

- Caroline Marchand, Adeline Floch-Barneaud, *et al.* (2012). Development of air and dust sampling methods for quantitative measurements of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in offices. Healthy Buildings.
- Chung, T. M. and J. Burnett (2000). "Lighting Quality Surveys in Office Premises." Indoor and Built Environment **9**(6): 335-341.
- Clausen, G. and D. P. Wyon (2005). "The combined effects of many different indoor environmental factors on acceptability and office work performance." HVAC&R Research **14**(1): 103-113.
- Clements-Croome, D. J. (2000). Creating the productive workplace. London/New York, E&FN Spon, Taylor&Francis Group.
- Colle, H. A. and A. Welsh (1976). "Acoustic masking in primary memory." Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior **15**(1): 17-31.
- .(1998) Ventilation for Buildings: Design Criteria for the Indoor Environment. CR, C.
- Cunha, S. C., K. Kalachova, *et al.* (2010). "Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) contents in house and car dust of Portugal by pressurized liquid extraction (PLE) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)." Chemosphere **78**(10): 1263-1271.
- D'Hollander, W., L. Roosens, *et al.* (2010). "Brominated flame retardants and perfluorinated compounds in indoor dust from homes and offices in Flanders, Belgium." Chemosphere **81**(4): 478-487.
- Delgado-Saborit, J. M., C. Stark, *et al.* (2011). "Carcinogenic potential, levels and sources of polycyclic aromatic hydrocarbon mixtures in indoor and outdoor environments and their implications for air quality standards." Environment International **37**(2): 383-392.
- Destailats, H., R. L. Maddalena, *et al.* (2008). "Indoor pollutants emitted by office equipment: A review of reported data and information needs." Atmospheric Environment **42**(7): 1371-1388.
- Edwards, R. D., J. Jurvelin, *et al.* (2001). "VOC concentrations measured in personal samples and residential indoor, outdoor and workplace microenvironments in EXPOLIS-Helsinki, Finland." Atmospheric Environment **35**(27): 4531-4543.
- Fanger, P. O. (1970). Thermal comfort. Copenhagen, Danish Technical Press.
- Federspiel, C. C., W. J. Fisk, *et al.* (2004). "Worker performance and ventilation in a call center: analyses of work performance data for registered nurses." Indoor Air **14**: 41-50.
- Federspiel, C. C., G. Liu, *et al.* (2002). Worker performance and ventilation: analyses of individual data for call-center workers. Indoor Air.
- Fisk, W. J. (2000a). "Health and productivity gains from better indoor environments and their relationships with building energy efficiency." Annual Review of Energy and the Environment **25**: 537-566.
- Fisk, W. J. (2000b). Review of health and productivity gains from better IEQ. Proceedings of Healthy buildings. **4**.
- Fisk, W. J., D. Black, *et al.* (2011). "Benefits and costs of improved IEQ in U.S. offices." Indoor Air **21**: 357-367.
- Fisk, W. J., D. Black, *et al.* (2012). "Changing ventilation rates in U.S. offices: Implications for health, work performance, energy, and associated economics." Building and Environment **47**(0): 368-372.
- Fisk, W. J., A. G. Mirer, *et al.* (2009). "Quantitative relationship of sick building syndrome symptoms with ventilation rates." Indoor Air **19**(2): 159-165.
- Fraser, A. J., T. F. Webster, *et al.* (2011). "Polyfluorinated Compounds in Serum Linked to Indoor Air in Office Environments." Environmental Science & Technology **46**(2): 1209-

1215.

- Fromme, H., W. Körner, *et al.* (2009). "Human exposure to polybrominated diphenyl ethers (PBDE), as evidenced by data from a duplicate diet study, indoor air, house dust, and biomonitoring in Germany." Environment International **35**(8): 1125-1135.
- Fromme, H., T. Lahrz, *et al.* (2004). "Polycyclic aromatic hydrocarbons inside and outside of apartments in an urban area." Science of The Total Environment **326**(1–3): 143-149.
- Frontczak, M. and P. Wargocki (2010). "Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments." Building and Environment **46**(4): 922-937.
- Goosey, E. and S. Harrad (2011). "Perfluoroalkyl compounds in dust from Asian, Australian, European, and North American homes and UK cars, classrooms, and offices." Environment International **37**(1): 86-92.
- Goosey, E. and S. Harrad (2012). "Perfluoroalkyl substances in UK indoor and outdoor air: Spatial and seasonal variation, and implications for human exposure." Environment International **45**(0): 86-90.
- Griffith, B., N. Long, *et al.* (2008). Methodology for modeling building energy performance across the commercial sector: Medium: ED; Size: 161 pp.
- Haapakangas, A., M. Haka, *et al.* (2008a). Effect of speech intelligibility on task performance - an experimental laboratory study. International Congress on Noise as a Public Health Problem.
- Haapakangas, A., R. Helenius, *et al.* (2008b). Perceived acoustic environment, work performance and well-being - survey results from Finnish offices. International Congress on Noise as a Public Health Problem.
- Hardy, G. E., D. Woods, *et al.* (2003). "The impact of psychological distress on absence from work." J Appl Psychol **88**(2): 306-314.
- Harrad, S., C. Ibarra, *et al.* (2008). "Concentrations of brominated flame retardants in dust from United Kingdom cars, homes, and offices: Causes of variability and implications for human exposure." Environment International **34**(8): 1170-1175.
- Harrad, S., C. Ibarra, *et al.* (2009). "Polychlorinated biphenyls in domestic dust from Canada, New Zealand, United Kingdom and United States: Implications for human exposure." Chemosphere **76**(2): 232-238.
- Haug, L. S., S. Huber, *et al.* (2011). "Investigation on Per- and Polyfluorinated Compounds in Paired Samples of House Dust and Indoor Air from Norwegian Homes." Environmental Science & Technology **45**(19): 7991-7998.
- Hongisto, V. (2007). Office noise and work performance. Proceedings of Clima WellBeing Indoors.
- Hsu, N. Y., C. C. Lee, *et al.* (2012). "Predicted risk of childhood allergy, asthma, and reported symptoms using measured phthalate exposure in dust and urine." Indoor Air **22**(3): 186-199.
- Huang, Y., L. Chen, *et al.* (2010). "PBDEs in indoor dust in South-Central China: Characteristics and implications." Chemosphere **78**(2): 169-174.
- Huber, S., L. S. Haug, *et al.* (2011). "Per- and polyfluorinated compounds in house dust and indoor air from northern Norway – A pilot study." Chemosphere **84**(11): 1686-1693.
- Humphreys (2005). "Quantifying occupant comfort : are combined indices of the indoor environment practicable ? ." Building Research and Information **33**: 317-325.
- Hygge, S. (1992). Heat and performance. H. o. H. Performance. San Diego, Academic Press. 1.
- Jensen, K. L., J. Toftum, *et al.* (2009). "A Bayesian Network approach to the evaluation of building design and its consequences for employee performance and operational

- costs." Building and Environment **44**(3): 456-462.
- Jin, Q., M. Overend, *et al.* (2012). "Towards productivity indicators for performance-based façade design in commercial buildings." Building and Environment **57**(0): 271-281.
- Jogsten, I., M. Nadal, *et al.* (2012). "Per- and polyfluorinated compounds (PFCs) in house dust and indoor air in Catalonia, Spain: Implications for human exposure." Environment International **39**(1): 172-180.
- Johnson, P. I., H. M. Stapleton, *et al.* (2010). "Relationships between Polybrominated Diphenyl Ether Concentrations in House Dust and Serum." Environmental Science & Technology **44**(14): 5627-5632.
- Jones-Otazo, H. A., J. P. Clarke, *et al.* (2005). "Is House Dust the Missing Exposure Pathway for PBDEs? An Analysis of the Urban Fate and Human Exposure to PBDEs." Environmental Science & Technology **39**(14): 5121-5130.
- Julander, A., H. Westberg, *et al.* (2005). "Distribution of brominated flame retardants in different dust fractions in air from an electronics recycling facility." Science of The Total Environment **350**(1-3): 151-160.
- Kaarlela-Tuomaala, A., R. Helenius, *et al.* (2009). "Effects of acoustic environment on work in private office rooms and open-plan offices - longitudinal study during relocation." Ergonomics **52**(11): 1423-1444.
- Kaczmarczyk, J., A. Melikov, *et al.* (2004). "Human response to personalized ventilation and mixing ventilation." Indoor Air **14**: 17-29.
- Kanazawa, A., I. Saito, *et al.* (2010). "Association between indoor exposure to semi-volatile organic compounds and building-related symptoms among the occupants of residential dwellings." Indoor Air **20**(1): 72-84.
- Kang, Y., K. C. Cheung, *et al.* (2010). "Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in different indoor dusts and their potential cytotoxicity based on two human cell lines." Environment International **36**(6): 542-547.
- Knobeloch, L., M. Turyk, *et al.* (2012). "Polychlorinated biphenyls in vacuum dust and blood of residents in 20 Wisconsin households." Chemosphere **86**(7): 735-740.
- Kopp, E. K., H. Fromme, *et al.* (2012). "Analysis of common and emerging brominated flame retardants in house dust using ultrasonic assisted solvent extraction and on-line sample preparation via column switching with liquid chromatography–mass spectrometry." Journal of Chromatography A **1241**(0): 28-36.
- Kosonen, R. and F. Tan (2004). "Assessment of productivity loss in air-conditioned buildings using PMV index." Energy and Buildings **36**(10): 987-993.
- Lagercrantz, L., M. Wistrand, *et al.* (2000). Negative impact of air pollution on productivity : previous Danish findings repeated in new Swedish test. Proceedings of Healthy Buildings.
- Lai, A. C. K., K. W. Mui, *et al.* (2009). "An evaluation model for indoor environmental quality (IEQ) acceptance in residential buildings." Energy and Buildings **41**(9): 930-936.
- Lan, L., Z. Lian, *et al.* (2010). "The effects of air temperature on office workers' well-being, workload and productivity-evaluated with subjective ratings." Applied Ergonomics **42**(1): 29-36.
- Lan, L., P. Wargocki, *et al.* (2011). "Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort." Energy and Buildings **43**(5): 1057-1062.
- Langer, S., C. J. Weschler, *et al.* (2010). "Phthalate and PAH concentrations in dust collected from Danish homes and daycare centers." Atmospheric Environment **44**(19): 2294-2301.
- Liebl, A., J. Haller, *et al.* (2012). "Combined effects of acoustic and visual distraction on

- cognitive performance and well-being." Applied Ergonomics **43**(2): 424-434.
- Lin, L. C., S. L. Wang, *et al.* (2011). "Associations between maternal phthalate exposure and cord sex hormones in human infants." Chemosphere **83**(8): 1192-1199.
- Link, J. and P. R. (1970). "Associated fluctuations in daily temperature, productivity and absenteeism." ASHRAE Transactions **Vol 76**(Part II): 326-337.
- Loveday, D., V. I. Hanby, *et al.* (1995). A software tool for relating the comfort and productivity of occupants in commercial buildings. Proceedings of CIBSE National Conference.
- Main, K. M., G. K. Mortensen, *et al.* (2006). "Human Breast Milk Contamination with Phthalates and Alterations of Endogenous Reproductive Hormones in Infants Three Months of Age." Environ Health Perspect **114**(2).
- Mak, C. M. and Y. P. Lui (2011). "The effect of sound on office productivity." Building Services Engineering Research and Technology.
- Mansell, A., P. Brough, *et al.* (2006). "Stable predictors of job satisfaction, psychological strain, and employee retention: An evaluation of organizational change within the New Zealand Customs Service." International Journal of Stress Management **13**(1): 84-107.
- Martinez-Moral, M. P. and M. T. Tena (2012). "Focused ultrasound solid-liquid extraction and gas chromatography tandem mass spectrometry determination of brominated flame retardants in indoor dust." Anal Bioanal Chem **404**(2): 289-295.
- Melzer, Neil Rice, *et al.* (2010). "Association between Serum Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Thyroid Disease in the U.S. National Health and Nutrition Examination Survey." Environ Health Perspect **118**(5): 686–692.
- Mendell, M. J. and A. G. Mirer (2009). "Indoor thermal factors and symptoms in office workers: findings from the US EPA BASE study." Indoor Air **19**(4): 291-302.
- Mills lii, S. A., D. I. Thal, *et al.* (2007). "A summary of the 209 PCB congener nomenclature." Chemosphere **68**(9): 1603-1612.
- Milton, D. K., P. M. Glencross, *et al.* (2000). "Risk of sick leave associated with outdoor air supply rate, humidification, and occupant complaints." Indoor Air **10**(4): 212-221.
- Ncube, M. and S. Riffat (2012). "Developing an indoor environment quality tool for assessment of mechanically ventilated office buildings in the UK - A preliminary study." Building and Environment **53**(0): 26-33.
- Newsham, G., J. Brand, *et al.* (2009). "Linking indoor environment conditions to job satisfaction: a field study." Building Research and Information **37**(2): 129-147.
- Ni, H.-G., S.-P. Cao, *et al.* (2011). "Incidence of polybrominated diphenyl ethers in central air conditioner filter dust from a new office building." Environmental Pollution **159**(7): 1957-1962.
- Niemelä, R., M. Hannula, *et al.* (2002). "The effect of air temperature on labour productivity in call centres—a case study." Energy and Buildings **34**(8): 759-764.
- Niemelä, R., J. Railio, *et al.* (2001). Assessing the effect of indoor environment on productivity. Proceedings of Clima, Napoli.
- Parat, S. and S. Kirchner (2009). Qualité de l'air intérieur, santé & confort et performance énergétique dans les immeubles de bureaux en France, Etude de cadrage de la campagne nationale, Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur: 1-98.
- Perdrix, A., S. Parat, *et al.* (2005). "Syndrome Des Bâtiments Malsains (SBM)." Revue Francophone des Laboratoires **2005**(373): 67-72.
- Persily, A. K. and J. Gorfain (2008). Analysis of ventilation data from the U.S. Environmental Protection Agency Building Assessment Survey and Evaluation (BASE) study.,

- National Institute of Standards and Technology (NIST): 122 p.
- Rashid, M. and C. Zimring (2008). "A Review of the Empirical Literature on the Relationships Between Indoor Environment and Stress in Health Care and Office Settings." Environment and Behavior **40**(2): 151-190.
- Ren, Y., T. Cheng, *et al.* (2006). "Polycyclic aromatic hydrocarbons in dust from computers: one possible indoor source of human exposure." Atmospheric Environment **40**(36): 6956-6965.
- Roelofsen, P. (2001). The design of the workplace as a strategy for productivity enhancement Proceedings of Clima. Napoli.
- Roosens, L., C. Cornelis, *et al.* (2010). "Exposure of the Flemish population to brominated flame retardants: Model and risk assessment." Environment International **36**(4): 368-376.
- Schlittmeier, S. J., J. Hellbrück, *et al.* (2008). "The impact of background speech varying in intelligibility: Effects on cognitive performance and perceived disturbance." Ergonomics **51**(5): 719-736.
- Seppänen, O., W. J. Fisk, *et al.* (2006a) "Effect of temperature on task performance in office environment." Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Seppänen, O., W. J. Fisk, *et al.* (2006b). "Ventilation and performance in office work." Indoor Air **16**(1): 28-36.
- Seppänen, O. A. and W. J. Fisk (2004). "Summary of human responses to ventilation." Indoor Air **14**: 102-118.
- Seppänen, O. A., W. J. Fisk, *et al.* (1999). "Association of ventilation rates and CO<sub>2</sub> concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings." Indoor Air **9**(4): 226-252.
- Shoeib, M., T. Harner, *et al.* (2011). "Indoor Sources of Poly- and Perfluorinated Compounds (PFCS) in Vancouver, Canada: Implications for Human Exposure." Environmental Science & Technology **45**(19): 7999-8005.
- Singh, A. and M. Syal (2011). "Costs and benefits of IEQ improvements in LEED office buildings." Journal of Infrastructure **17**(2).
- Smolders, K. C. H. J., Y. A. W. d. Kort, *et al.* (2012). "A higher illuminance induces alertness even during office hours: Findings on subjective measures, task performance and heart rate measures." Physiology & Behavior **107**(1): 7-16.
- Tanabe, Haned, *et al.* (2007). "Indoor Environmental Quality and Productivity." REHVA Journal
- Tanguy, J. (2007). "Description du poids corporel en fonction du sexe et de l'âge dans la population française." Environnement, Risques & Santé **6**(3): 179-187.
- Tham, K. W. (2004). "Effects of temperature and outdoor air supply rate on the performance of call center operators in the tropics." Indoor Air **14**: 119-125.
- Tham, K. W. and H. Willem (2004). Effects of neurobehavioral symptoms on call center operator performance in the tropics. Proceedings of RoomVent, Portugal.
- Tham, K. W., H. Willem, *et al.* (2003). Temperature and ventilation effects on the work performance of office workers (study of a call centre in the tropics). Healthy Buildings.
- Thuresson, K., J. A. Björklund, *et al.* (2012). "Tri-decabrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecane in indoor air and dust from Stockholm microenvironments 1: Levels and profiles." Science of The Total Environment **414**(0): 713-721.
- Toftum, J. and D. P. Wyon (2005). Remote Performance Test (RPM) - a new internet-based method for the measurement of occupant performance in office buildings Indoor Air, Beijing.

- Toms, L.-M. L., M. E. Bartkow, *et al.* (2009). "Assessment of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in samples collected from indoor environments in South East Queensland, Australia." Chemosphere **76**(2): 173-178.
- USEPA (2011). Exposure factors handbook. N. C. f. E. Assessment. Washington, DC.
- Venetjoki, N., A. Kaarlela-Tuomaala, *et al.* (2006). "The effect of speech and speech intelligibility on task performance." Ergonomics **49**(11): 1068-1091.
- Wang, J., M. Burris, *et al.* (2011). A pilot study on the effects of ventilation rate on creativity performance. Indoor Air. Austin, Texas.
- Ward, M. H., J. S. Colt, *et al.* (2009). "Residential Exposure to Polychlorinated Biphenyls and Organochlorine Pesticides and Risk of Childhood Leukemia." Environ Health Perspect **117**(6).
- Wargocki, P., L. Lagercrantz, *et al.* (2002). "Subjective perceptions, symptom intensity and performance: a comparison of two independent studies, both changing similarly the pollution load in an office." Indoor Air **12**(2): 74-80.
- Wargocki, P., O. Seppänen, *et al.* (2006). Indoor Climate and Productivity in Offices, How to integrate productivity in life-cost analysis of building services
- Wargocki, P., D. P. Wyon, *et al.* (1999). "Perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads." Indoor Air **9**(3): 165-179.
- Wargocki, P., D. P. Wyon, *et al.* (2000a). Productivity is affected by the air quality in offices. Proceedings of Healthy Buildings.
- Wargocki, P., D. P. Wyon, *et al.* (2004). "The performance and subjective responses of call-center operators with new and used supply air filters at two outdoor air supply rates." Indoor Air **14 Suppl 8**: 7-16.
- Wargocki, P., D. P. Wyon, *et al.* (2000b). "The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, Sick Building Syndrome (SBS) symptoms and productivity." Indoor Air **10**(4): 222-236.
- Watkins, D. J., M. D. McClean, *et al.* (2011). "Exposure to PBDEs in the office environment: evaluating the relationships between dust, handwipes, and serum." Environ Health Perspect **119**(9): 1247-1252.
- Wensing, M., E. Uhde, *et al.* (2005). "Plastics additives in the indoor environment—flame retardants and plasticizers." Science of The Total Environment **339**(1–3): 19-40.
- Weschler, C. J. (2009). "Changes in indoor pollutants since the 1950s." Atmospheric Environment **43**(1): 153-169.
- Weschler, C. J. and W. W. Nazaroff (2010). "SVOC partitioning between the gas phase and settled dust indoors." Atmospheric Environment **44**(30): 3609-3620.
- Wiik, R. (2011). "Indoor productivity measured by common response patterns to physical and psychosocial stimuli." Indoor Air **21**(4): 328-340.
- Witterseh, T., D. P. Wyon, *et al.* (2004). "The effects of moderate heat stress and open-plan office noise distraction on SBS symptoms and on the performance of office work." Indoor Air **8**: 30-40.
- Wong, L. T., K. W. Mui, *et al.* (2008). "A multivariate-logistic model for acceptance of indoor environmental quality (IEQ) in offices." Building and Environment **43**(1): 1-6.
- Wyon, D. P., P. O. Fanger, *et al.* (1975). "The mental performance of subjects clothed for comfort at two different air temperatures." Ergonomics **18**(4): 359-374.
- Zeghnoun, A. and F. Dor (2010). Description du budget espace-temps et estimation de l'exposition de la population française dans son logement. Disponible sur : [www.invs.sante.fr](http://www.invs.sante.fr). S.-M. F. I. d. v. sanitaire: 37 p.

- Zhang, T., H. W. Sun, *et al.* (2010). "Perfluorochemicals in meat, eggs and indoor dust in China: assessment of sources and pathways of human exposure to perfluorochemicals." Environ Sci Technol **44**(9): 3572-3579.
- Zhang, X., M. L. Diamond, *et al.* (2011). "Sources, emissions, and fate of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls indoors in Toronto, Canada." Environ Sci Technol **45**(8): 3268-3274.

---

## Liste des annexes

---

<b>Annexe 1 :</b>	Synthèse des données relatives aux COSV dans les bureaux	III
<b>Annexe 2 :</b>	Données relatives aux COSV dans les logements	XIV
<b>Annexe 3 :</b>	Synthèse des données d'exposition	XII
<b>Annexe 4 :</b>	Doses d'exposition aux COSV dans les bureaux et les logements (ng/kg/j)	XIII
<b>Annexe 5 :</b>	Illustration des tests de performance utilisés dans la campagne OFFICAIR	XVI
<b>Annexe 6 :</b>	Extrait des questionnaires sur l'environnement psycho-social et psycho-physique de la campagne OFFICAIR	XVIII

## Annexe 1 : Synthèse des données relatives aux COSV dans les bureaux

NB : Les médianes ou moyennes *en italique* sont des valeurs calculées à partir des données présentées dans les études citées. Les données **en gras** correspondent aux données sélectionnées pour le calcul des doses d'exposition.

COSV	Auteurs	Ville/Pays	Période d'échantillonnage	Nbre bureaux	Bâtiments # (O/N)	Concentration de la substance dans l'air, phase gazeuse + particulaire sauf indication contraire ( $C_{\text{air bureau}}$ )	Concentration de la substance dans les poussières ( $C_{\text{bureau}}$ )
Phtalates	(Bergh <i>et al.</i> , 2011)	Suède	?	10	?	Valeurs médianes ( $\text{ng/m}^3$ ) : <b>DMP (4,4)</b> , <b>DEP (620)</b> , <b>DiBP (230)</b> , <b>DBP (550)</b> , <b>BzBP (15)</b> et <b>DEHP (100)</b>	Valeurs médianes ( $\mu\text{g/g}$ ) : <b>DMP (0,2)</b> , <b>DEP (20)</b> , <b>DiBP (37)</b> , <b>DBP (100)</b> , <b>BzBP (8,8)</b> et <b>DEHP (1100)</b>
OBFR	(Bergh <i>et al.</i> , 2011)	Suède	?	10	?	Valeurs médianes ( $\text{ng/m}^3$ ) : <b>TEP (6,5)</b> , <b>TiBP (7,3)</b> , <b>TBP (2,3)</b> , <b>TCEP (10)</b> , <b>TCiPP (100)</b> , <b>TDCPP (28)</b> et <b>TBEP (5,8)</b> Valeurs moyennes ( $\text{ng/m}^3$ ) : <b>TTP (0,6)</b> , <b>DPEHP (1,8)</b> , <b>TToP (0,1)</b> et <b>TEHP (0)</b>	Valeurs médianes ( $\mu\text{g/g}$ ) : <b>TEP (0,1)</b> , <b>TiBP (1,3)</b> , <b>TBP (0,2)</b> , <b>TCEP (6,7)</b> , <b>TCiPP (19)</b> , <b>TDCPP (17)</b> , <b>TBEP (87)</b> , <b>TTP (5,3)</b> , <b>DPEHP (1)</b> et <b>TToP (0,6)</b> Valeurs moyennes ( $\mu\text{g/g}$ ) : <b>TEHP (0,1)</b>
NBRF	(Ali <i>et al.</i> , 2011)	Belgique	Janvier à Juin 2008	6	?	//	Valeurs médianes ( $\text{ng/g}$ ) : <b>BTBPE (19)</b> , <b>DBDPE (721)</b> , <b>TBB (7)</b> , <b>TBPH (64)</b> et <b>TBBPA-DBPE (306)</b>
HBCD	(Abdallah <i>et al.</i> , 2009)	UK	Mars à Décembre 2007	21	?	//	Valeurs médianes ( $\mu\text{g/g}$ ) : <b><math>\alpha</math>- (0,587)</b> , <b><math>\beta</math>- (0,176)</b> et <b><math>\gamma</math>- (0,621)</b>
	(Thuresson <i>et al.</i> , 2012)	Stockholm, Suède	Mars-Avril et Octobre-Novembre 2006	10	O	Valeur médiane ( $\text{pg/m}^3$ ) : Somme (<1,6)	Valeur médiane ( $\text{ng/g}$ ) : Somme (300)
	(D'Hollander <i>et al.</i> , 2010)	Belgique	2008	10	?	//	Valeur médiane ( $\text{ng/g}$ ) : Somme (367)

COSV	Auteurs	Ville/Pays	Période d'échantillonnage	Nbre bureaux	Bâtiments # (O/N)	Concentration de la substance dans l'air, phase gazeuse + particulaire sauf indication contraire ( $C_{\text{air bureau}}$ )	Concentration de la substance dans les poussières ( $C_{\text{bureau}}$ )
PCB (Seuls les numéros des congénères sont indiqués)	(Zhang <i>et al.</i> , 2011)	Toronto, Canada	Août à Septembre 2006	5	?	Valeurs médianes ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) : 16+32 (0,634), 17+18 (1,412), <b>22 (0,343)</b> , 25+26 (0,262), <b>27 (0,127)</b> , 28+31 (1,328), <b>33 (0,504)</b> , 41+64+71 (0,104), <b>42 (0,086)</b> , <b>44 (0,686)</b> , <b>45 (0,106)</b> , <b>47 (0,196)</b> , <b>49 (0,401)</b> , <b>51 (0,027)</b> , <b>52 (1,381)</b> , <b>53 (0,092)</b> , 56+60 (0,351), <b>66 (0,675)</b> , 70+76 (0,177), <b>74 (0,202)</b> , <b>82 (0,026)</b> , <b>83 (0,02)</b> , <b>84 (0,123)</b> , <b>87 (0,249)</b> , 90+101 (0,874), <b>91 (0,08)</b> , <b>95 (0,957)</b> , <b>97 (0,129)</b> , 99+113 (0,176), <b>105 (0,049)</b> , <b>110 (0,459)</b> , <b>111 (0,061)</b> , <b>118 (0,203)</b> , 128+162 (0,0185), <b>132 (0,105)</b> , 134+143 (0,02), 135+148 (0,082), <b>136 (0,13)</b> , 138+163+164 (0,162), <b>141 (0,063)</b> , <b>146 (0,022)</b> , <b>149 (0,37)</b> , <b>151 (0,158)</b> , <b>153 (0,159)</b> , 170+190 (0,011), <b>171 (0,009)</b> , <b>172 (0,003)</b> , <b>174 (0,044)</b> , <b>176 (0,015)</b> , <b>177 (0,024)</b> , <b>178 (0,01)</b> , <b>179 (0,054)</b> , <b>180 (0,032)</b> , <b>183 (0,02)</b> , <b>185 (0,0075)</b> , <b>187 (0,067)</b>	//
PFC	(Huber <i>et al.</i> , 2011)	Norvège	Hiver 2007	1	?	Valeurs moyennes ( $\text{pg}/\text{m}^3$ ) : 4:2 FTOH (165), 6:2 FTOH (266), 8:2 FTOH (3151), 10:2 FTOH (1970), EtFOSA (17,1), MeFOSA (40,4), EtFOSE (29) et MeFOSE (1211)	Valeurs moyennes ( $\text{ng}/\text{g}$ ) : 6:2 FTS (114), 8:2 FTS (177), PFBS (3,8), PFPS (2,7), PFHxS (27,8), PFHpS (3,5), PFOS (148), PFNS (5,4), PFDS (410), PFBA (4,2), PFPA (52,2), PFHxA (29,3), PFHpA (13,2), PFOA (69,4), PFNA (10,6), PFDA (12,1), PFUnDA (1,4), PFDoDA (3,7)

COSV	Auteurs	Ville/Pays	Période d'échantillonnage	Nbre bureaux	Bâtiments # (O/N)	Concentration de la substance dans l'air, phase gazeuse + particulaire sauf indication contraire (C <sub>air bureau</sub> )	Concentration de la substance dans les poussières (C <sub>bureau</sub> )
PFC	(Goosey <i>et al.</i> , 2011)	UK	Avril 2007 à Juin 2008	20	?	//	Valeurs médianes (ng/g) : <b>PFOS (230), PFOA (290), PFHxS (170), EtFOSA (15,5), FOSA (2), MeFOSE (220), EtFOSE (89)</b> Valeur moyenne (ng/g) : <b>MeFOSA (61)</b>
	(Zhang <i>et al.</i> , 2010)	Chine	Janvier à Juillet 2009	11	?	//	Valeurs moyennes (ng/g) : PFHxS (0,27), PFOS (8,63), PFDS (<0,2), PFOSA (0,19), PFHpA (22,7), PFOA (390), PFNA (5,75), PFDA (5,26), PFUnDA (1,6), PFDoDA (1,25)
	(D'Hollander <i>et al.</i> , 2010)	Belgique	2008	10	?	//	Valeurs médianes (ng/g) : PFOS (2,2), PFOA (2,9), PFNA (0,4), PFBS (0,2), PFBA (0,7), PFHxS (0,2), PFHxA (1,3), PFDA (0,9)
	(Björklund <i>et al.</i> , 2009)	Suède	2007/2008	10	?	//	Valeurs médianes (ng/g) : PFOS (110) et PFOA (70)
	(Fraser <i>et al.</i> , 2011)	Boston, USA	Hiver 2009	31	?	Valeurs moyennes (pg/m <sup>3</sup> ) : 6:2 FTOH (1320), 8:2 FTOH (9920), 10:2 FTOH (2850), EtFOSA (17), MeFOSA (29,1), EtFOSE (18,1) et MeFOSE (289)	//
	(Goosey <i>et al.</i> , 2012)	UK	Septembre 2008 à Mars 2009	12	?	Valeurs médianes (pg/m <sup>3</sup> ) : <b>PFOS (55), PFOA (18), PFHxS (84), EtFOSA (35), FOSA (59), MeFOSE (310) et EtFOSE (420)</b> Valeur moyenne (pg/m <sup>3</sup> ) : <b>MeFOSA (6)</b>	//

COSV	Auteurs	Ville/Pays	Période d'échantillonnage	Nbre bureaux	Bâtiments # (O/N)	Concentration de la substance dans l'air, phase gazeuse + particulaire sauf indication contraire (C <sub>air bureau</sub> )	Concentration de la substance dans les poussières (C <sub>bureau</sub> )
PBDE (Seuls les numéros des congénères sont indiqués)	(Ni <i>et al.</i> , 2011)	Shenzen, Chine	Mars 2009	1	?	//	Valeurs moyennes <sup>23</sup> (ng/g) : 28 (1,3), 47 (9,2), 49 (1,5), 85 (15), 99 (12), 100 (19), 153 (0,8), 154 (5,2), 138 (1,6), 183 (0,6), 196 (26), 206 (164), 207 (85), 208 (73), 209 (1369) Valeurs médianes <sup>24</sup> (ng/g) : 28 (0,64), 47 (0,92), 49 (0,36), 85 (0,2), 99 (0,85), 100 (0,69), 153 (0,15), 154 (1,03), 138 (0,15), 183 (0,35), 196 (5), 206 (32), 207 (22), 208 (10), 209 (258)
	(Watkins <i>et al.</i> , 2011)	Boston, USA	Janvier à Mars 2009	31	?	//	Valeurs moyennes (ng/g) : 28+33 (7,5), 47 (697), <b>49 (18,8)</b> , <b>66(9)</b> , <b>75 (39,8)</b> , 85+155 (49,6), 99 (915), <b>100 (195)</b> , <b>138 (17,9)</b> , 153 (138), <b>154 (115)</b> , 183 (81,2), <b>196 (29,1)</b> , 197 (32,4), <b>201 (4,9)</b> , 206 (153), 207 (125), 208 (61,8), 209 (4204)

<sup>23</sup> Dans la poussière récoltée à l'arrière des 6 ordinateurs analysés

<sup>24</sup> Dans la poussière récoltée dans les 56 filtres de la centrale d'air conditionné (accumulée depuis 1 an)

COSV	Auteurs	Ville/Pays	Période d'échantillonnage	Nbre bureaux	Bâtiments # (O/N)	Concentration de la substance dans l'air, phase gazeuse + particulaire sauf indication contraire ( $C_{\text{air bureau}}$ )	Concentration de la substance dans les poussières ( $C_{\text{bureau}}$ )
PBDE (Seuls les numéros des congénères sont indiqués)	(Huang <i>et al.</i> , 2010)	Chine	Été et hiver 2008	12	?	//	Valeurs médianes (ng/g) : 28 (0,87), 47 (8,10), 66 (1,15), 100 (1,09), 99 (8,03), 85 (0,53), 154 (1,54), 153 (3,05), 183 (6,77), 209 (3103)
	(Thuresson <i>et al.</i> , 2012)	Stockholm, Suède	Mars-Avril et Octobre-Novembre 2006	10	O	Valeurs médianes ( $\text{pg}/\text{m}^3$ ) : 28 (0,67), 47 (210), 99 (320), 153 (32), 183 (190), 197 (90), 206 (520), 207 (400), 208 (240), 209 (2000)	Valeurs médianes (ng/g) : <b>28 (1,2), 47 (52), 99 (92), 153 (23), 183 (55), 197 (29), 206 (0), 207 (44), 208 (17), 209 (780)</b>
	(Björklund <i>et al.</i> , 2012)	Stockholm, Suède	Mars-Avril 2006 et Octobre-Février 2007	9	O	Valeurs médianes ( $\text{pg}/\text{m}^3$ ) : <b>28 (1,3), 47 (240), 99 (320), 153 (32), 183 (210), 197 (100), 206 (640), 207 (450), 208 (270), 209 (2400)</b>	//
	(Zhang <i>et al.</i> , 2011)	Toronto, Canada	Août à Septembre 2006	5	?	Valeurs médianes <sup>25</sup> ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) : <b>7 (0,0014), 15 (0,0026), 17 (0,0047), 28 (0,011), 47 (0,082), 49 (0,0032), 66 (0,0014), 85 (0,0016), 99 (0,015), 100 (0,0066), 126 (0,0163), 153 (0,0016), 154 (0,00073), 183 (0,0028)</b>	//
	(Toms <i>et al.</i> , 2009)	Australie	2005	3	O	Valeurs moyennes ( $\text{pg}/\text{m}^3$ ) : 47 (140), 99 (13), 100 (3), 153 (1), 154 (0,8), 183 (2), 209 (8)	Valeurs moyennes (ng/g) : 47 (92,25), 99 (129), 100 (25), 153 (21,25), 154 (11,5), 183 (37,25), 209 (1088,25)
	(Roosens <i>et al.</i> , 2010)	UK	2008 / Données provenant de (Harrad <i>et al.</i> , 2008)	//	//	Valeurs médianes ( $\text{pg}/\text{m}^3$ ) : 47 (690), <b>100 (63)</b> , 99 (172,5), <b>154 (5,05)</b> et 153 (3,35)	//

<sup>25</sup> Prélèvement passif et donc de la phase gazeuse de l'air uniquement

COSV	Auteurs	Ville/Pays	Période d'échantillonnage	Nbre bureaux	Bâtiments # (O/N)	Concentration de la substance dans l'air, phase gazeuse + particulaire sauf indication contraire (C <sub>air bureau</sub> )	Concentration de la substance dans les poussières (C <sub>bureau</sub> )
PBDE (Seuls les numéros des congénères sont indiqués)	(Batterman <i>et al.</i> , 2010)	Michigan, USA	Juin-Juillet 2006	10	O	Valeurs moyennes <sup>26</sup> (pg/m <sup>3</sup> ) : <b>17 (744)</b> , 28 (404), <b>75 (63)</b> , <b>49 (77)</b> , 71 (170), 47 (1490), <b>66 (31)</b> , 100 (117), 99 (259), <b>85 (13)</b> , 154 (25) Valeurs moyennes <sup>27</sup> (pg/m <sup>3</sup> ) : 28 (8), 47 (933), 66 (10), 100 (46), 99 (156)	Valeurs moyennes (ng/g) : <b>17 (11)</b> , 28 (18), 75 (34), 49 (85), 71 (272), 47 (1650), 66 (26), 100 (525), 99 (3310), <b>85 (113)</b> , 154 (182), 153 (126), 138 (23), 166 (37), 183 (1270), 190 (65), 203 (237), 208 (445), 207 (357), 206 (117), 209 (6930)
HAP	(Delgado-Saborit <i>et al.</i> , 2011)	UK	?	30	?	Valeurs moyennes (ng/m <sup>3</sup> ) <b>Acénaphthalène (0,08)</b> , <b>Acénaphène (0,25)</b> , <b>Fluorène (0,04)</b> , <b>Phénanthrène (0,22)</b> , <b>Anthracène (0,06)</b> , <b>Fluoranthène (0,42)</b> , <b>Pyrène (0,27)</b> , <b>Benzo(a)anthracène (0,06)</b> , <b>Chrysène (0,16)</b> , <b>Benzo(b)fluoranthène (0,2)</b> , <b>Benzo(k)fluoranthène (0,12)</b> , <b>Benzo(a)pyrène (0,09)</b> , <b>Indéno(123cd)pyrène (0,1)</b> , <b>Dibenzo(ah)anthracène (0,03)</b> , <b>Benzo(ghi)perylène (0,15)</b> , <b>Coronène (0,09)</b>	//

<sup>26</sup> Prélèvement de la phase gazeuse de l'air

<sup>27</sup> Prélèvement de la phase particulaire de l'air

## Annexe 2 : Données relatives aux COSV dans les logements

Composés	Concentration de la substance dans les poussières en µg/g (C <sub>logement</sub> )	Concentration de la substance dans l'air en ng/m <sup>3</sup> (C <sub>air logement</sub> )	Référence des données poussières	Référence des données air
BBzP	8,503	3,5	(Blanchard <i>et al.</i> , 2012)	(Blanchard <i>et al.</i> , 2012)
DEHP	289,1	44		
DMP	0,188	8,2		
DEP	2,776	156,5		
DBP	11,85	101,7		
DiBP	18,46	377,4		
BDE-07	0	4,55E-04	<i>Absence</i>	(Zhang <i>et al.</i> , 2011)
BDE-15	0,0046	0,0023	(Martinez-Moral <i>et al.</i> , 2012)	
BDE-17	0,0015	0,00017	(Johnson <i>et al.</i> , 2010)	
BDE-28	9,14E-04	0,002	(Thuresson <i>et al.</i> , 2012)	(Thuresson <i>et al.</i> , 2012)
BDE-47	0,038	0,013		
BDE-49	0,00775	0,0016	(Martinez-Moral <i>et al.</i> , 2012)	(Zhang <i>et al.</i> , 2011)
BDE-66	0,0043	0,0056		<i>Absence</i>
BDE-75	0,0029	0		(Zhang <i>et al.</i> , 2011)
BDE-85	0,0151	0,0012		(Thuresson <i>et al.</i> , 2012)
BDE-99	0,063	0,004	(Thuresson <i>et al.</i> , 2012)	(Thuresson <i>et al.</i> , 2012)
BDE-100	0,002	5,40E-04	(Fromme <i>et al.</i> , 2009)	(Fromme <i>et al.</i> , 2009)
BDE-126	0	0,012	<i>Absence</i>	(Zhang <i>et al.</i> , 2011)
BDE-138	0,013	0	(Martinez-Moral <i>et al.</i> , 2012)	
BDE-153	0,008	0,001	(Martinez-Moral <i>et al.</i> , 2012)	(Thuresson <i>et al.</i> , 2012)
BDE-154	1,62E-03	0,0002	(Fromme <i>et al.</i> , 2009)	(Fromme <i>et al.</i> , 2009)
BDE-183	0,0016	0,0112	(Thuresson <i>et al.</i> , 2012)	(Thuresson <i>et al.</i> , 2012)
BDE-196	0,004	0	(Cunha <i>et al.</i> , 2010)	<i>Absence</i>
BDE-197	0,0007	0,0022	(Thuresson <i>et al.</i> , 2012)	(Thuresson <i>et al.</i> , 2012)
BDE-201	0,0126	0	(Johnson <i>et al.</i> , 2010)	<i>Absence</i>
BDE-206	0,0089	0	(Thuresson <i>et al.</i> , 2012)	(Thuresson <i>et al.</i> , 2012)
BDE-207	0,0046	0,0177		
BDE-208	0,0011	0,0007		
BDE-209	0,923	0,073		
DPEHP	0,5	0	(Bergh <i>et al.</i> , 2011)	(Bergh <i>et al.</i> , 2011)
TBB	0,002	0	(Ali <i>et al.</i> , 2012)	<i>Absence</i>
TBPH	0,012	0		
TEP	0,01	7,3	(Bergh <i>et al.</i> , 2011)	(Bergh <i>et al.</i> , 2011)
TPP	1,2	0,2		
TBP	0,3	9,1		
TCIPP	1,6	5,6		
TCEP	2,1	4,8		
TEHP	4,3	0		
TBEP	4	0,5	(Kanazawa <i>et al.</i> , 2010)	
TDCPP	10	0	(Bergh <i>et al.</i> , 2011)	
TiBP	1,1	13		
TTOP	1	0		
6:2FTS	0,009	0	(Haug <i>et al.</i> , 2011)	<i>Absence</i>
8:2FTS	0,015	0		

Composés	Concentration de la substance dans les poussières en µg/g (C <sub>logement</sub> )	Concentration de la substance dans l'air en ng/m <sup>3</sup> (C <sub>air logement</sub> )	Référence des données poussières	Référence des données air
EtFOSE	0,14	0,54	(Goosey <i>et al.</i> , 2011)	(Goosey <i>et al.</i> , 2012)
MeFOSE	0,13	0,76		
EtFOSA	0,13	0,067		
MeFOSA	0	0		
FOSA	0,003	0,045	(Jogsten <i>et al.</i> , 2012)	<i>Absence</i>
PFBS	0,000575	0		
PFDS	0	0		
PFHpS	0,00029	0	(Haug <i>et al.</i> , 2011)	(Goosey <i>et al.</i> , 2012)
PFHxS	0,077	0,023	(Goosey <i>et al.</i> , 2011)	
PFNS	0	0	(Huber <i>et al.</i> , 2011)	<i>Absence</i>
PFOS	0,16	0,011	(Goosey <i>et al.</i> , 2011)	(Goosey <i>et al.</i> , 2012)
PFPS	0	0	(Huber <i>et al.</i> , 2011)	<i>Absence</i>
PFBA	0,019	0	(Jogsten <i>et al.</i> , 2012)	(Shoeib <i>et al.</i> , 2011)
PFDA	0,00145	0,0079		
PFDoDA	0,0012	0		
PFHpA	0,0012	0,0054		
PFHxA	0,001	0,01		
PFNA	8,70E-04	0		
PFOA	0,031	0,024	(Goosey <i>et al.</i> , 2011)	(Goosey <i>et al.</i> , 2012)
PFPA	4,50E-04	0	(Jogsten <i>et al.</i> , 2012)	<i>Absence</i>
PFUnDA	7,30E-04	0	(Kopp <i>et al.</i> , 2012)	<i>Absence</i>
α-HBCD	0,1624	0		
β-HBCD	0,0352	0		
γ-HBCD	0,0974	0		
BTBPE	0,002	0	(Ali <i>et al.</i> , 2011)	<i>Absence</i>
DBDPE	0,153	0		
TBBPA-DBPE	0,078	0	<i>Absence</i>	(Huber <i>et al.</i> , 2011)
4:2FTOH	0	0,0207	(Shoeib <i>et al.</i> , 2011)	
6:2FTOH	0,049	0,0416		
8:2FTOH	0,063	10,05		
10:2FTOH	0,04	3,405	(Knobeloch <i>et al.</i> , 2012)	<i>Absence</i>
PCB 22	0,0001	0,181		
PCB 27	0	0,1585	<i>Absence</i>	(Zhang <i>et al.</i> , 2011)
PCB 33	0,0001	0,276	(Knobeloch <i>et al.</i> , 2012)	
PCB 42	0,0003	0,0495		
PCB 44	0,0017	0,2135		
PCB 45	0	0,075		
PCB 47	0,0001	0,196		
PCB 49	0,0009	0,1385		
PCB 51	0	0,026	<i>Absence</i>	
PCB 52	0,0018	0,5525	(Knobeloch <i>et al.</i> , 2012)	
PCB 53	0	0,046		
PCB 66	0,0009	0,1675		
PCB 74	0,0006	0,0985		
PCB 82	0,0001	0,007		
PCB 83	0	0,007		
PCB 84	0,0004	0,0225		
PCB 87	0,0007	0,0495		

Composés	Concentration de la substance dans les poussières en µg/g (C <sub>logement</sub> )	Concentration de la substance dans l'air en ng/m <sup>3</sup> (C <sub>air logement</sub> )	Référence des données poussières	Référence des données air	
PCB 91	0,0001	0,018	(Knobeloch <i>et al.</i> , 2012)	(Zhang <i>et al.</i> , 2011)	
PCB 95	0,0039	0,1635			
PCB 97	0,0003	0,0285			
PCB 105	0,00041	0,015			
PCB 110	0	0,0895	Absence		
PCB 111	0	0,025			
PCB 118	0,00092	0,0505	(Harrad <i>et al.</i> , 2009)		
PCB 132	0	0,0165	Absence		
PCB 136	0	0,0185			
PCB 141	0,0003	0,0125	(Knobeloch <i>et al.</i> , 2012)		
PCB 146	0,0002	0,007			
PCB 149	0	0,0555	Absence		
PCB 151	0,0005	0,025	(Knobeloch <i>et al.</i> , 2012)		
PCB 153	0,0012	0,03	(Harrad <i>et al.</i> , 2009)		
PCB 171	0,0001	0,001			
PCB 172	0	0,001	(Knobeloch <i>et al.</i> , 2012)		
PCB 174	0,0005	0,005			
PCB 176	0	0,002	Absence		
PCB 177	0,0002	0,0025			
PCB 178	0,0001	0,0015	(Knobeloch <i>et al.</i> , 2012)		
PCB 179	0	0,01	Absence		
PCB 180	0,00089	0,0045	(Harrad <i>et al.</i> , 2009)		
PCB 183	0,0004	0,003			
PCB 185	0	0,001	(Knobeloch <i>et al.</i> , 2012)		
PCB 187	0	0,008	Absence		
Acénaphthalène	0,03	0,08	(Fromme <i>et al.</i> , 2004)		(Delgado-Saborit <i>et al.</i> , 2011)
Acénaphène	0,05	0,25			
Fluorène	0,09	0,04			
Phénanthrène	0,96	0,22			
Anthracène	0,07	0,06			
Fluoranthène	0,96	0,42			
Pyrène	0,12	0,27	(Langer <i>et al.</i> , 2010)		
Benzo(a)anthracène	0,017	0,06			
Chrysène	0,55	0,16			
Benzo(b)fluoranthène	0,54	0,2	(Fromme <i>et al.</i> , 2004)		
Benzo(k)fluoranthène	0,37	0,12			
Benzo(a)pyrène	0,009	0,09	(Langer <i>et al.</i> , 2010)		
Indéno(123cd)pyrène	0,33	0,1			
Dibenzo(ah)anthracène	0,05	0,03			
Benzo(ghi)perylène	0,35	0,15	(Fromme <i>et al.</i> , 2004)		
Coronène	0,16	0,09			

**Remarque :**

- Seuls les COSV présents dans les bureaux sont reportés dans ce tableau à des fins de comparaison

### Annexe 3 : Synthèse des données d'exposition

<b>BET</b>	Temps journalier passé dans les logements	15,19 heures
	Fraction quotidienne de temps passé dans les logements ( $F_{\text{logement}}$ )	0,63
	Temps journalier passé dans les bureaux	7 heures
	Fraction quotidienne de temps passé dans les bureaux ( $F_{\text{bureau}}$ )	0,18
<b>Facteurs humains d'exposition</b>	Quantité de poussières ingérées par jour, tous milieux confondus ( $Q_{\text{poussières}}$ )	50 mg/j
	Quantité d'air inhalé par jour, tous milieux confondus ( $Q_{\text{air}}$ )	16 m <sup>3</sup> /j
	Poids corporel (P)	66 kg

#### Remarques :

- Le temps journalier passé dans les logements est une moyenne réalisée sur une semaine. Par hypothèse, les heures passées dans le logement durant cette semaine d'étude sont extrapolables à toutes les semaines de l'année. Le temps passé dans un logement pendant les semaines de congés (pour les actifs) peut être inférieur ou supérieur selon les activités. Globalement sur l'année, la variabilité est jugée faible et sans impact sur la quantification des expositions réalisées.

- Le temps de 7 heures par jour passées dans les bureaux correspond au temps passé à cette activité les jours où elle a lieu. Il convient donc, afin d'obtenir une fraction de temps annuelle, de pondérer par le nombre de jours travaillés ; il est pris égal à 231 ce qui fournit une fraction moyenne de temps au travail égale à 0,18.

Annexe 4 : Doses d'exposition aux COSV dans les bureaux et les logements  
(ng/kg/j)

Composés	DJE <sub>bureau,</sub>	DJE <sub>bureau,</sub>	DJE <sub>bureau,</sub>	DJE <sub>logement,</sub>	DJE <sub>logement,</sub>	DJE <sub>logement,</sub>
	ing	inh	globale	ing	inh	globale
BBzP	1,200	0,655	1,855	4,077	0,537	4,614
DEHP	150,000	4,364	154,364	138,618	6,751	145,369
DMP	0,027	0,192	0,219	0,090	1,258	1,348
DEP	2,727	27,055	29,782	1,331	24,012	25,344
DBP	13,636	24,000	37,636	5,682	15,604	21,286
DiBP	5,045	10,036	15,082	8,851	57,906	66,757
BDE-07	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BDE-15	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,003
BDE-17	0,002	0,032	0,034	0,001	0,000	0,001
BDE-28	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
BDE-47	0,007	0,010	0,018	0,018	0,002	0,020
BDE-49	0,003	0,003	0,006	0,004	0,000	0,004
BDE-66	0,001	0,001	0,003	0,002	0,001	0,003
BDE-75	0,005	0,003	0,008	0,001	0,000	0,001
BDE-85	0,012	0,001	0,012	0,007	0,000	0,007
BDE-99	0,013	0,014	0,027	0,030	0,001	0,031
BDE-100	0,027	0,000	0,027	0,001	0,000	0,001
BDE-126	0,000	0,001	0,001	0,000	0,002	0,002
BDE-138	0,002	0,000	0,002	0,006	0,000	0,006
BDE-153	0,003	0,001	0,005	0,004	0,001	0,004
BDE-154	0,016	0,000	0,016	0,001	0,000	0,001
BDE-183	0,008	0,009	0,017	0,001	0,007	0,008
BDE-196	0,004	0,000	0,004	0,002	0,000	0,002
BDE-197	0,004	0,004	0,008	0,000	0,001	0,002
BDE-201	0,001	0,000	0,001	0,006	0,000	0,006
BDE-206	0,000	0,028	0,028	0,004	0,000	0,004
BDE-207	0,006	0,020	0,026	0,002	0,003	0,005
BDE-208	0,002	0,009	0,011	0,001	0,000	0,001
BDE-209	0,106	0,105	0,211	0,443	0,011	0,454
DPEHP	0,136	0,079	0,215	0,240	0,000	0,240
TBB	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001
TBPH	0,009	0,000	0,009	0,006	0,000	0,006
TEP	0,014	0,284	0,297	0,005	1,120	1,125
TPP	0,723	0,026	0,749	0,575	0,127	0,702
TBP	0,027	0,100	0,128	0,144	1,396	1,540
TCiPP	2,591	4,364	6,955	0,767	3,544	4,312
TCEP	0,914	0,436	1,350	1,007	0,736	1,743
TEHP	0,014	0,000	0,014	2,062	0,000	2,062
TBEP	11,864	0,253	12,117	1,918	0,077	1,995
TDCPP	2,318	1,222	3,540	4,795	0,000	4,795
TiBP	0,177	0,319	0,496	0,527	1,995	2,522
TToP	0,082	0,004	0,086	0,479	0,000	0,479
6:2FTS	0,016	0,000	0,016	0,004	0,000	0,004
8:2FTS	0,024	0,000	0,024	0,007	0,000	0,007
EtFOSE	0,012	0,018	0,030	0,067	0,342	0,409
MeFOSE	0,030	0,014	0,044	0,062	0,117	0,179
EtFOSA	0,002	0,002	0,004	0,062	0,042	0,105
MeFOSA	0,008	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000
FOSA	0,000	0,003	0,003	0,001	0,028	0,030
PFBS	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
PFDS	0,056	0,000	0,056	0,000	0,000	0,000
PFHpS	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

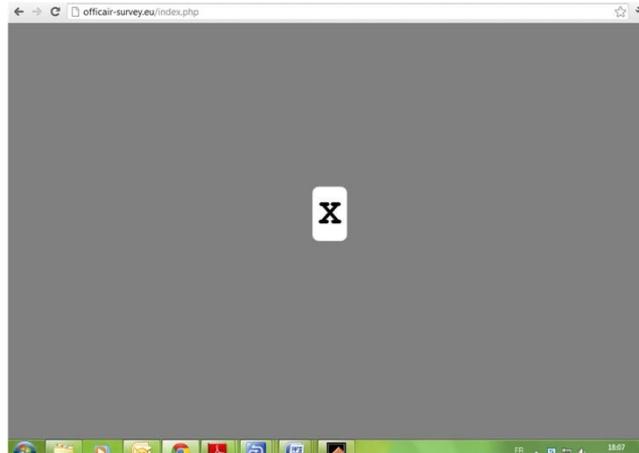
Composés	DJE <sub>bureau,</sub>	DJE <sub>bureau,</sub>	DJE <sub>bureau,</sub>	DJE <sub>logement,</sub>	DJE <sub>logement,</sub>	DJE <sub>logement,</sub>
	ing	inh	globale	ing	inh	globale
PFHxS	0,023	0,004	0,027	0,037	0,015	0,051
PFNS	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
PFOS	0,031	0,002	0,034	0,077	0,007	0,084
PFPS	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
PFBA	0,001	0,000	0,001	0,009	0,000	0,009
PFDA	0,002	0,000	0,002	0,001	0,001	0,002
PFDoDA	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001
PFHpA	0,002	0,000	0,002	0,001	0,001	0,001
PFHxA	0,004	0,000	0,004	0,000	0,006	0,007
PFNA	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
PFOA	0,040	0,001	0,040	0,015	0,015	0,030
PFPA	0,007	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000
PFUnDA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
α-HBCD	0,080	0,000	0,080	0,078	0,000	0,078
β-HBCD	0,024	0,000	0,024	0,017	0,000	0,017
γ-HBCD	0,085	0,000	0,085	0,047	0,000	0,047
BTBPE	0,003	0,000	0,003	0,001	0,000	0,001
DBDPE	0,098	0,000	0,098	0,073	0,000	0,073
TBBPA-DBPE	0,042	0,000	0,042	0,037	0,000	0,037
4:2FTOH	0,000	0,007	0,007	0,000	0,003	0,003
6:2FTOH	0,000	0,012	0,012	0,023	0,026	0,050
8:2FTOH	0,000	0,137	0,137	0,030	1,542	1,572
10:2FTOH	0,000	0,086	0,086	0,019	2,155	2,174
PCB 22	0,000	0,015	0,015	0,000	0,028	0,028
PCB 27	0,000	0,006	0,006	0,000	0,100	0,100
PCB 33	0,000	0,022	0,022	0,000	0,042	0,042
PCB 42	0,000	0,004	0,004	0,000	0,031	0,031
PCB 44	0,000	0,030	0,030	0,001	0,033	0,034
PCB 45	0,000	0,005	0,005	0,000	0,047	0,047
PCB 47	0,000	0,009	0,009	0,000	0,030	0,030
PCB 49	0,000	0,017	0,017	0,000	0,088	0,088
PCB 51	0,000	0,001	0,001	0,000	0,004	0,004
PCB 52	0,000	0,060	0,060	0,001	0,350	0,351
PCB 53	0,000	0,004	0,004	0,000	0,007	0,007
PCB 66	0,000	0,029	0,029	0,000	0,106	0,106
PCB 74	0,000	0,009	0,009	0,000	0,015	0,015
PCB 82	0,000	0,001	0,001	0,000	0,004	0,004
PCB 83	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001
PCB 84	0,000	0,005	0,005	0,000	0,014	0,014
PCB 87	0,000	0,011	0,011	0,000	0,008	0,008
PCB 91	0,000	0,003	0,003	0,000	0,011	0,011
PCB 95	0,000	0,042	0,042	0,002	0,025	0,027
PCB 97	0,000	0,006	0,006	0,000	0,018	0,018
PCB 105	0,000	0,002	0,002	0,000	0,002	0,002
PCB 110	0,000	0,020	0,020	0,000	0,057	0,057
PCB 111	0,000	0,003	0,003	0,000	0,004	0,004
PCB 118	0,000	0,009	0,009	0,000	0,032	0,032
PCB 132	0,000	0,005	0,005	0,000	0,003	0,003
PCB 136	0,000	0,006	0,006	0,000	0,012	0,012
PCB 141	0,000	0,003	0,003	0,000	0,002	0,002
PCB 146	0,000	0,001	0,001	0,000	0,004	0,005
PCB 149	0,000	0,016	0,016	0,000	0,009	0,009
PCB 151	0,000	0,007	0,007	0,000	0,016	0,016
PCB 153	0,000	0,007	0,007	0,001	0,005	0,005
PCB 171	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
PCB 172	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Composés	DJE <sub>bureau,</sub>	DJE <sub>bureau,</sub>	DJE <sub>bureau,</sub>	DJE <sub>logement,</sub>	DJE <sub>logement,</sub>	DJE <sub>logement,</sub>
	ing	inh	globale	ing	inh	globale
PCB 174	0,000	0,002	0,002	0,000	0,003	0,003
PCB 176	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
PCB 177	0,000	0,001	0,001	0,000	0,002	0,002
PCB 178	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
PCB 179	0,000	0,002	0,002	0,000	0,006	0,006
PCB 180	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001
PCB 183	0,000	0,001	0,001	0,000	0,002	0,002
PCB 185	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
PCB 187	0,000	0,003	0,003	0,000	0,005	0,005
Acénaphthalène	0,000	0,003	0,003	0,014	0,012	0,027
Acénaphène	0,000	0,011	0,011	0,024	0,158	0,182
Fluorène	0,000	0,002	0,002	0,043	0,006	0,049
Phénanthrène	0,000	0,010	0,010	0,460	0,139	0,600
Anthracène	0,000	0,003	0,003	0,034	0,009	0,043
Fluoranthène	0,000	0,018	0,018	0,460	0,064	0,525
Pyrène	0,000	0,012	0,012	0,058	0,041	0,099
Benzo(a)anthracène	0,000	0,003	0,003	0,008	0,009	0,017
Chrysène	0,000	0,007	0,007	0,264	0,025	0,288
Benzo(b)fluoranthène	0,000	0,009	0,009	0,259	0,031	0,290
Benzo(k)fluoranthène	0,000	0,005	0,005	0,177	0,018	0,196
Benzo(a)pyrène	0,000	0,004	0,004	0,004	0,014	0,018
Indéno(123cd)pyrène	0,000	0,004	0,004	0,158	0,015	0,174
Dibenzo(ah)anthracène	0,000	0,001	0,001	0,024	0,005	0,029
Benzo(ghi)perylène	0,000	0,007	0,007	0,168	0,023	0,191
Coronène	0,000	0,004	0,004	0,077	0,014	0,091

## Annexe 5 : Illustration des tests de performance utilisés dans la campagne OFFICAIR

### ➤ Test de réactivité :

Il s'agit d'appuyer aussi vite que possible sur la touche ENTREE du clavier à chaque fois qu'une croix (X) apparaît dans le carré blanc.



Dans la variante, les touches suivantes du clavier correspondent à chacun des quatre carrés en commençant par la gauche.

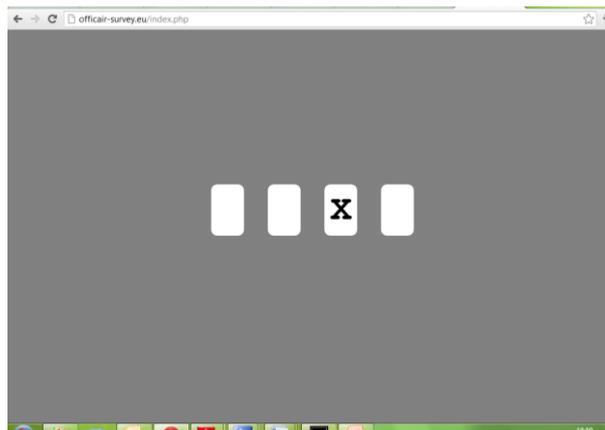
"1" correspond au premier carré

"2" au deuxième carré

"8" au troisième carré

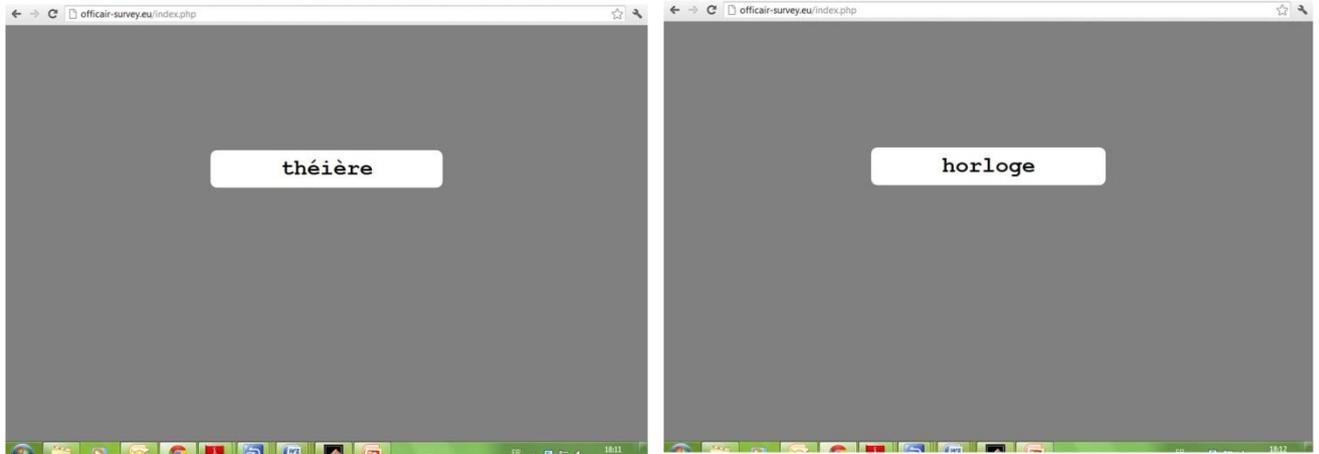
"9" au quatrième carré

Il s'agit alors d'appuyer aussi vite que possible sur la touche ENTREE du clavier à chaque fois qu'une croix (X) apparaît dans l'un des quatre carrés.

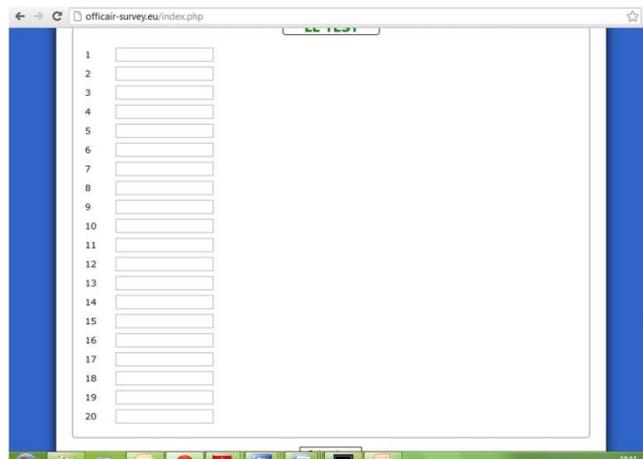


➤ Test de mémoire :

Une liste de 20 mots, comme ceux présentés ci-dessous en exemple, va apparaître sur l'écran, au rythme d'un mot toutes les 2 secondes.



Dans le test de mémoire immédiate, à la fin de la liste, les participants ont deux minutes pour écrire autant de mots que possible dans les cases vides, dans n'importe quel ordre par rapport à leur apparition à l'écran.



## Annexe 6 : Extrait des questionnaires sur l'environnement psycho-social et psychophysique de la campagne OFFICAIR

### Environnement psycho-social au travail

**115 Je suis constamment pressé(e) par le temps à cause d'une forte charge de travail.**

- Oui  
 Non

**116 Cela me perturbe**

- Pas du tout  
 Un peu  
 Beaucoup  
 Vraiment beaucoup

**117 Je suis fréquemment interrompu(e) et dérangé(e) dans mon travail.**

- Oui  
 Non

**118 Cela me perturbe**

- Pas du tout  
 Un peu  
 Beaucoup  
 Vraiment beaucoup

**119 J'ai beaucoup de responsabilités à mon travail.**

- Oui  
 Non

**120 Cela me perturbe**

- Pas du tout  
 Un peu  
 Beaucoup  
 Vraiment beaucoup

**121 Je suis souvent contraint(e) à faire des heures supplémentaires.**

- Oui  
 Non

**122 Cela me perturbe**

- Pas du tout  
 Un peu  
 Beaucoup  
 Vraiment beaucoup

127 Je reçois le respect que je mérite de mes supérieurs.

- Oui  
 Non

128 Cela me perturbe

- Pas du tout  
 Un peu  
 Beaucoup  
 Vraiment beaucoup

129 Je reçois le respect que je mérite de mes collègues.

- Oui  
 Non

130 Cela me perturbe

- Pas du tout  
 Un peu  
 Beaucoup  
 Vraiment beaucoup

150 Pensez à vous et à l'état d'esprit dans lequel vous êtes en général

	Jamais	2	3	4	Toujours
Contrarié(e)	<input type="radio"/>				
Hostile	<input type="radio"/>				
Alerte	<input type="radio"/>				
Honteux(se)	<input type="radio"/>				
Inspiré(e)	<input type="radio"/>				
Nerveux(se)	<input type="radio"/>				
Déterminé(e)	<input type="radio"/>				
Attentif(ve)	<input type="radio"/>				
Effrayé(e)	<input type="radio"/>				
Actif(ve)	<input type="radio"/>				

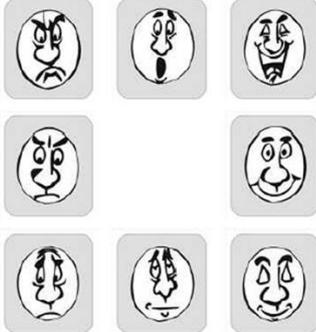
151 Avez-vous récemment vécu un évènement particulier très heureux (naissance, mariage, etc.) ?

- Oui  
 Non

152 Avez-vous récemment vécu un évènement particulier très triste (décès, accident, maladie, etc.) ?

- Oui  
 Non

153 Choisissez l'image qui correspond le mieux à votre humeur MAINTENANT



154 En complément des questions précédentes, y a-t-il un aspect de votre environnement (physique ou psychosocial) avec lequel vous n'êtes pas satisfait ou un aspect psycho-physique qui vous préoccupe ?

- Oui  
 Non

YVERNEAU

Héloïse

October 2012

## INGENIEUR DU GENIE SANITAIRE

Promotion 2011 - 2012

### **Consideration of emerging issues for the national campaign in offices of the indoor air quality Observatory : Relevance of monitoring semi-volatile organic compounds & Evaluation of the influence of indoor climate on office workers' performance**

#### **Abstract :**

In response to health and economic major issues, the Indoor Air Quality Observatory (OQA; *Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur*) starts a National Campaign in Offices (CNB; *Campagne Nationale Bureaux*) to characterize those environments. In order to update current CNB protocols, which were designed in 2009, to fit with state of the art issues linked to Indoor Environmental Quality (IEQ), the overall objective of this study is twofold. Are Semi-Volatile Organic Compounds (SVOC) relevant parameters to be measured in office buildings? How to evaluate the impact of indoor climate on the performance of office workers?

SVOC concentrations in offices (offices and settled dust) were collected through a literature review. Moreover, to discuss the relevance of monitoring SVOC, an estimation of doses of exposure was made. Finally, the links between various parameters of IEQ and performance, as well as up-to-date foreign studies of economic evaluation relative to an increase of performance due to better IEQ were presented and analyzed.

Concentrations for the 130 SVOC reported in offices vary between countries and chemical families. Besides, doses of exposure of a same mixture of SVOC in both offices and dwellings present the same order of magnitude. Consequently, those compounds are relevant for the CNB. Despite complex links between parameters of IEQ and performance, two evaluation methods were suggested. Measures of performance associated with questionnaire survey about the psychosocial environment of the occupants can fulfill the second objective.

With respect to various optional purposes, different lists of the SVOC to measure were established. An innovative evaluation method was considered, although it is important for future research work to be done. Cost-benefit analysis, decision support tools for comparing projects of improved IEQ, can be carried out in France.

#### **Key words :**

Offices, Semi-Volatile Organic Compounds (SVOC), Doses of exposure, Performance, Economic evaluation, Cost-benefit analysis, Indoor Environmental Quality (IEQ)

*L'Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les mémoires : ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.*

YVERNEAU

Héloïse

Octobre 2012

## INGENIEUR DU GENIE SANITAIRE

Promotion 2011 - 2012

### **Prise en compte de thématiques émergentes pour la campagne nationale «bureaux» de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur : Pertinence de la mesure des composés organiques semi-volatils & Evaluation de l'influence de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs**

#### **Résumé :**

Face à des enjeux sanitaires et économiques majeurs, l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) lance une Campagne Nationale Bureaux (CNB) pour dresser un état des lieux du parc français. Dans le but de mettre à jour les protocoles de la CNB, conçus en 2009, à la lumière des problématiques actuelles liées à la Qualité de l'Environnement Intérieur (QEI), l'OQAI a engagé une phase de réflexion autour de deux axes principaux. Les Composés Organiques Semi-Volatils (COSV) sont-ils des paramètres pertinents à mesurer dans les immeubles de bureaux ? Comment évaluer l'impact de l'environnement intérieur sur la performance des travailleurs ?

Une synthèse bibliographique a relevé les concentrations en COSV dans l'air et les poussières des bureaux. De plus, un calcul de doses d'exposition a été mené afin de discuter du bien-fondé de leur mesure. Par ailleurs, les liens entre divers paramètres caractérisant la QEI et la performance ainsi que les récentes études d'évaluation économique, réalisées dans d'autres pays, relatives à une augmentation de performance qui découle d'une meilleure QEI ont été présentés puis analysés.

Les 130 COSV rencontrés dans les bureaux présentent des concentrations variables entre les pays et les différentes familles chimiques. En outre, les doses d'exposition à un même mélange de COSV dans les bureaux et les logements étant comparables, ces composés sont considérés comme d'intérêt. Malgré des liens complexes entre les paramètres caractérisant la QEI et la performance, deux méthodes d'évaluation ont été proposées. Des mesures objectives de la performance couplées à des questionnaires jugeant l'environnement psycho-social permettent de répondre à l'objectif annoncé.

Différentes pistes, qui définissent les COSV à mesurer en fonction des finalités souhaitées, ont été établies. En outre, une méthode d'évaluation, réellement novatrice, a été envisagée nécessitant toutefois un important travail de recherche en amont. Enfin, les analyses coûts-bénéfices, réels outils d'aide à la décision, peuvent être conduites pour le cas français.

#### **Mots clés :**

Bureaux, Composés Organiques Semi-Volatils (COSV), Doses d'exposition, Performance, Evaluation économique, Analyses coûts-bénéfices, Qualité de l'Environnement Intérieur (QEI)

*L'Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les mémoires : ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.*