



**Mesures d'adaptation pour une saine
qualité de l'air intérieur dans un contexte
de changements climatiques : revue de la littérature**

CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Mesures d'adaptation pour une saine qualité de l'air intérieur dans un contexte de changements climatiques : revue de la littérature

Direction de la santé environnementale et de la toxicologie

Septembre 2016

AUTEURS

Patrick Poulin, Ph. D.

Marie-Eve Levasseur, M. Sc.

Vicky Huppé, M. Sc.

Équipe scientifique sur l'environnement intérieur

Direction de la santé environnementale et de la toxicologie

SOUS LA COORDINATION DE

Jean-Marc Leclerc, M. Sc.

Équipe scientifique sur l'environnement intérieur

Direction de la santé environnementale et de la toxicologie

RÉVISEURS

Mélanie Beaudoin, LL. B., M. Env.

Marie-Christine Gervais, M. Sc.

Claire Laliberté, M.A., M. Sc.

Direction de la santé environnementale et de la toxicologie

Daniel Aubin, Ph. D.

Conseil national de recherches Canada

Frédéric Valcin, M. Env.

Santé Canada

RÉVISION ET MISE EN PAGE

Véronique Paquet, agente administrative

Direction de la santé environnementale et de la toxicologie

REMERCIEMENTS

Les membres de l'équipe tiennent à remercier Stéphanie Ledeur-Gervaud et Vicky Tessier pour leur contribution à la recherche documentaire.

Cette étude a été réalisée grâce à la participation financière du Fonds vert dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques du gouvernement du Québec.

Ce document est disponible intégralement en format électronique (PDF) sur le site Web de l'Institut national de santé publique du Québec au : <http://www.inspq.qc.ca>.

Les reproductions à des fins d'étude privée ou de recherche sont autorisées en vertu de l'article 29 de la Loi sur le droit d'auteur. Toute autre utilisation doit faire l'objet d'une autorisation du gouvernement du Québec qui détient les droits exclusifs de propriété intellectuelle sur ce document. Cette autorisation peut être obtenue en formulant une demande au guichet central du Service de la gestion des droits d'auteur des Publications du Québec à l'aide d'un formulaire en ligne accessible à l'adresse suivante : <http://www.droitauteur.gouv.qc.ca/autorisation.php>, ou en écrivant un courriel à : droit.auteur@cspq.gouv.qc.ca.

Les données contenues dans le document peuvent être citées, à condition d'en mentionner la source.

Dépôt légal – 4^e trimestre 2016

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

ISBN : 978-2-550-77147-0 (PDF)

©Gouvernement du Québec (2016)

Avant-propos

Le mandat confié aux auteurs portait sur l'identification de mesures d'adaptation visant le maintien et l'amélioration de la qualité de l'air intérieur des bâtiments d'habitation, dans le contexte des changements climatiques. Le présent rapport ne traite pas des mesures applicables à l'environnement extérieur, et ce, bien que certaines d'entre elles puissent avoir une incidence sur la qualité de l'air intérieur. Par conséquent, les principaux objets de la présente revue concernent davantage les mesures et dispositifs d'adaptation applicables à l'environnement intérieur des bâtiments ainsi qu'à leur enveloppe.

Par ailleurs, la littérature étudiée portait exclusivement sur le milieu résidentiel (habitations individuelles, immeubles à logements, etc.). Ainsi, bien que certains des constats dégagés puissent s'appliquer à d'autres types d'environnements intérieurs, tels certains milieux mixtes comme les services de garde, les établissements d'enseignement ou les centres de soins et de services de santé, la présente revue n'en traite pas spécifiquement.

Ce document a pour objet de présenter une description factuelle des caractéristiques et de la performance des principales mesures pouvant être utiles à l'élaboration d'une démarche adaptative, et non pas de recommander l'utilisation d'une marque ou d'un modèle d'appareil en particulier. Même si la performance des différentes mesures et des différents dispositifs recensés au regard de l'adaptation aux changements climatiques n'a fait l'objet que de peu d'études spécifiques en conditions réelles, il a tout de même été jugé opportun de les présenter, dans la mesure où ils sont décrits par les auteurs comme des solutions pouvant théoriquement pallier les effets directs et indirects des changements climatiques.

Enfin, malgré l'application d'une méthodologie de recherche rigoureuse, les auteurs ne peuvent prétendre à une revue exhaustive de la littérature sur le sujet traité, en raison notamment de l'importance de la littérature grise y étant associée ainsi que de l'existence de publications portant sur des thématiques connexes (p. ex. maison verte, édifice « net zéro », etc.).

Table des matières

Liste des tableaux et figures.....	V
Glossaire.....	VII
Liste des sigles et acronymes.....	IX
Faits saillants.....	1
Sommaire.....	3
1 Mise en contexte.....	7
1.1 Changements climatiques au Canada et au Québec.....	7
1.2 Facteurs qui influencent la QAI.....	7
2 Objectifs.....	9
3 Méthodologie.....	11
3.1 Recherche documentaire.....	11
3.2 Champs d'application des mesures d'adaptation documentées.....	11
4 Changements climatiques et QAI.....	13
4.1 Conséquences des changements climatiques sur la QAI.....	13
4.1.1 Conséquences potentielles sur l'environnement naturel et bâti.....	13
4.1.2 Conséquences potentielles sur les contaminants provenant de l'extérieur.....	14
4.1.3 Conséquences potentielles sur les contaminants provenant de l'intérieur.....	16
4.1.4 Synthèse des conséquences potentielles des changements climatiques sur la QAI.....	18
4.2 Populations vulnérables aux conséquences négatives des changements climatiques sur la QAI.....	18
5 Mesures d'adaptation.....	21
5.1 Mesures de réduction et de contrôle de l'infiltration et de l'émission des contaminants.....	21
5.1.1 Aperçu des mesures d'adaptation applicables à l'environnement extérieur.....	21
5.1.2 Étanchéisation et isolation de l'enveloppe du bâtiment.....	21
5.1.3 Réduction à la source par le choix des produits et matériaux et les comportements des occupants.....	22
5.1.4 Chauffage, climatisation et déshumidification.....	27
5.2 Mesures d'amélioration de la ventilation.....	28
5.2.1 Ventilation naturelle.....	29
5.2.2 Ventilation mécanique.....	31
5.2.3 Ventilation centralisée.....	31
5.2.4 Contrôle des appareils.....	33
5.3 Mesures d'épuration de l'air.....	35
5.3.1 Filtration mécanique.....	35
5.3.2 Épurateur électronique.....	36
5.3.3 Adsorption des gaz.....	37
5.3.4 Oxydation photocatalytique.....	37
6 Discussion.....	39
6.1 Constats de la revue de la littérature.....	39
6.1.1 Mesures de réduction et de contrôle de l'infiltration et de l'émission des contaminants.....	39

6.1.2	Mesures d'amélioration de la ventilation	39
6.1.3	Mesures d'épuration de l'air	40
6.2	Analyse des mesures d'adaptation.....	41
6.2.1	Prioriser des mesures considérant l'efficacité énergétique.....	45
6.2.2	Prioriser des mesures accessibles adaptées aux besoins et aux vulnérabilités des occupants.....	45
6.2.3	Prioriser des mesures présentant des co-bénéfices	46
7	Perspectives	47
8	Références	49
Annexe 1	Résumé des principaux changements climatiques anticipés au Québec.....	67
Annexe 2	Conséquences des changements climatiques sur les contaminants de l'air intérieur	71
Annexe 3	Méthodologie et recherche bibliographique	81
Annexe 4	Efforts de normalisation et d'harmonisation en Europe	89
Annexe 5	Aperçu de programmes de certification de bâtiments.....	95
Annexe 6	Étiquetage environnemental	101
Annexe 7	Aperçu des systèmes d'étiquetage environnemental de produits et matériaux fréquemment rencontrés	107
Annexe 8	Aperçu de l'efficacité de la filtration de l'air en milieu résidentiel	111

Liste des tableaux et figures

Tableau 1	Principaux facteurs qui influencent la qualité de l'environnement intérieur	8
Tableau 2	Synthèse des mesures d'adaptation aux changements climatiques applicables aux bâtiments d'habitation	42
Figure 1	Mécanismes qui influencent l'exposition aux contaminants de sources intérieure et extérieure.....	8
Figure 2	Champs d'application des options de gestion de la QAI	12
Figure 3	Schéma des principaux processus par lesquels les changements climatiques pourraient affecter la QAI	19

Glossaire¹

Affichage environnemental (*environmental display*) : action de mettre à la disposition des consommateurs des renseignements objectifs concernant les effets d'un produit sur l'environnement, à des fins de comparaison entre produits de même catégorie. L'affichage environnemental peut se faire, par exemple, au moyen d'une étiquette environnementale apposée sur le produit ou par un document technique accompagnant le produit.

Certification : attestation réalisée par une tierce partie, relative à des produits, des processus, des systèmes ou des personnes.

Contaminants de l'air intérieur : substances auxquelles les occupants d'un bâtiment sont susceptibles d'être exposés, principalement par les voies respiratoires. Les contaminants peuvent être d'origine biologique (p. ex. moisissures, bactéries, acariens, pollens et spores), chimique (p. ex. fumée de tabac, monoxyde de carbone, particules fines en suspension dans l'air, composés organiques volatils) et radiologique (p. ex. radon). Très souvent, ces contaminants sont présents à de faibles concentrations qui ne causent pas d'effets significatifs à la santé. Cependant, dans certaines circonstances, des atteintes à la santé peuvent survenir, en fonction notamment de leur nature, de l'ampleur de l'exposition ainsi que de la vulnérabilité des personnes exposées (individus souffrant d'atteintes respiratoires ou d'hypersensibilité, nourrissons, personnes âgées, etc.).

Effet corona : également nommé « effet de couronne », l'effet corona est un phénomène de décharge électrique partielle engendré par l'ionisation des molécules présentes dans le milieu contigu à un conducteur. Il se manifeste lorsque le potentiel électrique excède une valeur critique mais dont les conditions ne permettent pas la formation d'un arc électrique.

Épuration de l'air² : action d'éliminer les impuretés contenues dans un substrat; purification.

Équilibrage³ : l'équilibrage d'un système de ventilation est l'ajustement visant à obtenir un débit équilibré d'admission d'air frais et d'évacuation d'air vicié.

Étiquette environnementale (*environmental label*) : marque distinctive apposée sur un produit, comportant des informations relatives à ses effets sur l'environnement, et visant à orienter le choix des consommateurs vers les produits portant le moins atteinte à l'environnement. Une étiquette environnementale peut se présenter, par exemple, sous la forme d'un énoncé, d'un graphique, d'un symbole. Elle est jointe (imprimée, collée, attachée, etc.) à l'emballage d'un produit ou au produit lui-même. Cette marque peut constituer une attestation (autodéclarée ou approuvée par une tierce partie) que le produit répond à certains critères de réduction des atteintes environnementales (étiquette écologique ou écoétiquette) ou elle peut prendre la forme d'une fiche synthétique décrivant qualitativement ou quantitativement divers aspects environnementaux, tels que la quantité de gaz à

¹ Les définitions proviennent principalement des sources suivantes :

- Office québécois de la langue française, avec la collaboration du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs et du Bureau de normalisation du Québec (2013). Vocabulaire du développement durable. Repéré à https://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/bibliotheque/dictionnaires/terminologie_deve_durable/20110721_dev_durable.pdf.
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). La ventilation des bâtiments d'habitation : impacts sur la santé respiratoire des occupants. Auteurs : Pierre Lajoie, Jean-Marc Leclerc, Marion Schnebelen. Québec : INSPQ, 2006, 222 p. Repéré à <https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/490-VentilationBatimentsHabitation.pdf>.

² Dictionnaire Larousse. Repéré à <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/%C3%A9puration/30635>.

³ Ressources naturelles Canada (2012). Ventilateurs-récupérateurs de chaleur, Office de l'efficacité énergétique des Ressources naturelles Canada, 44 p. Repéré à http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeefiles/pdf/publications/HRV_FR.pdf.

effet de serre produite pendant la fabrication du produit, la distance parcourue pour faire la distribution du produit, etc.

Habitation : tout bâtiment, ou partie de bâtiment, où des personnes habitent et dorment. Inclut autant les habitations de type unifamilial que les immeubles multilogements.

Inertie thermique : capacité d'un matériau à emmagasiner de la chaleur puis à la restituer progressivement de manière diffuse. Plus l'inertie thermique d'un bâtiment est élevée, plus celui-ci se réchauffe et se refroidit lentement.

Label⁴ : signe distinctif apposé sur un produit ou qui accompagne un service, et qui en garantit la qualité, l'origine ou la conformité à certaines caractéristiques définies. Le label peut être délivré par un organisme public, parapublic, professionnel ou privé n'intervenant pas lui-même dans la fabrication ou la vente du produit ou du service. Le label reconnaît que le produit ou le service satisfait aux normes de qualité et qu'il correspond aux caractéristiques définies.

Réduction à la source : toute mesure qui vise à limiter l'émission de contaminants dans l'air intérieur. Aux fins de cette revue de la littérature, la réduction à la source inclut également les mesures visant à limiter la dispersion des contaminants, telles que l'utilisation d'appareils d'extraction d'air vicié (hotte de cuisinière et ventilateur de salle de bain).

Ventilateur récupérateur de chaleur : appareil de ventilation muni d'un noyau récupérateur de chaleur qui réchauffe l'air froid en provenance de l'extérieur avant qu'il ne soit distribué dans la résidence.

Ventilateur récupérateur d'énergie : appareil de ventilation muni d'un noyau récupérateur d'énergie. Il récupère la chaleur, tout comme le VRC, mais également l'énergie emprisonnée dans l'humidité ambiante.

Ventilation : processus d'admission et d'évacuation de l'air par des moyens mécaniques ou naturels. Il est à noter que ce terme exclut, dans le présent rapport, les déplacements de l'air occasionnés par les appareils ayant pour première fonction d'extraire les contaminants à la source, dont la hotte de cuisinière et le ventilateur de salle de bain.

Ventilation mécanique : désigne tout échange d'air avec le milieu extérieur réalisé au moyen d'un dispositif comportant au moins un équipement motorisé d'évacuation et/ou d'alimentation forcée d'air.

Ventilation naturelle passive : désigne tout échange d'air avec le milieu extérieur effectué de manière involontaire (infiltration + exfiltration) qui s'opère par le biais des ouvertures et interstices de l'enveloppe du bâtiment.

Ventilation naturelle volontaire : désigne tout échange d'air avec le milieu extérieur pratiqué de façon volontaire par le biais d'ouvertures spécialement aménagées, telles des fenêtres, des portes.

⁴ Office québécois de la langue française (2007). Repéré à http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8382045.

Liste des sigles et acronymes

Anses	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CAH	Changement d'air à l'heure
CIRC	Centre international de Recherche sur le cancer
CLI	Concentration limite d'intérêt
CNRC	Conseil national de recherches Canada
CO	Monoxyde de carbone
COV	Composé organique volatil
CO ₂	Dioxyde de carbone
EPA	Environmental Protection Agency
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HAP	Hydrocarbure aromatique polycyclique
HEPA	<i>High Efficiency Particulate Air</i>
HO ₂	<i>Radical hydroperoxyde</i>
H ₂ O ₂	Peroxyde d'hydrogène
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
IOM	Institute of Medicine
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalisation)
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MELS	Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport

MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
MERV	<i>Minimum efficiency reporting value</i>
MSSS	Ministère de la Santé et des Services sociaux
NOx	Oxydes d'azote
OH	Hydroxyde
OMS	Organisation mondiale de la Santé
OQAI	Observatoire de la qualité de l'air intérieur
PM _{2,5}	Particules fines en suspension d'un diamètre inférieur à 2,5 micromètres
QAI	Qualité de l'air intérieur
RBQ	Régie du bâtiment du Québec
SCHL	Société canadienne d'hypothèques et de logement
S. O.	Sans objet
SO ₂	Dioxyde de soufre
UE	Union européenne
UV	Rayons ultraviolets
VRC	Ventilateur récupérateur de chaleur
VRE	Ventilateur récupérateur d'énergie
UK GBC	United Kingdom Green Building Council
µm	Micromètre

Faits saillants

Cette revue de la littérature rapporte les différentes mesures d'adaptation aux changements climatiques, dans un contexte québécois, pouvant être mises à profit par les propriétaires, gestionnaires et occupants de bâtiments d'habitation pour y assurer et y maintenir une bonne qualité de l'air intérieur.

- Les changements climatiques sont susceptibles de moduler la fréquence, l'étendue et l'intensité de certains processus et phénomènes de nature environnementale et, plus particulièrement, des événements climatiques extrêmes. Les problèmes de qualité de l'air intérieur des bâtiments d'habitation engendrés de façon directe ou indirecte par de tels processus sont susceptibles de se manifester différemment selon divers facteurs : les caractéristiques de l'environnement extérieur, par exemple les conditions climatiques, les caractéristiques des bâtiments, telles que l'étanchéité de l'enveloppe, et, finalement, les comportements des occupants. Les conséquences exactes des changements climatiques sur la qualité de l'air intérieur sont toutefois difficiles à prévoir compte tenu des divers facteurs qui modulent cette relation.
- Les changements climatiques pourraient affecter l'intégrité des bâtiments d'habitation et moduler les concentrations de certains contaminants de sources extérieure et intérieure. Les modifications des caractéristiques physiques de l'air, dont la température et l'humidité relative, pourraient avoir une influence sur l'émissivité de certains produits et matériaux et sur le confort, voire sur la santé des occupants.
- Les solutions répertoriées pour répondre de façon cohérente aux enjeux des changements climatiques sur les bâtiments d'habitation s'articulent sur la base de trois avenues générales de gestion de la qualité de l'air intérieur : le contrôle à la source, la ventilation et le traitement ou la purification de l'air intérieur.
- Parmi l'ensemble des mesures répertoriées par cette revue de la littérature, la réduction à la source (p. ex. utilisation de matériaux moins émissifs), l'isolation et l'étanchéisation des bâtiments, combinées à une ventilation adéquate, devraient être considérées comme les mesures les plus pérennes et écoénergétiques, mais également les moins contraignantes sur le plan comportemental.
- La ventilation naturelle volontaire constitue une avenue de maintien de la qualité de l'air intérieur accessible et, de surcroît, généralement plus efficace lorsque pratiquée la nuit.
- La mise en place ou l'optimisation de dispositifs de ventilation mécanique dans les bâtiments constitue une mesure d'adaptation à privilégier, bien que plus onéreuse que la ventilation naturelle. Par ailleurs, l'utilisation et l'entretien adéquats de ces systèmes de ventilation mécanique s'avèrent essentiels afin d'assurer leur efficacité.
- L'utilisation de dispositifs de traitement ou de purification de l'air intérieur peut également s'avérer une option de gestion complémentaire théoriquement efficace. En revanche, le pouvoir épurateur de tels dispositifs est généralement restreint à une classe spécifique de contaminants, et leur efficacité demeure conditionnelle à une utilisation judicieuse et à un entretien rigoureux.

- Outre la population générale, certains groupes plus vulnérables risquent de subir davantage les conséquences des changements climatiques sur la qualité de l'air intérieur de leur demeure, ce pour quoi une attention particulière devra leur être accordée dans la mise en place de mesures d'adaptation applicables aux bâtiments d'habitation.
- En somme, cette revue de la littérature démontre que c'est un ensemble de mesures d'adaptation intégrées, applicables tant au bâtiment et à ses composants qu'aux comportements des occupants, qui permettra d'atténuer les conséquences des changements climatiques sur la qualité de l'air intérieur.
- L'éducation et la sensibilisation de la population et des acteurs du milieu de l'habitation au regard des différents enjeux associés au maintien de la qualité de l'air intérieur dans un contexte de changements climatiques constituent ainsi des orientations prioritaires pour l'adaptation. Il s'avère également pertinent de poursuivre les recherches sur ce thème afin de consolider les efforts d'adaptation entrepris par le Québec au cours des dernières années.

Sommaire

Cette revue de la littérature recense et analyse les différentes mesures de gestion de la qualité de l'air intérieur répertoriées dans la littérature scientifique. Puisque le mandat confié à l'INSPQ visait spécifiquement l'environnement intérieur des bâtiments d'habitation, le document n'aborde pas les mesures applicables à l'environnement extérieur, bien que certaines d'entre elles puissent avoir une incidence sur la qualité de l'air intérieur. Le document présente une description factuelle des caractéristiques et de la performance des principales mesures pouvant être utiles à l'élaboration d'une démarche adaptative. Les critères retenus par les auteurs pour l'analyse des différentes mesures d'adaptation intègrent des préoccupations liées à la qualité de l'air intérieur, à l'efficacité énergétique, aux efforts nécessaires à l'application des mesures pour les occupants et les propriétaires des bâtiments concernés, ainsi qu'aux co-bénéfices potentiels de ces mesures.

Contexte

Les changements climatiques pourraient affecter de manière directe et indirecte la qualité de l'air intérieur dans les habitations québécoises. En effet, l'exposition aux contaminants en provenance de l'extérieur et de l'intérieur pourrait être modulée par divers aléas climatiques, dont l'augmentation des températures, les variations des précipitations estivales et hivernales et la fréquence des événements climatiques extrêmes.

Les conséquences exactes des changements climatiques sur la qualité de l'air intérieur sont toutefois difficiles à prévoir compte tenu des divers facteurs qui modulent cette relation, tels que l'incertitude présente dans certaines projections climatiques, les différences régionales importantes anticipées (p. ex. certains événements plus prononcés dans le nord), l'entretien et les modifications qui seront apportées aux bâtiments existants ainsi que les changements qui surviendront dans les pratiques de construction (p. ex. adoption de nouvelles mesures dans les codes du bâtiment) et les comportements des occupants (p. ex. utilisation accrue de la climatisation).

Certaines populations (p. ex. ménages à faibles revenus) risquent de subir davantage les conséquences des changements climatiques sur la qualité de l'air intérieur de leur demeure, contribuant ainsi aux disparités de santé et de capacité d'adaptation au sein de la population. En conséquence, une attention particulière devra leur être accordée dans la mise en place de mesures d'adaptation applicables aux bâtiments d'habitation et à l'environnement immédiat.

Principaux constats

Les principales actions à prioriser afin d'assurer une bonne qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments d'habitation demeurent : 1) le contrôle ou la réduction des contaminants à la source; 2) la ventilation; et 3) l'épuration de l'air intérieur, dans certaines circonstances. Il appert cependant que la combinaison de ces différents types de mesures pourrait constituer une des avenues les plus prometteuses pour l'adaptation dans un contexte de changements climatiques.

La réduction des contaminants à la source, par le biais notamment de la sélection de matériaux moins émissifs et de la modification de certains comportements des occupants, serait théoriquement la mesure la plus efficace afin d'améliorer la qualité de l'air intérieur. La construction de nouveaux bâtiments, tout comme la rénovation des habitations existantes, devraient idéalement être entreprises en utilisant des matériaux dont l'efficacité énergétique, la durabilité et la résistance à la biodétérioration sont élevées et dont l'émissivité des composés organiques volatils est faible.

La ventilation naturelle demeure une avenue de gestion de la qualité de l'air intérieur simple et accessible. Cependant, son utilisation est tributaire des comportements des occupants qui doivent gérer l'ouverture et la fermeture des fenêtres en fonction des conditions météorologiques et climatiques. Dans un contexte climatique changeant et avec la construction de bâtiments de plus en plus étanches, il semble donc que cette mesure ne puisse assurer à elle seule le maintien de la qualité de l'air intérieur.

L'installation ou la mise à niveau d'un système de ventilation centralisé (ventilateur récupérateur de chaleur [VRC] ou d'énergie [VRE]) constituerait une mesure d'adaptation efficace au regard des principaux effets anticipés des changements climatiques. Par ailleurs, certains dispositifs de ces systèmes (p. ex. contrôles intelligents) sont conçus pour assurer une ventilation tenant compte des principaux paramètres de confort.

Lorsque la qualité de l'air extérieur se dégrade de façon importante (par exemple lors d'incendies de forêt qui émettent des quantités importantes de gaz de combustion, de particules et de suies dans l'air ambiant), l'une des meilleures avenues de gestion de la qualité de l'air intérieur pour une courte période consiste à interrompre tout système de ventilation mécanisée, incluant les ventilateurs d'extraction et de recirculation de l'air, et de limiter les échanges par voie naturelle au minimum, en maintenant les portes et fenêtres extérieures fermées.

Bien que certains dispositifs d'épuration de l'air soient onéreux et d'efficacité variable en milieu résidentiel, certains modèles peuvent s'avérer utiles dans des circonstances spécifiques (p. ex. épisode de mauvaise qualité de l'air extérieur) ou lorsque des individus plus vulnérables occupent un milieu intérieur donné (p. ex. enfants asthmatiques dans une chambre à coucher), afin d'éliminer divers polluants et contaminants particulaires présents dans l'air intérieur.

Pour être efficaces, les systèmes de ventilation et d'épuration de l'air dans les habitations doivent être correctement sélectionnés, installés, entretenus, et doivent être utilisés de manière adéquate par les occupants. L'éducation et la sensibilisation du public et des acteurs de l'industrie de la construction (promoteurs, architectes, fabricants d'appareils, de produits de construction et d'ameublement, etc.) apparaissent donc essentielles.

C'est donc un ensemble de mesures d'adaptation applicables à l'environnement extérieur, aux bâtiments, à ses composants ainsi qu'aux comportements des occupants qui permettront de réduire les impacts des changements climatiques sur la qualité de l'air intérieur. Ces mesures devraient non seulement s'appliquer aux bâtiments existants, mais également être compatibles au contexte changeant des pratiques de construction, d'opération et d'entretien du parc immobilier. Elles doivent aussi tenir compte des changements susceptibles de survenir à l'égard des comportements des occupants (p. ex. utilisation accrue de la climatisation) ainsi que des conséquences sur les paramètres de l'environnement intérieur et extérieur, qui risquent de différer sensiblement selon les régions.

Conclusions et avenues de recherche

L'amélioration des bonnes pratiques de construction et d'entretien des bâtiments ainsi que l'intégration de considérations relatives à la qualité de l'air intérieur et aux changements climatiques dans les codes du bâtiment et la réglementation associée contribuerait à préparer le parc immobilier québécois à la réalité de demain.

Il serait pertinent de poursuivre la réflexion sur les nouveaux types de bâtiments (p. ex. bâtiment vert, écologique, durable, à énergie positive) afin de considérer davantage leurs impacts sur la qualité de l'environnement intérieur, soit sur les paramètres de confort (dont la température et l'humidité relative) et la qualité de l'air intérieur, en plus des considérations reliées à l'efficacité énergétique et au développement durable.

Il existe un besoin d'améliorer les connaissances relatives aux composés émanant des matériaux de construction et de décoration, et de développer de nouvelles méthodes uniformisées de caractérisation de l'émissivité de ces matériaux, notamment en fonction des conditions climatiques actuelles et anticipées.

Il serait souhaitable d'évaluer les certifications existantes, tant en ce qui concerne les produits et matériaux que les bâtiments, afin de déterminer lesquelles permettent d'atteindre une bonne qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments d'habitation en fonction des réalités québécoises.

Des travaux pourraient également porter sur l'utilité et la faisabilité de développer un système d'étiquetage canadien, voire québécois, pour identifier les produits et matériaux en fonction de leurs émissions, ce qui permettrait aux consommateurs et aux promoteurs de faire des choix éclairés quant aux matériaux qu'ils achètent et installent dans les habitations.

Des recherches portant sur l'efficacité des composants de systèmes de ventilation mécanique tels que les modules de contrôles intelligents pourraient s'avérer utiles afin de bonifier de futures mises à jour des codes du bâtiment.

Des études visant à comparer plusieurs méthodes de traitement de l'air dans des conditions atmosphériques particulières (p. ex. lors d'un épisode de smog) et futures, à l'aide de scénarios climatiques déjà éprouvés, pourraient contribuer à valider l'efficacité des mesures de gestion de la qualité de l'air intérieur dans le contexte climatique québécois.

La mise en place de programmes de subvention visant l'installation ou la mise à niveau de systèmes de ventilation performants et écoénergétiques dans les habitations pourrait contribuer à l'adaptation de la société québécoise aux impacts des changements climatiques, particulièrement auprès des populations plus vulnérables (p. ex. autochtones, aînés, enfants).

Certains types de bâtiments, tels les hôpitaux et les centres d'hébergement et de soins de longue durée (CHSLD), accueillent parfois des clientèles vulnérables (individus à mobilité réduite ou atteints de maladies chroniques, aînés, etc.) sur de longues périodes. Il serait donc pertinent d'évaluer les risques potentiels des impacts des changements climatiques sur les milieux intérieurs pour ces sous-groupes de la population ainsi que de sélectionner les mesures d'atténuation pouvant être mises en œuvre dans de tels milieux.

La coordination des travaux proposés dans le présent document pourrait être facilitée par le développement d'un outil s'inspirant par exemple de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) mis en place en France. En favorisant le rassemblement, le développement et le transfert des connaissances dans le domaine, la mise en place d'un observatoire contribuerait à jouer un rôle d'influence dans le domaine de l'environnement intérieur. Elle favoriserait également l'adoption d'une approche holistique dans la réalisation des divers travaux, qui tiendrait compte d'autres enjeux liés à la qualité de l'air intérieur, tels que les changements climatiques et l'efficacité énergétique.

1 Mise en contexte

1.1 Changements climatiques au Canada et au Québec

Dans son dernier rapport, le GIEC soutenait que les émissions de GES, largement responsables des récents changements climatiques, ont continué d'augmenter au cours des dernières années (IPCC, 2014). Certaines tendances à l'égard de l'évolution du climat ont déjà pu être constatées sur le territoire canadien au cours du XX^e siècle et il est anticipé que celles-ci s'accroîtront dans le futur, avec des variations régionales et saisonnières importantes (Warren et Lemmen, 2014; Ouranos, 2010). Pour la province de Québec plus particulièrement, les plus récents scénarios climatiques indiquent que des événements climatiques plus prononcés seraient attendus au nord, ainsi qu'une augmentation des températures moyennes sur l'ensemble du territoire, et ce, de façon plus importante au cours de la saison hivernale. Une augmentation de la quantité de précipitations hivernales est également anticipée, alors qu'elle devrait demeurer stable lors de la saison estivale. Les changements dans les précipitations et la température seront davantage marqués à l'égard des extrêmes que des moyennes (p. ex. hausse des températures maximales et minimales, augmentation de la quantité de pluie lors des journées les plus pluvieuses) (Ouranos, 2015a). L'annexe 1 présente plus en détail les principaux changements climatiques anticipés pour le Québec ainsi que les conséquences attendues sur l'environnement naturel et bâti.

1.2 Facteurs qui influencent la QAI

La QAI représente un enjeu de santé publique majeur. Les citoyens canadiens passent approximativement 90 % de leur temps à l'intérieur (Dales et collab., 2008; Santé Canada, 2015), en particulier dans les bâtiments d'habitation. Bien que le domicile soit d'abord un lieu destiné au confort et à la protection des occupants, ces derniers peuvent y être exposés à différents types de contaminants, provenant de sources intérieure et extérieure, qui peuvent avoir une incidence sur leur santé.

De façon globale, la qualité de l'environnement intérieur est dépendante de trois principaux facteurs, soit des caractéristiques de l'environnement extérieur, des caractéristiques du bâtiment ainsi que des comportements des occupants (IOM, 2011). Ceux-ci sont présentés plus en détail dans le tableau 1. L'état de santé et la perception des occupants quant à la QAI, bien que non présentés dans le tableau, jouent aussi un rôle important, notamment dans les choix et les comportements des occupants. Par ailleurs, les conditions nécessaires à un environnement intérieur de qualité peuvent être différentes d'une personne à une autre, entre autres selon leur vulnérabilité et leurs attentes.

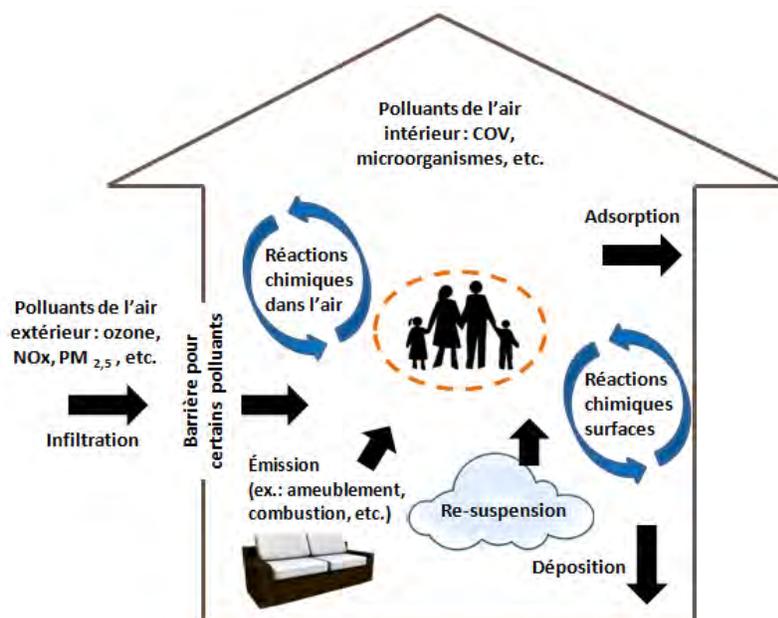
Tels que présentés à la figure 1, une grande variété de mécanismes sont susceptibles d'affecter les concentrations de contaminants dans l'air intérieur et, par le fait même, l'exposition des occupants à ces derniers. Peuvent être mentionnés parmi les principaux processus impliqués : l'introduction et l'infiltration de contaminants de source extérieure (p. ex. ozone et particules fines), l'émission de contaminants à partir de diverses sources intérieures (p. ex. les COV émis par les matériaux et l'ameublement, les NO_x émis par les activités de combustion telles que la cuisson des aliments), les réactions chimiques dans l'air et sur les surfaces intérieures (p. ex. production de sous-produits tels que le formaldéhyde à partir de l'ozone [voir annexe 2]), les réactions d'adsorption et de déposition sur les surfaces ainsi que la remise en suspension des contaminants déposés sur les surfaces (influençant notamment les concentrations de particules dans l'air).

Tableau 1 Principaux facteurs qui influencent la qualité de l'environnement intérieur

Facteurs	Description
Caractéristiques de l'environnement extérieur	Inclut les aspects tels que les polluants présents dans l'air extérieur (p. ex. ozone, particules fines), les conditions climatiques et météorologiques (p. ex. précipitations intenses, épisodes de chaleur, etc.), les caractéristiques du sol (p. ex. porosité, perméabilité, qui modulent le potentiel de migration du radon) et les conditions géologiques (p. ex. présence d'uranium dans le substrat rocheux, qui module le potentiel d'émission de radon).
Caractéristiques conceptuelles et structurales du bâtiment	Inclut les aspects liés à la qualité de la conception, de la structure et des composants des bâtiments tels que l'intégrité, l'étanchéité et l'imperméabilité de l'enveloppe du bâtiment (p. ex. fondations, murs, toiture, fenêtres, portes, isolation), les caractéristiques des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation ainsi que les types de matériaux qui composent le bâtiment. Ces différentes caractéristiques influencent notamment l'émission de contaminants à l'intérieur du bâtiment (p. ex. selon le choix de matériaux), le taux d'échanges d'air à l'heure, l'intrusion de contaminants provenant de l'extérieur à l'intérieur des bâtiments (p. ex. radon, ozone, particules fines) ainsi que le potentiel d'infiltration d'eau et de croissance d'agents microbiens associés à l'humidité excessive (p. ex. moisissures).
Comportements des occupants	Inclut les aspects liés aux choix et à l'utilisation de matériaux de construction, de décoration et d'ameublement ainsi que de produits (p. ex. nettoyants, assainisseurs) qui ont le potentiel d'émettre des contaminants dans l'air intérieur (p. ex. des COV), aux activités d'opération et d'entretien réalisées ainsi qu'aux connaissances, perceptions et comportements qui influencent la ventilation (p. ex. utilisation du système de ventilation central, de la hotte de cuisine, du ventilateur d'extraction de la salle de bain, ouverture des fenêtres, etc.).

Adapté de IOM, 2011.

Figure 1 Mécanismes qui influencent l'exposition aux contaminants de sources intérieure et extérieure



Adaptée de Laumbach, Meng et Kipen, 2015.

2 Objectifs

L'objectif principal de la présente revue de la littérature est de dresser un inventaire des mesures d'adaptation existantes, applicables au milieu résidentiel dans un contexte géographique similaire à celui du Québec, notamment au regard des enjeux centraux que sont :

- l'introduction accrue de contaminants provenant de l'extérieur à l'intérieur des habitations;
- l'émission accrue de contaminants provenant de sources intérieures.

Ainsi, la revue de la littérature porte sur :

- les potentialités d'introduction des contaminants de sources extérieures dans l'enceinte des bâtiments ainsi que d'augmentation de l'émission de contaminants de sources intérieures dans un contexte de changements climatiques;
- et les méthodes d'adaptation visant l'atténuation de l'introduction dans les bâtiments de contaminants provenant de l'extérieur ainsi que de l'augmentation de l'émission de contaminants intérieurs, telles que la spécificité et l'efficacité des technologies de purification de l'air (centrales et mobiles) ainsi que sur les mesures de réduction à la source, tels la normalisation et l'étiquetage des matériaux de construction et de décoration.

Finalement, la revue de la littérature permet de faire une analyse des mesures d'adaptation répertoriées afin de déterminer celles qui répondent le mieux aux besoins de la population du Québec en matière de maintien et de contrôle de la QAI. D'autres préoccupations ont aussi été considérées dans l'analyse, telles que l'efficacité énergétique et les efforts nécessaires à l'application des mesures pour les occupants et les propriétaires des bâtiments concernés. Cette démarche vise à mettre en relief les mesures qui pourraient être plus aisément mises en œuvre et soutenues par les organisations compétentes ainsi que par la population.

3 Méthodologie

3.1 Recherche documentaire

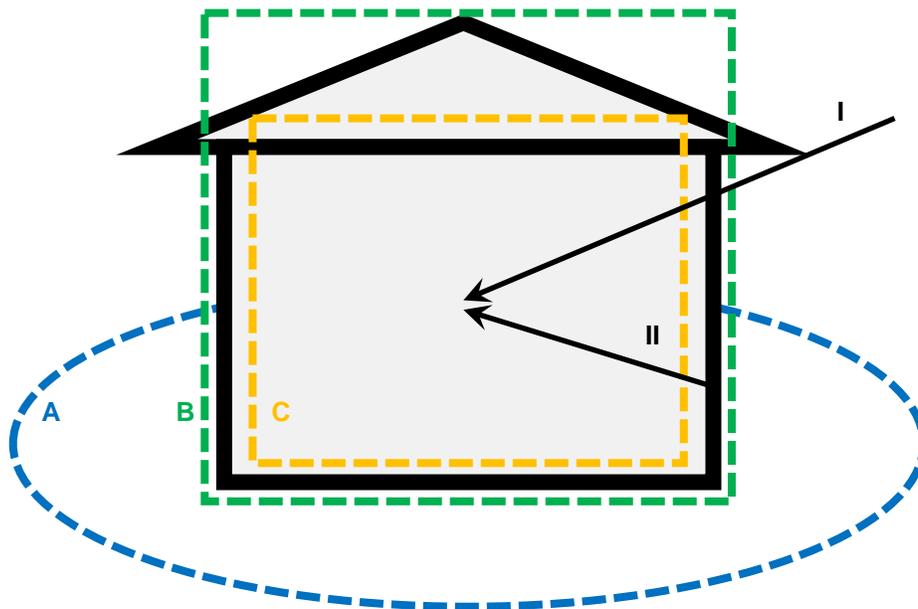
À l'automne 2014, l'équipe de travail a entamé la réalisation de la présente revue de la littérature par l'élaboration d'un bordereau de recherche documentaire avec l'appui d'une professionnelle en documentation de l'INSPQ. Ce travail a permis de mettre en relation un certain nombre de concepts décrits par une série de mots-clés. Les thèmes de la recherche documentaire proposés ont été circonscrits à l'aide de six concepts : « air intérieur », « changements climatiques », « contaminants », « législation, lignes directrices, recommandations, normalisation, étiquetage », « matériaux de construction et produits de décoration » et « techniques de traitement », ceux-ci s'appliquant spécifiquement aux bâtiments d'habitation résidentiels. Les détails de la méthodologie et de la stratégie utilisées pour la recherche documentaire (bases de données et mots-clés utilisés) sont présentés à l'annexe 3.

3.2 Champs d'application des mesures d'adaptation documentées

Selon certains auteurs s'étant déjà penchés sur la question, l'adaptation vise à se préparer aux conséquences actuelles ou anticipées des changements climatiques dans le but de réduire les effets sur la santé qui leur sont potentiellement associés (Frumkin et collab., 2008; Ouranos, [s.d.]). Afin de schématiser la portée des options de gestion de la QAI répertoriées dans la littérature, celles-ci ont été scindées en trois grandes classes de mesures d'adaptation aux changements climatiques, dont les champs d'application se déclinent de façon concentrique (voir figure 2). Notons toutefois que la revue de la littérature effectuée n'a permis de relever que très peu d'informations concernant les segments les plus distaux de ce spectre, soit les mesures pouvant être appliquées à la gestion des éléments en périphérie du bâtiment (identifiées par la lettre A) qui peuvent avoir un impact sur la QAI.

En effet, conformément au mandat initial, les concepts et mots-clés utilisés pour élaborer le bordereau de recherche sur lequel s'appuie la revue de la littérature portaient davantage sur les techniques de traitement de l'air applicables aux habitations résidentielles et les mesures de réduction à la source qui peuvent être mises à profit dans un contexte de changements climatiques (voir annexe 3). Les prochaines sections aborderont donc principalement les mesures appliquées à l'enveloppe et au milieu intérieur du bâtiment, soit **les éléments du schéma identifiés par les lettres B et C** (voir figure 2).

Figure 2 Champs d'application des options de gestion de la QAI



- I : Sources de contaminants et de stress physiques externes
- II : Sources de contaminants et de stress physiques internes
-  : Enveloppe du bâtiment
- A : Options de gestion appliquées au milieu extérieur
- B : Options de gestion appliquées à l'enveloppe**
- C : Options de gestion appliquées au milieu intérieur**

4 Changements climatiques et QAI

4.1 Conséquences des changements climatiques sur la QAI

À l'heure actuelle, outre quelques publications relativement récentes (Vardoulakis et collab., 2015; Nazaroff, 2013; IOM, 2011; Schenck et collab., 2010; Field, 2010; Fisk, 2015) ainsi que des éditoriaux et commentaires sur le sujet (Spengler, 2012; Potera, 2011; Nazaroff, 2008), il existe peu de littérature scientifique portant spécifiquement sur la problématique des changements climatiques et de leurs conséquences sur la QAI. Pourtant, les changements climatiques ont et auront une influence sur les conditions de l'environnement extérieur, la qualité des bâtiments ainsi que sur les comportements des occupants, conduisant conséquemment à des impacts sur la QAI. Par ailleurs, dans la perspective où une hausse de certains événements climatiques extrêmes est attendue (p. ex. épisodes de chaleur accablante), certains auteurs semblent d'avis que la population passera davantage de temps dans l'environnement intérieur dans le futur (IOM, 2011; Mudarri, 2010).

4.1.1 CONSÉQUENCES POTENTIELLES SUR L'ENVIRONNEMENT NATUREL ET BÂTI

Les conséquences potentielles sur l'environnement naturel et bâti les plus susceptibles d'avoir une influence sur la QAI sont présentées ci-dessous. La section qui suit s'appuie en majeure partie sur les publications récentes d'Ouranos (Ouranos, 2015a, 2015b, 2010). Les références complémentaires consultées sont précisées dans le texte.

Hausse des températures et phénomènes liés

Une conséquence attendue de la hausse des températures spécifique au milieu nordique est la fonte du pergélisol. Celle-ci pourrait entraîner des affaissements et des glissements de terrain, ce qui risque de causer des dommages importants aux bâtiments. Ce réchauffement est également susceptible de modifier la répartition et d'augmenter le développement de certains insectes ravageurs pour les cultures. Malgré la hausse des besoins en climatisation en été, une baisse de la demande en énergie est anticipée sur une base annuelle en raison de la diminution des besoins en chauffage durant l'hiver.

Altération de la qualité de l'air extérieur

Le réchauffement et l'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère risquent fort probablement d'augmenter les concentrations de pollens allergènes dans l'air, par une élévation de la production de pollens et une prolongation de la période de croissance des plantes (Ziska, Epstein et Schlesinger, 2009). Notamment, l'expansion géographique de l'herbe à poux (*Ambrosia*) à travers le Québec, qui représente déjà une préoccupation notable de santé publique considérant le nombre important de personnes affectées, sera favorisée par les conditions climatiques futures.

Les projections concernant les principaux contaminants extérieurs, soit l'ozone et les PM_{2,5}, sont plus incertaines puisque les concentrations futures seront dépendantes des changements qui surviendront non seulement à l'égard du climat physique (p. ex. précipitations), mais également de l'ampleur des activités anthropiques responsables de l'émission de polluants atmosphériques, ce dernier facteur étant considéré le plus déterminant. Conséquemment, la mise en place de stratégies et de politiques visant la réduction des émissions aura une influence importante sur les concentrations anticipées de contaminants dans le futur (p. ex. stratégie d'électrification des transports) (IOM, 2011). Pour les PM_{2,5}, ce sont les changements dans les émissions régionales qui influencent davantage les projections et, selon les modèles, les concentrations atmosphériques de PM_{2,5} en Amérique du Nord devraient diminuer dans le futur. Cependant, des saisons estivales plus

sèches, telles que projetées, suggèrent des conditions propices à des incendies de forêt plus fréquents. Ces incendies émettent des polluants dans l'air, en particulier des particules fines, qui sont transportées sur de longues distances et augmentent les concentrations mesurées dans l'air extérieur jusqu'à des centaines de kilomètres du lieu de l'incendie (INSPQ, 2013b). Pour l'ozone, les concentrations projetées seront influencées par les émissions régionales et nationales. Certains modèles prévoient ainsi une diminution dans les concentrations d'ozone troposphérique, alors que d'autres prévoient une augmentation. Néanmoins, sans changement dans les émissions et en présence d'un réchauffement climatique tel que projeté, une augmentation des pics de concentrations d'ozone et de PM_{2,5} est anticipée dans les zones polluées.

Inondations et sécheresses

Bien que les inondations étaient par le passé davantage un phénomène associé aux crues printanières, une augmentation des sinistres associés aux crues est observée à l'heure actuelle, et ce, en toutes saisons. L'augmentation prévue des événements de pluies intenses et de la quantité de pluie lors des jours les plus pluvieux amène un risque accru d'inondations soudaines et localisées. Certains secteurs résidentiels, en particulier dans les régions côtières, seront d'ailleurs plus à risque de submersion.

Il est également anticipé que les changements climatiques (notamment la durée, l'intensité et la fréquence de certains événements tels que les pluies et les redoux hivernaux) affecteront l'intégrité des bâtiments ainsi que leur rythme d'usure. Le manque de connaissances sur l'état des bâtiments, leur vieillissement, leur usure et leur entretien rend les infrastructures vulnérables aux aléas climatiques, et ce, pour l'ensemble du Québec.

Néanmoins, les projections à l'égard de l'humidité du sol indiquent des conditions plus sèches à l'échelle annuelle pour le Québec, en particulier pendant la saison estivale. L'assèchement des sols de type argileux pourrait causer des fissures aux fondations des bâtiments.

Augmentation des événements climatiques extrêmes

Les événements climatiques extrêmes (p. ex. orages, vents violents, tempêtes), dont la fréquence et l'intensité de certains sont susceptibles d'être affectées par les changements climatiques, pourraient avoir des conséquences sur les infrastructures de distribution et de transport de l'électricité et, conséquemment, sur la fiabilité et la disponibilité du service.

4.1.2 CONSÉQUENCES POTENTIELLES SUR LES CONTAMINANTS PROVENANT DE L'EXTÉRIEUR

Les contaminants présents dans l'air extérieur peuvent s'introduire dans les bâtiments de différentes façons, soit par la ventilation naturelle dite « passive » (c'est-à-dire de manière non volontaire par les interstices de l'enveloppe), soit par la ventilation naturelle dite « volontaire » (ouverture volontaire des portes et fenêtres) ou encore par le biais des systèmes de ventilation mécanique (ventilation volontaire soutenue par des dispositifs mécanisés) (Breen et collab., 2014; Chen et Zhao, 2011). Parmi les polluants extérieurs susceptibles de s'introduire à l'intérieur, l'ozone et les particules fines revêtent une importance particulière au regard des politiques de contrôle de la pollution atmosphérique (Nazaroff, 2013; IOM, 2011) puisqu'ils sont les principaux contaminants qui entrent dans la composition du smog.

Il est présumé que les changements climatiques auront un impact sur les concentrations de contaminants de source extérieure dans l'air intérieur. Cependant, les conséquences précises de ces changements sont difficiles à prévoir. D'une part, les changements qui se produiront à l'égard des concentrations de contaminants de source extérieure auront nécessairement des impacts sur la QAI

(Nazaroff, 2013). Toutefois, l'incertitude demeure quant aux projections des concentrations atmosphériques pour certains de ces contaminants (par exemple, pour les $PM_{2,5}$ et l'ozone). D'autre part, plusieurs facteurs modulent l'introduction et l'infiltration des contaminants de source extérieure à l'intérieur des bâtiments et les changements climatiques pourraient avoir un impact sur cette relation. Ces facteurs incluent notamment les caractéristiques des polluants, les caractéristiques du bâtiment, les comportements des occupants (Nazaroff, 2013) ainsi que les conditions climatiques.

En effet, les caractéristiques physicochimiques des contaminants retrouvés à l'extérieur modulent leur potentialité d'infiltration et leur persistance dans l'air intérieur. Par exemple, comme rapporté dans la revue de l'IOM et de Nazaroff (Nazaroff, 2013; IOM, 2011), les particules de faible diamètre (c.-à-d. entre 0,1 et 2 μm) s'infiltrent plus aisément au travers de l'enveloppe et persistent plus longtemps dans l'air intérieur. À l'inverse, les particules de plus grand diamètre (c.-à-d. entre 2,5 et 10 μm), qui s'infiltrent plus difficilement dans les bâtiments par les interstices de l'enveloppe, sont plus facilement captées par les dispositifs de filtration des systèmes de ventilation et se déposent plus rapidement sur les surfaces une fois à l'intérieur. Ainsi, considérant la taille des grains de pollen intacts (qui mesurent approximativement quelques dizaines de μm), le bâtiment représenterait une certaine protection à l'égard de leur infiltration. Les conséquences d'une augmentation des concentrations extérieures de pollens, telle qu'attendue avec les changements climatiques, sur celles retrouvées à l'intérieur ne semblent toutefois pas avoir fait l'objet d'études (IOM, 2011).

Quant à l'ozone, il a la particularité d'être un polluant très réactif qui, une fois dans l'environnement intérieur, réagit rapidement avec des composés chimiques présents, notamment sur les surfaces (IOM, 2011; Weschler, 2006; Moriske et collab., 1998). Ces réactions entraînent la formation de sous-produits tels que le formaldéhyde, faisant en sorte que l'ozone ne persiste pas longtemps dans l'air intérieur. Selon l'IOM, des concentrations atmosphériques d'ozone plus élevées, combinées à des taux d'échanges d'air plus faibles (p. ex. dus à la fermeture des fenêtres ou à la réduction de la ventilation mécanique), auront des conséquences incertaines sur les concentrations intérieures d'ozone, mais pourraient toutefois accroître celles des sous-produits générés par la réaction de ce dernier avec d'autres composés dans l'environnement intérieur (IOM, 2011).

Ces données mettent en lumière l'importance des caractéristiques du bâtiment dans la relation entre les concentrations de contaminants présents à l'extérieur et celles retrouvées à l'intérieur. Par exemple, le type et l'âge du bâtiment (Taylor et collab., 2014; MacNeill et collab., 2014) ainsi que la présence d'un dispositif de filtration dans le système de ventilation mécanique (Nazaroff, 2013; IOM, 2011) sont des facteurs qui modulent l'introduction et l'infiltration des particules. Dans un contexte de changements climatiques, les modifications à l'égard de l'intégrité et du rythme d'usure des bâtiments qui sont susceptibles de survenir pourraient avoir une influence sur leur étanchéité et, ultimement, sur l'infiltration des contaminants de source extérieure. Les modifications qui seront apportées aux pratiques de construction et d'opération des bâtiments moduleront également cette relation (IOM, 2011; Weschler, 2006; Moriske et collab., 1998).

Les impacts potentiels des changements climatiques sur l'humidité du sol pourraient également affecter la migration de contaminants tels que le radon (Field, 2010), et modifier le patron d'exposition à ce contaminant dans l'environnement intérieur. Cependant, les changements à l'égard des vents et de la température, combinés ou non à une étanchéité accrue des bâtiments, auront une influence sur les différences de pression à travers l'enveloppe, ce qui pourrait modifier la ventilation naturelle passive⁵. Par exemple, une hausse des températures est susceptible de diminuer la

⁵ Les facteurs qui influencent la pression d'air dans les bâtiments sont expliqués plus en détail dans l'avis scientifique de l'INSPQ *La ventilation des bâtiments d'habitation : impacts sur la santé respiratoire des occupants* (INSPQ, 2006).

différence de température entre l'intérieur et l'extérieur et, conséquemment, de réduire de façon globale l'infiltration passive des contaminants à l'intérieur (Ilacqua et collab., 2015).

Les changements climatiques entraîneront également fort probablement des changements dans les comportements des occupants à l'égard de la ventilation et de la climatisation, ce qui influencera les taux d'échanges d'air ainsi que l'introduction de contaminants provenant de sources extérieures dans les bâtiments (Nazaroff, 2013). Bien que la ventilation soit reconnue comme un mécanisme important afin de diluer les concentrations de polluants de source intérieure, elle peut favoriser en contrepartie l'introduction de polluants de source extérieure dans l'enceinte du bâtiment (Nazaroff, 2013; Sherman et Matson, 2003). Plusieurs auteurs ont ainsi mis en évidence que l'ouverture des fenêtres en été augmente de manière importante la contribution des particules provenant de l'extérieur sur les concentrations intérieures (Meier et collab., 2015; Taylor et collab., 2014; MacNeill et collab., 2014). De la même manière, les concentrations dans l'air intérieur de certains contaminants tels que l'ozone sont étroitement liées aux taux d'échanges d'air (Lv et Zhu, 2013; Weschler, 2006). Dans un contexte de réchauffement climatique, une utilisation accrue de la climatisation, comme elle est habituellement accompagnée de la fermeture des fenêtres, aura tendance à diminuer l'introduction et la concentration des contaminants de source extérieure dans l'air intérieur (Nazaroff, 2013).

Enfin, les changements dans la distribution et le développement d'insectes ravageurs pour les cultures qui sont susceptibles de survenir avec les changements climatiques pourraient conduire à une utilisation accrue de certains pesticides. Transportés dans les bâtiments (par exemple, par la ventilation, les chaussures ou les vêtements des occupants), les concentrations présentes dans l'environnement intérieur pourraient ainsi augmenter s'ils sont mal utilisés ou si les précautions de base ne sont pas respectées (IOM, 2011).

4.1.3 CONSÉQUENCES POTENTIELLES SUR LES CONTAMINANTS PROVENANT DE L'INTÉRIEUR

Les changements climatiques sont susceptibles de modifier les conditions de température et d'humidité dans l'environnement intérieur de différentes façons, ce qui aura éventuellement un impact sur les concentrations de contaminants de source intérieure. Cependant, il demeure difficile d'apprécier dans quelle mesure ces conditions seront modifiées et de quelle manière celles-ci influenceront la QAI en raison des nombreux facteurs impliqués.

En particulier, la hausse anticipée des vagues de chaleur et des précipitations sont susceptibles d'augmenter à divers degrés la température et l'humidité relative à l'intérieur de certains bâtiments (IOM, 2011; Weschler, 2006; Moriske et collab., 1998). Ces changements ne dépendront toutefois pas seulement des conditions climatiques futures; certaines caractéristiques des bâtiments et de leur environnement immédiat peuvent avoir une influence importante sur les conditions de température et d'humidité à l'intérieur, notamment la quantité de rayonnement solaire qui atteint la structure, la présence de végétation à proximité, le degré d'isolation et d'étanchéité des bâtiments, les matériaux utilisés et leur capacité à réfléchir ou à absorber la chaleur, ainsi que la présence et le type de sources de chaleur à l'intérieur telles que l'éclairage artificiel et les appareils électroménagers (Franck et collab., 2013; IOM, 2011; INSPQ, 2009). Des chercheurs ayant réalisé des projections pour des écoles répondant aux exigences actuelles de construction au Royaume-Uni sont arrivés à la conclusion que le réchauffement aura pour effet d'augmenter le nombre d'heures où la température intérieure sera supérieure à 28 °C des mois de mai à septembre (Jenkins, Peacock et Banfill, 2009). Les auteurs soulignent ainsi l'importance de songer dès maintenant à la conception de bâtiments permettant de mieux s'adapter à cette conséquence des changements climatiques.

En plus d'avoir des impacts sur le confort thermique des occupants et leur adaptation à la chaleur, des conditions plus chaudes et plus humides dans l'environnement intérieur auront tendance à favoriser l'émission de certains COV tels que le formaldéhyde (Vardoulakis et collab., 2015; Dassonville et collab., 2009; Dingle et Franklin, 2002) ainsi que l'émission de composés organiques semi-volatils (COSV) (Weschler et Nazaroff, 2008). Elles faciliteront de plus la prolifération de certains micro-organismes tels que les moisissures (Mendell et collab., 2011; Heseltine, Rosen et World Health Organization, 2009) et les acariens (IOM, 2011; Seppänen et Fisk, 2004; Fernández-Caldas, Trudeau et Ledford, 1994). Ajoutées à cela, des conditions plus humides dans les bâtiments, favorisées par les changements climatiques, représentent un terreau propice aux infestations d'organismes indésirables qui pourraient également conduire à une plus grande utilisation de pesticides dans l'environnement intérieur (IOM, 2011). Par ailleurs, l'activité de certains agents infectieux diffère selon les saisons dans les climats tempérés, ce qui porte à croire que les changements climatiques auront une influence sur leur transmission dans l'environnement intérieur. Par exemple, des conditions plus chaudes et plus humides auraient tendance à diminuer la transmission de virus respiratoires tels que l'influenza (Pica et Bouvier, 2012; Lowen et collab., 2007).

Cependant, il importe de noter que les modifications qui se produiront suivant l'utilisation des dispositifs de climatisation, de chauffage et de ventilation, lorsque présents, moduleront aussi les conditions de température et d'humidité dans l'environnement intérieur ainsi que les concentrations de contaminants de source intérieure (Vardoulakis et collab., 2015; Nazaroff, 2013; IOM, 2011). Par exemple, une utilisation accrue de la climatisation pourrait avoir comme effet de réduire les populations d'acariens ainsi que l'émission de COV par les matériaux, notamment par la diminution de l'humidité ambiante (Spengler, 2012; IOM, 2011). À l'inverse, dans un contexte où les scénarios climatiques prévoient des hivers plus doux, la réduction de l'utilisation des appareils de chauffage en hiver pourrait conduire à des conditions plus humides et une augmentation de la prolifération d'acariens. De plus, selon Morey (2010), le manque d'entretien des systèmes de climatisation (afin de limiter les coûts, par exemple) peut faciliter la condensation à l'intérieur du système et favoriser la prolifération de contaminants microbiens. Une réduction de la ventilation (causée, par exemple, par une utilisation accrue de la climatisation) aurait pour conséquence d'augmenter les concentrations de contaminants de source intérieure (Laumbach, Meng et Kipen, 2015; Nazaroff, 2008).

L'augmentation anticipée des inondations provoquées par la hausse des événements de pluie intense, combinée à l'usure et aux dommages potentiels des infrastructures causés par le vieillissement du parc immobilier, pourraient entraîner un risque accru de problèmes d'humidité excessive à l'intérieur (Vardoulakis et collab., 2015). Encore une fois, de telles conditions favorisent le développement de micro-organismes tels que les moisissures. Les changements climatiques pourraient ainsi conduire à une exposition plus importante des occupants à ces contaminants.

Enfin, les conséquences des changements climatiques sur les infrastructures de distribution et de transport de l'énergie pourraient avoir des conséquences sur le nombre d'intoxications résidentielles au CO (Nazaroff, 2013; IOM, 2011). Comme observé lors de la tempête du verglas de 1998 (Berry, 2008; Roy, 1998) ainsi que lors d'autres événements climatiques extrêmes rapportés aux États-Unis (Johnson-Arbor, Quental et Li, 2014; Waite, Murray et Baker, 2014; Muscatiello et collab., 2010; Van Sickle et collab., 2007; CDC, 2009, 2006, 2005), les interruptions de service d'énergie sur des périodes prolongées représentent des situations propices à l'adoption de comportements inappropriés (en particulier l'utilisation de génératrices à l'intérieur), qui peuvent entraîner des concentrations élevées, voire mortelles, de CO dans l'air intérieur.

4.1.4 SYNTHÈSE DES CONSÉQUENCES POTENTIELLES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA QAI

La figure 3 de la page suivante présente une synthèse des conséquences possibles des changements climatiques sur les contaminants présents dans les bâtiments, provenant d'une part de source extérieure et, d'autre part, de source intérieure. Celles-ci sont détaillées à l'annexe 2.

4.2 Populations vulnérables aux conséquences négatives des changements climatiques sur la QAI

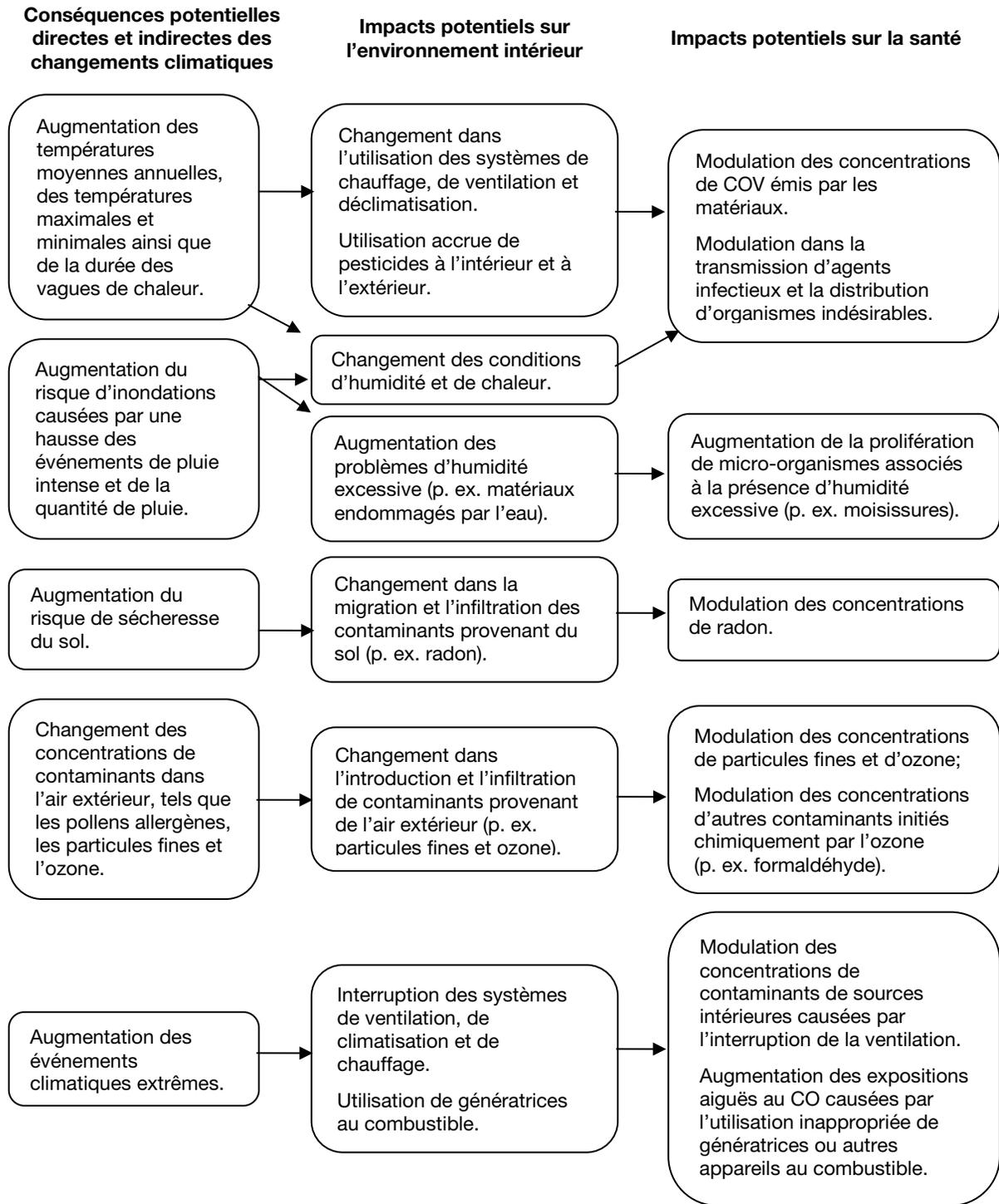
En raison de facteurs intrinsèques (p. ex. âge, état de santé) et extrinsèques (p. ex. conditions de logement), certains groupes de la population risquent de subir davantage les conséquences négatives des changements climatiques sur la QAI, contribuant ainsi aux disparités de santé et de capacité d'adaptation au sein de la population (IOM, 2011).

Notamment en raison **de leur sensibilité et/ou de leur état de santé**, certaines personnes sont plus vulnérables aux effets associés à l'exposition aux contaminants de l'air. Ce groupe inclut les personnes ayant des problèmes de santé chronique (p. ex. asthme, maladie pulmonaire obstructive chronique [MPOC]), diabète, maladie cardiovasculaire, etc.), qui peuvent voir leur condition s'aggraver lorsqu'exposées à des concentrations élevées de contaminants dans l'air. Il comprend également les personnes âgées (du fait de la prévalence importante de maladies chroniques chez ce groupe d'âge ainsi que d'autres facteurs associés au vieillissement) et les jeunes enfants (entre autres en raison de leur système immunitaire qui n'est pas complètement développé et de la quantité plus importante d'air respiré par kilogramme de poids). Ces personnes ont par ailleurs tendance à passer davantage de temps dans l'environnement intérieur, les rendant ainsi plus exposées aux contaminants s'y trouvant (Laumbach, Meng et Kipen, 2015; IOM, 2011).

Les **conditions de logement ainsi que la localisation** sont également des facteurs importants qui influencent la capacité d'adaptation. La localisation réfère tant à la situation géographique du bâtiment (p. ex. en milieu rural ou en milieu urbain, en périphérie ou au centre-ville) qu'à son environnement immédiat (p. ex. près d'une source de pollution extérieure telle qu'une route achalandée, dans une zone inondable ou susceptible à l'érosion, dans un îlot de chaleur). Par exemple, les bâtiments plus âgés peuvent être plus à risque de présenter certains problèmes (p. ex. isolation insuffisante, susceptibilité plus importante aux infiltrations d'air et d'eau) et exposer davantage les ménages aux conséquences des changements climatiques sur la QAI (IOM, 2011).

Ces derniers facteurs sont par ailleurs étroitement liés au **statut économique** des ménages. Selon une revue d'études réalisées en contexte européen, les ménages à faible revenu sont plus susceptibles d'habiter des logements en moins bonne condition (p. ex. isolation insuffisante, besoins en réparations majeures) et des quartiers offrant une qualité de vie moindre (p. ex. avec moins d'espaces verts, plus près des routes achalandées et de sites pollués). Ils ont par ailleurs moins accès aux ressources leur permettant d'apporter les modifications, les réparations et l'entretien nécessaires pour s'adapter (p. ex. rénovations après une inondation) (OMS Europe, 2010). Des conditions de logement inadéquates exposent davantage ces ménages à une multitude de facteurs de risque associés à une mauvaise qualité de l'air (p. ex. problèmes d'humidité excessive et de croissance fongique) ainsi qu'à d'autres problèmes (p. ex. bruit, inconfort thermique), contribuant ainsi aux inégalités de santé.

Figure 3 Schéma des principaux processus par lesquels les changements climatiques pourraient affecter la QAI



Adaptée de IOM, 2011; Mudarri, 2010.

Le **mode d'occupation** (c.-à-d. propriétaire ou locataire) du logement a aussi une influence sur la capacité d'adaptation, selon la revue réalisée par l'IOM. Ainsi, les ménages locataires auraient peu de contrôle sur l'adaptation de leur logement face aux changements climatiques et sur la mise en place de mesures permettant de réduire l'exposition à certains contaminants (p. ex. installation d'un système de ventilation centralisé) (IOM, 2011).

Il importe enfin de souligner que les facteurs mentionnés dans cette section jouent également un rôle important dans la vulnérabilité et la capacité d'adaptation à d'autres problématiques associées aux changements climatiques, telles que la hausse des températures (OMS Europe, 2010), contribuant ainsi au cumul de risques pour ces personnes.

5 Mesures d'adaptation

5.1 Mesures de réduction et de contrôle de l'infiltration et de l'émission des contaminants

5.1.1 APERÇU DES MESURES D'ADAPTATION APPLICABLES À L'ENVIRONNEMENT EXTÉRIEUR

La localisation d'un bâtiment de même que son environnement immédiat peuvent affecter la nature et la variabilité spatio-temporelle des contaminants extérieurs qui pourront ensuite s'introduire à l'intérieur. Il importe donc de tenir compte de ces paramètres lors de la sélection et de l'application de mesures d'adaptation destinées à maintenir la QAI dans les bâtiments d'habitation, et ce, afin de ne pas engendrer d'effets indésirables ou antagonistes aux résultats souhaités (OQAI, 2012b).

Les mesures visant à réduire les concentrations de contaminants de source extérieure pourront contribuer à réduire les concentrations retrouvées dans l'environnement intérieur, en particulier dans les bâtiments ventilés naturellement qui ne disposent pas d'un système de ventilation mécanique muni d'un dispositif de filtration. Ces mesures touchent essentiellement le secteur des transports, celui-ci étant la principale source de certains polluants atmosphériques (p. ex. NO_x et $\text{PM}_{2,5}$), en plus d'être responsable d'émissions de GES (UK GBC, 2015; MDDELCC, 2014, 2002).

De façon similaire, certaines mesures liées à l'aménagement de l'environnement immédiat (p. ex. création d'îlots de fraîcheur en milieu urbain, plantation d'arbres), déjà préconisées par la santé publique afin de mieux s'adapter aux conséquences des changements climatiques, peuvent, de manière indirecte, offrir certains bénéfices au regard de la QAI. À titre d'exemple, en plus d'améliorer la qualité de l'air ambiant par la capture et la filtration des polluants atmosphériques, la végétalisation permet une meilleure rétention des eaux pluviales par rapport aux surfaces imperméables (UK GBC, 2015). Ainsi, les risques d'accumulation et d'infiltration d'eau sont réduits et, conséquemment, les problèmes potentiels d'humidité excessive et de contamination fongique dans les bâtiments. De plus, le fait de rafraîchir l'environnement immédiat des bâtiments par le biais de la végétalisation peut contribuer à réduire la température de leur enveloppe et de leur enceinte et, de ce fait, diminuer l'émission de certains contaminants de l'air intérieur (p. ex. formaldéhyde), en plus d'assurer le confort thermique des occupants (INSPQ, 2009).

Comme précisé dans l'avant-propos et compte tenu des objectifs du présent mandat visant plus spécifiquement les mesures d'adaptation appliquées à l'environnement intérieur, les auteurs du présent rapport ont convenu de ne pas traiter davantage des mesures applicables à l'environnement extérieur. Le lecteur intéressé par de telles mesures pourrait se référer à d'autres ouvrages, portant notamment sur la lutte contre les îlots de chaleur urbains ainsi que sur les perspectives d'intervention favorisant le transport actif (INSPQ, 2009; 2014; Boucher et Fontaine, 2011).

5.1.2 ÉTANCHÉISATION ET ISOLATION DE L'ENVELOPPE DU BÂTIMENT

Par analogie, l'enveloppe d'un bâtiment renvoie à l'image d'une membrane déployée entre le milieu extérieur et l'environnement intérieur. Cette enveloppe constitue une barrière physique visant à limiter l'exposition des occupants aux stress physiques (c.-à-d. thermique, hydrique, éolien, auditif) et aux contaminants (p. ex. particules fines, gaz de combustion, ozone) provenant de l'extérieur. Les prescriptions incluses dans les plus récentes versions des codes de bâtiment en termes d'efficacité énergétique, d'isolation et d'étanchéité constituent des avancées notables (Barnes et collab., 2013). Le renforcement des contraintes réglementaires et des incitatifs visant à faire appliquer ces

prescriptions constituerait une mesure d'adaptation de première importance, et ce, tant pour les bâtiments neufs que pour ceux faisant l'objet de rénovations majeures (Franck et collab., 2013).

Afin de limiter le transfert de chaleur et d'humidité de part et d'autre de l'enveloppe et des problèmes y étant potentiellement associés (comme les ponts thermiques, la condensation, etc.), de nouveaux procédés de construction, d'isolation et d'étanchéisation sont donc de plus en plus appliqués aux nouvelles constructions⁶. Lorsqu'elles sont appliquées de façons concomitante et optimale, ces techniques touchant l'enveloppe des bâtiments offrent une solution passive et peu énergivore de contrer les vagues de chaleur et de protéger les populations vulnérables de leurs effets (Santamouris, Sfakianaki et Pavlou, 2010) et, ainsi, de constituer une mesure d'adaptation simple et efficace. De plus, elles assurent en général un meilleur contrôle du confort thermique des occupants à l'intérieur, en préservant la fraîcheur en été et la chaleur en hiver (IOM, 2011; INSPQ, 2009), permettant du même coup de réduire les besoins en climatisation (Pinkerton et collab., 2013), en chauffage ainsi qu'en consommation d'énergie (économies pouvant aller jusqu'à 15 % selon Xu et Ojima, 2007). À titre d'exemple, Frank (2005) précise que l'une des façons simples d'accroître l'inertie thermique de l'enveloppe d'un bâtiment⁷ est de limiter l'étendue des surfaces vitrées. L'installation de fenêtres à double ou triple vitrage, d'un auvent et de portiques extérieurs limiterait aussi la condensation sur les surfaces vitrées, alors que le retrait des tapis mur-à-mur contribuerait à maintenir l'humidité à des niveaux acceptables (SCHL, 2009a).

L'utilisation d'une membrane sous la dalle de fondation, partie intégrante de l'enveloppe externe d'un bâtiment, peut limiter l'introduction d'humidité excessive, la condensation, le possible développement de moisissures ainsi que l'infiltration de radon à l'intérieur (Yau et Hasbi, 2013; De Wilde et Coley, 2012; Fernández-Caldas, Trudeau et Ledford, 1994). Ces auteurs suggèrent également d'installer une membrane pour les vides sanitaires lorsque le sol est en contact avec l'air intérieur (cave sur terre battue) ainsi que des événements extérieurs (ventilateur statique « maximum » pour le toit, évent pour les vides sanitaires, sortie extérieure de sècheuse) pour évacuer l'humidité excessive.

Enfin, plusieurs auteurs soulignent l'importance de procéder à un entretien régulier des bâtiments dont l'enveloppe est susceptible de subir des dommages accrus en raison de l'augmentation de la fréquence d'événements climatiques extrêmes. Une attention particulière devrait être portée à la dégradation des matériaux synthétiques par le soleil, aux dommages infligés par les vents et la pluie, de même que par les redoux hivernaux sous l'effet des cycles de gel-dégel (Yau et Hasbi, 2013; De Wilde et Coley, 2012).

5.1.3 RÉDUCTION À LA SOURCE PAR LE CHOIX DES PRODUITS ET MATÉRIAUX ET LES COMPORTEMENTS DES OCCUPANTS

L'une des méthodes les plus efficaces pour assurer une bonne QAI consiste à réduire à la source les concentrations de contaminants de l'air intérieur. D'une part, il est possible de réduire les émissions de contaminants volatils en provenance de produits et de matériaux installés ou entreposés dans les habitations. Par exemple, les nouveaux meubles et matériaux émettent davantage de COV qui peuvent altérer la QAI, principalement lors de leur installation et dans les semaines ou mois qui suivent. Afin de réduire ces émissions, les occupants et les propriétaires de bâtiments d'habitation peuvent opter pour des produits et matériaux moins émissifs ou qui ont des teneurs réduites en COV (p. ex. peinture sans COV, matériaux sans formaldéhyde). À cet égard, divers programmes de certification de bâtiments, de produits et de matériaux ont vu le jour au cours des dernières

⁶ Pour consulter le règlement sur l'efficacité énergétique : <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/E-1.1,%20r.%201>.

⁷ Pour de plus amples renseignements sur l'inertie thermique : http://www.ecosources.info/dossiers/Inertie_thermique.

décennies afin d'informer les consommateurs sur les caractéristiques des produits qu'ils peuvent se procurer afin de réduire l'apport de COV dans l'air intérieur.

D'autre part, il est possible d'agir sur les sources de contaminants de l'air intérieur, qui sont souvent liées aux activités mêmes des occupants. En effet, les comportements et habitudes de vie peuvent avoir un impact majeur sur les concentrations de contaminants à l'intérieur du domicile; la QAI peut être altérée par le tabagisme, l'usage de produits d'entretien toxiques et leur fréquence d'utilisation, l'usage de produits de lutte contre les organismes indésirables (p. ex. pesticides), l'usage inapproprié d'appareils à combustion, les activités générant de l'humidité, etc. (Loftness et collab., 2007; Bluysen et collab., 2010). Il est donc possible de réduire à la source l'émission de plusieurs contaminants en modifiant certaines habitudes ou en changeant certains comportements pouvant nuire à la QAI. De plus, l'utilisation adéquate de ventilateurs d'extraction d'air munis d'une sortie externe (notamment dans la cuisine et la salle de bain) est efficace pour capter les contaminants à la source et limiter les conditions d'humidité excessive susceptibles de favoriser le développement de moisissures (Fernández-Caldas, Trudeau et Ledford, 1994). L'installation de ces dispositifs est d'ailleurs prescrite dans le Code national du bâtiment (2010).

Ainsi, l'application des mesures de réduction des contaminants à la source passe d'abord par la sensibilisation et la volonté des occupants, des propriétaires, des entrepreneurs ou des fournisseurs de produits et matériaux d'habiter et de construire des bâtiments sains. Les choix judicieux de produits et de matériaux, tout comme les comportements individuels, sont donc à la base de cette démarche d'amélioration de la QAI, laquelle suppose un effort de conscientisation encore plus important compte tenu du lien encore peu documenté entre les changements climatiques et la QAI. Bien que les efforts individuels soient nécessaires afin d'assurer une bonne QAI, la réglementation et la normalisation peuvent avoir un impact sur divers déterminants de la QAI.

Réglementation et normalisation

Au cours des dernières décennies, de nombreux pays ont adopté des lois ou des règlements afin d'encadrer divers aspects reliés à la construction des bâtiments de même qu'à l'utilisation et à l'identification des matériaux de construction, de décoration et d'ameublement dans le but de réduire les émissions de contaminants auxquelles les occupants des bâtiments d'habitation peuvent être exposés. Outre l'UE, la France (Anses, 2015c), la Chine (Bai et collab., 2002), le Danemark (Kolarik et collab., 2011), la Corée du Sud (Lim et collab., 2011; Kim et collab., 2007), le Japon (Kagawa, 1993), et, finalement, les États-Unis (ASHRAE, 2013) et le Canada (Charles et collab., 2005; Santé Canada, 2006) ont adopté des lois, des règlements ou des lignes directrices visant à encadrer à divers degrés la QAI. De plus, une série de normes internationales ont été développées en lien avec la QAI (série ISO 16000). Cependant, à l'heure actuelle, tant la normalisation que les programmes de certification de bâtiments, de produits et de matériaux ne semblent pas encore prendre en compte les impacts des changements climatiques sur la QAI (IOM, 2011; Srebric, 2010).

Les auteurs se concentreront ici sur la situation réglementaire au Canada et au Québec. Pour plus d'informations sur les efforts de normalisation et d'harmonisation en Europe, le lecteur est invité à consulter l'annexe 4.

Le Code national du bâtiment canadien contient quelques prescriptions visant directement ou indirectement la QAI, dont la ventilation (sections 6.2.2 et 9.32), les mesures limitant l'infiltration du radon et autres gaz souterrains (section 9.13.4) ainsi que l'installation d'avertisseurs de CO et d'entrées d'air de compensation pour les appareils à combustion (section 9.32) (Code national du bâtiment, 2010; RBQ, 2016). Aussi, la publicité, la vente et l'importation de mousse isolante d'urée-formaldéhyde sont interdites depuis 1980 en vertu de la Loi sur les produits dangereux (Santé

Canada, 2010). Cette mesure a contribué à réduire les concentrations de ce composé dans l'air intérieur des habitations au cours des dernières années. D'autres sources de contaminants ont aussi été interdites avec le temps, comme la crocidolite, l'amosite et les mélanges de matériaux friables contenant de l'amiante (Code de sécurité pour les travaux de construction [chapitre S-2.1, r.4]). Des exigences relatives aux appareils de chauffage au bois sont aussi précisées dans la réglementation québécoise (Règlement sur les appareils de chauffage au bois [chapitre Q-2, r.1]). Enfin, des lignes directrices sur la QAI résidentiel fournissent des valeurs guides pour certains contaminants du milieu intérieur. Ces valeurs, qui n'ont pas force légale, sont en fait des recommandations qui visent à fournir des critères de gestion en vue de réduire les risques liés aux contaminants de l'air intérieur. Mises à jour graduellement, ces lignes directrices sont actuellement disponibles pour une dizaine de contaminants, dont le formaldéhyde (Santé Canada, 2006; Gouvernement du Canada, 2015).

Au Québec, bien que certains règlements, lois et codes encadrent la construction et la rénovation des habitations, peu d'entre eux contiennent des dispositions qui abordent directement la QAI. Les dispositions en vigueur touchant de près ou de loin la réduction des contaminants à la source dans les habitations résidentielles sont pratiquement inexistantes. Aucune obligation réglementaire relative à l'installation ou à l'utilisation de matériaux pouvant émettre des COV (matériaux de construction, peintures, etc.) n'a été répertoriée dans le cadre de cette revue de la littérature. De plus, il n'y aurait aucune disposition réglementaire québécoise relative à l'affichage environnemental et à la publicité « verte » (Morin et collab., 2008), sauf pour les produits alimentaires biologiques. Enfin, les valeurs guides présentées dans les *Lignes directrices sur la qualité de l'air intérieur résidentiel* de Santé Canada sont celles qui font office de référence au Québec.

En marge de la réglementation applicable aux habitations résidentielles, qui font l'objet de la présente revue de la littérature, certaines normes et valeurs d'exposition relatives à la QAI sont précisées dans la réglementation applicable aux milieux de travail (Règlement sur la santé et la sécurité du travail [chapitre S-2.1, r. 13]). De surcroît, divers guides ont été développés afin d'encadrer la gestion de la QAI dans plusieurs types de bâtiments tels que les établissements du réseau de la santé et des services sociaux (Corporation d'hébergement du Québec, 2005; Gouvernement du Québec, 2011), les services de garde préscolaires (CSST et AQHSST, 2000) et les établissements scolaires (MELS, 2014). Bien que certaines personnes puissent séjourner de manière prolongée dans certains de ces établissements (hôpitaux, CHSLD, etc.), les auteurs du présent rapport ne se sont pas penchés sur les mesures d'adaptation applicables à ces types de bâtiments en particulier.

L'absence de réglementation concernant la QAI en milieu résidentiel dans plusieurs pays pourrait s'expliquer par le nombre important de contaminants physiques, chimiques et microbiologiques qui sont susceptibles de contaminer l'air intérieur, la variété des sources d'émissions et la diversité des mécanismes d'action des différentes substances pouvant occasionner des effets sur la santé des occupants (UBA, 2006), sans compter la difficulté d'évaluer l'exposition réelle des occupants. L'exemple français montre cependant qu'il est possible de mettre en place un cadre normatif fonctionnel afin d'améliorer la QAI (voir annexe 4). Ainsi, il appert que l'amélioration du cadre législatif québécois et des guides d'application pourrait contribuer à l'adaptation des individus et de la société face à l'introduction et à l'émission accrues de contaminants à l'intérieur des bâtiments d'habitation dans un contexte de changements climatiques. En effet, l'intégration de considérations relatives à la QAI et aux changements climatiques dans les codes du bâtiment et la réglementation associée pourrait contribuer à préparer le parc immobilier québécois à la réalité de demain.

Programmes de certification de bâtiments

Bien qu'ayant principalement pour objectif d'améliorer l'efficacité énergétique, les programmes de certification de bâtiments peuvent aussi contribuer à améliorer la QAI puisque la majorité d'entre eux incluent des exigences relatives aux matériaux et aux produits installés dans les habitations. Dans un contexte de changements climatiques, l'augmentation de la température et de l'humidité relative pourrait contribuer à accroître les émissions et la prolifération de certains contaminants dans l'air intérieur (p. ex. COV, moisissures, acariens). De plus, puisque la majorité de ces programmes vise à réduire les émissions associées à la construction et à l'utilisation des bâtiments, il apparaît donc que ce type de mesures peut contribuer à l'adaptation aux changements climatiques en promouvant une avenue de réduction des émissions de GES à la source. Depuis le début des années 1990, un nombre croissant de ces programmes d'application volontaire ont vu le jour, offrant aux occupants et aux entrepreneurs des occasions d'améliorer les habitations qu'ils construisent ou qu'ils rénovent.

Au Québec, plusieurs systèmes de certification de bâtiments sont disponibles, dont certains reconnus mondialement, comme les programmes LEED et ENERGY STAR. Offert aux projets réalisés au Québec (sous le 51^e parallèle), le programme Novoclimat 2.0 spécifie aussi des normes techniques afin d'assurer un meilleur rendement énergétique, un plus grand confort et une meilleure QAI (MERN, 2016). Ces programmes précisent parfois des dispositions (obligatoires ou facultatives) pour améliorer la QAI des habitations construites ou rénovées, en plus d'exiger la conformité aux normes et aux règlements en vigueur. Le ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du Territoire (MAMOT) propose d'ailleurs aux municipalités de promouvoir la construction et le développement de bâtiments durables et sains (entre autres par le biais des certifications Novoclimat, LEED, BOMA BEST⁸ et la norme R -2000) sur leur territoire. Le Ministère a développé à cet effet une série de guides de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable qui s'adressent aux professionnels et aux acteurs du milieu municipal (Boucher, Blais et Vivre en ville, 2010).

Une évaluation sommaire de huit de ces programmes a été réalisée aux fins du présent rapport (voir annexe 5). L'analyse permet de constater que la moitié d'entre eux semble contenir des dispositions obligatoires concernant la QAI, et que l'ensemble des programmes offre des dispositions facultatives relatives à la QAI. Ainsi, dans la plupart des cas, un bâtiment peut faire l'objet d'une certification sans avoir réellement pris en compte la QAI (Schenck et collab., 2010; Wargo, 2010). Bien que la majorité des programmes souligne l'importance des environnements intérieurs pour la santé et la qualité de vie, peu d'entre eux ont des dispositions obligatoires à l'égard de cet aspect de l'habitation pour l'obtention de la certification. À l'heure actuelle, il semble donc que les principaux programmes de certification de bâtiments ne puissent garantir à eux seuls une bonne QAI (Bluyssen et collab., 2010). Enfin, il reste difficile de hiérarchiser les différents programmes de certification au regard de l'amélioration de la QAI puisqu'ils ne sont pas tous basés sur les mêmes critères et que l'amélioration de la QAI est tributaire de l'application de mesures généralement facultatives.

Programmes de certification des produits et matériaux de construction, de décoration et d'ameublement

Une des mesures de réduction à la source des contaminants de l'air intérieur consiste à sélectionner des produits et des matériaux de construction, de décoration et d'ameublement qui émettent peu ou pas de contaminants (Yu et Kim, 2013). Pour ce faire, plusieurs étiquettes environnementales permettent de repérer diverses caractéristiques des produits certifiés afin de sélectionner ceux qui altèrent le moins la QAI. Ces informations sur la composition des produits et matériaux peuvent être

⁸ Building Owners and Managers Association – Building Environmental Standards

utiles tant pour les professionnels de la construction (concepteurs, entrepreneurs, fournisseurs) que pour les consommateurs (Azuma et collab., 2012).

Plusieurs principes doivent cependant être respectés pour qu'un programme d'étiquetage environnemental soit crédible et efficace, dont l'indépendance du processus de certification et la sélection de critères mesurables et réalistes (Global Ecolabelling Network, 2004). De plus, pour mettre en place un tel programme, il faut notamment déterminer les tests qui seront effectués sur les produits et matériaux, les contaminants qui seront évalués et les valeurs seuils qui devront être respectées. Pour plus d'informations sur les principes et les composantes de l'étiquetage environnemental de même que sur les types d'étiquetage existants, le lecteur est invité à consulter l'annexe 6.

Les systèmes d'étiquetage environnemental de produits et de matériaux les plus fréquemment rencontrés – et qui incluent des critères relatifs à la QAI (p. ex. émissions de COV) – sont présentés à l'annexe 7. Sont notamment décrites les certifications EcoLogo, Green Seal, GREENGUARD, FloorScore et le Green Label du Carpet and Rug Institute. Les systèmes de certifications de bâtiments, de produits et de matériaux peuvent fournir des informations importantes sur les caractéristiques environnementales de ces derniers et contribuer au maintien d'une bonne QAI dans les habitations. Pour que l'utilisation de ces systèmes constitue une mesure d'adaptation efficace dans le contexte des changements climatiques, plusieurs facteurs doivent cependant être pris en compte.

Facteurs relatifs aux tests d'émissions

Les tests d'évaluation des émissions de polluants provenant des produits et matériaux sont souvent effectués dans des conditions environnementales dites « normales » (température et humidité relative fixes), sans prendre en compte tous les scénarios possibles pouvant être rencontrés durant la vie utile du produit ou du matériau. Ainsi, ne sont pas toujours considérés la variabilité de l'utilisation des produits, les modifications des conditions environnementales (p. ex. différences de température entre les conditions réelles et les conditions en laboratoire), les échanges d'air variables selon la construction des habitations, les modes de ventilation (naturelle et/ou mécanique), etc. (Levin, 2010).

De plus, ces tests sont souvent effectués avec de l'air purifié (sans particules, COV ou substances oxydantes, autres que l'oxygène) alors que l'air ambiant contient normalement des COV, de l'ozone et des oxydes d'azote en concentrations variables. Ces molécules peuvent réagir avec les produits et matériaux en place (p. ex. peintures, meubles) et générer des sous-produits par un processus subséquent de dégradation (Wolkoff, 1999). Ces caractéristiques devraient donc être prises en compte lors des tests effectués afin de représenter le plus fidèlement possible la réalité et, conséquemment, les concentrations auxquelles les occupants seront exposés.

Enfin, il importe de prendre en compte la composition des différentes surfaces sur lesquelles les produits à fortes émissions, comme les peintures et les vernis, sont utilisés lors des tests d'émission. En effet, le type de surface déterminera la nature et le taux d'émissions de COV de ces matériaux. Par exemple, la peinture au latex appliquée sur du béton émettrait moins de COV que lorsqu'elle est apposée sur un panneau de gypse (Silva et collab., 2003). Le développement de méthodes d'évaluation des émissions qui prendrait en compte ces différents facteurs contribuerait à améliorer les systèmes d'étiquetage environnemental, permettant ainsi aux consommateurs et aux entreprises de faire des choix plus éclairés pour améliorer la QAI de leur habitation.

Facteurs relatifs aux matériaux

Dans une perspective de réduction des GES, plusieurs systèmes de certification proposent d'employer des matériaux qui consomment moins d'énergie lors des étapes de production, tels que les produits manufacturés faits de cellulose ou de fibres de bois. Ces matériaux sont cependant généralement plus sensibles à la biodétérioration lorsqu'ils sont en présence d'humidité excessive (Morey, 2010). Ce phénomène peut entraîner une augmentation des problèmes de QAI puisque des moisissures peuvent s'y développer et disperser dans l'air des spores et autres composants fongiques. Afin de réduire le risque de croissance de moisissures, certains matériaux sont parfois enduits de fongicides. L'utilisation inappropriée de ces produits par les occupants peut accroître leur exposition aux fongicides dans l'air intérieur, qui sont eux-mêmes nocifs (Loftness et collab., 2007).

Comme souligné précédemment, l'augmentation de la température et de l'humidité relative ainsi que l'intensification des événements climatiques extrêmes (p. ex. pluies torrentielles et inondations), prévus selon certains scénarios climatiques (voir aussi annexe 1), pourront engendrer des conditions propices au développement de moisissures sur les matériaux présents dans les habitations (Mudarra, 2010). Il apparaît donc souhaitable de prendre ces éléments en considération lors de la sélection des produits et des matériaux devant être installés dans les bâtiments d'habitation. Certains auteurs suggèrent d'ailleurs de développer une certification spécialement adaptée à ces enjeux (Morey, 2010), ou encore d'améliorer la diffusion des informations associées aux certifications existantes, notamment en lien avec le développement fongique potentiel (Loftness et collab., 2007).

Enfin, il importe de souligner qu'au-delà des certifications relatives aux bâtiments et aux produits et matériaux employés dans leur construction, il existe de nombreux autres systèmes de certification applicables aux quartiers et aux communautés. Ainsi, des certifications comme One Planet Living, initiative développée par le World Wildlife Fund et BioRegional, Living Community Challenge de l'International Living Future Institute, LEED for Neighbourhood Development du Conseil du bâtiment durable du Canada, et les communautés STAR encouragent la création de milieux de vie sains et la création de communautés durables, que ce soit à l'échelle d'une rue, d'un quartier ou d'un campus. Elles promeuvent le développement de projets respectueux de l'environnement et qui améliorent la qualité de vie. La qualité de l'air à l'intérieur des habitations est affectée indirectement par ce type de certification, notamment par le biais de l'amélioration de la qualité de l'air extérieur et par l'utilisation de matériaux durables et sains dans le développement des projets (STAR Communities, 2016; BioRegional, [s.d.]; U.S. GBC, 2011; International Living Future Institute, 2014a).

5.1.4 CHAUFFAGE, CLIMATISATION ET DÉSHUMIDIFICATION

Outre le gain de confort thermique que peuvent procurer le chauffage et la climatisation, ces avenues de gestion peuvent contribuer au maintien de la QAI puisqu'elles doivent être appliquées à des bâtiments maintenus en conditions fermées, limitant ainsi l'introduction de polluants venant de l'extérieur (pollens, spores, allergènes, etc.) (Nelson et collab., 1988; Nazaroff, 2013; Lin et collab., 2013; Bell et collab., 2009). Bien entendu, ce concept de bâtiment fermé implique l'évitement de la ventilation naturelle volontaire et ne concerne pas l'arrêt de la ventilation mécanique.

Il est important de noter que le chauffage et la climatisation des bâtiments sont des enjeux auxquels devront faire face les spécialistes en bâtiment dans un contexte de changements climatiques (Santamouris, Sfakianaki et Pavlou, 2010). En dépit des avantages indéniables qu'offre la climatisation (p. ex. réduction de la morbidité et de la mortalité chez les personnes vulnérables en période de chaleur intense [O'Connor et Kosatsky, 2008]), certains auteurs rapportent que l'utilisation généralisée de ce type de dispositif est susceptible d'engendrer des rétroactions négatives tant à l'échelle locale que globale, telles la création d'îlots de chaleur (INSPQ, 2009; Lundgren et Kjellstrom,

2013; Liu, Ma et Li, 2011; Kjellstrom et McMichael, 2013) et une augmentation de la consommation d'électricité et des émissions de GES associées (Isaac et van Vuuren, 2009; Farbotko et Waitt, 2011; Davis et Gertler, 2015; Kjellstrom et McMichael, 2013). Davis et Gertler (2015) rapportent que l'utilisation généralisée de climatiseurs à l'échelle planétaire pourrait engendrer la production annuelle d'environ 23 milliards de tonnes de GES d'ici la fin du siècle.

En marge des systèmes, l'emploi d'un déshumidificateur portable dans des endroits humides (p. ex. sous-sol) est également considéré comme une mesure efficace pour contrer toute augmentation d'humidité relative, réduisant par le fait même les contaminants de l'air intérieur associés (SCHL, 2009b; Fernández-Caldas, Trudeau et Ledford, 1994).

5.2 Mesures d'amélioration de la ventilation

L'amélioration du rendement énergétique des bâtiments au cours des dernières décennies s'explique notamment par la volonté de réduire les coûts en énergie, les émissions de carbone des bâtiments (tant au moment de la conception, de la construction que de l'opération du bâtiment) et l'amélioration du confort des occupants. Or, cette réalité vient de pair avec une étanchéisation accrue de l'enveloppe des bâtiments qui, en l'absence de ventilation adéquate, limite les échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur. Les contaminants générés à l'intérieur des bâtiments se retrouvent ainsi piégés dans l'enceinte du bâtiment, ce qui contribue à la dégradation de la QAI (Barnes et collab., 2013; IOM, 2011; Brown, Crump et Harrison, 2013). À titre d'exemple, une étude portant sur des résidences unifamiliales localisées dans neuf grandes villes américaines a démontré que l'augmentation de l'étanchéité des bâtiments pourrait engendrer une réduction de la ventilation naturelle passive de l'ordre de 5 % d'ici 2050 (moyenne de tous sites, toutes saisons, toutes projections climatiques) ainsi qu'une augmentation concomitante des concentrations des contaminants de l'air intérieur de l'ordre de 6 % (Ilacqua et collab., 2015). Il est à noter que le principe général et, par conséquent, les préoccupations qu'il engendre demeurent les mêmes dans les environnements situés plus au nord, tels que ceux rencontrés au Québec (Haysom et Reardon, 1998; INSPQ, 2006).

La diminution de la ventilation naturelle passive (infiltration et exfiltration d'air par l'enveloppe des bâtiments) doit donc être compensée par l'intégration d'autres mesures de ventilation favorisant une augmentation des échanges d'air avec l'extérieur. Le choix de telles mesures devrait idéalement être effectué dans une perspective écoénergétique puisque leur mise en place entraînera des coûts qui pourront varier de façon importante. En effet, il faudra d'abord considérer le coût d'achat, d'installation et d'entretien du système sélectionné, ainsi que la consommation électrique de l'appareil choisi, considérant son mode et sa fréquence d'utilisation. De plus, en saison froide, plus le taux d'échange d'air est élevé, plus l'introduction d'air frais est importante, et plus les coûts d'énergie nécessaires pour réchauffer cet air seront importants. Malgré cela, la ventilation constitue l'avenue de gestion et de maintien de la QAI la plus communément recommandée par les organismes sanitaires et réglementaires concernés (Dimitroulopoulou et Bartzis, 2014; INSPQ, 2006; Santé Canada, 2007). En effet, peu importe les dispositifs ou systèmes privilégiés, une utilisation judicieuse de ces derniers pourra améliorer significativement la QAI et la santé des occupants de même que leur productivité (Sundell et collab., 2011; Fisk et Rosenfeld, 1997). L'adaptation aux changements climatiques anticipés doit donc prendre en considération ces réalités dans les bâtiments existants ainsi que dans les futures constructions.

5.2.1 VENTILATION NATURELLE

La ventilation dite « naturelle » peut s'effectuer par l'entremise des ouvertures et interstices présents dans l'enveloppe du bâtiment (fenêtres, portes, conduits, joints, cheminée, prises électriques, etc.) (Panzhauser, Mahdavi et Fail, 1993). La ventilation naturelle dite « passive » (ou « non contrôlée par l'humain ») s'effectue de façon continue dans les bâtiments, à divers degrés d'intensité, puisqu'elle est notamment conditionnée par les vents, l'effet de cheminée et les changements de pression localisés (INSPQ, 2006). Cependant, il est possible d'accroître l'ampleur de la ventilation naturelle par l'entremise de certains comportements adoptés par les occupants et de certaines caractéristiques structurales. À cet effet, Ward (2008) rapporte qu'en ouvrant plus fréquemment les portes et fenêtres de leur domicile, les occupants peuvent accroître la ventilation de plus de 30 %, voire bien au-delà lorsque la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est élevée. L'efficacité de la ventilation naturelle dite « volontaire », puisqu'opérée par les occupants, demeure cependant difficilement contrôlable puisqu'elle peut être tributaire de nombreux facteurs décrits ci-dessous (voir Bangalee, Lin et Miao, 2012; INSPQ, 2006).

Tout d'abord, la mise en application de la ventilation naturelle volontaire nécessite notamment certains efforts de la part des occupants. L'étude de Sharpe et collab. (2015) a démontré que les occupants utilisent rarement les dispositifs de ventilation naturelle (événements de ventilation ou *trickle ventilators*⁹). En effet, plus de 60 % des répondants ne faisaient jamais usage de ces dispositifs dans leur chambre à coucher, 28 % les laissaient toujours en position ouverte alors que 9 % procédaient à des ajustements réguliers (les ouvraient régulièrement ou occasionnellement). Les mesures de concentrations moyennes de CO₂ dans les chambres à coucher d'un sous-échantillon de répondants ont également démontré que la ventilation naturelle ne permet généralement pas de satisfaire aux prescriptions des organismes compétents en matière de ventilation, soit un taux de ventilation minimal souhaitable se situant à 0,5 CAH en Europe, et entre 0,30 et 0,35 CAH¹⁰ au Québec (ASHRAE, 2013; Code national du bâtiment, 2010). Sharpe et collab. (2015) expliquent ces résultats par le fait que l'ajustement de la ventilation naturelle par les occupants demeure une solution qui peut s'avérer plus ardue en raison des contraintes associées à la conception des fenêtres (et aux événements de ventilation, populaires en Europe), qui sont parfois difficilement manipulables ou atteignables.

McKone et Sherman (2003) rapportent que les occupants ont tendance à ouvrir les fenêtres surtout lorsqu'ils perçoivent un problème de qualité d'air intérieur ou de confort. Par ailleurs, Ward (2008) et Bangalee, Lin et Miao (2012) rapportent également une ambivalence au regard du comportement des occupants entre le souci d'économie d'énergie et celui de la préservation d'une bonne QAI. En effet, en dépit des problèmes de QAI ou des inconforts perçus, certains occupants ne seraient pas enclins à ouvrir leurs fenêtres en saison hivernale, notamment afin d'éviter les pertes thermiques occasionnées par une telle pratique de ventilation.

Par ailleurs, des problèmes associés à la conception du bâtiment, tels que la distribution non uniforme des sites d'extraction d'air vicié et d'introduction d'air frais (ex. lorsque les fenêtres sont toutes orientées du même côté d'un bâtiment), ainsi que l'impossibilité d'ajuster les débits relativement aux besoins des occupants (compte tenu notamment de la variabilité importante de la vitesse des vents) peuvent également limiter l'efficacité de la ventilation naturelle volontaire (Sharpe et collab., 2015; Fernández-Caldas, Trudeau et Ledford, 1994). Scheepers et collab. (2012), Sharpe et collab. (2015) et Lajoie, Leclerc et Schnebelen (INSPQ, 2006) indiquent plusieurs autres situations

⁹ Les événements de ventilation, largement utilisés au Royaume-Uni et en Europe, sont généralement intégrés dans les cadres de portes et de fenêtres. Ceux-ci sont utilisés afin de satisfaire aux exigences de ventilation minimales des espaces qui ne peuvent bénéficier de ventilation mécanique.

¹⁰ À noter que ce taux sous-tend la présence d'un système de ventilation mécanique, et qu'il correspond à la somme de la capacité de ce dernier et de la ventilation naturelle passive.

qui peuvent également faire entrave à l'application de la ventilation naturelle : conception inadaptée du bâtiment et des portes et fenêtres, source de pollution extérieure, âge des occupants, densité d'occupation, courant d'air, bruit, etc.

Comme mentionné précédemment, la ventilation naturelle peut favoriser l'introduction de contaminants provenant de l'extérieur dans le bâtiment, pouvant dans certains cas altérer la QAI. Puisque les concentrations de contaminants à l'extérieur sont généralement moindres la nuit, le fait de ventiler naturellement lors de cette période permet de limiter leur introduction à l'intérieur du bâtiment. En parallèle, cette pratique constitue une mesure d'adaptation aux vagues de chaleur préconisée par le gouvernement canadien (Gouvernement du Canada, 2012). Son efficacité dépend largement de la différence de température entre le milieu intérieur et extérieur, celle-ci étant optimale lorsque l'écart de température entre la période diurne et nocturne excède 12 °C (Seppänen et Fisk, 2004). De plus, son rendement est modulé par le taux de renouvellement de l'air intérieur, la capacité thermique du bâtiment (c.-à-d. son isolation et son inertie) et le degré de transfert entre la masse thermique du bâtiment et le flux d'air frais (Santamouris, Sfakianaki et Pavlou, 2010).

Selon Seppänen et Fisk (2004), la ventilation nocturne constitue un moyen écoénergétique d'assurer la ventilation ainsi que le confort thermique des occupants de bâtiments situés en milieux chauds ou tempérés. Par exemple, Santamouris, Sfakianaki et Pavlou (2010) ont démontré par l'entremise d'une étude effectuée sur 214 bâtiments résidentiels situés dans des secteurs périurbains et ruraux de la Grèce que la ventilation nocturne (naturelle; sans intervention mécanisée) pourrait contribuer à réduire la consommation énergétique moyenne associée à la climatisation de 12 kWh/m²/a, voire jusqu'à 40 kWh/m²/a dans certaines circonstances jugées optimales. Il faut cependant souligner que la ventilation naturelle, qu'elle soit diurne ou nocturne, ne s'avère pas écoénergétique si l'air extérieur doit être climatisé ou chauffé (Seppänen et Fisk, 2004).

Parmi les autres mesures de ventilation naturelle répertoriées, il appert que l'intégration d'une cheminée de ventilation (c.-à-d. d'un puits de ventilation verticale) doublerait l'efficacité de la ventilation naturelle d'un bâtiment bien isolé (passant de 0,15-0,31 CAH à 0,62 CAH selon Panzhauser, Mahdavi et Fail (1993). L'élaboration du design et la construction de bâtiments intégrant de tels systèmes peuvent cependant s'avérer complexes car les codes de construction et les guides de bonnes pratiques offrent généralement peu de balises pour les architectes et concepteurs à cet égard. À l'instar des auteurs précédemment cités, Mavrogianni et Mumovic (2010) ont réalisé une étude portant sur l'efficacité de la ventilation naturelle stimulée par un capteur de vent (cheminée munie d'un appendice équipé de fentes dont le design favorise les mouvements d'air), et contrebalancée par l'ouverture manuelle des fenêtres par les occupants. Les résultats des essais effectués en saison hivernale ont montré que les conditions nécessaires au confort thermique des occupants pouvaient être maintenues par l'entremise de ce type de dispositif. En revanche, les essais réalisés en saison estivale ont montré l'utilité de coupler l'utilisation de tels dispositifs à des systèmes automatisés alternatifs performants (c.-à-d. utilisation de la climatisation à la demande). Il est à noter que de telles cheminées de ventilation (p. ex. puits ou cheminées de ventilation communiquant entre les salles de bain d'un même immeuble) sont rencontrées dans certains vieux bâtiments d'habitation du Québec, mais que de telles installations ne sont plus recommandées dans les plus récentes versions du Code de construction.

Dans un contexte de changements climatiques, où des variations de précipitations et de températures sont à prévoir, il semble donc que la ventilation naturelle (tant passive que volontaire) ne soit pas en mesure d'assurer à elle seule le maintien de la QAI. De plus, puisqu'il est généralement recommandé de fermer les fenêtres et d'éviter les activités physiques à l'extérieur lors d'épisodes de pollution atmosphérique (Agence de la santé et des services sociaux de Montréal, 2015) afin

notamment d'éviter l'introduction de contaminants de source extérieure, la ventilation naturelle ne peut être envisagée en toutes situations. Ainsi, les prescriptions des codes de construction concernant l'étanchéité des bâtiments afin de réduire les pertes de chaleur causées par les infiltrations naturelles a entraîné la nécessité de développer différents dispositifs de ventilation mécanique pour répondre aux besoins de ventilation des occupants de bâtiments, particulièrement dans les milieux froids et tempérés (Schenck et collab., 2010; Sharpe et collab., 2015).

5.2.2 VENTILATION MÉCANIQUE

Les exigences relatives à la ventilation mécanique sont précisées dans la Loi sur le bâtiment (chapitre B-1.1), dans le Code de construction du Québec (chapitre B-1.1, r.2) et dans le règlement modifiant le Code de construction pour favoriser l'efficacité énergétique des bâtiments. Les dispositions sur les taux de CAH, l'installation de hottes au-dessus des cuisinières et de ventilateurs dans les salles de bain font partie des quelques éléments ayant trait à la réduction des contaminants de l'air intérieur dans la réglementation québécoise.

Au Québec, la capacité totale minimale ou requise d'une installation de ventilation mécanique (ou le besoin calculé de ventilation d'une habitation) est calculée en fonction du type et du nombre de pièces de l'habitation (voir Code de construction du Québec [chapitre 1]). Pour la plupart d'entre elles, la somme des taux minimaux de renouvellement d'air par pièce correspond à environ 0,3 CAH (INSPQ, 2006). À ce taux de ventilation, il faudra en moyenne 3 heures pour que l'air intérieur d'un bâtiment soit complètement renouvelé. À noter qu'un taux de ventilation optimal devrait permettre de conjuguer la dilution des contaminants intérieurs, la limitation de la pénétration des contaminants de source extérieure, la réduction des pertes de chaleur et l'optimisation du confort thermique dans la grande majorité des situations. Liu, Ma et Li (2011) rapportent que le taux de ventilation de même que la distribution d'air frais à l'ensemble des pièces habitées constituent des paramètres clés du maintien de la QAI. La ventilation des chambres à coucher constituerait un enjeu important en milieu résidentiel puisque l'humidité générée par les occupants durant la nuit est susceptible de s'ajouter à la charge présente dans l'air ambiant et de favoriser localement le processus de condensation, l'activité des acariens et la concentration d'allergènes (Sundell et collab., 1995). Bien entendu, la ventilation est également primordiale pour diluer le CO₂ exhalé par les dormeurs durant la nuit.

Les systèmes de ventilation mécanisés les plus communément rencontrés dans les bâtiments sont ceux dotés d'un module récupérateur de chaleur ou, moins fréquemment, d'énergie, couplés ou non à un dispositif de chauffage à air pulsé. Ces appareils sont généralement calibrés de façon à obtenir une pression intérieure équilibrée, ceci afin de ne pas créer de pression négative ou positive. Ces systèmes sont conçus pour assurer un échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur, mais peuvent également être opérés de façon à assurer une recirculation de l'air à l'intérieur sans échange d'air avec l'extérieur.

5.2.3 VENTILATION CENTRALISÉE

Selon la grande majorité des organismes et auteurs consultés, les systèmes de ventilation centralisés constituent, parmi l'ensemble des appareils disponibles sur le marché, une avenue de gestion essentielle au maintien de la QAI (INSPQ, 2006; Santé Canada, 2007; Haysom et Reardon, 1998). Ceux-ci peuvent s'avérer utiles pour pallier ou encore atténuer certains problèmes communément rencontrés en milieu intérieur et dont l'ampleur et la fréquence pourraient être modulées par les changements climatiques anticipés au Québec. À titre d'exemple, Myatt et collab. (2008) rapportent les résultats d'un modèle développé par le National Institute of Standards and Technology (NIST) visant à évaluer l'efficacité de divers dispositifs de ventilation et de purification de l'air au regard d'allergènes déclencheurs de symptômes associés à l'asthme. Selon ce modèle, le système de

ventilation central équipé d'un filtre offrait le meilleur contrôle des concentrations d'allergènes, notamment par la réduction de 30 à 55 % des allergènes d'origine féline, et de 50 à 75 % des spores fongiques. L'utilisation d'un tel filtre pourrait également contribuer à réduire l'introduction de contaminants particulaires de source extérieure.

Selon Sundell et collab. (1995) et Emenius, Egmar et Wickman (1998), les équipements de ventilation centralisés pourraient également être utilisés pour maintenir l'humidité relative des environnements intérieurs à des niveaux acceptables et ainsi prévenir la présence d'acariens et d'allergènes y étant associés. Seppänen et Fisk (2004) précisent également que l'utilisation de systèmes de ventilation centralisés bien calibrés contribue à conserver la structure des bâtiments au sec en prévenant la condensation d'air humide dans les murs par temps froid (conditions favorables au développement de moisissures dans les cloisons). La calibration équilibrée contribue également à prévenir la dépressurisation de l'enceinte, condition favorable quant à elle à l'infiltration de contaminants de source extérieure, dont le radon, ainsi qu'au retour des gaz et de fumée de combustion (Seppänen et Fisk, 2004). En marge de ces principes de base, le principal avantage des systèmes de ventilation centralisés équilibrés demeure la capacité à délivrer une quantité d'air frais constante dans chacune des pièces habitables d'un bâtiment. Il semble donc que les systèmes de ventilation centralisés pourraient constituer une mesure d'adaptation aux effets des changements climatiques qui sont prévus sous nos latitudes.

Certains auteurs ont toutefois fait état de certains contaminants de l'air intérieur pouvant provenir des pièces et équipements faisant partie intégrante des systèmes de ventilation mécanisés. Seppänen et Fisk (2004) ont démontré que les symptômes associés au syndrome du bâtiment malsain (ou *sick building syndrome*) dans les gros bâtiments étaient plus souvent observés chez les occupants de bâtiments équipés de ventilation mécanisée que chez les occupants de bâtiments qui en étaient dépourvus. Ceci serait notamment dû au fait que les conduits de ventilation de ces systèmes sont susceptibles d'émettre certains COV et des particules fines qui se retrouvent alors dans l'air circulant dans le bâtiment. Le type de contaminants émis dépend des matériaux utilisés dans les composants du système de ventilation (p. ex. conduits et joints flexibles plastifiés, adaptateurs, produits scellant) ainsi que de l'entretien du système (Morrison et collab., 1998). En effet, la présence de systèmes de ventilation centralisés non nettoyés serait corrélée à plusieurs symptômes respiratoires (Seppänen et Fisk, 2004), et l'importance de cet aspect a d'ailleurs été soulevée par de nombreux organismes compétents telle l'ASHRAE (2013).

Willman (1993) précise que depuis 1988, le National Energy Management Institute a multiplié les études portant sur l'efficacité des systèmes de ventilation installés dans une large gamme de bâtiments commerciaux et institutionnels soumis à divers environnements et contraintes climatiques. Ces études ont permis de démontrer que les systèmes de ventilation présentaient généralement des problèmes de conception et d'utilisation, et ce, principalement au niveau du réseau de distribution d'air frais, occasionnant des inconforts thermiques et auditifs pour les occupants (voir Yu et Kim, 2012). Il est à noter que des observations similaires ont été rapportées au Québec en milieu résidentiel par certains auteurs (voir Canuel, 2006). La mise à niveau de ces systèmes peut, dans certains cas, être effectuée par l'entremise de travaux mineurs alors que dans d'autres circonstances, d'importants investissements s'avèrent essentiels. La conception (p. ex. puissance de l'appareil adaptée au volume d'air et à l'occupation du bâtiment), l'installation (p. ex. emplacement du boîtier et des conduits de ventilation), le calibrage (p. ex. en pression équilibrée), l'entretien des composants (p. ex. nettoyage des conduits, des filtres et du noyau) et l'utilisation (p. ex. mode échange ou mode recirculation, en continu ou en intermittence) constituent les facteurs à considérer pour assurer une bonne QAI ainsi que des économies d'énergie, et ce, dans la grande majorité des circonstances (Yu et Kim, 2012).

En ce qui a trait aux systèmes de ventilation centralisés pourvus d'un dispositif de récupération de chaleur sensible ou latente, qui préconditionne l'air en provenance de l'extérieur (VRC ou VRE¹¹) Vorwald (2011) de même que Yu et Kim (2012) rapportent que l'utilisation de noyaux thermique ou enthalpique permet d'effectuer des économies d'énergie, notamment en préchauffant l'air provenant de l'extérieur, de l'ordre de 20 à 40 %. Les économies d'énergies annuelles atteindraient près de 9 % (plus importantes en hiver qu'en été en raison de l'écart de température) lorsque le VRC est utilisé selon une programmation optimisée pour le confort des occupants.

Il est fréquent au Québec que le système de ventilation centralisé soit couplé au système de chauffage à air pulsé. Une autre mesure d'optimisation de la ventilation centralisée jugée efficace consiste à décroisonner les systèmes de chauffage et de climatisation de la ventilation afin de pouvoir utiliser ces systèmes de façon indépendante (Loftness et collab., 2007; Yu et Kim, 2012). Le décroisonnement de ces dispositifs permettrait, lorsque les conditions y sont favorables, d'introduire de l'air frais en quantité suffisante pour assurer le maintien de la QAI sans solliciter le ventilateur principal du système de chauffage à air pulsé afin d'atteindre des conditions de confort optimales dans les pièces habitables. Il appert donc que, outre leur installation dans les bâtiments d'habitation qui en sont dépourvus, l'optimisation des équipements et des systèmes de ventilation en place peut revêtir un intérêt comme mesure d'adaptation aux effets des changements climatiques (Balvers et collab., 2012).

Les systèmes de ventilation centralisés peuvent être installés tant dans les bâtiments neufs que dans ceux existants. Tant l'emplacement des conduits, des entrées et des sorties d'air extérieures que le choix du type de conduits et de l'unité de récupération de chaleur ou d'énergie peuvent varier en fonction des besoins des occupants ainsi que des contraintes structurelles et climatiques rencontrées. Les fabricants recommandent généralement l'installation de l'appareil dans un endroit où la température est similaire à celle retrouvée dans l'environnement intérieur du domicile, tel un placard, par exemple. Il est à noter qu'à l'heure actuelle, le Code de construction du Québec fait état, dans ses sections 6.2.2.8 et 9.32, de mesures à observer pour l'installation des appareils de ventilation dans les bâtiments d'habitation.

5.2.4 CONTRÔLE DES APPAREILS

En parallèle à l'optimisation du design, de nombreux auteurs sont d'avis que la modulation spatio-temporelle de l'intensité de la ventilation sur la base des besoins des occupants et des conditions environnementales extérieures demeure une stratégie d'adaptation à préconiser. Le fait de réduire ou d'interrompre la ventilation mécanique au moyen d'un interrupteur manuel ou programmable au cours de périodes jugées critiques (p. ex incendies de forêt, épisode de smog) pourrait limiter l'exposition des occupants à certains contaminants de source extérieure (Ilacqua et collab., 2015; Sherman et Matson, 2003). Dans un tel contexte, le bâtiment fait alors office de réservoir d'air frais; par exemple, lors d'un épisode de pollution atmosphérique, ou lorsque les concentrations d'ozone sont les plus élevées, soit en milieu de journée. Une fois l'épisode passé, une purge de l'air intérieur peut être effectuée afin d'extraire les contaminants générés à l'intérieur qui se seraient accumulés dans le bâtiment (p. ex. CO₂, particules fines, formaldéhyde, etc.). Il est alors recommandé d'activer la ventilation mécanique le matin, le soir ou la nuit, alors que les concentrations extérieures d'ozone

¹¹ Un VRC est un appareil de ventilation muni d'un noyau récupérateur de chaleur qui réchauffe l'air froid en provenance de l'extérieur avant qu'il ne soit distribué dans la résidence. Un VRE récupère la chaleur (tout comme le VRC), mais également l'énergie emprisonnée dans l'humidité ambiante. Dans les maisons climatisées, lorsque le taux d'humidité est plus élevé à l'extérieur qu'à l'intérieur, le système VRE limite la quantité d'humidité entrant dans la maison. Pour les maisons dont le taux d'humidité est faible en hiver, le système VRE limite la quantité d'humidité rejetée à l'extérieur de la maison, diminuant de ce fait, l'assèchement de l'air intérieur.

et d'autres contaminants précurseurs du smog sont généralement plus faibles (Moriske et collab., 1998; MacNeill et collab., 2014).

Il est également possible d'accroître la ventilation des aires occupées afin de répondre aux demandes ponctuelles des occupants en augmentant la vitesse (mode « haute vitesse ») du ventilateur (ou la longueur du cycle d'échange), puis en diminuant celle-ci lorsque les lieux sont inoccupés. Une telle stratégie peut contribuer à limiter l'introduction de contaminants de source extérieure tout en conjuguant économie d'énergie, dilution des contaminants de source interne et confort thermique pour les occupants (Yu et Kim, 2012). Selon certaines études, il peut s'avérer pertinent, dans certaines circonstances (p. ex. niveau d'occupation élevé), de ventiler les milieux occupés au-delà du seuil minimal prescrit par les organismes ou dans les codes du bâtiment, afin d'assurer le maintien de la QAI (Emenius, Egmar et Wickman, 1998; Kim et Hwang, 2009).

Les travaux menés par Schell et Inthout (2001), Woloszyn et collab. (2009) et Laverge et collab. (2011) corroborent cette avenue de gestion de la ventilation en proposant une approche de contrôle intelligent prenant en compte plusieurs variables et basée sur les besoins des occupants, et ce, en temps réel (c.-à-d. que l'intensité de la ventilation est contrôlée sur demande). En effectuant un suivi étroit et simultané de l'occupation, de la température, du taux d'humidité relative et de la concentration en CO₂ de l'air intérieur à l'aide de sondes et d'une interface informatique conçue à cet effet, ces auteurs ont été en mesure de ventiler les zones occupées de façon flexible et optimale (non préprogrammées) tout en minimisant les frais de fonctionnement associés au renouvellement de l'air, au chauffage et à la climatisation. Laverge et collab. (2011) précisent que cette technique permet d'atteindre les critères de ventilation minimale plus efficacement que le ferait un appareil de ventilation fonctionnant en continu, en plus de réduire les pertes de chaleur par la ventilation de 25 à 60 %. De façon complémentaire, Liu et collab. (2014) ont procédé à une étude portant sur l'ajustement automatisé des systèmes de ventilation, de chauffage et de climatisation afin de limiter les conséquences des stress subis par l'enveloppe du bâtiment (rayonnement solaire, humidité, vent) sur la QAI dans un contexte de changements climatiques. En s'appuyant sur la mesure des conditions observées au niveau de l'enveloppe externe du bâtiment, ces auteurs ont montré que cette avenue de contrôle automatisé pouvait s'avérer efficace tant au regard de l'économie d'énergie (gain de 5,2 %) que du contrôle des concentrations de CO₂ dans l'air intérieur.

En dépit des qualités indéniables de la ventilation mécanisée et du caractère fondamental qu'elle revêt dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques, Sherman et Matson (2003) précisent que la meilleure avenue de gestion d'événements de contamination de l'air extérieur de courte durée (p. ex. particules provenant d'incendies de forêt) est encore d'interrompre tout système de ventilation mécanisée, incluant les ventilateurs d'extraction et de recirculation de l'air, et de limiter les échanges par voie naturelle au minimum, en maintenant les portes et fenêtres extérieures fermées. Cette mesure de confinement simple, qui s'appuie sur le rôle premier du bâtiment (soit de protéger les occupants du milieu extérieur), est à la portée de tous pour limiter l'introduction ponctuelle de contaminants de source extérieure. Plus le bâtiment est étanche, plus cette mesure sera effective dans le temps. Par ailleurs, si la contamination de l'air extérieur est modérée ou de longue durée et que les occupants désirent un renouvellement minimal de l'air intérieur, l'utilisation du système de ventilation par intermittence, par exemple, peut s'avérer opportune. Les déséquilibres de pression dans le bâtiment peuvent être minimisés, notamment en conservant toutes les portes intérieures ouvertes; mesure qui améliore également la circulation de l'air entre les différentes pièces de l'espace habitable. Lorsqu'une approche par confinement est appliquée, l'utilisation de dispositifs d'épuration de l'air intérieur, par l'entremise de systèmes centraux ou localisés (p.ex. épurateurs d'air), pourrait également s'avérer pertinente.

5.3 Mesures d'épuration de l'air

Bien que la ventilation constitue un moyen privilégié de diluer les concentrations de contaminants présents à l'intérieur des habitations (INSPQ, 2015; Nazaroff, 2013), elle a cependant tendance à uniformiser les caractéristiques de l'air intérieur et extérieur lorsqu'aucun mécanisme de filtration n'y est associé. Selon Santé Canada (2013), le CO, le NO₂, l'ozone, les particules fines, les COV et le SO₂ sont les principaux contaminants de l'air extérieur qui peuvent avoir des impacts sur la santé. Au Québec, il existe d'ailleurs un programme de surveillance de qualité de l'air extérieur, dont l'un des objectifs consiste à diffuser en temps réel un indice de qualité de l'air afin d'informer la population et de l'amener à adopter des comportements préventifs appropriés (MDDELCC, 2015). Un tel indice devrait être considéré par les propriétaires et gestionnaires de bâtiments dans l'élaboration de stratégies pour assurer une QAI adéquate.

Ainsi, en ce qui a trait aux bâtiments situés dans des zones où l'air extérieur est fréquemment de mauvaise qualité, il existe une grande variété de procédés d'épuration de l'air intérieur jugés efficaces pour limiter les concentrations de divers contaminants particulaires et gazeux (Yu et Kim, 2012). Les dispositifs d'épuration de l'air sont disponibles sous forme d'unités portables ou peuvent être intégrés au système de ventilation centralisé. Les dispositifs de traitement portables doivent être installés à des endroits précis ou localisés à l'intérieur du bâtiment, soit à proximité des sources de contaminants. Barn (2010) et Siegel (2016) rapportent cependant qu'en dépit de leur performance théorique, l'efficacité des épurateurs d'air varie grandement selon leur conception, leur installation, leur utilisation et leur entretien, ainsi que selon la nature et la concentration des contaminants présents. De plus, comme les sources de contamination de l'air intérieur peuvent être multiples, de tels appareils peuvent s'avérer inefficaces s'ils ne sont pas utilisés de concert avec des mesures de gestion complémentaires (Nelson et collab., 1988; Sherman et Matson, 2003; US EPA, 2009). Les principaux procédés d'épuration de l'air intérieur sont présentés ci-après.

5.3.1 FILTRATION MÉCANIQUE

La filtration mécanique est un dispositif permettant de capter les particules en suspension de l'air intérieur. Ces appareils d'épuration de l'air, qui sont les plus fréquemment utilisés en milieu résidentiel, sont généralement constitués d'un ventilateur, d'un support étanche destiné à recevoir un ou des filtres, ainsi que d'une unité de contrôle. Les types de ventilateur de même que les types de filtres utilisés varient selon les usages et les performances recherchés. Alors que le captage des particules est directement effectué par l'entremise des fibres du filtre, le retrait des aérosols de plus faible taille est favorisé par le mécanisme d'impaction induit par le flux d'air turbulent. Sherman et Matson (2003) rapportent que la filtration en elle-même constitue une stratégie efficace, quoique coûteuse, pour réduire les concentrations de contaminants particulaires (p. ex. allergènes tels que les spores de moisissures, les pollens, et les acariens dans les poussières), lorsqu'utilisée adéquatement. Fisk (2013) confirme d'ailleurs que l'application de cette stratégie peut contribuer à limiter l'exposition des occupants à ces contaminants, et même engendrer des bénéfices sanitaires corollaires significatifs (p. ex. réduction des symptômes chez les personnes allergiques et asthmatiques, de même que la morbidité et la mortalité associées à l'exposition aux particules de sources extérieures). Il semble donc que les systèmes de ventilation centralisés munis d'un dispositif de filtration de l'air provenant de l'extérieur constitueraient un bon moyen de prévenir la contamination du milieu intérieur, tandis que l'utilisation d'appareils de filtration portables pourrait constituer une solution de substitution à la ventilation lorsque la qualité de l'air extérieur s'est dégradée (Sherman et Matson, 2003; Seppänen et Fisk, 2004; Barn, 2010; US EPA, 2008, 2009), situations dont la fréquence pourrait s'accroître dans un contexte de changements climatiques.

Outre l'appareil de filtration, il importe de sélectionner le type de filtre adéquat, non seulement par rapport au dispositif de filtration, mais aussi en prenant en considération les besoins des occupants. Les différents types de filtres disponibles sont généralement classés d'après la codification MERV, sur une échelle de 1 à 20, qui réfère à leur efficacité minimale au regard de la taille de particules (US EPA, 2009). Sherman et Matson (2003) rapportent que la filtration de particules allergènes de grande taille (tels les pollens) peut être effectuée avec un filtre MERV 6-8. Les spores et petits pollens peuvent quant à eux être retirés de l'air ambiant en utilisant un filtre MERV 9-12. Lorsque l'appareil le permet, l'utilisation d'un filtre MERV 11 sur un système centralisé de chauffage à air pulsé ou de ventilation est en mesure de diminuer la concentration d'allergènes d'acariens de 30 à 40 %. Bien que la filtration de la suie et des autres produits de combustion peut être effectuée en utilisant un filtre MERV 13, permettant des réductions des concentrations de l'ordre de 45 à 80 %, les filtres MERV 17-20 pourraient les réduire de 95 % (à 10 ECAH¹²) (Fisk et collab., 2002). Le modèle de filtre le plus polyvalent, efficace et couramment utilisé demeure le filtre HEPA, qui permet de retenir 99,97 % des particules de diamètre inférieur à 0,3 µm. Les filtres sont généralement constitués de microfibrilles de verre et durent environ un an (Nelson et collab., 1988). Le remplacement des filtres constitue donc un enjeu de première importance au regard du maintien de la QAI puisque les filtres colmatés deviennent des sites de réactions d'oxydation engendrant la production de composés azotés et de COV (Clausen, 2004). De plus, l'utilisation de filtres colmatés est susceptible de nuire au rendement du moteur soutenant le ventilateur.

À titre d'information complémentaire, l'annexe 8 présente les résultats d'études originales concernant l'efficacité relative et spécifique de différents systèmes de filtration mécanique en milieu intérieur.

5.3.2 ÉPURATEUR ÉLECTRONIQUE

Sous leur forme la plus simple, les épurateurs électroniques génèrent des ions négatifs par l'entremise de l'effet corona, qui ionise les contaminants de l'air, avant de les rabattre sur une plaque chargée positivement. Certains appareils, non équipés de plaque collectrice, entraîneront plutôt le dépôt des contaminants chargés sur les différentes surfaces présentes dans la pièce (meubles, tapis, rideaux, etc.). L'efficacité de tels dispositifs est associée à la force du champ électrique généré, à la surface réactive des plaques collectrices, au débit du ventilateur et à la présence de préfiltres. De plus, ces dispositifs sont particulièrement efficaces pour l'épuration des particules de la taille des pollens, des spores de moisissures et des aérosols issus de la fumée de combustion (de la taille des PM_{2,5}) (Nelson et collab., 1988; Fernández-Caldas, Trudeau et Ledford, 1994; US EPA, 2009). Les résultats d'une étude réalisée par Henderson, Milford et Miller (2005) montrent d'ailleurs que l'air intérieur des maisons équipées d'épurateurs électrostatiques présentait des concentrations de PM_{2,5} moindres de 63 à 88 % lorsque comparées aux résidences témoins non équipées de tels systèmes.

Contrairement aux filtres, ces systèmes ne sont pas sensibles au colmatage mais requièrent un entretien régulier (nettoyage des plaques collectrices) afin d'optimiser leur performance. L'efficacité de retrait des poussières serait réduite d'environ 20 % après 16 heures d'utilisation, et de 75 % après 40 heures (Nelson et collab., 1988). Malgré cette intéressante fiche technique, l'utilisation d'épurateurs électroniques est généralement déconseillée en milieu résidentiel puisque ce type d'appareil produit de l'ozone en quantité variable et que ce puissant oxydant, produit par l'entremise de l'effet corona, est susceptible de causer un risque pour la santé des occupants (Barn, 2010; US EPA, 2009).

¹² Équivalent changement d'air à l'heure.

5.3.3 ADSORPTION DES GAZ

À l'instar des contaminants particulaires de l'air intérieur, il est possible de retirer les contaminants gazeux (p. ex. formaldéhyde, ozone, NO_x) à l'aide d'un filtre ou d'une cartouche constituée de charbon activé ou d'un autre adsorbant chimique (Sherman et Matson, 2003). En revanche, l'efficacité de tels dispositifs est reconnue comme étant relativement brève et variable selon les contextes d'utilisation (Nelson et collab., 1988). Bien que certaines études ont montré que les concentrations de SO₂ et de COV peuvent être atténuées dans une proportion approximative de 30 % et de 90 % respectivement par ces appareils (Sherman et Matson, 2003), il n'en demeure pas moins qu'il s'avère difficile d'appliquer ce type de technologie de façon efficace puisqu'elle s'appuie sur des réactions de surface pour lesquelles le nombre de sites d'adsorption est limité et que, par conséquent, des efforts soutenus en matière d'entretien doivent être déployés (Joffe, 1996). Le même auteur mentionne également que la filtration chimique des gaz ne peut se substituer à la ventilation et au contrôle des émissions à la source. En marge de ces contraintes et à l'instar de tous les dispositifs d'épuration, de nombreux éléments doivent être pris en compte afin de maximiser l'efficacité des systèmes d'adsorption des gaz : type de filtres, installation et entretien appropriés, etc. De plus, les coûts d'acquisition, d'utilisation et d'entretien peuvent rendre cette avenue non attractive pour le milieu résidentiel (US EPA, 2009).

5.3.4 OXYDATION PHOTOCATALYTIQUE

Ces systèmes, jadis utilisés pour le traitement de l'eau et des effluents industriels, ont fait leur apparition sur le marché des assainisseurs d'air au début des années 2000. Cette technologie, qualifiée d'universelle, est en mesure de détruire les composés chimiques particuliers et gazeux de même que les micro-organismes pathogènes à température et à pression ambiantes (OQAI, 2012a). La première étape du processus d'épuration se caractérise par l'adsorption d'oxygène, de vapeur d'eau et de COV sur un matériel semi-conducteur comme le dioxyde de titane (TiO₂). L'irradiation de ce semi-conducteur avec un rayonnement ultraviolet (UV) ou visible provoque le transfert de charges au sein de ce matériel qui engendre, en présence de molécules d'eau et d'oxygène adsorbées, la formation d'espèces chimiques de l'oxygène très réactives¹³. La présence de ces espèces entraîne la minéralisation des COV de l'air présents à la surface du composé semi-conducteur. Le mécanisme d'épuration s'achève par la désorption des produits de minéralisation, soit le CO₂ et la vapeur d'eau. L'élimination des micro-organismes serait également effectuée par l'entremise des radicaux libres (OH, HO₂, H₂O₂), précipités par l'action des UV sur le composé semi-conducteur.

Les systèmes photocatalytiques se déclinent en 2 grandes catégories de produits destinés aux usages domestiques : les systèmes dynamiques et les matériaux photoactifs. La première catégorie regroupe les modules de traitement imbriqués dans les systèmes de ventilation centralisés, de même que divers types d'appareils autonomes qui intègrent différentes fonctions d'épuration, de climatisation et de chauffage de l'air intérieur. Il est à noter que l'air doit circuler à plusieurs reprises dans le dispositif (soit un minimum de 4 à 5 passages) afin que son effet épurateur soit significatif sur la QAI. En ce qui concerne la seconde catégorie, l'OQAI (2012a) a identifié 14 types de matériaux photoactifs enrichis en dioxyde de titane et aux propriétés dites dépolluantes ou antibactériennes, dont des peintures et des papiers peints. Bien que ces systèmes photocatalytiques possèdent une efficacité théorique bien documentée, rares sont les essais ayant été réalisés en conditions réelles. L'OQAI (2012a) rapporte que la performance de ces systèmes reste contestable, voire potentiellement nuisible pour la QAI en raison de la formation de sous-produits potentiellement

¹³ Tels les ions superoxydes (O₂⁻), hydroxyles (OH⁻) et hydroperoxydes (HO₂⁻).

néfastes pour la santé, dont certains COV (Hodgson et collab., 2007; US EPA, 2009) et le NO₂ (Yu et Brouwers, 2009).

À titre d'exemple, Hodgson et collab. (2007) ont étudié l'efficacité d'un tel dispositif sur un mélange de 27 COV. Selon les résultats rapportés, la conversion des COV est variable, soit entre 20 % et 80 %, avec un temps de transit de l'air dans le système équivalent à 0,03 seconde. L'efficacité de conversion des COV demeure inversement proportionnelle au débit de l'appareil et varie selon le type de contaminants. D'autre part, la conversion ou la minéralisation incomplète des COV entraîne la production de formaldéhyde, d'acétaldéhyde, d'acétone ainsi que d'acides formique et acétique. Par ailleurs, une étude réalisée par Yu et collab. (2006) a montré que l'efficacité de minéralisation des COV par le système photocatalytique augmente avec le taux d'humidité relative de l'air (qui fournit des radicaux hydroxyles), mais décroît avec la vitesse de renouvellement de l'air sur les surfaces actives.

6 Discussion

6.1 Constats de la revue de la littérature

Les mesures documentées dans la présente revue de la littérature ont la particularité d'être applicables tant aux bâtiments existants qu'aux bâtiments à construire. Bien qu'elles puissent être employées individuellement, ces mesures devraient idéalement être implantées en complémentarité les unes avec les autres et en considérant les caractéristiques de l'environnement immédiat et du bâtiment lui-même, ainsi que les comportements des occupants afin d'assurer une gestion intégrée et optimale de la qualité de l'environnement intérieur.

6.1.1 MESURES DE RÉDUCTION ET DE CONTRÔLE DE L'INFILTRATION ET DE L'ÉMISSION DES CONTAMINANTS

Puisque les scénarios climatiques futurs prévoient des variations notables dans les quantités de précipitations et les températures pour certaines régions du Québec, il semble d'entrée de jeu qu'une des premières mesures à considérer serait de **procéder à l'amélioration de l'isolation et de l'étanchéité de l'enveloppe des bâtiments**. Cette mesure permet de limiter l'infiltration de contaminants provenant de source extérieure, de réduire les problèmes potentiels de condensation ou d'infiltration d'eau et d'accroître le confort thermique des occupants. De plus, l'isolation et l'étanchéisation permettent d'assurer un meilleur contrôle de la température et de l'humidité, ce qui peut engendrer une réduction des émissions de certains contaminants de source intérieure (p. ex. COV), et de maintenir des conditions permettant d'éviter le développement de moisissures. Enfin, ce type de mesure apporte des co-bénéfices indirects pour l'adaptation aux changements climatiques en réduisant les coûts de chauffage et de climatisation associés – dans certains contextes – à des émissions de GES (p. ex. dans le nord du Québec où le mazout est utilisé comme source d'énergie pour le chauffage).

De même, la mise en œuvre de cette mesure devrait être effectuée **à l'aide de matériaux dont l'efficacité énergétique et la résistance à la biodétérioration sont élevées et dont l'émissivité des COV est faible**. De tels matériaux existent actuellement sur le marché. Il est recommandé d'opter pour des produits certifiés par des organismes compétents et reconnus et qui répondent à des exigences minimales pour assurer une bonne QAI (Srebric, 2010). Le choix de tels produits constitue une mesure de réduction à la source des contaminants de l'air intérieur ainsi qu'une mesure d'adaptation simple et efficace aux effets indirects des changements climatiques (Yu et Kim, 2012).

6.1.2 MESURES D'AMÉLIORATION DE LA VENTILATION

Parmi les autres mesures documentées qui sont susceptibles d'avoir une incidence positive directe sur l'amélioration et le maintien de la QAI dans un contexte de changements climatiques, **l'usage de la ventilation (naturelle et/ou mécanique) demeure une avenue de gestion importante**. À cet effet, la ventilation naturelle volontaire est une option de base souvent efficace pour assurer une meilleure QAI, en plus d'être accessible et peu énergivore (Mavrogianni et Mumovic, 2010; Scheepers et collab., 2012). Cette mesure nécessite cependant que le bâtiment soit fonctionnel à cet égard (p. ex. mécanismes des fenêtres en bon état) et que les occupants y recourent adéquatement. En effet, ce mode de ventilation devrait être utilisé lorsque les conditions extérieures le favorisent (p. ex. conditions météorologiques appropriées selon la période de l'année, faible niveau de pollution atmosphérique ou de perturbation locale, faible pollution sonore), mais devrait être minimisé, voire mis de côté en cas de vague de chaleur ou de froid, d'événements climatiques extrêmes ou d'événements menant à la détérioration de la qualité de l'air extérieur (p. ex. smog, incendies de

forêt). **La ventilation naturelle nocturne reste une solution à considérer puisque les concentrations de polluants extérieurs sont généralement moindres la nuit.**

Au Québec, la ventilation naturelle ne peut assurer à elle seule le maintien de la QAI, sachant que la température est très variable au cours de l'année – et le sera davantage avec les changements climatiques – et que l'enveloppe des bâtiments est de plus en plus étanche afin d'améliorer l'efficacité énergétique. Dans ce contexte, **le recours à la ventilation mécanisée s'avère une avenue d'adaptation d'importance dans les habitations plus étanches.** Les systèmes de ventilation mécanique centralisés permettent non seulement d'extraire et/ou de diluer les contaminants présents dans l'air intérieur, mais également d'acheminer de l'air frais aux pièces habitables (Orosa et Oliveira, 2010). Bien que les coûts associés à leur installation ou à leur mise à niveau puissent s'avérer substantiels, l'ajout d'un dispositif permettant la récupération de la chaleur ou de l'énergie doit être considéré, dans une optique d'optimisation de la QAI et d'efficacité énergétique. D'ailleurs, il est à noter qu'en vertu du Règlement modifiant le Code de construction pour favoriser l'efficacité énergétique des bâtiments (Gouvernement du Québec, 2012), il est obligatoire au Québec depuis le 30 août 2012 de procéder à l'installation de VRC dans les nouveaux bâtiments d'habitation. Aussi, l'installation de systèmes de ventilation centralisés performants combinés à des ventilateurs extracteurs d'air dans la cuisine et la salle de bain constitue un moyen efficace et peu énergivore de contrôler le taux d'humidité relative, de réduire les contaminants à la source et d'assurer le confort thermique des occupants, par l'adaptation à la chaleur.

C'est également en accord avec le contexte climatique rencontré au Québec qu'il s'avérerait pertinent de **promouvoir la mise en place de diverses technologies de contrôle de la ventilation qui sont flexibles et peu énergivores** (Nazaroff, 2013; Laverge et collab., 2011; Sharpe et collab., 2015; Vorwald, 2011). Les modules de contrôle actuellement fournis avec les appareils disponibles sur le marché permettent à l'utilisateur d'opter pour différents modes de fonctionnement tels que « échange d'air avec l'extérieur », « recirculation de l'air intérieur », « intermittent », etc. Le choix d'opter pour l'un ou l'autre de ces modes requiert toutefois un minimum de compréhension et de connaissances de la part de l'utilisateur. Certains systèmes de contrôle permettent de moduler l'utilisation des systèmes de ventilation mécanisés en fonction des besoins des occupants et des paramètres « sentinelles » de la QAI (p. ex. CO₂). Dans un futur rapproché, il peut être envisagé que de tels systèmes automatisés puissent commander l'ouverture et la fermeture des fenêtres d'un bâtiment, par exemple, et ajuster les débits d'air d'une habitation en fonction des paramètres sentinelles et des conditions météorologiques observées ou projetées (p. ex. épisode de smog, humidité relative et température élevées). Comme souligné par Mavrogianni et Mumovic (2010), il semble que l'implantation de mesures combinées de ventilation naturelle et mécanisée et de dispositifs de contrôle intelligents s'avèrent une avenue d'adaptation parmi les plus prometteuses, bien qu'encore peu accessible à tous.

6.1.3 MESURES D'ÉPURATION DE L'AIR

Dans des situations où la qualité de l'air extérieur se dégrade (p. ex. lors d'événements climatiques extrêmes) ou lorsqu'un ou plusieurs occupants sont affectés par divers allergènes, l'utilisation de dispositifs d'épuration de l'air intérieur peut constituer une mesure de gestion efficace pour certains polluants en provenance de l'extérieur. Puisque les données probantes relatives à l'efficacité des systèmes de filtration sont plus abondantes que celles concernant les autres types d'épurateurs d'air, l'emploi de dispositifs de filtration est généralement recommandé à titre de mesure d'appoint. En effet, l'utilisation d'une unité de filtration localisée ou portable munie d'un filtre HEPA peut réduire l'exposition aux particules respirables et les effets sur la santé occasionnés par celles-ci (Sultan, Magee et Nilsson, 2011). L'utilisation d'un appareil de ventilation

centralisée muni d'un filtre HEPA pourrait également offrir aux occupants une protection en continu contre les contaminants particulaires de source extérieure, tels les spores, les pollens, la fumée de combustion, etc. En ce qui concerne la gestion des contaminants gazeux, l'enveloppe du bâtiment peut fournir une certaine protection contre les polluants de source extérieure tels que l'ozone. Contrairement aux contaminants particulaires, le traitement des contaminants gazeux, tant de source interne qu'externe, et des sous-produits de dégradation associés (p. ex. formaldéhyde) s'avère toutefois généralement onéreux (tant à l'achat qu'à l'entretien) et communément peu efficace en milieu résidentiel (Weschler, 2000).

6.2 Analyse des mesures d'adaptation

Il apparaît donc que de nombreuses solutions s'offrent aux propriétaires, aux gestionnaires et aux occupants de bâtiments d'habitation qui désirent poser des gestes concrets en vue de limiter les effets directs et indirects des aléas climatiques sur la QAI de leurs habitations. À cet effet, la présente revue de la littérature a permis de mettre en relief différentes mesures d'adaptation aux changements climatiques, qui ont été caractérisées sur la base de l'information disponible selon les critères suivants :

- Leur(s) impact(s) direct(s) ou indirect(s) sur la QAI;
- Leur efficacité énergétique;
- Leur accessibilité, soit notamment les efforts qu'elles impliquent pour les occupants, les gestionnaires ou les propriétaires, tant en ce qui a trait aux investissements en temps et en argent (au départ et en cours d'opération) qu'aux démarches pour assurer l'efficacité recherchée;
- Les co-bénéfices potentiels à l'égard de la mitigation ou de l'adaptation à d'autres problématiques liées aux changements climatiques (p. ex. îlots de chaleur, pollution atmosphérique).

Les principales mesures répertoriées dans la présente revue ainsi que les caractéristiques leur étant associées ci-dessus mentionnées sont présentées au tableau 2 et analysées aux pages suivantes. Il est à noter que l'analyse des mesures répertoriées se base sur les éléments pertinents rapportés par les auteurs des documents retenus, de même que sur le jugement professionnel des auteurs impliqués dans la rédaction du présent document. L'intervention directe de ces derniers s'est avérée plus particulièrement nécessaire au regard de certains critères pour lesquels peu d'informations étaient disponibles dans la littérature. Les auteurs laissent au lecteur le soin d'évaluer la pertinence des mesures présentées en fonction des besoins des occupants, de leurs vulnérabilités individuelles et des autres facteurs pouvant influencer leur décision de sélectionner l'une ou l'autre d'entre elles.

Tableau 2 Synthèse des mesures d'adaptation aux changements climatiques applicables aux bâtiments d'habitation

Mesures	Impacts sur la QAI	Efficacité énergétique	Efforts ^a	Co-bénéfices potentiels
Mesures de réduction et de contrôle de l'infiltration et de l'émission des contaminants				
Étanchéisation et isolation de l'enveloppe externe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduction de l'infiltration des contaminants de source extérieure; ▪ Minimisation de l'infiltration d'eau et de la condensation due aux surfaces froides et, par conséquent, de la croissance fongique; ▪ Minimisation de l'émission de certains COV (par un meilleur contrôle de l'humidité et de la chaleur); ▪ Persistance prolongée de contaminants de source intérieure en l'absence de mesures de ventilation adéquates. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduction des coûts d'énergie pour le chauffage et la climatisation. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Investissement pouvant être substantiel (en fonction de l'ampleur des travaux); ▪ Effort nécessaire pour la mise en place de la mesure, mais aucun effort d'entretien par la suite. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Impact positif potentiel sur le confort thermique en facilitant l'adaptation à la chaleur.
Réduction à la source par les choix des produits et matériaux et les comportements des occupants	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduction à la source des contaminants (p. ex. COV); ▪ Contrôle de la contamination fongique par l'utilisation de matériaux résistants à la biodétérioration. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grande efficacité énergétique de plusieurs matériaux certifiés démontrée. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Investissement faible à modéré pour les matériaux (selon le type de matériaux) et substantiel (si un bâtiment complet est construit); ▪ Effort nécessaire pour la recherche, le choix et l'achat de matériaux sains qui réduisent l'impact sur la QAI; ▪ Effort nécessaire pour la recherche des certifications existantes et le choix des dispositions favorisant une meilleure QAI lors de la construction ou de rénovations majeures (p. ex. Novoclimat 2.0). 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Matériaux durables, qui limitent l'impact sur l'environnement (p. ex. bois avec la certification FSC); ▪ Contribution à la mitigation des changements climatiques par la réduction des émissions de GES (lors de la construction et de l'opération des bâtiments, ou de la production de matériaux).

Tableau 2 Synthèse des mesures d'adaptation aux changements climatiques applicables aux bâtiments d'habitation (suite)

Mesures	Impacts sur la QAI	Efficacité énergétique	Efforts ^a	Co-bénéfices potentiels
Mesures de réduction et de contrôle de l'infiltration et de l'émission des contaminants				
Extraction localisée (hotte, ventilateur d'extraction)	<ul style="list-style-type: none"> Extraction des contaminants à la source; Minimisation des conditions d'humidité excessive, de la condensation et, par conséquent, de la croissance fongique; Dilution des contaminants de source intérieure. 	<ul style="list-style-type: none"> Efficacité énergétique modulée par le type d'appareil (p. ex. ENERGY STAR) et la fréquence d'utilisation. 	<ul style="list-style-type: none"> Investissement faible à modéré (obligatoire dans tous les nouveaux bâtiments); Efforts limités à l'entretien des appareils. 	<ul style="list-style-type: none"> Impact positif potentiel sur le confort thermique.
Chauffage, climatisation et déshumidification	<ul style="list-style-type: none"> Réduction des concentrations de pollens, de spores et d'autres allergènes (notamment en raison de la fermeture des fenêtres). 	<ul style="list-style-type: none"> Efficacité énergétique modulée par le type d'appareil, le mode d'utilisation (p. ex. en intermittence ou en continu), l'étanchéité du bâtiment, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Investissement pouvant être substantiel (dépend du type d'appareil); Efforts liés à la compréhension des fonctionnalités, à la gestion et à l'entretien des appareils. 	<ul style="list-style-type: none"> Impact positif sur le confort thermique en contribuant à l'adaptation à la chaleur.
Mesures d'amélioration de la ventilation				
Ventilation naturelle (incluant la ventilation nocturne)	<ul style="list-style-type: none"> Dilution des contaminants de source intérieure, en l'absence d'épisodes de pollution extérieure; Introduction potentielle des contaminants de source extérieure. 	<ul style="list-style-type: none"> Faible coût énergétique (sauf si l'air extérieur doit être chauffé ou refroidi). 	<ul style="list-style-type: none"> Investissement nul (sauf s'il faut réchauffer l'air froid qui entre); Efforts liés à la gestion de l'ouverture/fermeture des fenêtres en fonction des saisons, des conditions climatiques, des autres aléas extérieurs (p. ex. bruit, odeurs) ainsi que des possibles contraintes physiques (p. ex. mécanisme d'ouverture altéré) et reliées à l'utilisateur (p. ex. personne handicapée, aînés). 	<ul style="list-style-type: none"> Impact positif potentiel sur le confort thermique en facilitant l'adaptation à la chaleur lorsqu'appliquée de façon adéquate (p. ex. la nuit en été).

Tableau 2 Synthèse des mesures d'adaptation aux changements climatiques applicables aux bâtiments d'habitation (suite)

Mesures	Impacts sur la QAI	Efficacité énergétique	Efforts ^a	Co-bénéfices potentiels
Mesures d'amélioration de la ventilation				
Ventilation mécanique	<ul style="list-style-type: none"> Minimisation des conditions d'humidité excessive, de la condensation et, par conséquent, de la croissance fongique; Minimisation de l'infiltration de contaminants particulaires de source extérieure (bonifiée par la présence d'un filtre); Dilution des contaminants de source intérieure. 	<ul style="list-style-type: none"> Efficacité énergétique modulée par le type d'appareil (p. ex. ENERGY STAR), le mode d'utilisation (p. ex. en intermittence) et l'étanchéité du bâtiment. 	<ul style="list-style-type: none"> Investissement pouvant être substantiel (dépend du type de système); Efforts liés à la compréhension des fonctionnalités, à la gestion et à l'entretien des appareils. 	<ul style="list-style-type: none"> Impact positif potentiel sur le confort thermique en contribuant à l'adaptation à la chaleur.
Mesures d'épuration de l'air				
Filtration mécanique	<ul style="list-style-type: none"> Atténuation des contaminants particulaires fins et grossiers. 	<ul style="list-style-type: none"> Efficacité énergétique modulée par le type d'appareil, le mode d'utilisation (p. ex. en intermittence ou en continu), l'étanchéité du bâtiment, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Investissement pouvant être substantiel (dépend du type d'appareil); Efforts liés à la compréhension des fonctionnalités, à la gestion et à l'entretien des appareils. 	<ul style="list-style-type: none"> S. O.
Épurateur électronique	<ul style="list-style-type: none"> Atténuation des contaminants particulaires fins; Production d'ozone néfaste pour la santé. 			<ul style="list-style-type: none"> S. O.
Adsorption des gaz	<ul style="list-style-type: none"> Atténuation des contaminants gazeux. 			<ul style="list-style-type: none"> S. O.
Oxydation photocatalytique	<ul style="list-style-type: none"> Destruction des composés chimiques particulaires et des micro-organismes pathogènes; Production de sous-produits parfois néfastes pour la santé, dont les COV et le NO₂. 			<ul style="list-style-type: none"> S. O.

^a Les efforts sont toujours modulés en fonction du statut d'occupation. Ainsi, les propriétaires ou gestionnaires de bâtiments ont plus de responsabilités que les locataires (ou les occupants non-propriétaires) à l'égard de la mise en œuvre de certaines mesures (p. ex. achat d'un système de ventilation centralisé pour un immeuble à logements). Par contre, les occupants des habitations sont responsables de la mise en œuvre des mesures impliquant leur milieu de vie et de leurs comportements (p. ex. utilisation adéquate du ventilateur extracteur d'air de la salle de bain, achat de produits moins émissifs).

6.2.1 PRIORISER DES MESURES CONSIDÉRANT L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Peu importe les travaux de construction ou de rénovation à effectuer ainsi que le type d'équipement de ventilation, d'épuration, de chauffage ou de climatisation à acquérir ou à remplacer, certaines considérations en matière d'efficacité énergétique doivent être considérées. Au Québec, le secteur résidentiel représentait, en 2011, 18,8 % de la consommation d'énergie totale, la majeure partie étant destinée au chauffage de l'espace habitable et de l'eau (MERN, 2015). La même année, il a été estimé qu'environ 10,6 % des émissions de GES provenaient des secteurs résidentiel, commercial et institutionnel (chauffage des bâtiments) (MDDELCC, 2014). À l'heure actuelle, la demande énergétique globale en lien avec la ventilation mécanisée constitue une fraction variable, mais non négligeable, de la consommation énergétique totale d'un bâtiment (U.S. EIA, 2015). Les résultats de plusieurs études, tant rétrospectives que prospectives, ont également démontré que l'utilisation massive de dispositifs de climatisation est susceptible d'amplifier les effets des changements climatiques, que ce soit à l'échelle locale (intensification des îlots de chaleur) ou globale (augmentation de la température planétaire) (Isaac et van Vuuren, 2009; Santamouris, Sfakianaki et Pavlou, 2010; Hamlet et collab., 2010; Yau et Hasbi, 2013).

L'utilisation massive de climatiseurs est également susceptible d'engendrer des pannes de courant (en période de forte demande) ainsi que des stress encore plus grands pour les individus qui ne seraient pas en mesure d'utiliser ou d'obtenir de tels appareils. Il s'avère donc pertinent de **préconiser, dans un premier temps, des mesures d'adaptation efficaces et peu énergivores, comme les mesures passives, notamment afin de ne pas accroître la vulnérabilité des populations les plus sensibles** (incluant les personnes âgées, les personnes handicapées ou souffrant de maladies chroniques et celles au statut socioéconomique précaire) (Reid et collab., 2009; Nazaroff, 2013; Bélanger et collab., 2014; Campbell-Lendrum et Corvalán, 2007). Yau et Hasbi (2013) et Frank (2005) concluent d'ailleurs leurs analyses respectives en précisant que le meilleur moyen d'adaptation au stress thermique croissant est de disposer de parasoleils à l'extérieur de l'habitation, de développer des stratégies de ventilation naturelle (incluant la ventilation nocturne) et d'opter pour l'occupation d'endroits naturellement frais (p. ex. sous-sols) durant les vagues de chaleur. D'un point de vue populationnel, il pourrait également s'avérer pertinent que **les autorités compétentes développent des plans d'adaptation intégrés à l'intention des propriétaires et des gestionnaires de bâtiments afin de prévenir et de minimiser non seulement les impacts anticipés des changements climatiques au regard du confort thermique, mais également sur la QAI** (Austin et collab., 2015). La promotion de mesures d'adaptation peu énergivores et peu coûteuses devrait être préconisée par souci d'équité et d'accessibilité (Maller et Strengers, 2011).

6.2.2 PRIORISER DES MESURES ACCESSIBLES ADAPTÉES AUX BESOINS ET AUX VULNÉRABILITÉS DES OCCUPANTS

De par leur statut d'utilisateurs de bâtiments, les occupants sont les premiers bénéficiaires, mais également des acteurs de première ligne dans la mise en place et le maintien de mesures d'adaptation aux changements climatiques. Das et collab. (2013) ont d'ailleurs démontré que les variables reliées aux comportements des occupants comptaient parmi les principaux déterminants de la ventilation d'une habitation, et ce, devant les caractéristiques structurales. Pour assurer la QAI dans leur habitation et leur confort thermique, les occupants devraient ainsi prioriser certaines actions : contrôle et réduction des contaminants à la source, utilisation de la ventilation naturelle et/ou mécanique et, dans certaines circonstances, épuration de l'air intérieur (Nazaroff, 2013). L'entretien, la rénovation et la mise à jour des bâtiments d'habitation et des systèmes de ventilation et d'épuration contribuent à assurer la performance de ces derniers, tout en minimisant les coûts d'utilisation (De Wilde et Coley, 2012).

Dans un contexte où la gestion de la QAI n'est pas assujettie à un cadre réglementaire, Sharpe et collab. (2015) mentionnent qu'il serait pertinent **d'accompagner la population dans l'acquisition de comportements adaptatifs sur la base de différents indices et repères faciles à identifier**. À titre d'exemple, ces auteurs recommandent l'installation de moniteurs de CO₂ (dont les taux élevés indiquent une ventilation insuffisante) accompagnés d'outils de communication décrivant des conseils simples et directs pour aiguiller les occupants dans l'adoption de comportements utiles (p. ex. ouvrir les fenêtres, activer la hotte de la cuisinière).

Plusieurs auteurs soulignent également l'importance **de lancer ou de poursuivre les démarches communicationnelles et éducatives auprès de la population et des différents acteurs de l'industrie de la construction relativement aux impacts des émissions de contaminants issus des produits et matériaux de construction, de décoration et d'ameublement** (Yu et Kim, 2012; Bluysen et collab., 2010). En effet, les professionnels responsables de la construction et du design des bâtiments (p. ex. architectes, entrepreneurs) ne seraient pas toujours au courant des impératifs et des enjeux liés à la QAI, et ne connaîtraient que rarement les systèmes d'étiquetage environnemental nationaux et internationaux (Bluysen et collab., 2010). De plus, certains auteurs suggèrent que l'adoption de comportements adaptés devrait passer par l'acquisition de connaissances de base en lien avec l'entretien des appareils et la ventilation des bâtiments (Greene, Casey et Williams, 1997). Une étude souligne d'ailleurs que les efforts d'éducation et de sensibilisation devraient être dirigés principalement vers divers publics cibles tels que les professionnels des milieux universitaires, les architectes et les locataires (Bluysen et collab., 2010).

6.2.3 PRIORISER DES MESURES PRÉSENTANT DES CO-BÉNÉFICES

Certaines mesures d'adaptation rapportées précédemment sont susceptibles d'engendrer des co-bénéfices lorsqu'elles sont appliquées avec rigueur et assiduité. À titre d'exemple, l'application de mesures passives de gestion de la QAI (isolation, étanchéisation des bâtiments, ventilation naturelle) ou qui peuvent être qualifiées d'écoénergétiques (p. ex. VRE) contribue à diminuer la consommation énergétique, et ce, particulièrement en période de pointe. Enfin, certaines mesures peuvent contribuer à la réduction des GES (p. ex. construction de bâtiments plus durables et moins émissifs), une des principales causes des changements climatiques.

7 Perspectives

À l'heure actuelle, il existe encore peu de littérature scientifique portant spécifiquement sur la problématique des changements climatiques et de leurs conséquences sur l'environnement intérieur. Considérant que les Québécois passent environ 90 % de leur temps à l'intérieur (Dales et collab., 2008; Santé Canada, 2015) et que certains scénarios climatiques (p. ex. augmentation des vagues de chaleur) pourraient amener la population à y passer davantage de temps, il s'avère pertinent de poursuivre les recherches sur ce thème afin de poursuivre les efforts d'adaptation entrepris par le Québec au cours des dernières années.

La réflexion sur les nouveaux concepts ou sur les nouvelles mesures à adopter devra ainsi se poursuivre afin de considérer davantage leurs impacts sur la qualité de l'environnement intérieur, soit sur les paramètres de confort (dont la température et l'humidité relative) et la QAI. Cette considération débute par l'adoption de mesures s'appliquant à l'environnement extérieur limitrophe des bâtiments, telles que la plantation d'arbres, la végétalisation des toits, la considération des caractéristiques physiographiques des sites, etc.

Aussi, il faut envisager dès maintenant la conception de bâtiments ou de complexes d'habitation mieux adaptés à la réalité climatique de demain. Les bâtiments résidentiels de nouvelle génération (p. ex. bâtiment vert, écologique, durable, à énergie positive) sont des exemples d'initiatives qui témoignent d'un souci d'adaptation et de l'importance accordée à l'efficacité énergétique et au développement durable.

Certains auteurs des publications retenues ont proposé des pistes de réflexion ainsi que des avenues de recherche complémentaires qui pourraient contribuer à bonifier l'inventaire des mesures d'adaptation réalisé par le biais de la présente revue de la littérature. Ainsi, des études et des projets de recherche pourraient se pencher sur : 1) la gestion des zones de chaleur à l'intérieur des bâtiments (p. ex. aux étages supérieurs); 2) les comportements des occupants; 3) le concept de bâtiments résilients aux changements climatiques; 4) le concept d'approche de gestion intégrée adapté à la lutte contre les changements climatiques (De Wilde et Coley, 2012).

Aussi, plusieurs auteurs et organismes signalent le besoin d'améliorer les connaissances relatives aux composés émanant des matériaux de construction et de décoration, et de développer de nouvelles méthodes uniformisées de caractérisation de l'émissivité de ces matériaux (Brown, Crump et Harrison, 2013; Anses, 2013; Joint Research Centre, 2013), notamment en fonction des conditions climatiques actuelles et anticipées.

Des travaux pourraient également porter sur l'utilité et la faisabilité de développer un système d'étiquetage canadien – voire québécois – pour identifier les produits et matériaux en fonction de leurs émissions; cela permettrait aux consommateurs et aux promoteurs de faire des choix éclairés quant aux matériaux qu'ils achètent et installent dans les habitations.

L'évaluation des certifications existantes, tant en ce qui concerne les produits et matériaux que les bâtiments, serait aussi souhaitable afin de déterminer lesquelles permettent d'atteindre une bonne qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments d'habitation en fonction des réalités québécoises.

Des recherches portant sur l'efficacité des composants de systèmes de ventilation mécanique tels que les modules de contrôles intelligents pourraient s'avérer utiles afin de bonifier de futures mises à jour des codes du bâtiment.

Enfin, la comparaison de plusieurs méthodes de traitement de l'air dans des conditions atmosphériques particulières (p. ex. lors d'une vague de chaleur, d'un épisode de smog) et futures, à l'aide de scénarios climatiques déjà éprouvés, pourrait contribuer à valider l'efficacité des mesures de gestion de la QAI pour le contexte climatique québécois.

Au-delà de la recherche et du développement de procédés visant à assurer une bonne QAI, la mise en place de programmes de subvention visant l'installation ou la mise à niveau de systèmes de ventilation performants et écoénergétiques dans les habitations pourrait contribuer à l'adaptation de la société québécoise aux impacts des changements climatiques, particulièrement auprès des populations plus vulnérables (p. ex. autochtones, aînés, enfants) et dans les autres milieux où ces populations peuvent se retrouver (p. ex. hôpitaux, garderies, quartiers près de sources de pollution atmosphérique). En effet, d'autres types de bâtiments peuvent héberger, pour des durées variables, des individus avec des vulnérabilités particulières. Par exemple, les hôpitaux et les centres d'hébergement et de soins de longue durée (CHSLD) accueillent des clientèles vulnérables pour de longues périodes (individus à mobilité réduite et atteints de maladies chroniques, aînés, etc.). Il serait donc pertinent d'évaluer les risques potentiels des impacts des changements climatiques pour ces sous-groupes de la population sur les milieux intérieurs ainsi que d'établir les mesures d'atténuation pouvant être mises en œuvre dans de tels milieux.

Enfin, la promotion de ces mesures d'adaptation devrait se faire par le biais de campagnes de sensibilisation auprès de la population et des acteurs de l'industrie de la construction. Ces campagnes feraient la promotion des différentes méthodes de maintien de la QAI et des comportements adaptés pour ce faire (p. ex. choix de matériaux à faible émissivité et utilisation adéquate de la ventilation naturelle, des systèmes de ventilation mécanique et des dispositifs d'épuration).

La coordination des divers travaux de recherche proposés précédemment pourrait être facilitée par la mise en place d'un outil inspiré de l'OQAI, qui a vu le jour en France en 2001. Au moyen de diverses activités menées au cours des dernières années (OQAI, 2012b), cet observatoire a notamment contribué aux travaux ayant mené à l'étiquetage des nouveaux produits de construction et de décoration (Anses, 2013). L'OQAI a également participé, par son expertise scientifique et technique, à la mise en place d'une surveillance obligatoire de la QAI dans les milieux accueillant des populations vulnérables, notamment les centres de la petite enfance et les écoles. Les connaissances acquises par un tel observatoire ont aussi permis d'influencer les lignes directrices et la réglementation concernant la QAI en France, en plus de mener à diverses activités de sensibilisation auprès des professionnels et du grand public. Par le développement des connaissances, leur partage et le réseautage des organisations impliquées, la mise en place d'un outil québécois inspiré de ce type d'observatoire contribuerait à jouer un rôle d'influence dans le domaine de l'environnement intérieur. Par ailleurs, la combinaison des diverses mesures proposées dans le présent document (réduction à la source, ventilation, purification, etc.) milite en faveur d'une approche intégrée, qui serait favorisée par la mise en place d'un tel outil. Elle favoriserait également l'adoption d'une approche holistique dans la réalisation des divers travaux, qui tiendrait compte d'autres enjeux liés à la qualité de l'air intérieur, tels que les changements climatiques et l'efficacité énergétique.

Références

- AgBB. (2015). *Health-related evaluation procedure for volatile organic compounds emissions (VOC, VOC and SVOC) from Building Products*. Repéré à http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/355/dokumente/agbb_evaluation_scheme_2015.pdf
- Agence de la santé et des services sociaux de Montréal. (2015). Le smog et votre santé. Repéré à <http://pro.santemontreal.qc.ca/detail/article/le-smog-et-votre-sante>
- Allen, R. W., Carlsten, C., Karlen, B., Leckie, S., Eeden, S. van, Vedal, S., ... Brauer, M. (2011). An air filter intervention study of endothelial function among healthy adults in a woodsmoke-impacted community. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 183(9), 1222-1230. doi : 10.1164/rccm.201010-1572OC
- Anses. (2013). Etiquetage des produits de construction et de décoration au regard de l'émission de COV. Repéré à <https://www.anses.fr/fr/content/etiquetage-des-produits-de-construction-et-de-d%C3%A9coration-au-regard-de-l%E2%80%99C3%A9mission-de-cov>
- Anses. (2015a). *Évaluation des risques liés à l'exposition aux retardateurs de flamme dans les meubles rembourrés - Partie 2 - Évaluation des effets sur la santé et sur l'environnement, et estimation qualitative du rapport bénéfices/risques*. Repéré à <https://www.anses.fr/fr/system/files/CONSO2011sa0132Ra-02.pdf>
- Anses. (2015b). Qualité de l'air intérieur : appui de l'Anses pour la mise en place d'un étiquetage pour les produits d'ameublement. Repéré à <https://www.anses.fr/fr/content/qualit%C3%A9-de-l%E2%80%99air-int%C3%A9rieur-appui-de-l%E2%80%99anses-pour-la-mise-en-place-d%E2%80%99un-%C3%A9tiquetage-pour-les>
- Anses. (2015c). Qualité de l'air intérieur, établissement de valeurs réglementaires et surveillance. Repéré à <https://www.anses.fr/fr/content/qualit%C3%A9-de-l%E2%80%99air-int%C3%A9rieur-%C3%A9tablissement-de-valeurs-r%C3%A9glementaires-et-surveillance>
- ASHRAE. (2013). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013 – Ventilation for acceptable indoor air quality*. Repéré à http://catalogue.cssslaval.qc.ca/GEIDFile/Doc_186564.pdf?Archive=199630291781&File=Doc_186564_pdf
- Austin, S. E., Ford, J. D., Berrang-Ford, L., Araos, M., Parker, S. et Fleury, M. D. (2015). Public health adaptation to climate change in canadian jurisdictions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(1), 623-651. doi : 10.3390/ijerph120100623
- Azuma, K., Funaki, R., Hasegawa, A., Shinohara, N., Yamaguchi, M., Fujita, K.-O., ... Tanabe, S.-I. (2012). Integrating requirements for the delivery of information relating to construction-product compositions. *Indoor and Built Environment*, 23(5), 653-664. doi : 10.1177/1420326X12462912
- Bai, Z., Jia, C., Zhu, T. et Zhang, J. (2002). Indoor air quality related standards in China. *Proceedings : Indoor Air 2002*, p. 1012-17. Repéré à <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB7659.pdf>.
- Balvers, J., Bogers, R., Jongeneel, R., Kamp, I. van, Boerstra, A. et Dijken, F. van. (2012). Mechanical ventilation in recently built Dutch homes: technical shortcomings, possibilities for improvement, perceived indoor environment and health effects. *Architectural Science Review*, 55(1), 4-14. doi : 10.1080/00038628.2011.641736

- Bangalee, M. Z. I., Lin, S. Y. et Miao, J. J. (2012). Wind driven natural ventilation through multiple windows of a building: a computational approach. *Energy and Buildings*, 45, 317-325.
doi : 10.1016/j.enbuild.2011.11.025
- Barn, P. (2010). *Épurateurs d'air domestiques et amélioration de la qualité de l'air intérieur et de la santé : revue des données probantes*. Repéré à http://www.ccse.ca/sites/default/files/Epurateurs_air_domestiques_oct_2010.pdf
- Barn, P., Larson, T., Noullett, M., Kennedy, S., Copes, R. et Brauer, M. (2007). Infiltration of forest fire and residential wood smoke: an evaluation of air cleaner effectiveness. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 18(5), 503-511. doi : 10.1038/sj.jes.7500640
- Barnes, C. S., Alexis, N. E., Bernstein, J. A., Cohn, J. R., Demain, J. G., Horner, E., ... Phipatanakul, W. (2013). Climate change and our environment: the effect on respiratory and allergic disease. *The journal of allergy and clinical immunology in practice*, 1(2), 137-141.
doi : 10.1016/j.jaip.2012.07.002
- Bartenstein, K. et Lavallée, S. (2003). L'écolabel est-il un outil du protectionnisme « vert » ? *Les Cahiers de droit*, 44(3), 361-393. Repéré à <https://www.erudit.org/revue/cd/2003/v44/n3/043757ar.pdf>
- Batterman, S., Godwin, C. et Jia, C. (2005). Long duration tests of room air filters in cigarette smokers' homes. *Environmental Science & Technology*, 39(18), 7260-7268.
- Bélanger, D., Gosselin, P., Valois, P. et Abdous, B. (2014). Perceived adverse health effects of heat and their determinants in deprived neighbourhoods: a cross-sectional survey of nine cities in Canada. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(11), 11028-11053. doi : 10.3390/ijerph111111028
- Bell, M. L., Ebisu, K., Peng, R. D. et Dominici, F. (2009). Adverse health effects of particulate air pollution: modification by air conditioning. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 20(5), 682-686.
doi : 10.1097/EDE.0b013e3181aba749
- Berry, P. (2008). Chapitre 8 - Vulnérabilités, adaptation et capacité d'adaptation au Canada. Dans *Santé et changements climatiques : évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada*. Ottawa (Ontario) : Santé Canada. Repéré à http://ptaff.ca/bloque/wp-content/uploads/sante_et_changement_climatique-chapitre_8.pdf
- BioRegional. (s.d.). One Planet Living. Repéré à <http://www.bioregional.com/oneplanetliving/>
- Blyussen, P. M., de Richeumont, S., Crump, D., Maupetit, F., Witterseh, T. et Gajdos, P. (2010). Actions to reduce the impact of construction products on indoor air: outcomes of the European project on Healthy Air. *Indoor and Built Environment*, 19(3), 327-339.
doi : 10.1177/1420326X10370533
- BOMA Canada. (2016). *BOMA BEST Application guide*. Repéré à <http://www.bomabest.com/wp-content/uploads/BOMA-BEST-V2-Application-Guide-FULL.pdf>
- Boucher, I. et Fontaine, N. (2011). *L'aménagement et l'écomobilité, Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable*. Repéré sur le site du ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire : http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/grands_dossiers/developpement_durable/amenagement_ecomobilite.pdf

- Boucher, I., Blais, P. et Vivre en ville. (2010). *Le bâtiment durable - Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable*. Repéré sur le site du ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire : http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/amenagement_territoire/urbanisme/guide_batiment_durable.pdf
- Bräuner, E. V., Forchhammer, L., Møller, P., Barregard, L., Gunnarsen, L., Afshari, A., ... Loft, S. (2008). Indoor particles affect vascular function in the aged: an air filtration-based intervention study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 177(4), 419-425. doi : 10.1164/rccm.200704-632OC
- BREEAM. (2013). Indoor air quality. Repéré à http://www.breeam.com/BREEAMInt2013SchemeDocument/content/05_hea/hea_02.htm
- Breen, M. S., Burke, J. M., Batterman, S. A., Vette, A. F., Godwin, C., Croghan, C. W., ... Long, T. C. (2014). Modeling spatial and temporal variability of residential air exchange rates for the near-road exposures and effects of urban air pollutants study (NEXUS). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(11), 11481-11504. doi : 10.3390/ijerph111111481
- Brown V. M., Crump, D. R. et Harrison, P. T. (2013). Assessing and controlling risks from the emission of organic chemicals from construction products into indoor environments. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15(12), 2164-2177. doi : 10.1039/c3em00413a
- Brown, K. W., Minegishi, T., Allen, J. G., McCarthy, J. F., Spengler, J. D. et MacIntosh, D. L. (2014). Reducing patients' exposures to asthma and allergy triggers in their homes: an evaluation of effectiveness of grades of forced air ventilation filters. *Journal of Asthma*, 51(6), 585-594. doi : 10.3109/02770903.2014.895011
- Campbell-Lendrum, D. et Corvalán, C. (2007). Climate change and developing-country cities: implications for environmental health and equity. *Journal of Urban Health*, 84(1), 109-117. doi : 10.1007/s11524-007-9170-x
- Candiani, G., Del Curto, B. et Cigada, A. (2012). Improving indoor air quality by using the new generation of corrugated cardboard-based filters. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 2(10), 157-162. doi : 10.5301/JABFM.2012.9705
- Canuel, M. (2006, octobre). La ventilation des maisons neuves est inadéquate et peut constituer un risque pour la santé. *Protégez-vous*. Repéré à <http://www.lbr.ca/index.php?pageID=5&idA=4089> [N'est plus disponible]
- CDC. (2005). Carbon monoxide poisoning from hurricane-associated use of portable generators - Florida, 2004. *MMWR* 54, 697-700. Repéré à <http://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm5428a2.htm>
- CDC. (2006). Carbon monoxide poisonings after two major hurricanes - Alabama and Texas, August-October 2005. *MMWR* 55, 236-239. Repéré à <http://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm5509a4.htm>
- CDC. (2009). Carbon monoxide exposures after hurricane ike - Texas, September 2008. *MMWR* 58, 845-849. Repéré à <http://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm5831a1.htm>
- Charles, K., Magee, R. J., Won, D. et Luszyk, E. (2005). *Indoor air quality guidelines and standards* (n° RR-204). Repéré sur le site du CIRC : http://hite-engineering.com/wp-content/uploads/2014/01/indor_air_quality_standards_guide.pdf

- Chen, C. et Zhao, B. (2011). Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. *Atmospheric Environment*, 45(2), 275-288. doi : 10.1016/j.atmosenv.2010.09.048
- Cheng, Y. S., Lu, J. C. et Chen, T. R. (1998). Efficiency of a portable indoor air cleaner in removing pollens and fungal spores. *Aerosol Science and Technology*, 29(2), 92-101.
- CIRC et OMS. (2002). *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans - Volume 82 - Some traditional herbal medicines, some mycotoxins, naphthalene and styrene*. Repéré à <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol82/mono82.pdf>
- CIRC. (1993). *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans - Volume 56 - Some naturally occurring substances: food items and constituents, heterocyclic aromatic amines and mycotoxins*. Lyon, France : World Health Organization. Repéré à <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol56/mono56.pdf>
- CIRC. (2016). *Agents classified by the IARC Monographs, Volume 1-116*. Repéré à <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/ClassificationsAlphaOrder.pdf>
- Clausen, G. (2004). Ventilation filters and indoor air quality: a review of research from the International Centre for Indoor Environment and Energy. *Indoor Air*, 14(s7), 202-207. doi : 10.1111/j.1600-0668.2004.00289.x
- Code national du bâtiment. (2010). Code national du bâtiment – Canada 2010. Repéré à http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/publications/centre_codes/2010_code_national_batiment.html
- Conseil du bâtiment durable du Canada. (2016). LBC - Living building challenge. Repéré à <http://batimentdurable.ca/construction-developpement-durable/living-building-challenge-2>
- Corporation d'hébergement du Québec. (2005). *La qualité de l'air intérieur dans les établissements du réseau de la santé et des services sociaux : Guide*. Gouvernement du Québec.
- CSST et AQHSST. (2000). *La qualité de l'air dans les services de garde préscolaires : Guide d'intervention* (n° DC 200-16062). Repéré à http://www.cnesst.gouv.qc.ca/Publications/200/Documents/dc_200_16062.pdf
- Curson, P. (1993). Climate and chronic respiratory disease in Sydney - The case of asthma. *Climatic Change*, 25(3-4), 405-420. doi : 10.1007/BF01098384
- D'Amato, G., Liccardi, G. et Frenguelli, G. (2007). Thunderstorm-asthma and pollen allergy. *Allergy*, 62(1), 11-16. doi : 10.1111/j.1398-9995.2006.01271.x
- Dales, R., Liu, L., Wheeler, A. J. et Gilbert, N. L. (2008). Quality of indoor residential air and health. *CMAJ: Canadian Medical Association Journal = Journal de l'Association Médicale Canadienne*, 179(2), 147-152. doi : 10.1503/cmaj.070359
- Das, P., Chalabi, Z., Jones, B., Milner, J., Shrubsole, C., Davies, M., ... Wilkinson, P. (2013). Multi-objective methods for determining optimal ventilation rates in dwellings. *Building and Environment*, 66, 72-81. doi : 10.1016/j.buildenv.2013.03.021
- Dassonville, C., Demattei, C., Laurent, A.-M., Le Moullec, Y., Seta, N. et Momas, I. (2009). Assessment and predictor determination of indoor aldehyde levels in Paris newborn babies' homes. *Indoor Air*, 19(4), 314-323. doi : 10.1111/j.1600-0668.2009.00594.x

- Davis, L. W. et Gertler, P. J. (2015). Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19), 5962-5967. doi : 10.1073/pnas.1423558112
- De Wilde, P. et Coley, D. (2012). The implications of a changing climate for buildings. *Building and Environment*, 55, 1-7. doi : 10.1016/j.buildenv.2012.03.014
- Dimitroulopoulou, C. et Bartzis, J. (2014). Ventilation rates in european office buildings: A review. *Indoor and Built Environment*, 23(1), 5-25. doi : 10.1177/1420326X13481786
- Dingle, P. et Franklin, P. (2002). Formaldehyde levels and the factors affecting these levels in homes in Perth, Western Australia. *Indoor and Built Environment*, 11(2), 111-116. doi : 10.1177/1420326X0201100206
- Écohabitation. (2015). Certification LEED - Guide technique. *Écohabitation*. Repéré à <http://www.ecohabitation.com/leed/guide-technique>
- Ecolabel Index. (2016). Ecolabel Index. Repéré à <http://www.ecolabelindex.com>
- Emenius, G., Egmar, A. et Wickman, M. (1998). Mechanical ventilation protects one-storey single-dwelling houses against increased air humidity, domestic mite allergens and indoor pollutants in a cold climatic region. *Clinical & Experimental Allergy*, 28(11), 1389-1396. doi : 10.1046/j.1365-2222.1998.00408.x
- Farbotko, C. et Waitt, G. (2011). Residential air-conditioning and climate change: Voices of the vulnerable. *Health Promotion Journal of Australia: Official Journal of Australian Association of Health Promotion Professionals*, 22(Special Issue), S13.
- Fernández-Caldas, E., Trudeau, W. L. et Ledford, D. K. (1994). Environmental control of indoor biologic agents. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 94(2), 404-412. doi : 10.1016/0091-6749(94)90106-6
- Field, R. W. (2010). *Climate change and indoor air quality*. Repéré sur le site de l'US EPA : https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/field_climate_change_iag.pdf
- Fisk, W. J. (2013). Health benefits of particle filtration. *Indoor Air*, 23(5), 357-368. doi : 10.1111/ina.12036
- Fisk, W. J. (2015). Review of some effects of climate change on indoor environmental quality and health and associated no-regrets mitigation measures. *Building and Environment*, 86, 70-80. doi : 10.1016/j.buildenv.2014.12.024
- Fisk, W. J. et Rosenfeld, A. H. (1997). Estimates of improved productivity and health from better indoor environments. *Indoor Air*, 7(3), 158-172. doi : 10.1111/j.1600-0668.1997.t01-1-00002.x
- Fisk, W. J., Faulkner, D., Palonen, J. et Seppanen, O. (2002). Performance and costs of particle air filtration technologies. *Indoor Air*, 12(4), 223-234. doi : 10.1034/j.1600-0668.2002.01136.x
- Fisman, D. N., Lim, S., Wellenius, G. A., Johnson, C., Britz, P., Gaskins, M., ... Newbern, C. (2005). It's not the heat, it's the humidity: wet weather increases legionellosis risk in the greater philadelphia metropolitan area. *Journal of Infectious Diseases*, 192(12), 2066-2073. doi : 10.1086/498248

- Franck, U., Krüger, M., Schwarz, N., Grossmann, K., Röder, S. et Schlink, U. (2013). Heat stress in urban areas: Indoor and outdoor temperatures in different urban structure types and subjectively reported well-being during a heat wave in the city of Leipzig. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(2), 167-177. doi : 10.1127/0941-2948/2013/0384
- Frank, T. (2005). Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland. *Energy and Buildings*, 37(11), 1175-1185. doi : 10.1016/j.enbuild.2005.06.019
- Frumkin, H., Hess, J., Luber, G., Malilay, J. et McGeehin, M. (2008). Climate change: the public health response. *American Journal of Public Health*, 98(3), 435-445. doi : 10.2105/AJPH.2007.119362
- Gagné, A. et Garon, J. (2012a). Comment construire des habitations moins susceptibles de développer des moisissures. *Maison saine*(Février-Mars), 18-21.
- Gagné, A. et Garon, J. (2012b). D'hier à aujourd'hui - L'évolution du problème des moisissures dans l'habitation. *Maison saine*(Février-Mars), 14-16.
- Global Ecolabelling Network. (2004). *Introduction to ecolabelling*. Repéré à <http://www.globalecolabelling.net/assets/Uploads/intro-to-ecolabelling.pdf>
- Gouvernement du Canada. (2012). Chaleur accablante - vagues de chaleur. Repéré à <http://canadiensensante.gc.ca/healthy-living-vie-saine/environnement-environnement/sun-soleil/heat-extreme-chaleur-fra.php>
- Gouvernement du Canada. (2015). Lignes directrices sur la qualité de l'air intérieur résidentiel. Repéré à <http://canadiensensante.gc.ca/healthy-living-vie-saine/environnement-environnement/air/guidelines-lignes-directrices-fra.php>
- Gouvernement du Québec. (2011). *Guide de qualité de l'air intérieur dans les établissements du réseau de la santé et des services sociaux* (Publication n° 978-2-550-63668-7). Repéré à <http://publications.msss.gouv.qc.ca/msss/fichiers/2011/11-610-05W.pdf>
- Gouvernement du Québec. (2012). Règlement modifiant le Règlement sur la délivrance des certificats de compétence - Décret 858-2012, 1^{er} août 2012. *Gazette officielle du Québec*, (33), 4183. Repéré à <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=1&file=58152.PDF>
- Green, R., Simpson, A., Custovic, A., Faragher, B., Chapman, M. et Woodcock, A. (1999). The effect of air filtration on airborne dog allergen. *Allergy*, 54(5), 484-488.
- Greene, R. E., Casey, J. M. et Williams, P. (1997). A proactive approach for managing indoor air quality. *Journal of Environmental Health*, 60(4), 15-21.
- Gulati, R. K., Kwan-Gett, T., Hampson, N. B., Baer, A., Shusterman, D., Shandro, J. R. et Duchin, J. S. (2009). Carbon monoxide epidemic among immigrant populations: King County, Washington, 2006. *American Journal of Public Health*, 99(9), 1687-1692. doi : 10.2105/AJPH.2008.143222
- Hamidin, N., Yu, J., Phung, D. T., Connell, D. et Chu, C. (2013). Volatile aromatic hydrocarbons (VAHs) in residential indoor air in Brisbane, Australia. *Chemosphere*, 92(11), 1430-1435. doi : 10.1016/j.chemosphere.2013.03.050
- Hamlet, A. F., Lee, S.-Y., Mickelson, K. E. B. et Elsner, M. M. (2010). Effects of projected climate change on energy supply and demand in the Pacific Northwest and Washington State. *Climatic Change*, 102(1-2), 103-128. doi : 10.1007/s10584-010-9857-y

- Hampson, N. B. et Dunn, S. L. (2015). Carbon monoxide poisoning from portable electrical generators. *The Journal of Emergency Medicine*, 49(2), 125-129.
doi : 10.1016/j.jemermed.2014.12.091
- Hampson, N. B. et Stock, A. L. (2006). Storm-related carbon monoxide poisoning: lessons learned from recent epidemics. *Undersea and Hyperbaric Medical Society, Inc*, 33(4), 257-263.
- Haysom, J. C. et Reardon, J. T. (1998). *Pourquoi les maisons ont besoin de ventilation mécanique. Solution constructive*, (14). Repéré sur le site du CNRC : http://www.nrc-cnrc.gc.ca/ctu-sc/files/doc/ctu-sc/ctu-n14_fra.pdf
- Henderson, D. E., Milford, J. B. et Miller, S. L. (2005). Prescribed burns and wildfires in colorado: impacts of mitigation measures on indoor air particulate matter. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55(10), 1516-1526. doi : 10.1080/10473289.2005.10464746
- Heseltine, E., Rosen, J. et World Health Organization (dir.). (2009). *WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould*. Repéré sur le site de l'OMS : <http://www.who.int/indoorair/publications/7989289041683/en>
- Hodgson, A. T., Destailats, H., Sullivan, D. P. et Fisk, W. J. (2007). Performance of ultraviolet photocatalytic oxidation for indoor air cleaning applications. *Indoor Air*, 17(4), 305-316.
doi : 10.1111/j.1600-0668.2007.00479.x
- Hospodsky, D., Qian, J., Nazaroff, W. W., Yamamoto, N., Bibby, K., Rismani-Yazdi, H. et Peccia, J. (2012). Human occupancy as a source of indoor airborne bacteria. *PLoS ONE*, 7(4), e34867.
doi : 10.1371/journal.pone.0034867
- ICC Evaluation Service. (2015). Environmental product declarations. Repéré à <http://www.icc-es.org/ep/epd-index.shtml>
- iisBE. (2009). SB Method and SBTool. Repéré à <http://www.iisbe.org/sbmethod>
- Ilacqua, V., Dawson, J., Breen, M., Singer, S. et Berg, A. (2015). Effects of climate change on residential infiltration and air pollution exposure. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 1-8. doi : 10.1038/jes.2015.38
- Institut national de santé du Québec (INSPQ). Les avertisseurs de monoxyde de carbone comme mesure de protection au Québec : État de situation et perspectives d'intervention. Auteurs : Claire Laliberté, Suzanne Gingras, Marion Schebelen. Montréal : INSPQ, 2010b. 79 p.
- Institut national de santé du Québec (INSPQ). Potentiel piétonnier et utilisation des modes de transport actif pour aller au travail au Québec - État des lieux et perspectives d'interventions. Auteur : Éric Robitaille. Montréal : INSPQ, 2014. 109 p.
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). (2010a). Smog et particules - Les changements climatiques et les niveaux de smog dans l'air ambiant. Repéré à <http://www.monclimatmasante.qc.ca/smog-et-particules.aspx>
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). État des connaissances sur le pollen et les allergies: Les assises pour une gestion efficace. Auteure : Isabelle Demers. Montréal : INSPQ, 2013a. 111 p.

- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). État des connaissances sur la toxicité et l'exposition humaine aux phtalates. Auteurs : Marc Rhainds et Louis Saint-Laurent. Montréal : INSPQ, 2004. (Bulletin d'information en santé environnementale ; 5 avril 2004). Repéré à <https://www.inspq.qc.ca/bise/etat-des-connaissances-sur-la-toxicite-et-l-exposition-humaine-aux-phtalates>
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). Étude des impacts de la ventilation sur la qualité de l'air intérieur et la santé respiratoire des enfants asthmatiques dans les habitations (Projet IVAIRE). Auteurs : Pierre Lajoie, Daniel Aubin, Véronique Gingras *et al.* Montréal : INSPQ, 2015. 133 p.
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). La ventilation des bâtiments d'habitation: impacts sur la santé respiratoire des occupants. Auteurs : Pierre Lajoie, Jean-Marc Leclerc, Marion Schnebelen. Montréal : INSPQ, 2006. 222 p.
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). Le radon au Québec: évaluation du risque à la santé et analyse critique des stratégies d'intervention. Auteurs : Jean-Claude Dessau, Fabien Gagnon, Benoît Lévesque *et al.* Montréal : INSPQ, 2004. 191 p.
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). Les impacts sanitaires des particules liées aux feux de forêt. Auteurs : Tarik Benmarhnia, Fatma Mathlouthi, Audrey Smargiassi. Montréal : INSPQ, 2013b. 20 p.
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. Auteure : Méliissa Giguère. Montréal : INSPQ, 2009. 95 p.
- International Living Future Institute. (2014a). *Living Building Challenge 3.0 - A visionary path to a regenerative future*. Repéré à http://living-future.org/sites/default/files/reports/FINAL%20LBC%203_0_WebOptimized_low.pdf
- International Living Future Institute. (2014b). Living Community Challenge. Repéré à <http://living-future.org/lcc>
- IOM (dir.). (2011). *Climate change, the indoor environment, and health*. Washington, D.C : National Academies Press.
- IPCC. (2014). Summary for policymakers. Dans *Climate change 2014: Mitigation of climate change. contribution of Working Group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge University Press). Repéré à http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers.pdf
- Iqbal, S., Clower, J. H., Hernandez, S. A., Damon, S. A. et Yip, F. Y. (2012). A review of disaster-related carbon monoxide poisoning: Surveillance, epidemiology, and opportunities for prevention. *American Journal of Public Health*, 102(10), 1957-1963.
doi : 10.2105/AJPH.2012.300674
- Isaac, M. et van Vuuren, D. P. (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy*, 37(2), 507-521.
doi : 10.1016/j.enpol.2008.09.051
- Jenkins, D. P., Peacock, A. D. et Banfill, P. F. G. (2009). Will future low-carbon schools in the UK have an overheating problem? *Building and Environment*, 44(3), 490-501.
doi : 10.1016/j.buildenv.2008.04.012

- Jia, C., Batterman, S. et Godwin, C. (2008). VOCs in industrial, urban and suburban neighborhoods— Part 2: Factors affecting indoor and outdoor concentrations. *Atmospheric Environment*, 42(9), 2101-2116. doi : 10.1016/j.atmosenv.2007.11.047
- Joffe, M. A. (1996). Chemical filtration of indoor air: An application primer. *ASHRAE Journal*, 38(2). Repéré à <http://www.osti.gov/scitech/biblio/509311>
- Johnson-Arbor, K. K., Quental, A. S. et Li, D. (2014). A comparison of carbon monoxide exposures after snowstorms and power outages. *American Journal of Preventive Medicine*, 46(5), 481-486. doi : 10.1016/j.amepre.2014.01.006
- Joint Research Centre. (2005). *Harmonisation of indoor material emissions labelling systems in the EU* (n° 24). European Commission. Repéré à http://www.inive.org/medias/ECA/ECA_Report24.pdf
- Joint Research Centre. (2013). *Harmonisation framework for health based evaluation of indoor emissions from construction products in the European Union using the EU-LCI concept* (n° 29). Repéré à http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC83683/eca%20report%2029_final.pdf
- Kagawa, J. (1993). Indoor air quality standards and regulations in Japan. *Indoor and Built Environment*, 2(4), 223-231. doi : 10.1177/1420326X9300200407
- Kanchongkittiphon, W., Mendell, M. J., Gaffin, J. M., Wang, G. et Phipatanakul, W. (2015). Indoor environmental exposures and exacerbation of asthma: An update to the 2000 review by the Institute of Medicine. *Environmental Health Perspectives*, 123(1), 6-20. doi : 10.1289/ehp.1307922
- Kim, M.-H. et Hwang, J.-H. (2009). Performance prediction of a hybrid ventilation system in an apartment house. *Energy and Buildings*, 41(6), 579-586. doi : 10.1016/j.enbuild.2008.12.003
- Kim, S., Kim, J.-A., An, J.-Y., Kim, H.-J., Kim, S. D. et Park, J. C. (2007). TVOC and formaldehyde emission behaviors from flooring materials bonded with environmental-friendly MF/PVAc hybrid resins. *Indoor Air*, 17(5), 404-415. doi : 10.1111/j.1600-0668.2007.00488.x
- Kjellstrom, T. et McMichael, A. J. (2013). Climate change threats to population health and well-being: the imperative of protective solutions that will last. *Global Health Action*, 6(0), 1-9. doi : 10.3402/gha.v6i0.20816
- Kolarik, Gunnarsen, Logadottir et Funch. (2011). Concentrations of formaldehyde in new Danish residential buildings in relation to WHO recommendations and CEN requirements. *Indoor and Built Environment*, 21, 552-561.
- L'Europe est à vous. (2015). Marquage CE. Repéré à http://europa.eu/youreurope/business/product/ce-mark/index_fr.htm
- Larsson, N. (2015). *SBTool for 2015*. Repéré sur le site de l'iisBE : <http://www.iisbe.org/system/files/SBTool%20Complete%2004May15.pdf>
- Laumbach, R., Meng, Q. et Kipen, H. (2015). What can individuals do to reduce personal health risks from air pollution? *Journal of Thoracic Disease*, 7(1), 96-107. doi : 10.3978/j.issn.2072-1439.2014.12.21

- Laverge, J., Van Den Bossche, N., Heijmans, N. et Janssens, A. (2011). Energy saving potential and repercussions on indoor air quality of demand controlled residential ventilation strategies. *Building and Environment*, 46(7), 1497-1503. doi : 10.1016/j.buildenv.2011.01.023
- LEED Canada. (2009). *LEED Canada - Système d'évaluation des bâtiments durables*. Repéré à http://www.ecohabitation.com/sites/www.ecohabitation.com/files/page/leed_canada_for_homes_2009_rsaddendum_fr_1.pdf
- Légifrance. (2015). Décret n° 2015-1000 du 17 août 2015 relatif aux modalités de surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public (Publication n°0190). Repéré à <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2015/8/17/2015-1000/jo/texte>
- Levin, H. (2010). *National programs to assess IEQ effects of building materials and products*. Building Ecology Research Group. Repéré à http://nsf.kavi.com/apps/group_public/download.php/10086/National%20Programs%20to%20Assess%20IEQ%20Effects%20of%20Building%20Materials%20and%20Products%20-%20Hal%20Levin%202009-2010.pdf
- Lim, S., Lee, K., Seo, S. et Jang, S. (2011). Impact of regulation on indoor volatile organic compounds in new unoccupied apartment in Korea. *Atmospheric Environment*, 45, 1994-2000. doi : 10.1016/j.atmosenv.2011.01.020
- Lin, L.-Y., Chuang, H.-C., Liu, I.-J., Chen, H.-W. et Chuang, K.-J. (2013). Reducing indoor air pollution by air conditioning is associated with improvements in cardiovascular health among the general population. *The Science of the Total Environment*, 463-464, 176-181. doi : 10.1016/j.scitotenv.2013.05.093
- Liu, C., Hsu, P.-C., Lee, H.-W., Ye, M., Zheng, G., Liu, N., ... Cui, Y. (2015). Transparent air filter for high-efficiency PM_{2.5} capture. *Nature Communications*, 6, 6205. doi : 10.1038/ncomms7205
- Liu, H., Lee, S., Kim, M., Shi, H., Kim, J. T. et Yoo, C. (2014). Finding the optimal set points of a thermal and ventilation control system under changing outdoor weather conditions. *Indoor and Built Environment*, 23(1), 118-132. doi : 10.1177/1420326X14522669
- Liu, J., Ma, F. et Li, Y. (2011). The effect of anthropogenic heat on local heat island intensity and the performance of air conditioning systems. *Advanced Materials Research*, 250-253, 2975-2978. doi : 10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.2975
- Liu, W., Zhang, Y., Yao, Y. et Li, J. (2012). Indoor decorating and refurbishing materials and furniture volatile organic compounds emission labeling systems: A review. *Chinese Science Bulletin*, 57(20), 2533-2543. doi : 10.1007/s11434-012-5208-x
- Loftness, V., Hakkinen, B., Adan, O. et Nevalainen, A. (2007). Elements that contribute to healthy building design. *Environmental Health Perspectives*, 115(6), 965-970. doi : 10.1289/ehp.8988
- Lowen, A. C., Mubareka, S., Steel, J. et Palese, P. (2007). Influenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature. *PLoS Pathogens*, 3(10). doi : 10.1371/journal.ppat.0030151
- Lundgren, K. et Kjellstrom, T. (2013). Sustainability challenges from climate change and air conditioning use in urban areas. *Sustainability*, 5(7), 3116-3128. doi : 10.3390/su5073116
- Lv, J. et Zhu, L. (2013). Effect of central ventilation and air conditioner system on the concentration and health risk from airborne polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Environmental Sciences*, 25(3), 531-536. doi : 10.1016/S1001-0742(12)60079-5

- MacIntosh, D. L., Myatt, T. A., Ludwig, J. F., Baker, B. J., Suh, H. H. et Spengler, J. D. (2008). Whole house particle removal and clean air delivery rates for in-duct and portable ventilation systems. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(11), 1474-1482. doi : 10.3155/1047-3289.58.11.1474
- MacNeill, M., Kearney, J., Wallace, L., Gibson, M., Héroux, M. E., Kuchta, J., ... Wheeler, A. J. (2014). Quantifying the contribution of ambient and indoor-generated fine particles to indoor air in residential environments. *Indoor Air*, 24(4), 362-375. doi : 10.1111/ina.12084
- Maller, C. J. et Strengers, Y. (2011). Housing, heat stress and health in a changing climate: promoting the adaptive capacity of vulnerable households, a suggested way forward. *Health Promotion International*, 26(4), 492-498. doi : 10.1093/heapro/dar003
- Marc, M., Namiesnik, J. et Zabiegała, B. (2014). Small-scale passive emission chamber for screening studies on monoterpene emission flux from the surface of wood-based indoor elements. *Science of The Total Environment*, 481, 35-46. doi : 10.1016/j.scitotenv.2014.02.021
- Mavrogianni, A. et Mumovic, D. (2010). On the use of windcatchers in schools: Climate change, occupancy patterns, and adaptation strategies. *Indoor and Built Environment*, 19(3), 340-354. doi : 10.1177/1420326X09341507
- McKone, T. E. et Sherman, M. H. (2003). *Residential ventilation standards scoping study* (n° LBNL-53800). Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California.
- MDDELCC. (2002). Indice de la qualité de l'air (IQA). Repéré à <http://www.iqa.mddelcc.gouv.qc.ca/contenu/index.asp>
- MDDELCC. (2007). *Info-Smog - L'origine du smog*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/air/info-smog/fiche-form.pdf>
- MDDELCC. (2014). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2011 et leur évolution depuis 1990* (Publication n° 978-2-550-70740-0). Repéré à http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/ges/2011/Inventaire_1990-2011.pdf
- MDDELCC. (2015). Le programme de surveillance de la qualité de l'air. Repéré à http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/air/programme_surveillance/index.asp#objectifs
- Meadow, J. F., Altrichter, A. E., Kembel, S. W., Kline, J., Mhuireach, G., Moriyama, M., ... Bohannon, B. J. M. (2014). Indoor airborne bacterial communities are influenced by ventilation, occupancy, and outdoor air source. *Indoor Air*, 24(1), 41-48. doi : 10.1111/ina.12047
- Meier, R., Eeftens, M., Phuleria, H. C., Ineichen, A., Corradi, E., Davey, M., ... Künzli, N. (2015). Differences in indoor versus outdoor concentrations of ultrafine particles, PM_{2.5}, PM_{absorbance} and NO₂ in Swiss homes. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 25(5), 499-505. doi : 10.1038/jes.2015.3
- MELS. (2014). *La qualité de l'air dans les établissements scolaires - Document de référence*. Repéré à http://www.education.gouv.qc.ca/fileadmin/site_web/documents/reseau/financement/qualite_air_reference_s.pdf
- Mendell, M. J., Mirer, A. G., Cheung, K., Tong, M. et Douwes, J. (2011). Respiratory and allergic health effects of dampness, mold, and dampness-related agents: A review of the epidemiologic evidence. *Environmental Health Perspectives*, 119(6), 748-756. doi : 10.1289/ehp.1002410

- MERN. (2015). *Politique énergétique 2016-2025 : Efficacité et innovation énergétiques*. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique/documents/fascicule-3-BEIE.pdf>
- MERN. (2016). *Maisons Novoclimat 2.0*. Repéré à <http://www.efficaciteenergetique.gouv.qc.ca/mon-habitation/novoclimat/maisons/#.Vp6dAVL3Gfw>
- Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. (2012). *Étiquetage des émissions en polluants volatils des produits de construction et de décoration*. Repéré à <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Chapitre-I-Mode-d-emploi-de-l.html>
- Moniteur Belge. (2014). *Arrêté royal établissant les niveaux seuils pour les émissions dans l'environnement intérieur de produits de construction pour certains usages prévus*, n° C 2014/24239 (2014). Repéré à http://www.etaamb.be/fr/arrete-royal-du-08-mai-2014_n2014024239.html
- Morey, P. R. (2010). *Climate change and potential effects on microbial air quality in the built environment*. Washington : US EPA. Repéré à <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=CA4A674B773FC06A1159345AD217EB1C?doi=10.1.1.180.5082&rep=rep1&type=pdf>
- Morin, L. A., Faucher, C., Gravan, V. et Tremblay, A. (2008). *Les écoétiquettes - Un nouvel outil pour des acquisitions écoresponsables*. Repéré à <http://www.portail.approvisionnement-quebec.gouv.qc.ca/fileadmin/Documentation/ecoetiquette.pdf>
- Moriske, H.-J., Ebert, G., Konieczny, L., Menk, G. et Schöndube, M. (1998). Concentrations and decay rates of ozone in indoor air in dependence on building and surface materials. *Toxicology Letters*, 96–97, 319–323. doi : 10.1016/S0378-4274(98)00088-5
- Morrison, G. C., Nazaroff, W. W., Cano-Ruiz, J. A., Hodgson, A. T. et Modera, M. P. (1998). Indoor air quality impacts of ventilation ducts: Ozone removal and emissions of volatile organic compounds. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 48(10), 941–952. doi : 10.1080/10473289.1998.10463740
- MSSS. (2015a). *Intoxication au monoxyde de carbone*. Repéré à <http://sante.gouv.qc.ca/problemes-de-sante/intoxication-au-monoxyde-de-carbone>
- MSSS. (2015b). *Radon domiciliaire*. Repéré à <http://sante.gouv.qc.ca/conseils-et-prevention/radon-domiciliaire>
- Mudarri, D. (2010). *Public health consequences and cost of climate change impacts on indoor environments*. Repéré à http://149.171.158.96/sites/default/files/upload/pdf/cf/hbep/publications/attachments/Mudarri2010PH_consequences_and_cost_of_climate_change_on_indoor_env.pdf
- Muscatiello, N. A., Babcock, G., Jones, R., Horn, E. et Hwang, S.-A. (2010). Hospital emergency department visits for carbon monoxide poisoning following an October 2006 snowstorm in western New York. *Journal of Environmental Health*, 72(6), 43–48.
- Myatt, T. A., Minegishi, T., Allen, J. G., MacIntosh, D. L. et others. (2008). Control of asthma triggers in indoor air with air cleaners: a modeling analysis. *Environ Health*, 7(43), b54.
- Naumova, E. N. (2006). Mystery of seasonality: Getting the rhythm of nature. *Journal of public health policy*, 27(1), 2–12. doi : 10.1057/palgrave.jphp.3200061

- Nazaroff, W. W. (2008). Climate change, building energy use, and indoor environmental quality. *Indoor Air*, 18(4), 259-260. doi : 10.1111/j.1600-0668.2008.00556.x
- Nazaroff, W. W. (2013). Exploring the consequences of climate change for indoor air quality. *Environmental Research Letters*, 8(1). doi : 10.1088/1748-9326/8/1/015022
- Neil, K. et Berkelman, R. (2008). Increasing incidence of legionellosis in the United States, 1990–2005: Changing epidemiologic trends. *Clinical Infectious Diseases*, 47(5), 591-599. doi : 10.1086/590557
- Nelson, H. S., Hirsch, S. R., Ohman, J. L., Platts-Mills, T. A. E., Reed, C. E. et Solomon, W. R. (1988). Recommendations for the use of residential air-cleaning devices in the treatment of allergic respiratory diseases - Forty-fifth annual meeting. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 82(4), 661-669. doi : 10.1016/0091-6749(88)90980-3
- Noh, K.-C. et Hwang, J. (2010). The effect of ventilation rate and filter performance on indoor particle concentration and fan power consumption in a residential housing unit. *Indoor and Built Environment*, 444-452. doi : 10.1177/1420326X10373213
- Novoclimat 2.0. (2014). *Exigences techniques - Volets « Maison » et « Petit bâtiment multilogement »*. Repéré à http://www.efficaciteenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/novo2/exigences_novoclimat2_maison-PBM.pdf
- O'Connor, M. et Kosatsky, T. (2008). *Systematic review: How efficacious and how practical are personal health protection measures recommended to reduce morbidity and mortality during heat episodes?* Repéré à http://www.nccch.ca/sites/default/files/Heat_Protection_Advice_Feb_2008.pdf
- OMS Europe. (2010). *Environment and health risks: a review of the influence and effects of social inequalities*. Repéré à http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0003/78069/E93670.pdf
- OMS. (2010). WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. Repéré à <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2010/who-guidelines-for-indoor-air-quality-selected-pollutants>
- OQAI. (2012a). L'épuration par photocatalyse - Opportunité ou menace pour la qualité de l'air intérieur. *Bulletin de l'OQAI*, (4), 12 p.
- OQAI. (2012b). L'OQAI a 10 ans. *Bulletin de l'OQAI*, (3), 16 p.
- OQAI. (s.d.). Pollution intérieure – Fiches polluants – Composés organiques volatils. Repéré à <http://www.oqai.fr/ObsAirInt.aspx?idarchitecture=182>
- Orosa, J. A. et Oliveira, A. C. (2010). Impact of climate change on cooling energy consumption. *Journal of the Energy Institute*, 83(3), 171-177. doi : 10.1179/014426010X12759937396876
- Ouranos. (2010). *Élaborer un plan d'action aux changements climatiques. Guide destiné au milieu municipal québécois*. Repéré à http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/amenagement_territoire/documentation/plan_adaptation_changement_climatique.pdf
- Ouranos. (2015a). *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec, Édition 2015 : Partie 1: Évolution climatique du Québec*. Repéré à <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/SynthesePartie1.pdf>

- Ouranos. (2015b). *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec, Édition 2015 : Partie 2: Vulnérabilités, impacts et adaptation aux changements climatiques*. Repéré à <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/SynthesePartie2.pdf>
- Ouranos. (s.d.). Qu'est ce que la mitigation/atténuation? Repéré à <http://adaptation.ouranos.ca/fr/concepts-de-base/qu-est-ce-que-attenuation-mitigation> [N'est plus disponible]
- Panzhauser, E., Mahdavi, A. et Fail, A. (1993). Simulation and evaluation of natural ventilation in residential buildings. Dans N. Nagda (dir.), *Modeling of indoor air quality and exposure* (p. 182-196). Philadelphie : ASTM International. Repéré à <http://www.astm.org/doiLink.cgi?STP13108S>
- Pica, N. et Bouvier, N. M. (2012). Environmental factors affecting the transmission of respiratory viruses. *Current Opinion in Virology*, 2(1), 90-95. doi : 10.1016/j.coviro.2011.12.003
- Pinkerton, K. E., Rom, W. N., Carlsten, C., Jaakkola, J. J. K., Bayram, H., Sigsgaard, T., ... Costa, D. L. (2013). Climate change and global public health. *Embase Turk Toraks Dergisi*, 14(4), 115-122.
- Potera, C. (2011). Climate change impacts indoor environment. *Environmental Health Perspectives*, 119(9), a382. doi : 10.1289/ehp.119-a382
- Qian, J., Ferro, A. R. et Fowler, K. R. (2008). Estimating the resuspension rate and residence time of indoor particles. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(4), 502-516. doi : 10.3155/1047-3289.58.4.502
- RBQ. (2016). Code de construction et Code de sécurité. Repéré à <https://www.rbq.gouv.qc.ca/lois-reglements-et-codes/code-de-construction-et-code-de-securite.html>
- Reid, C., O'Neill, M., Gronlund, C., Brines, S., Brown, D., Diez-Roux, A. et Schwartz, J. (2009). Mapping community determinants of heat vulnerability. *Environmental Health Perspectives*, 117(11), 1730-36. doi : 10.1289/ehp.0900683
- Ressources naturelles Canada. (2015a). À propos de la Norme R-2000. Repéré à <http://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/habitations/nouvelles-maisons/5088>
- Ressources naturelles Canada. (2015b). Maisons R-2000. Repéré à <http://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/habitations/nouvelles-maisons/5086>
- Ressources naturelles Canada. (2016). ENERGY STAR au Canada. Repéré à <http://www.rncan.gc.ca/energie/produits/energystar/12520>
- Roy, L.-A. (1998). *Le verglas de 1998 dans le Nord-Est de l'Amérique*. *Bulletin d'information en santé environnementale*, 9(6). Repéré à [http://www.bibliotheque.assnat.qc.ca/01/PER/947119/1998/Vol_9_no_6_\(nov-dec_1998\).pdf](http://www.bibliotheque.assnat.qc.ca/01/PER/947119/1998/Vol_9_no_6_(nov-dec_1998).pdf)
- Salthammer, T., Mentese, S. et Marutzky, R. (2010). Formaldehyde in the indoor environment. *Chemical Reviews*, 110(4), 2536-2572. doi : 10.1021/cr800399g
- Santamouris, M., Sfakianaki, A. et Pavlou, K. (2010). On the efficiency of night ventilation techniques applied to residential buildings. *Energy and Buildings*, 42(8), 1309-1313. doi : 10.1016/j.enbuild.2010.02.024
- Santé Canada. (2006). Lignes directrices sur la qualité de l'air intérieur résidentiel : formaldéhyde. Repéré à http://epe.lac-bac.gc.ca/100/200/301/hcan-scan/residential_indoor-f/index.html

- Santé Canada. (2007). Améliorer la qualité de l'air intérieur. Repéré à <http://canadiensensante.gc.ca/healthy-living-vie-saine/environnement-environnement/air/improve-ameliorer-fra.php#am>
- Santé Canada. (2010). Interdiction de la mousse isolante d'urée-formaldéhyde au Canada. Repéré à <http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/advisories-avis/info-ind/formaldehyde-fra.php>
- Santé Canada. (2012a). Le formaldéhyde dans l'air intérieur. Repéré à <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/formaldehyde/fact-info-fra.php>
- Santé Canada. (2012b). Polluants provenant des meubles et des matériaux de construction. Repéré à <http://canadiensensante.gc.ca/healthy-living-vie-saine/environnement-environnement/home-maison/polluants-fra.php>
- Santé Canada. (2013). Polluants. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/air/default.asp?lang=Fr&n=BCC0B44A-1>
- Santé Canada. (2015). La qualité de l'air. Repéré à <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/air/in/index-fra.php>
- Scheepers, P. T. J., Cremers, R., Hout, S. P. R. van et Anzion, R. B. M. (2012). Influence of a portable air treatment unit on health-related quality indicators of indoor air in a classroom. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(2), 429-439. doi : 10.1039/C1EM10559K
- Schell, M. et Inthout, D. (2001, février). Demand control ventilation using CO₂. *ASHRAE Journal*. Repéré à <http://www.airtest.com/support/manual/reference/article2.pdf>
- Schenck, P., Ahmed, A. K., Bracker, A. et DeBernardo, R. (2010). *Climate change, indoor air quality and health*. Repéré à https://swap.stanford.edu/20131016063238/http://www.epa.gov/iaq/pdfs/uconn_climate_health.pdf
- SCHL. (2009a). Efficacité des déshumidificateurs à contrôler l'humidité dans les maisons (n° 66556). Société canadienne d'hypothèques et de logement. Repéré à <https://www03.cmhc-schl.gc.ca/catalog/productDetail.cfm?cat=151&itm=14&lang=fr&sid=UGrK6ruPhs4MGoQG5S7ZuhvnkHRKKBoDA7JmPRyGxZVhtkfdxLgJJRjkqVMzMTt9&fr=1452111964948>
- SCHL. (2009b). *Mesurer l'humidité dans votre maison*. Repéré à http://publications.gc.ca/collections/collection_2011/schl-cmhc/nh18-24/NH18-24-1-2009-fra.pdf
- Seppänen, O. A. et Fisk, W. J. (2004). Summary of human responses to ventilation. *Indoor Air*, 14, 102-118. doi : 10.1111/j.1600-0668.2004.00279.x
- Sharpe, T., Farren, P., Howieson, S., Tuohy, P. et McQuillan, J. (2015). Occupant interactions and effectiveness of natural ventilation strategies in contemporary new housing in Scotland, UK. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(7), 8480-8497. doi : 10.3390/ijerph120708480
- Sherman, M. H. et Matson, N. E. (2003). *Reducing indoor residential exposures to outdoor pollutants* (Publication n° LBNL-51758). Lawrence Berkeley National Laboratory. Repéré à <http://escholarship.org/uc/item/5mf9b4dm>
- Siegel, J. A. (2016). Primary and secondary consequences of indoor air cleaners. *Indoor Air*, 26(1), 88-96. doi : 10.1111/ina.12194

- Silva, Vasconcelos, Santos et Fernandes. (2003). Comparison of the substrate effect on VOC emissions from water based varnish and latex paint. *Environmental Science & Pollution Research*, 10(4), 209-216.
- Sippola, M. R. et Nazaroff, W. W. (2003). Modeling particle loss in ventilation ducts. *Atmospheric Environment*, 37(39-40), 5597-5609. doi : 10.1016/j.atmosenv.2003.07.016
- Spengler, J. D. (2012). Climate change, indoor environments, and health: Editorial. *Indoor Air*, 22(2), 89-95. doi : 10.1111/j.1600-0668.2012.00768.x
- Srebric, J. (2010). *DRAFT—Opportunities for green building (GB) rating systems to improve indoor air quality credits and to address changing climatic conditions*. Repéré à https://swap.stanford.edu/20110205193045/http://www.epa.gov/iedweb00/pdfs/jelena_draft_per_11-4-10.pdf
- STAR Communities. (2016). Certification | STAR Communities. Repéré à <http://www.starcommunities.org/certification>
- Sultan, Z. M., Magee, R. J. et Nilsson, G. (2011). IAQ solutions and technologies: Review and selection for protocol development (Publication n° NRCC-54495). Repéré sur le site du CNRC : <http://nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/npsi/ctrl?action=rtdoc&an=20374466>
- Sundell, J., Levin, H., Nazaroff, W. W., Cain, W. S., Fisk, W. J., Grimsrud, D. T., ... Weschler, C. J. (2011). Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor Air*, 21(3), 191-204. doi : 10.1111/j.1600-0668.2010.00703.x
- Sundell, J., Wickman, M., Pershagen, G. et Nordvall, S. L. (1995). Ventilation in homes infested by house-dust mites. *Allergy*, 50(2), 106-112. doi : 10.1111/j.1398-9995.1995.tb05065.x
- Taylor, J., Shrubsole, C., Davies, M., Biddulph, P., Das, P., Hamilton, I., ... Oikonomou, E. (2014). The modifying effect of the building envelope on population exposure to PM_{2.5} from outdoor sources. *Indoor Air*, 24(6), 639-651. doi : 10.1111/ina.12116
- The Blue Angel. (s.d.). Our label for the environment. *The Blue Angel*. Repéré à <https://www.blauer-engel.de/en/our-label-environment>
- UBA. (2006). *Options for legal regulations concerning indoor pollution – Do we need a « TA Innenraum »?* Repéré à http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/TA-Innenraum_en.pdf
- UK GBC. (2015). Demystifying green infrastructure. Repéré à <http://www.ukgbc.org/resources/publication/uk-gbc-task-group-report-demystifying-green-infrastructure>
- US EIA. (2015). How much energy is consumed in residential and commercial buildings in the United States? Repéré à <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=86&t=1>
- US EPA. (2005). *New homes with ENERGY STAR Indoor Air Package*. Repéré à https://www.energystar.gov/ia/partners/bldrs_lenders_raters/downloads/IAPConsm508.pdf
- US EPA. (2008). *Guide to air cleaners in the home* (Publication n° EPA-402-F-08-004). Repéré à <http://www.epa.gov/sites/production/files/2014-07/documents/aircleaners.pdf>

- US EPA. (2009). *Residential air cleaners* : A summary of available information (2^e éd.) (Publication n° EPA 402-F-09-002). Repéré à https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/residential_air_cleaning_devices.pdf
- US GBC. (2011). LEED 2009 for neighbourhood development with canadian alternative compliance paths. Repéré à https://www.cagbc.org/CAGBC/Programs/LEED/CommercialInstitutional/RatingsSystems/Neighbourhood_Develop.aspx
- Van Sickle, D., Chertow, D. S., Schulte, J. M., Ferdinands, J. M., Patel, P. S., Johnson, D. R., ... Moolenaar, R. L. (2007). Carbon monoxide poisoning in Florida during the 2004 hurricane season. *American Journal of Preventive Medicine*, 32(4), 340-346.
doi : 10.1016/j.amepre.2006.12.013
- Vardoulakis, S., Dimitroulopoulou, C., Thornes, J., Lai, K.-M., Taylor, J., Myers, I., ... Wilkinson, P. (2015). Impact of climate change on the domestic indoor environment and associated health risks in the UK. *Environment International*, 85, 299-313. doi : 10.1016/j.envint.2015.09.010
- Voir Vert. (2015a). Certifications - Produits et matériaux. Repéré à http://www.voirvert.ca/savoir/ressources/certifications_produits
- Voir Vert. (2015b). Energy Star. Repéré à <http://www.voirvert.ca/savoir/ressources/certifications-batiments/energy-star>
- Vorwald, R. (2011). New energy technologies for high-performance buildings. *Energy Engineering*, 108(2), 17-24. doi : 10.1080/01998595.2011.10389016
- Waite, T., Murray, V. et Baker, D. (2014). Carbon monoxide poisoning and flooding: Changes in risk before, during and after flooding require appropriate public health interventions. *PLoS Currents*, 6. doi : 10.1371/currents.dis.2b2eb9e15f9b982784938803584487f1
- Ward, I. C. (2008). The potential impact of the new (UK) building regulations on the provision of natural ventilation in dwellings - A case study of low energy social housing. *International Journal of Ventilation*, 7(1), 77-88. doi : 10.5555/ijov.2008.7.1.77
- Wargo, J. (2010). *LEED certification - Where energy efficiency collides with human health*. Repéré à http://www.ehhi.org/reports/leed/LEED_report_0510.pdf
- Warren, F. J. et Lemmen, D. S. (éd.) (2014). *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*. Repéré sur le site de Ressources naturelles Canada : http://epe.lac-bac.gc.ca/100/201/301/liste_hebdomadaire/2014/electronique/w14-26-U-F.html/collections/collection_2014/rncan-nrcan/M174-2-2014-fra.pdf
- Weschler, C. J. (2000). Ozone in indoor environments: concentration and chemistry. *Indoor Air*, 10(4), 269-288.
- Weschler, C. J. (2006). Ozone's impact on public health: Contributions from indoor exposures to ozone and products of ozone-initiated chemistry. *Environmental Health Perspectives*, 114(10), 1489-1496. doi : 10.1289/ehp.9256
- Weschler, C. J. et Nazaroff, W. W. (2008). Semivolatile organic compounds in indoor environments. *Atmospheric Environment*, 42(40), 9018-9040. doi : 10.1016/j.atmosenv.2008.09.052
- Willman, A. J. (1993). Successful indoor ventilation strategies. *Indoor and Built Environment*, 2(4), 221-222. doi : 10.1177/1420326X9300200406

- Wolfe, A. H. et Patz, J. A. (2002). Reactive nitrogen and human health: acute and long-term implications. *Ambio*, 31(2), 120-125.
- Wolkoff. (1999). How to measure and evaluate volatile organic compound emissions from building products. A perspective. *The Science of the Total Environment*, 227, 197-213.
- Woloszyn, M., Kalamees, T., Olivier Abadie, M., Steeman, M. et Sasic Kalagasidis, A. (2009). The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings. *Building and Environment*, 44(3), 515-524. doi : 10.1016/j.buildenv.2008.04.017
- Xiong, J., Zhang, Y. et Huang, S. (2011). Characterisation of VOC and formaldehyde emission from building materials in a static environmental chamber: Model development and application. *Indoor and Built Environment*, 20(2), 217-225. doi : 10.1177/1420326X103874801
- Xu, L. et Ojima, T. (2007). Field experiments on natural energy utilization in a residential house with a double skin façade system. *Building and Environment*, 42(5), 2014-2023. doi : 10.1016/j.buildenv.2005.07.026
- Xu, Y., Raja, S., Ferro, A. R., Jaques, P. A., Hopke, P. K., Gressani, C. et Wetzel, L. E. (2010). Effectiveness of heating, ventilation and air conditioning system with HEPA filter unit on indoor air quality and asthmatic children's health. *Building and Environment*, 45(2), 330-337. doi : 10.1016/j.buildenv.2009.06.010
- Yau, Y. H. et Hasbi, S. (2013). A review of climate change impacts on commercial buildings and their technical services in the tropics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 430-441. doi : 10.1016/j.rser.2012.10.035
- Yu, C. W. F. et Crump, D. R. (2003). Small chamber tests for measurement of VOC emissions from flooring adhesives. *Indoor and Built Environment*, 12(5), 299-310. doi : 10.1177/142032603035502
- Yu, C. W. F. et Kim, J. T. (2012). Low-carbon housings and indoor air quality. *Indoor and Built Environment*, 21(1), 5-15. doi : 10.1177/1420326X11431907
- Yu, C. W. F. et Kim, J. T. (2013). Material emissions and indoor simulation. *Indoor and Built Environment*, 22(1), 21-29. doi : 10.1177/1420326X12474966
- Yu, K.-P., Lee, G. W.-M., Huang, W.-M., Wu, C.-C., Lou, C. et Yang, S. (2006). Effectiveness of photocatalytic filter for removing volatile organic compounds in the heating, ventilation, and air conditioning system. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(5), 666-674. doi : 10.1080/10473289.2006.10464482
- Yu, Q. L. et Brouwers, H. J. H. (2009). Indoor air purification using heterogeneous photocatalytic oxidation. Part I: Experimental study. *Applied Catalysis B: Environmental*, 92(3-4), 454-461. doi : 10.1016/j.apcatb.2009.09.004
- Ziska, L. H., Epstein, P. R. et Schlesinger, W. H. (2009). Rising CO₂, climate change, and public health: Exploring the links to plant biology. *Environmental Health Perspectives*, 117(2), 155-158. doi : 10.1289/ehp.11501
- Ziska, L., Knowlton, K., Rogers, C., Dalan, D., Tierney, N., Elder, M. A., ... Frenz, D. (2011). Recent warming by latitude associated with increased length of ragweed pollen season in central North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(10), 4248-4251. doi : 10.1073/pnas.1014107108

Annexe 1

Résumé des principaux changements climatiques anticipés au Québec

Principaux changements climatiques anticipés au Québec pour lesquels l'état des connaissances est élevé ou modéré (adapté de Ouranos, 2015a, 2010) :

- Une augmentation des températures annuelles, avec des changements plus importants en hiver et dans le nord de la province;
- Une augmentation de la température maximale (journée la plus chaude) et de la température minimale (journée la plus froide);
- Une augmentation de la durée des vagues de chaleur et de la fréquence des nuits chaudes (dont la température minimale est au-dessus de 20 °C);
- Une réduction du nombre de jours de gels, de jours froids et de nuits froides, ainsi qu'une légère diminution de la durée des vagues de froid;
- Une augmentation de la quantité maximale annuelle de précipitations ainsi qu'une hausse des cumuls de précipitations hivernales et printanières pour l'ensemble du Québec;
- Une hausse des précipitations automnales et estivales au nord et au centre; pour le sud, certains modèles prévoient de faibles diminutions alors que d'autres prévoient de faibles augmentations;
- Une hausse des événements extrêmes de précipitations, et ce, de façon plus marquée au nord. Ces changements se traduiraient notamment par une augmentation des quantités de précipitations lors des jours les plus pluvieux, et du nombre de jours de précipitations abondantes;
- Une diminution du couvert neigeux, plus particulièrement dans le sud et dans la région du Golfe-du-Saint-Laurent, et une réduction de la durée de l'enneigement;
- Une réduction de la période d'englacement pour la baie d'Hudson et le golfe du Saint-Laurent;
- Une baisse du niveau de la mer le long des côtes du détroit et de la Baie-d'Hudson, et hausse du niveau de la mer dans le golfe du Saint-Laurent.

Annexe 2

Conséquences des changements climatiques sur les contaminants de l'air intérieur

Contaminants de source extérieure

Particules

Les particules sont des polluants présents dans l'air extérieur qui peuvent être de nature primaire (c'est-à-dire qu'elles sont émises directement sous forme de particules à partir de la source) ou secondaire (c'est-à-dire qu'elles sont formées dans l'atmosphère à partir de gaz précurseurs) (Nazaroff, 2013; IOM, 2011). Elles proviennent de diverses sources, notamment du transport et du chauffage au bois.

La taille et la composition chimique des particules conditionnent leur dynamique dans l'atmosphère ainsi que leur infiltration et leur persistance dans les bâtiments (Nazaroff, 2013; IOM, 2011). Les particules plus grossières (entre 2,5 et 10 μm) ont tendance à ne pas persister longtemps dans l'atmosphère et leurs concentrations dans l'air extérieur sont plutôt hétérogènes, alors que les particules plus fines (entre 0,1 et 2 μm) ont tendance à persister plus longtemps et leur concentration dans l'atmosphère est plus homogène (Nazaroff, 2013; IOM, 2011). Comme rapporté dans la revue de l'IOM, les particules de taille plus fine s'infiltrent plus facilement dans les bâtiments et ont tendance à y persister plus longtemps par rapport aux particules de taille plus importante. Ces dernières sont davantage captées par les dispositifs de filtration, de ventilation et d'épuration, et se déposent plus rapidement sur les surfaces (IOM, 2011; Sippola et Nazaroff, 2003).

Outre les caractéristiques des polluants, d'autres facteurs influencent l'introduction et l'infiltration des particules à l'intérieur des bâtiments et peuvent entraîner d'importantes variations temporelles et spatiales (c'est-à-dire d'un bâtiment à l'autre). Plusieurs auteurs ont ainsi mis en évidence l'influence de certaines caractéristiques du bâtiment sur la contribution de l'air extérieur dans les concentrations retrouvées à l'intérieur. Par exemple, Taylor et collab. (2014) ont trouvé des concentrations plus élevées de $\text{PM}_{2,5}$ de source extérieure dans les domiciles situés à l'extérieur du centre-ville par rapport à ceux situés au centre-ville, où les concentrations ambiantes étaient pourtant plus élevées. Les auteurs attribuent ces résultats aux caractéristiques distinctes des bâtiments des deux secteurs, notamment à l'égard du type de bâtiment (les maisons détachées et les jumelés à l'extérieur du centre-ville présentaient une surface externe d'exposition par rapport au volume interne plus importante que les multilogements situés au centre-ville) et de la perméabilité des matériaux composant l'enveloppe (Taylor et collab., 2014). Dans une autre étude, l'âge des bâtiments avait également une influence; ceux construits avant 1945 étaient associés à une infiltration plus élevée (MacNeill et collab., 2014). En présence de systèmes de ventilation mécanique, l'existence et l'efficacité de dispositifs de filtration ont aussi une influence sur la concentration dans l'air intérieur de particules fines en provenance de l'extérieur (Nazaroff, 2013; IOM, 2011).

Les comportements des occupants sont un autre facteur qui influence les concentrations intérieures de particules provenant de l'extérieur. Plusieurs études ont ainsi démontré que l'ouverture des fenêtres lors de la saison chaude augmente considérablement la contribution des particules provenant de l'extérieur sur les concentrations intérieures (Meier et collab., 2015; Taylor et collab., 2014; MacNeill et collab., 2014). Des taux d'échanges d'air élevés, en particulier lors de l'ouverture des fenêtres et en l'absence de mécanismes de filtration, conduisent ainsi à des concentrations plus élevées de particules provenant de l'extérieur (Nazaroff, 2013; IOM, 2011). Les activités humaines (déplacements, entretien) auraient aussi une influence sur la remise en suspension des particules et, conséquemment, leur concentration dans l'air intérieur (Qian, Ferro et Fowler, 2008).

Considérant ces données, les conséquences des changements climatiques sur l'introduction et l'infiltration de particules dans l'environnement intérieur dépendront de divers facteurs. Outre les effets sur les concentrations extérieures (p. ex. des hivers plus doux pourraient amener une réduction du chauffage au bois et de l'émission de particules en saison hivernale), les modifications qui seront apportées aux pratiques de conception, d'opération et d'entretien du bâtiment influenceront fort probablement la contribution des sources extérieures sur les concentrations intérieures des particules (IOM, 2011). Dans un contexte de hausse des températures, les comportements à l'égard de l'ouverture ou de la fermeture des fenêtres (p. ex. en raison de l'utilisation de la climatisation) auront également un impact significatif sur l'introduction de particules dans l'environnement intérieur.

Ozone

L'ozone troposphérique est le produit de réactions entre les NO_x et les COV présents dans l'atmosphère en présence de lumière et de chaleur (appelées « réactions photochimiques »). Dans l'air extérieur, les concentrations augmentent particulièrement lors de journées chaudes et ensoleillées (INSPQ, 2010; Sherman et Matson, 2003), surtout en fin d'après-midi. Produits en grandes quantités par les activités humaines dans les zones urbaines, les précurseurs de l'ozone (NO_x et COV) sont transportés sur de très longues distances¹⁴. Conséquemment, les concentrations d'ozone ont tendance à être assez homogènes dans l'atmosphère.

Les concentrations d'ozone retrouvées à l'intérieur sont notamment liées aux concentrations dans l'air extérieur ainsi qu'au taux d'échange d'air (Weschler, 2006, 2000). L'introduction d'ozone dans les bâtiments est donc moins susceptible de se produire lorsque les fenêtres sont fermées (Moriske et collab., 1998), par exemple en hiver ou en présence de climatisation. Une fois à l'intérieur, l'ozone réagit rapidement et de manière irréversible avec des composés présents sur les surfaces (terpène, styrène, etc.) ainsi qu'avec certains gaz (p. ex. NO_x), ce qui conduit à la formation de sous-produits tels que le formaldéhyde, qui ont des effets sur la santé connus (Nazaroff, 2013; IOM, 2011; Weschler, 2000, 2006). Ces réactions surviennent notamment sur des surfaces présentes dans les milieux intérieurs tels le tapis, le contreplaqué et le plâtre (Moriske et collab., 1998). Les concentrations d'ozone dans l'air intérieur sont donc généralement inférieures à celles retrouvées dans l'air extérieur, notamment en raison de l'occurrence de telles réactions (Weschler, 2006). En marge de ce processus, une certaine proportion de l'ozone persiste dans les bâtiments et, considérant que les gens passent la majorité de leur temps à l'intérieur, l'exposition à l'ozone dans l'environnement intérieur représenterait une part importante (de 45 à 75 %) de l'exposition totale (Weschler, 2006).

Les conséquences des changements climatiques sur les concentrations d'ozone dans l'environnement intérieur dépendront non seulement des concentrations présentes à l'extérieur, mais également des changements qui se produiront à l'égard des pratiques de construction des bâtiments (p. ex. choix des matériaux, étanchéité des bâtiments) ainsi que des comportements des occupants (p. ex. ouverture des fenêtres, utilisation d'un climatiseur). Par exemple, une augmentation des concentrations extérieures serait susceptible d'augmenter les concentrations intérieures d'ozone et des sous-produits de réactions; à l'opposé, une diminution des échanges d'air consécutive à une meilleure étanchéisation du bâtiment et à une utilisation accrue de la climatisation pourrait avoir pour effet de diminuer les concentrations intérieures.

¹⁴ Une part importante des polluants précurseurs d'ozone au Québec proviennent du sud de l'Ontario et des États-Unis, en particulier dans les régions de l'Outaouais et de Montréal (MDDELCC, 2007).

Les conditions climatiques influenceront également l'infiltration de polluants extérieurs tels que l'ozone dans les bâtiments. Selon une modélisation impliquant 9 grandes villes aux États-Unis, il a été estimé que le réchauffement du climat diminuera la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur et, conséquemment, réduira de façon globale l'infiltration passive des contaminants à l'intérieur (Ilacqua et collab., 2015). Ces changements pourraient ainsi conduire à une diminution globale de l'exposition aux polluants de source extérieure plus réactifs, tels que l'ozone. Néanmoins, pour certaines localités plus chaudes, une infiltration accrue est anticipée durant la saison estivale lorsque les concentrations ambiantes sont particulièrement élevées, ce qui pourrait augmenter l'exposition à ce même polluant (Ilacqua et collab., 2015).

Conséquemment, tous ces facteurs mis ensemble compliquent les projections quant à la façon dont les concentrations intérieures d'ozone seront affectées dans le futur (Vardoulakis et collab., 2015). Néanmoins, de tels changements pourraient, selon l'IOM, conduire à une augmentation des concentrations des sous-produits générés par la réaction de l'ozone avec d'autres composés présents dans l'environnement intérieur (IOM, 2011).

Pollens

Les effets sur la santé causés par l'exposition aux pollens touchent un nombre important de personnes et entraînent par le fait même des coûts en soins de santé importants. Ils sont la principale cause de rhinite allergique, en plus de contribuer aux problèmes de santé chez les asthmatiques (INSPQ, 2013a; Ziska et collab., 2011). Plus particulièrement, l'herbe à poux présente un intérêt en termes de santé publique au Québec en raison de son abondance sur le territoire et de son fort potentiel allergène (INSPQ, 2013a).

Selon Seppänen et Fisk (2004), les pollens s'introduiraient dans les bâtiments par le biais de la ventilation et des vêtements des occupants, et seraient ainsi communément retrouvés dans l'environnement intérieur. L'IOM n'a cependant relevé aucune littérature spécifique portant sur les conséquences des changements climatiques sur l'exposition aux pollens dans l'environnement intérieur (IOM, 2011). Dans un contexte où les concentrations de pollens allergènes et la durée de la saison pollinique sont appelées à augmenter dans le futur, il est possible, selon Barnes et collab., que ces changements entraînent une introduction accrue à l'intérieur des bâtiments (Barnes et collab., 2013). Toutefois selon les publications recensées par l'IOM, les grains de pollen, en raison de leur taille, ne s'infiltrent pas efficacement dans les bâtiments et ne persistent pas longtemps dans l'air intérieur (IOM, 2011). Ils sont aussi aisément captés par les dispositifs de filtration (Seppänen et Fisk, 2004). Le fractionnement de certains types de pollens en particules allergènes de taille plus petite (par exemple lors d'orages) (D'Amato, Liccardi et Frenguelli, 2007) pourrait toutefois, selon l'IOM, faciliter leur pénétration dans les bâtiments (IOM, 2011).

Radon

Le radon est un gaz radioactif qui provient de la désintégration de l'uranium dans la croûte terrestre. Considéré cancérigène pour l'humain (CIRC, 2016), le radon serait responsable de 10 % des cancers du poumon. Le risque augmente avec la concentration, la durée de l'exposition et le tabagisme (MSSS, 2015a).

Le radon présent à l'intérieur des bâtiments provient principalement du sol (IOM, 2011; Field, 2010). Il s'infiltré par les ouvertures du soubassement telles que les fissures dans la fondation. Les caractéristiques du sol, telles que la quantité d'uranium et la perméabilité, sont des facteurs importants qui influencent la migration de ce gaz dans les bâtiments. En fonction de ces différents facteurs (présence d'ouvertures dans le soubassement et caractéristiques géologiques), il peut ainsi s'accumuler et atteindre des concentrations importantes dans certains bâtiments (INSPQ, 2004). Les

différences de pression entre l'environnement intérieur et le sol, les échanges d'air ainsi que le contenu en moiteur autour du bâtiment sont aussi des conditions qui peuvent influencer l'infiltration du radon dans les bâtiments (Field, 2010).

Les changements climatiques sont susceptibles de modifier les concentrations intérieures de radon de diverses façons. Cependant, la direction de cette modification est difficile à prévoir (Nazaroff, 2013). Par exemple, les conséquences du climat futur sur l'intégrité et le rythme d'usure des bâtiments pourraient favoriser l'infiltration de radon à l'intérieur des bâtiments situés dans des zones à forte potentialité d'émission. De plus, certains phénomènes associés aux changements climatiques (p. ex. sécheresse du sol qui peut causer des fissures dans les fondations et favoriser la migration du radon, changements dans la différence de pression entre l'environnement intérieur et extérieur) pourraient également avoir une influence sur le taux d'infiltration de radon dans les bâtiments (Field, 2010).

Dans l'éventualité d'une utilisation accrue de la climatisation en raison de l'augmentation globale de la température, les échanges d'air avec l'extérieur sont susceptibles de diminuer, ce qui pourrait causer une augmentation des concentrations de radon dans l'air intérieur, en particulier dans les bâtiments plus étanches (Field, 2010). De plus, l'utilisation d'un système de ventilation centralisé pourrait contribuer à homogénéiser les concentrations de radon dans un même bâtiment, et ainsi accroître l'exposition des occupants présents aux étages supérieurs (Nazaroff, 2013; Field, 2010).

Autres contaminants de source extérieure

Il existe d'autres contaminants provenant de source extérieure qui peuvent s'infiltrer dans les bâtiments et dont les concentrations dans l'air intérieur pourraient être modulées par les changements climatiques. C'est le cas notamment du SO₂, des NO_x, des HAP ainsi que de divers COV. Néanmoins, comme précisé précédemment, ce sont d'abord les changements qui se produiront à l'égard des émissions qui influenceront les concentrations de polluants extérieurs (Ouranos, 2015a).

Selon la revue réalisée par l'IOM, le bâtiment représente généralement une certaine protection à l'égard de l'exposition à certains de ces polluants, et les concentrations dans l'air extérieur pourraient être appelées à diminuer dans un contexte de changements climatiques, dépendamment de la mise en place de mesures de contrôle à la source (IOM, 2011). Par ailleurs, pour certains de ces polluants, tels que les particules et les NO_x, les sources intérieures peuvent contribuer aux concentrations retrouvées dans l'air des bâtiments (p. ex. cuisson des aliments, utilisation d'une cuisinière fonctionnant au gaz) (IOM, 2011; Wolfe et Patz, 2002). L'apport des sources extérieures dans les concentrations retrouvées à l'intérieur nécessiterait ainsi davantage de recherches.

Contaminants de source intérieure

Contaminants associés aux problèmes d'humidité excessive

La présence d'humidité excessive est une condition qui favorise la prolifération de moisissures dans les bâtiments. En plus de causer des dommages potentiels aux matériaux, l'humidité excessive persistante et la contamination fongique ont été associées à des effets sur la santé dans la littérature, tels que des sifflements respiratoires, de la toux et l'exacerbation de l'asthme (Mendell et collab., 2011; Heseltine, Rosen et World Health Organization, 2009). Par ailleurs, les moisissures peuvent produire des métabolites secondaires, tels que des composés organiques volatils microbiens (COVm) et des mycotoxines qui, dans certains contextes (p. ex. milieu agricole), ont aussi des effets sur la santé (CIRC, 1993, 2002).

Les problèmes d'humidité excessive sont aussi une condition favorable au développement de bactéries dans l'environnement intérieur (IOM, 2011). Les bactéries Gram négatif présentent un intérêt particulier en raison de la présence d'endotoxines, qui sont un composant de leur membrane externe. À des concentrations élevées, les endotoxines ont été associées à des effets sur la santé, notamment à l'exacerbation de l'asthme (Kanchongkittiphon et collab., 2015).

Différents facteurs sont susceptibles d'avoir une influence sur les contaminants associés à l'humidité excessive dans un contexte de changements climatiques. Le risque accru d'inondations, en particulier dans certaines régions côtières où une augmentation du niveau de la mer est attendue, pourrait augmenter le risque d'exposition à ce type de problèmes (Barnes et collab., 2013). Certaines études recensées par l'IOM et d'autres auteurs ont rapporté des concentrations élevées de moisissures et de bactéries dans les domiciles affectés par des événements de pluie importante ainsi que par des inondations à la suite d'ouragans (Yau et Hasbi, 2013; IOM, 2011).

L'usure des bâtiments (qui pourrait être accentuée par les changements climatiques), les pratiques de construction ainsi que l'entretien qui sera apporté par les occupants auront aussi une influence sur les contaminants associés à l'humidité excessive. Selon l'IOM, les problèmes associés à l'humidité excessive auraient tendance à s'accroître avec l'âge et le degré de détérioration des bâtiments (IOM, 2011). Par ailleurs, les matériaux de construction écologiques, qui demandent moins d'énergie pour être produits (comme le bois), peuvent être davantage sujets à la contamination fongique que des produits comme l'acier (Morey, 2010). Il semble néanmoins que les connaissances sur les causes et sur la prévention des problèmes d'humidité excessive et de prolifération fongique ne soient pas toujours bien intégrées aux pratiques actuelles de construction et d'entretien (IOM, 2011; Gagné et Garon, 2012a, 2012b).

Composés organiques volatils et semi-volatils

Les COV sont un groupe de polluants, sous forme de gaz ou de vapeurs, contenant du carbone et de l'hydrogène (Santé Canada, 2012b). Ils comprennent une large gamme de contaminants dont plusieurs ont des effets néfastes pour la santé, notamment le benzène (p. ex. fumée de cigarette, ameublement), les tétrachloroéthylènes (p. ex. nettoyage à sec), le toluène (p. ex. peinture), l'alpha-pinène (p. ex. produits d'entretien), le limonène (p. ex. désodorisants) (OQAI, n. d.) ainsi que le formaldéhyde. Les sources de COV dans l'environnement intérieur sont très diverses et comprennent entre autres les matériaux de construction (p. ex. colles, peintures, vernis), le mobilier, les produits domestiques (produits nettoyants, assainisseurs d'air) et la combustion (p. ex. fumée de tabac, foyer ou poêles à bois) (Jia, Batterman et Godwin, 2008; Santé Canada, 2012b).

Les concentrations de COV dans l'environnement intérieur peuvent varier de manière notable dans le temps pour un même bâtiment ainsi que d'un bâtiment à l'autre. Plusieurs facteurs expliquent ces variations, notamment les caractéristiques du bâtiment (p. ex. types de matériaux), les choix et les comportements des occupants (p. ex. fréquence et intensité de l'utilisation de produits qui émettent ce type de contaminant) et le taux d'échange d'air avec l'extérieur (IOM, 2011). Les émissions de COV dans le milieu résidentiel ont ainsi tendance à être plus élevées dans les bâtiments nouvellement construits ou récemment rénovés (Nazaroff, 2013; Hamidin et collab., 2013). Les concentrations tendraient à diminuer avec l'âge du bâtiment, conséquence de la diminution des émissions des matériaux de construction et de leur dilution par le biais d'une ventilation naturelle passive accrue dans les bâtiments plus âgés (Dingle et Franklin, 2002).

La population est ainsi exposée à une diversité de COV dans l'environnement intérieur qui ont divers effets sur la santé, et le cumul des effets associés est préoccupant selon Santé Canada (Santé Canada, 2012b). En particulier, le formaldéhyde représente un polluant d'intérêt en termes de santé publique. En effet, c'est un irritant qui peut causer des sensations de brûlures aux yeux, au nez et à la gorge lors d'une exposition à des concentrations importantes (Santé Canada, 2012a). Il est par ailleurs reconnu comme étant cancérigène pour l'humain (CIRC, 2016), bien que, selon Santé Canada, la probabilité de développer un cancer à la suite d'une exposition aux concentrations typiquement retrouvées dans les domiciles au pays est relativement faible (Santé Canada, 2012a).

Des conditions plus chaudes et plus humides dans l'environnement intérieur (causées par les changements climatiques) sont susceptibles d'augmenter les concentrations intérieures de certains COV tels que le formaldéhyde. En effet, les émissions de formaldéhydes dans l'environnement intérieur seraient corrélées positivement avec l'humidité relative et la température (Dassonville et collab., 2009). Par ailleurs, plus le taux d'échange d'air est important, plus les concentrations tendent à diminuer (Salthammer, Mentese et Marutzky, 2010). Dans une étude réalisée par l'INSPQ chez un groupe d'enfants asthmatiques, le pourcentage de résidences qui dépassaient la valeur guide recommandée par Santé Canada pour le formaldéhyde ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 8 h) était plus élevée en été (63 %) par rapport à l'automne et à l'hiver (23 %) (INSPQ, 2015). Les auteurs expliquent ces résultats par l'émission accrue de formaldéhyde avec l'augmentation de la température et les réactions chimiques favorisées par des conditions plus humides. Des résultats similaires quant à l'effet des saisons sur les concentrations de formaldéhyde dans les résidences ont été observés dans le cadre d'autres études (Dassonville et collab., 2009; Dingle et Franklin, 2002).

Les conditions de température et d'humidité auraient également une influence sur le processus de désorption des composés organiques semi-volatils (COSV). Par exemple, des surfaces plus chaudes favoriseraient l'émission de COSV dans l'air intérieur (Weschler et Nazaroff, 2008). L'exposition aux COSV tels que les phtalates (utilisés comme agents plastifiants) et les polybromodiphényléthers (utilisés comme retardateurs de flamme) aurait divers effets sur la santé (p. ex. toxicité sur la reproduction, perturbation potentielle du système endocrinien) (Anses, 2015a; Rhainds et Saint-Laurent, 2004).

Agents infectieux et autres organismes sensibles aux conditions d'humidité et de température

La manière dont le bâtiment est conçu (p. ex. ventilation) et partagé par les humains (p. ex. proximité) (Meadow et collab., 2014) ainsi que certains facteurs saisonniers (p. ex. température, humidité, précipitations) jouent un rôle important dans l'exposition aux agents infectieux (IOM, 2011; Naumova, 2006). Parmi ces facteurs, l'humidité est considérée comme un facteur critique, plusieurs micro-organismes étant sensibles aux conditions d'humidité (IOM, 2011). Conséquemment, les modifications qui se produiront à l'égard du climat ainsi que les mesures d'adaptation qui seront apportées à l'environnement intérieur afin de contrôler la température et l'humidité auront certainement une influence sur la transmission d'agents infectieux. Il existe toutefois peu de littérature portant spécifiquement sur le lien entre les changements climatiques et l'occurrence des maladies infectieuses en milieu intérieur (IOM, 2011).

Il est bien connu que l'activité de certains virus respiratoires tels que le virus de l'influenza et le virus respiratoire syncytial (VRS) varie selon les saisons; dans les climats tempérés, elle est moins importante lors de la saison estivale. Selon la revue de l'IOM et une autre plus récente publiée en 2012, une augmentation de la température, combinée à une humidité plus élevée, diminuerait la transmission de certains virus respiratoires (Pica et Bouvier, 2012; IOM, 2011). Par exemple, la transmission du virus de l'influenza serait plus efficace à une température de 5°C par rapport à 20°C , ainsi qu'à une humidité relative située entre 20 et 35 % par rapport à 50 % (Lowen et collab.,

2007). Toutefois, considérant que les pics de transmission correspondent aux périodes où les gens passent davantage de temps à l'intérieur, il semble que l'importance du rôle de l'humidité ambiante dans la transmission de ces virus respiratoires reste à élucider.

La transmission de certaines bactéries serait également influencée par les conditions climatiques. Notamment, la présence de la bactérie responsable de la légionellose, le plus souvent transmise par le biais d'aérosols, est commune dans certains réseaux de distribution d'eau potable et varie selon les saisons (IOM, 2011). L'occurrence des cas de la maladie du légionnaire a ainsi été davantage observée durant la saison estivale, et a été associée aux pluies et à une augmentation de l'humidité relative (Fisman et collab., 2005). Bien que certaines hypothèses pour expliquer cette relation ont été soulevées (p. ex. multiplication accrue de la bactérie dans les systèmes de distribution d'eau, dispersion des sédiments organiques dans le réseau d'eau municipal, etc. (Morey, 2010; Fisman et collab., 2005), la cause exacte ainsi que le lieu de transmission (intérieur ou extérieur) n'ont pas été clairement identifiés. Dans un contexte de changements climatiques où le régime des précipitations est appelé à changer, une meilleure compréhension des mécanismes de cette association serait donc nécessaire (Neil et Berkelman, 2008; Fisman et collab., 2005).

Les acariens sont également une catégorie d'organismes indésirables retrouvés dans l'environnement intérieur qui sont sensibles aux conditions environnementales, en particulier à l'humidité (IOM, 2011; Fernández-Caldas, Trudeau et Ledford, 1994). Des conditions plus sèches, telles qu'observées en hiver lors de la période de chauffe, ont pour effet de réduire drastiquement les populations d'acariens à l'intérieur, alors que des conditions plus humides favorisent leur prolifération. Certaines espèces d'acariens sont d'ailleurs plus sensibles que d'autres aux conditions d'humidité. Les conséquences des changements climatiques sur les concentrations d'acariens dans l'environnement intérieur sont toutefois difficiles à prévoir compte tenu des divers facteurs qui entrent en ligne de compte. Notamment, des hivers plus doux et des étés plus chauds et humides sont susceptibles de modifier les populations d'acariens dans les bâtiments, notamment à l'égard des types retrouvés dans les poussières ainsi que la distribution géographique des espèces endémiques (IOM, 2011; Curson, 1993). Par ailleurs, une réduction de l'utilisation du chauffage pourrait conduire à une augmentation des populations d'acariens alors que l'utilisation accrue de la climatisation aurait l'effet inverse (par la réduction de l'humidité ambiante) (Spengler, 2012; IOM, 2011).

Monoxyde de carbone

L'accroissement des interruptions du service d'électricité qui pourrait survenir avec les changements climatiques soulève des préoccupations à l'égard des intoxications au CO, consécutives à une utilisation inappropriée de certains appareils tels que des génératrices fonctionnant au combustible (IOM, 2011). Selon un sondage réalisé auprès de ménages québécois en 2006, c'est 10 % de la population qui a déjà adopté des comportements risqués à l'égard de l'utilisation d'appareils à combustion à l'intérieur lors d'une panne électrique (INSPQ, 2010b).

Contrairement aux autres contaminants abordés dans ce chapitre, c'est l'exposition aiguë – plutôt que l'exposition chronique – qui soulève une préoccupation importante de santé publique. Le CO est issu de la combustion incomplète de matières organiques (INSPQ, 2010b). Une des composantes importantes du risque associé au CO est qu'il est indétectable pour l'humain; c'est un gaz inodore, incolore et non irritant. Les signes d'une intoxication légère au CO incluent notamment de la fatigue, des maux de tête et des nausées. Dans le cas d'une intoxication plus sévère, l'exposition au CO peut aller jusqu'à causer des pertes de conscience, un coma, des dommages cérébraux et la mort (MSSS, 2015b; Waite, Murray et Baker, 2014).

De nombreux cas d'intoxications au CO survenus à la suite de pannes d'électricité prolongées causées par des événements climatiques extrêmes ont été documentés. Par exemple, au cours de la tempête de verglas de 1998 qui a privé d'électricité plus de 4,7 millions de personnes au Québec, au Nouveau-Brunswick et en Ontario, plusieurs cas d'intoxications au CO ont été rapportés, dont 150 personnes ayant consulté pour intoxication, 51 personnes ayant été traitées en chambre hyperbare et 6 décès (Berry, 2008; Roy, 1998). Plusieurs autres cas d'intoxication au CO à la suite de pannes d'électricité prolongées lors d'événements tels que des inondations, des orages et des tempêtes de neige ont été répertoriés ailleurs qu'au Québec (Johnson-Arbor, Quental et Li, 2014; Waite, Murray et Baker, 2014; Muscatiello et collab., 2010; CDC, 2009; Van Sickle et collab., 2007; CDC, 2006, 2005). Dans la grande majorité des cas, ces intoxications étaient associées à l'utilisation inappropriée de génératrices portables, soit à l'intérieur du domicile, dans le garage ou à l'extérieur, tout près d'une prise d'air (Johnson-Arbor, Quental et Li, 2014; Waite, Murray et Baker, 2014; Muscatiello et collab., 2010; Van Sickle et collab., 2007; Hampson et Stock, 2006; CDC, 2006, 2005). La plupart de ces intoxications ont eu lieu en milieu résidentiel (Johnson-Arbor, Quental et Li, 2014; Iqbal et collab., 2012; Van Sickle et collab., 2007). Selon une étude récente réalisée par Hampson et Dunn (2015) auprès de patients traités pour intoxication au CO associée à l'usage d'une génératrice, la principale raison évoquée pour avoir utilisé ce genre d'appareil de manière inappropriée est le manque de connaissance du risque.

D'autres causes d'intoxications sont possibles, telles que l'utilisation d'un BBQ à l'intérieur, bien que ce type de comportement ait été davantage observé chez les populations immigrantes aux États-Unis (Iqbal et collab., 2012; Gulati et collab., 2009). Le nombre d'intoxications serait d'ailleurs sous-estimé; notamment, certains cas non fatals seraient mal diagnostiqués (en raison de la non-spécificité des symptômes) ou simplement non rapportés (Iqbal et collab., 2012; CDC, 2009).

Autres contaminants de source intérieure

Il importe de souligner qu'il existe plusieurs autres contaminants de source intérieure dont les concentrations sont susceptibles d'être altérées dans un contexte de changements climatiques. De façon globale, l'IOM rapporte que la construction de bâtiments de plus en plus étanches, combinée à la réduction de la ventilation dans un souci d'économie d'énergie, aura pour effet d'augmenter la persistance des contaminants de source intérieure tels que la fumée de tabac secondaire et le NO_x (IOM, 2011).

Annexe 3

Méthodologie et recherche bibliographique

Méthodologie et recherche documentaire

La recherche documentaire a été menée à partir des bases de données présentées au tableau 1.

Tableau 1 Plateformes et bases de données consultées

Plateformes	Bases de données
Ovid SP	<ul style="list-style-type: none">▪ Périodiques électroniques – Forfait Total Access Collection;▪ All EBM reviews – Cochrane Database of Systematic Reviews, Cochrane Central Register of Controlled Trials, ACP Journal Club, Database of Abstracts of Reviews of Effects, Cochrane Methodology Register, Health Technology Assessment, NHS Economic Evaluation Database;▪ EMBASE (1974 to 2016 February 01);▪ Ovid MEDLINE (R) (1946 to January Week 3 2016);▪ Ovid MEDLINE (R) In-Process & Other Non-Indexed Citations February 01, 2016.
ProQuest	<ul style="list-style-type: none">▪ Environmental Sciences and Pollution Management.

Six concepts ont été recherchés dans les bases de données :

- Concept 1 : air intérieur;
- Concept 2 : changements climatiques;
- Concept 3 : contaminants;
- Concept 4 : législation, lignes directrices, recommandations, normalisation, étiquetage;
- Concept 5 : matériaux de construction et produits de décoration;
- Concept 6 : techniques de traitement.

La combinaison de ces concepts visait à répondre aux questionnements suivants :

- Comment les changements climatiques peuvent affecter la QAI?
(combinaison des concepts 1 et 2)
- Quels sont les contaminants à considérer?
(combinaison des concepts 1, 2 et 3)
- Quels moyens préventifs sont mis en place ou peuvent être mis en place pour se protéger?
(combinaison des concepts 1, 4 et 5)
- Quelles techniques de traitement de l'air intérieur peuvent être utilisées?
(combinaison des concepts 1, 2 et 6 ou des concepts 1 et 6)

Les mots-clés utilisés pour lancer les stratégies de recherche sont présentés au tableau 2.

Tableau 2 Mots-clés utilisés pour chaque concept dans OvidSP et ProQuest¹⁵

Concept	Concept 1 Air intérieur	Concept 2 Changements climatiques	Concept 3 Contaminants	Concept 4 Législation, lignes directrices, recommandations, normalisation, étiquetage	Concept 5 Matériaux de construction et produits de décoration	Concept 6 Techniques de traitement
Mots-clés						
Mots-clés pour la recherche dans OvidSP						
Langage naturel	((indoor OR internal OR interior OR in-house OR household* OR domestic OR home* OR house* OR dwelling* OR housing OR (living ADJ0 (accommodation* OR quarter*)) OR residential OR residence* OR abode* OR habitation* OR condo*) ADJ2 air).ti,ab,kw.	((climat* ADJ3 (chang* OR modif* OR variab*)) OR (global ADJ0 warming) OR ((greenhouse OR green-house) ADJ0 effect*)).ti,ab,kw.	(pollut* OR contamina* OR allergen* OR emissivity OR emittance OR emission* OR ("volatile organic" ADJ0 (compound* OR carbon*)) OR VOC* OR formaldehyde OR methanal OR (formic ADJ0 aldehyde) OR (methyl ADJ0 aldehyde) OR (methylene ADJ0 oxide) OR oxomethane OR oxymethylene OR formol OR formalin).ti,ab,kw.	(law* OR legislat* OR prohibit* OR restrict* OR policy OR policies OR rule OR rules OR (social ADJ2 control*) OR regulation* OR jurisprudence* OR (legal ADJ2 (aspect* OR principle*)) OR ban OR banned OR certificat* OR ((guideline* OR guideline* ADJ0 value*) OR label* OR marking OR recommendat* OR norm* OR caution*)).ti,ab,kw.	((building OR construction) ADJ2 (material* OR product* OR article*) OR decorat* OR ornament OR solvent* OR chipboard* OR chip-board* OR draper* OR curtain* OR carpet* OR paint OR painting OR vinyl).ti,ab,kw.	(filter* OR filtrat* OR purif* OR treat* OR ioni#e* OR ventilat* OR ((attenuat* OR mitig* OR correct*) ADJ2 contaminat*) OR heat* OR cool* OR aerat* OR (air ADJ1 (distribution OR conditioning)) OR ((HEPA OR centrali#ed OR "UV lamp" OR ((charcoal OR electrostatic) ADJ0 filter) OR (cold ADJ0 plasma) OR (photocatalytic ADJ0 oxidation) OR ozone OR (ion* ADJ1 generat*)) ADJ2 (system* OR equipment* OR device*)).ti,ab,kw.
MeSH	air pollution, indoor/	exp climate change/	environmental pollutants/ OR air pollutants/ OR allergens/ OR volatile organic compounds/ OR exp formaldehyde/			environment, controlled/ OR air conditioning/ OR heating/ OR humidity/ OR temperature/ OR ventilation/
EMTREE	indoor air pollution/ exp air quality/ AND housing/	climate change/	air pollution/ OR volatile organic compound/ OR oxide/ OR carbon dioxide/	air quality standard/		air monitoring/ OR air quality control/ OR air conditioning/ OR room ventilation/ OR air filter/

¹⁵ Le bordereau de recherche développé en collaboration avec les ressources documentaires de l'INSPQ est disponible sur demande auprès des auteurs du présent document.

Tableau 2 Mots-clés utilisés pour chaque concept dans OvidSP et ProQuest (suite)

Concept	Concept 1 Air intérieur	Concept 2 Changements climatiques	Concept 3 Contaminants	Concept 4 Législation, lignes directrices, recommandations, normalisation, étiquetage	Concept 5 Matériaux de construction et produits de décoration	Concept 6 Techniques de traitement
Mots-clés						
Mots-clés pour la recherche dans OvidSP						
CAB Thesaurus	indoor air pollution/ air quality/ AND (dwellings/ OR buildings/)	exp climatic change/ OR greenhouse effect/	air pollution/ OR exp air pollutants/ OR volatile compounds/ OR exp organic compounds/ OR toxic substances/			air assisted sprayers/ OR air cleaners/ OR air conditioners/ OR air conditioning/ OR air drying/ OR drying air/ OR air filters/ OR air flow/ OR air heaters/ OR air ionization/ OR controlled atmospheres/ OR coolers/ OR cooling/ OR cooling systems/ OR recirculating cooling systems/ OR diffusers/ OR dust control/ OR dust extractors/ OR environmental control/ OR fans/ OR filtration/ OR heat exchangers/ OR heat transfer/ OR heating/ OR humidifiers/ OR relative humidity/ OR ventilation/ OR artificial ventilation/ OR ventilators/

Tableau 2 Mots-clés utilisés pour chaque concept dans OvidSP et ProQuest (suite)

Concept	Concept 1 Air intérieur	Concept 2 Changements climatiques	Concept 3 Contaminants	Concept 4 Législation, lignes directrices, recommandations, normalisation, étiquetage	Concept 5 Matériaux de construction et produits de décoration	Concept 6 Techniques de traitement
Mots-clés						
Mots-clés pour la recherche dans ProQuest						
Langage naturel	TI((indoor OR internal OR interior OR in-house OR household* OR domestic OR home* OR house* OR dwelling* OR housing OR (living N/0 (accommodation* OR quarter*)) OR residential OR residence* OR abode* OR habitation* OR condo*) N/2 air) OR AB((indoor OR internal OR interior OR in-house OR household* OR domestic OR home* OR house* OR dwelling* OR housing OR (living N/0 (accommodation* OR quarter*)) OR residential OR residence* OR abode* OR habitation* OR condo*) N/2 air)	TI((climat* N/3 (chang* OR modif* OR variab*)) OR (global N/0 warming) OR ((greenhouse OR green-house) N/0 effect*)) OR AB((climat* N/3 (chang* OR modif* OR variab*)) OR (global N/0 warming) OR ((greenhouse OR green-house) N/0 effect*))	TI(pollut* OR contamina* OR allergen* OR emissivity OR emittance OR emission* OR ("volatile organic" N/0 (compound* OR carbon*)) OR VOC* OR formaldehyde OR methanal OR (formic N/0 aldehyde) OR (methyl N/0 aldehyde) OR (methylene N/0 oxide) OR oxomethane OR oxymethylene OR formol OR formalin) OR AB(pollut* OR contamina* OR allergen* OR emissivity OR emittance OR emission* OR ("volatile organic" N/0 (compound* OR carbon*)) OR VOC* OR formaldehyde OR methanal OR (formic N/0 aldehyde) OR (methyl N/0 aldehyde) OR (methylene N/0 oxide) OR oxomethane OR oxymethylene OR formol OR formalin)	TI(law* OR legislat* OR prohibit* OR restrict* OR policy OR policies OR rule OR rules OR (social N/2 control*) OR regulation* OR jurisprudence* OR (legal N/2 (aspect* OR principle*)) OR ban OR banned OR certificat* OR ((guideline* OR guide-line* N/0 value*) OR label* OR marking OR recommendat* OR norm* OR caution*)) OR AB (law* OR legislat* OR prohibit* OR restrict* OR policy OR policies OR rule OR rules OR (social N/2 control*) OR regulation* OR jurisprudence* OR (legal N/2 (aspect* OR principle*)) OR ban OR banned OR certificat* OR ((guideline* OR guide-line* N/0 value*) OR label* OR marking OR recommendat* OR norm* OR caution*))	TI((building OR construction) N/2 (material* OR product* OR article*) OR decorate* OR ornament OR solvent* OR chipboard* OR chipboard* OR draper* OR curtain* OR carpet* OR paint OR painting OR vinyl) OR AB((building OR construction) N/2 (material* OR product* OR article*) OR decorate* OR ornament OR solvent* OR chipboard* OR chipboard* OR draper* OR curtain* OR carpet* OR paint OR painting OR vinyl)	TI(filter* OR filtrate* OR purify* OR treat* OR ventilat* OR ((attenuate* OR mitig* OR correct*) NEAR/2 contaminant*) OR heat* OR cool* OR aerate* OR (air NEAR/1 (distribution OR conditioning)) OR ((HEPA OR "UV lamp" OR ((charcoal OR electrostatic) NEAR/0 filter) OR (cold NEAR/0 plasma) OR (photocatalytic NEAR/0 oxidation) OR ozone OR (ion* NEAR/1 general*)) NEAR/2 (system* OR equipment* OR device*))

La stratégie de recherche a été appliquée une première fois, de façon exploratoire, au mois d'octobre 2014, puis une seconde fois, au mois de janvier 2015. Le processus de sélection des articles pertinents s'est effectué en deux temps. Dans un premier temps, les titres et les résumés des articles recensés par la recherche documentaire ont été passés en revue afin d'éliminer les articles non compatibles sur la base de certains critères (respect du thème, publié après 2000, en anglais ou en français). Dans un deuxième temps, après avoir obtenu les manuscrits des articles retenus, une analyse rigoureuse de leur contenu a été effectuée par les membres de l'équipe de travail. Cette seconde analyse de la pertinence du contenu (p. ex. applicabilité au climat du Québec, au milieu résidentiel) a permis de retenir uniquement les articles scientifiques pertinents aux fins du présent rapport.

Le tableau 3 présente les résultats des différentes requêtes dans les bases de données OvidSP et ProQuest.

Tableau 3 Résultats généraux de la recherche bibliographique dans OvidSP et ProQuest

Numéro de recherche ou combinaison (sans doublons)	Thématique de la recherche	Nombre d'articles avec OvidSP (2015-01-12)	Nombre d'articles avec ProQuest (2015-01-12)	Nombre d'articles retenus
1	Air intérieur	14 868	14 169	S. O.
2	Changements climatiques	47 355	123 829	S. O.
3	Contaminants	1 249 604	677 021	S. O.
4	Législation, lignes directrices, recommandations, normalisation, étiquetage	7 941 441	294 194	S. O.
5	Matériaux de construction et produits de décoration	355 460	93 092	S. O.
6	Techniques de traitement	11 589 120	1 712 826	S. O.
Concepts 1 et 2	Air intérieur et Changements climatiques	73	113	7
Concepts 1, 2 et 3	Air intérieur et Changements climatiques et Contaminants	54	75	
Concepts 1, 4 et 5	Air intérieur et Législation, lignes directrices, recommandations, normalisation, étiquetage et Matériaux de construction et produits de décoration	169	14	15
Concepts 1, 2 et 6	Air intérieur et Changements climatiques et Techniques de traitement	36	58	25
Concepts 1 et 6	Air intérieur et Techniques de traitement	2969	5242	

En marge de cette recherche documentaire, une veille scientifique a également permis d'assembler un certain nombre d'articles scientifiques complémentaires tout au long de l'élaboration du présent document. Certains articles et documents d'intérêt cités en références dans les publications consultées ont également été inclus à l'analyse.

De plus, une recherche documentaire a été effectuée afin d'obtenir des documents et des informations techniques pertinentes, en provenance de la littérature grise (identifiée par l'entremise d'outils de recherche tels que Google et Google Scholar) ou encore de sites Web de nombreux organismes pertinents, dont les suivants :

- [OMS](#)
- [Ouranos](#)
- [GIEC](#)
- [EPA](#)

Enfin, les éléments relatifs aux législations en vigueur ici et ailleurs dans le monde ont été obtenus à partir des sites Web regroupant les articles de lois et les règlements des diverses instances gouvernementales nationales et internationales, notamment en matière d'étiquetage :

- La base de données [EUR-Lex](#), qui regroupe la législation et les documents publics de l'UE
- [Site Web de la législation \(Justice\) du Canada](#)

Annexe 4

Efforts de normalisation et d'harmonisation en Europe

Effort de normalisation et d'harmonisation en Europe

Puisque chaque pays membre de l'UE possède une réglementation qui lui est propre et que tous les pays n'abordent pas les enjeux liés à la QAI de la même manière, la présente annexe se penche davantage sur les avancées faites par l'UE dans ce domaine, en soulignant les efforts particuliers de certains pays.

Le Bureau régional de l'OMS pour l'Europe (OMS/Europe) a publié en 2010 des valeurs guides pour la QAI. De telles valeurs ont été élaborées pour plusieurs substances chimiques généralement présentes dans l'air intérieur, dont le benzène, le CO, le formaldéhyde et le radon. Ces valeurs représentent des concentrations maximales à ne pas dépasser pour la protection de la santé. Par exemple, la valeur guide pour le formaldéhyde est de 100 µg/m³ (OMS, 2010).

En 2011, le Parlement européen a adopté un règlement établissant des conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction (EU 305/2011¹⁶) et qui « détermine les conditions relatives à la mise sur le marché des produits de construction. Il définit également des critères d'évaluation des performances pour ces produits, ainsi que les conditions d'utilisation du marquage CE [conforme aux exigences]¹⁷. » Parmi les exigences fondamentales applicables aux ouvrages de construction, il est précisé que ceux-ci doivent être conçus et construits de manière à ne pas constituer une menace pour l'hygiène ou la santé et la sécurité des travailleurs, des occupants et des voisins, du fait, notamment, de l'émission, à l'intérieur ou à l'extérieur, de substances dangereuses, de COV, de GES ou de particules dangereuses (Annexe I, article 3 b), ou de l'humidité dans des parties de l'ouvrage de construction ou sur les surfaces intérieures de celui-ci (Annexe I, article 3 g). Bien que devant respecter cette réglementation européenne, les pays sont ensuite libres d'intégrer des précisions supplémentaires (plus contraignantes que le règlement) quant aux émissions et aux limites à respecter dans leur législation nationale. À l'heure actuelle, seules la France, l'Allemagne et la Belgique semblent avoir pris cette initiative.

Aussi, afin de répondre au besoin d'information du public et des producteurs, de nombreux systèmes d'étiquetage environnemental pour les bâtiments et pour les produits et les matériaux de construction, de décoration et d'ameublement ont vu le jour depuis la fin des années 70. Puisque ces systèmes sont généralement adaptés aux exigences nationales et possèdent tous des spécificités techniques quant aux protocoles d'évaluation des émissions pour les substances chimiques (Joint Research Centre, 2005), il devenait complexe, tant pour les producteurs que pour les consommateurs, de faire un choix éclairé dans un contexte de libre marché où de nombreux produits comportant diverses étiquettes environnementales sont disponibles.

Afin de pallier ce problème, le Joint Research Centre coordonne depuis quelques années des travaux afin d'harmoniser les méthodes d'évaluation des émissions provenant des produits et des matériaux. Ce processus d'harmonisation se base sur le concept de CLI. Celle-ci est développée pour chaque composé individuel et a pour objectif de prévenir la survenue d'effets sur la santé lors d'une exposition à long terme à des émissions provenant de matériaux de construction, de décoration ou d'ameublement. Les travaux réalisés à ce jour n'ont cependant considéré que les COV (Anses, 2013).

¹⁶ Règlement (UE) n° 305/2011 du Parlement européen et du Conseil du 9 mars 2011 établissant des conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction et abrogeant la directive 89/106/CEE du Conseil Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE. Repéré à <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32011R0305>.

¹⁷ « Le marquage CE doit être apposé sur de nombreux produits avant que ceux-ci puissent être vendus dans l'EEE [espace économique européen] (UE + Islande, Liechtenstein et Norvège). Il prouve que votre produit a été évalué et qu'il répond aux exigences de l'UE en matière de sécurité, de santé et de protection de l'environnement. Il est valable pour les produits fabriqués dans l'EEE et en dehors et qui sont ensuite commercialisés sur le territoire de l'EEE. » (L'Europe est à vous, 2015).

Une proposition d'harmonisation des protocoles d'évaluation basés sur la santé pour les émissions de produits de construction dans l'air intérieur a d'ailleurs été publiée en 2013 (Joint Research Centre, 2013). Ultiment, ce processus vise à permettre aux différents systèmes d'étiquetage environnemental européens d'évaluer les émissions de la même manière en utilisant une procédure robuste basée sur la santé.

France

En France, plusieurs réglementations ont été adoptées dans les dernières années afin de prévenir les effets sur la santé associés à certains contaminants pouvant être présents dans le milieu intérieur. Un premier décret (n° 2011-321¹⁸), relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils, rend obligatoire, depuis septembre 2013, l'étiquetage de tous les produits de construction et de décoration vendus en France. L'étiquette apposée sur les produits et matériaux vise à indiquer simplement et lisiblement leur niveau d'émission en contaminants volatils. Le niveau d'émission réfère à l'une des 4 classes (allant de « très faibles émissions » à « fortes émissions ») qui ont été déterminées à partir des émissions évaluées pour 11 polluants. Les contaminants visés par cette réglementation incluent non seulement le formaldéhyde et les émissions totales de COV, mais aussi l'acétaldéhyde, le toluène, le tétrachloroéthylène, le xylène, le triméthylbenzène, le dichlorobenzène, l'éthylbenzène, le butoxyéthanol et le styrène. Cette mesure vise à fournir aux consommateurs une information claire et transparente quant aux produits qu'ils achètent et installent dans les habitations (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2012).

De plus, le troisième plan national santé environnement (2015-2019) prévoit l'élargissement de l'étiquetage obligatoire aux produits d'ameublement. Dans ce contexte, l'Anses a été mandatée afin de déterminer les substances chimiques prioritaires pour la mise en place de l'étiquetage de ce type de produits. À ce jour, l'Anses a relevé 31 substances prioritaires (incluant des composés organiques volatils, semi-volatils et très volatils), substances qui sont toutes classées comme cancérigènes, mutagènes ou affectant la reproduction en vertu du Règlement (n° 1272/2008¹⁹) du Parlement européen, ou classées comme telles par le CIRC (classes 1, 2A ou 2B) (Anses, 2015b).

Une autre réglementation vise à mettre progressivement en place une surveillance obligatoire de la QAI dans les établissements recevant du public (décret n° 2011-1728²⁰), incluant notamment les établissements accueillant des enfants tels que les établissements d'accueil collectif d'enfants de moins de 6 ans, les écoles maternelles, les écoles primaires, les centres de loisirs et les établissements d'enseignement ou de formation professionnelle. Dans ces endroits, les méthodes de ventilation devront être évaluées, et la mesure du formaldéhyde, du benzène et du CO₂ devra être réalisée (décret n° 2012-14²¹). Le décret n° 2015-1000²² du 17 août 2015 a reporté au 1^{er} janvier 2018

¹⁸ Décret n° 2011-321 du 23 mars 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils. Repéré à <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2011/3/23/DEVL1101903D/jo>.

¹⁹ Règlement (CE) n° 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges, modifiant et abrogeant les directives 67/548/CEE et 1999/45/CE et modifiant le règlement (CE) n° 1907/2006 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). Repéré à <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32008R1272>.

²⁰ Décret n° 2011-1728 du 2 décembre 2011 relatif à la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public. Repéré à <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000024909128&categorieLien=id>.

²¹ Décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public. Repéré à <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000025105291&categorieLien=id>.

²² Décret n° 2015-1000 du 17 août 2015 relatif aux modalités de surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public. Repéré à <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000031052712&categorieLien=id>.

le début de la surveillance périodique de la QAI pour les établissements d'accueil collectif recevant des enfants de moins de 6 ans, les écoles maternelles et les écoles élémentaires. Tous les autres établissements devront s'être soumis à ces exigences d'ici le 1er janvier 2023 (Journal officiel de la République française, 2015). Pour plus d'informations sur ce programme, consultez la brochure explicative *Le nouveau dispositif réglementaire 2015-2023 : la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans les lieux accueillant des enfants* : <https://ile-de-france.ademe.fr/sites/default/files/files/DI/Air/qualite-air-ecoles.pdf>.

Enfin, des valeurs réglementaires ont été établies pour le formaldéhyde et le benzène (Anses, 2015c). Dans le premier cas, la valeur guide a été fixée à 30 µg/m³ pour une exposition de longue durée et devrait être abaissée à 10 µg/m³ au 1^{er} janvier 2023. Pour le benzène, la valeur guide a été fixée à 5 µg/m³ pour une exposition de longue durée et devait être abaissée à 2 µg/m³ au 1^{er} janvier 2016²³ (décret n° 2011-1727²⁴).

Allemagne et Belgique

Bien que n'allant pas aussi loin que la France dans leurs efforts de normalisation, l'Allemagne (AgBB, 2015) et la Belgique (Moniteur Belge, 2014) se sont aussi dotées de réglementations nationales obligeant les fabricants de produits de construction à respecter certains niveaux seuils d'émissions. Ainsi, la valeur maximale pour les émissions de formaldéhyde dans l'air intérieur est de 100 µg/m³ dans les 2 pays.

²³ Aucune information n'était disponible au moment de la publication quant à l'entrée en vigueur de cette modification à la date prévue.

²⁴ Décret n° 2011-1727 du 2 décembre 2011 relatif aux valeurs-guides pour l'air intérieur pour le formaldéhyde et le benzène, Repéré à <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000024909119&categorieLien=id>.

Annexe 5

Aperçu de programmes de certification de bâtiments

Aperçu de programmes de certifications de bâtiments

À noter que les informations sur les certifications (p. ex. exigences techniques, guide de l'utilisateur, standards) ne sont pas toujours accessibles gratuitement au grand public, ce pour quoi cet aperçu n'est pas exhaustif.

BOMA

D'abord connu sous le nom de Green Globes, puis Visez vert ou Visez vert plus (Go Green ou Go Green Plus), le programme BOMA BEST (Building Environmental Standards) de BOMA Canada est la plus récente version de ce programme qui s'adresse aux bâtiments déjà existants. Ce programme en ligne et volontaire conduit à une certification par une tierce partie, à la suite de la vérification d'un questionnaire et d'audits sur les lieux. Dans le domaine résidentiel, le programme ne s'applique qu'aux immeubles résidentiels à logements multiples. Parmi les conditions obligatoires à l'obtention de la certification BOMA BEST, celles relatives à la QAI incluent notamment de vérifier si une étude sur les matières dangereuses liées à la construction (matériaux contenant de l'amiante, des BPC, du plomb, du mercure) et un inventaire sur les produits chimiques d'usage (p. ex. les pesticides) ont été effectués au cours des trois dernières années ainsi que de valider que la direction de l'immeuble dispose d'un document permettant de répondre aux préoccupations des locataires/occupants concernant la QAI et qu'elle possède une politique écrite pour le choix des matériaux de construction ayant pour but de réduire les impacts sur l'environnement. Ainsi, cette certification semble être davantage une évaluation des meilleures pratiques mises en place par les propriétaires ou gestionnaires de bâtiments existants qu'une évaluation précise du choix des matériaux et des critères de construction (BOMA Canada, 2016).

Pour plus d'informations, consultez le www.bomacanada.ca/programs/program_index.html.

BREEAM

Développé en 1990 au Royaume-Uni, BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) serait le premier système d'évaluation et de certification de la performance environnementale des bâtiments. Les projets réalisés en dehors de l'Europe et du golfe Persique sont certifiés par BREEAM International. BREEAM s'applique à la fois aux nouvelles constructions, aux rénovations importantes, aux aménagements intérieurs, aux bâtiments existants et à l'aménagement des quartiers, tant pour les bâtiments commerciaux que résidentiels. Un chapitre des exigences techniques portant sur la santé et le bien-être contient plusieurs dispositions relatives aux enjeux environnementaux, dont certaines touchant spécifiquement la QAI (BREEAM, 2013). L'obtention de la certification BREEAM ne semble cependant pas exiger d'avoir obtenu de points dans la catégorie de la QAI (Srebric, 2010).

Pour plus d'informations, consultez le www.breeam.com/certification-training.

ENERGY STAR

Développée en 1992 par l'EPA et disponible au Canada, cette certification s'applique à la fois à différents types d'appareils ménagers et aux bâtiments (Voir Vert, 2015a). Le programme de base ne semble pas avoir d'exigences particulières en lien avec la QAI. Par contre, le Indoor Air Package d'ENERGY STAR permet aux promoteurs immobiliers de construire des maisons possédant des caractéristiques qui assurent une meilleure QAI²⁵. Ce programme, qui s'ajoute aux exigences régulières d'ENERGY STAR, vise à assurer un meilleur contrôle de l'humidité, des organismes

²⁵ Ce produit ne serait encore disponible qu'aux États-Unis.

nuisibles (p. ex. termites) et du radon, prévoit l'installation de systèmes de climatisation, de chauffage et de ventilation et vise à sélectionner des matériaux qui réduisent les émissions de contaminants dans le domicile (Ressources naturelles Canada, 2016; US EPA, 2005).

Pour plus d'informations, consultez le www.rncan.gc.ca/energie/produits/energystar/12520.

LEED

Le Green Building Council américain a développé le programme LEED en 1998 avec comme cible le marché américain (Srebric, 2010). Ce programme, désormais reconnu à l'échelle mondiale, regroupe les exigences concernant la QAI dans deux catégories, soit *Qualité des environnements intérieurs* et *Matériaux et ressources*. Il faut obtenir un minimum de six points dans la première catégorie et de deux points dans la seconde pour obtenir le premier niveau de certification. Les exigences obligatoires et optionnelles dans la première catégorie touchent notamment l'évacuation des gaz de combustion, le contrôle de l'humidité, la ventilation avec de l'air frais, l'extraction localisée (p. ex. dans la salle de bain), la filtration de l'air, le contrôle des contaminants, la protection contre le radon et contre les polluants du garage. Dans la catégorie *Matériaux et ressources*, les exigences concernant la QAI touchent principalement la sélection de produits et de matériaux à faible teneur en COV certifiés Green Seal ou GREENGUARD GOLD ou sans résine d'urée formaldéhyde ajoutée, et de tapis portant l'étiquette verte de l'Institut canadien du tapis et du Carpet and Rug Institute (GREENLABEL PLUS) (LEED Canada, 2009; Écohabitation, 2015).

Pour plus d'informations, consultez le www.cagbc.org/cbdca.

Living Building Challenge

Le Living Building Challenge serait l'un des plus rigoureux programmes de performance environnementale du secteur de la construction et du bâtiment (Conseil du bâtiment durable du Canada, 2016), notamment en raison de l'évaluation basée sur la vraie performance du projet. En effet, les projets doivent être opérationnels au moins 12 mois avant d'être admissibles à la certification, et ce, afin de vérifier de nombreux paramètres une fois que la construction est terminée et que les occupants ont intégré les lieux. Pour obtenir cette certification, les projets doivent se conformer à 20 impératifs qui varient en fonction du type de projet et qui sont répartis dans 7 catégories différentes. Les éléments ayant trait à la QAI se retrouvent dans les sections *Santé* et *Matériaux*. Les exigences incluent entre autres la conformité à la norme ASHRAE 62, la réalisation de tests de QAI avant et après 9 mois d'occupation du bâtiment, la conformité au CDPH Standard Method v1.1-2010 pour tous les produits d'intérieur ayant un potentiel d'émission de COV, et l'installation de systèmes d'évacuation pour les cuisines, les salles de bain et les aires dédiées à la conciergerie. De plus, les projets ne peuvent contenir aucun des matériaux ou produits chimiques présents sur la « Liste rouge », dont font partie l'amiante, le bisphénol A, le formaldéhyde ajouté, les phtalates, de même que les COV dans les enduits, les adhésifs et les scellants (International Living Future Institute, 2014b).

Pour plus d'informations, consultez le living-future.org/lbc.

Norme R-2000

Au Canada, la norme R-2000 est une norme volontaire administrée par Ressources naturelles Canada, qui fixe des exigences de rendement pour l'efficacité énergétique, la QAI et l'utilisation de produits et de matériaux respectueux de l'environnement. Un certain nombre d'éléments doivent être sélectionnés à l'intérieur de la catégorie *Qualité de l'air intérieur* pour satisfaire aux exigences de la norme. Ces éléments comprennent notamment la sélection et l'installation « des revêtements de sols en bois dur, des armoires et des peintures produisant peu d'émissions (de composés organiques peu volatils) ainsi que des adhésifs et des produits de finition sans solvant » (Ressources naturelles Canada, 2015a). Les maisons certifiées R-2000 répondraient davantage aux exigences liées à la QAI que les maisons certifiées ENERGY STAR seulement (Ressources naturelles Canada, 2015b).

Pour plus d'informations, consultez le www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/habitations/nouvelles-maisons/5090.

Novoclimat 2.0

Le programme Novoclimat 2.0 est offert à la fois aux maisons et aux petits bâtiments de type multilogement. Ce programme contient certaines exigences obligatoires relatives à la QAI et plusieurs mesures optionnelles qui sont énumérées à l'annexe A du guide des exigences techniques. Un pointage minimum doit être obtenu parmi ces exigences facultatives afin d'obtenir la certification. Parmi celles-ci, on retrouve principalement des mesures de réduction des contaminants de l'air intérieur par la sélection de produits à faibles émissions de COV, tels que déterminés par les certifications Green Seal, GREENGUARD ou ÉcoLogo. De plus, en ce qui concerne les planchers, une série de conditions doivent être remplies afin d'obtenir les crédits, dont : la présence de l'étiquette verte de l'Institut canadien du tapis et du Carpet and Rug Institute (CRI/CCI GREENLABEL ou GREENLABEL PLUS) sur les tapis utilisés; la conformité à la norme européenne E1, à la norme ANSI A208.1 ou à la norme CARB phase 1 ou 2 pour les sous-couches en panneaux constitués de produits dérivés du bois; l'absence de revêtement de plancher en vinyle (Novoclimat 2.0, 2014).

Pour plus d'informations, consultez le <http://www.efficaciteenergetique.gouv.qc.ca/mon-habitation/novoclimat/maisons/#.V4Oh7k1TFCp>.

SBTool

Le Sustainable Building Tool se veut un cadre générique pour l'évaluation de la performance de bâtiments et de projets, qui peut ensuite être adapté par les organisations nationales ou locales de chaque pays (iiSBE, 2009). La seule exigence concernant la QAI de ce programme de certification touche la concentration de CO₂ dans l'air intérieur. Les autres critères ne sont pas obligatoires et s'appliquent de manière générale à la ventilation, à l'humidité relative, au bruit et à la lumière. Il ne semble pas y avoir de critères concernant le choix de matériaux pour réduire les émissions de produits chimiques (Larsson, 2015).

Pour plus d'informations, consultez le www.iisbe.org/sbmethod.

Annexe 6

Étiquetage environnemental

Principes et composantes de l'étiquetage environnemental

Le premier programme officiel d'étiquetage environnemental pour des produits, Blue Angel, a vu le jour en 1978 en Allemagne (Liu et collab., 2012; Morin et collab., 2008; Bartenstein et Lavallée, 2003). Aujourd'hui, plus de 12 000 produits et services dans près de 1 500 entreprises portent cette étiquette environnementale reconnue en Europe et ailleurs dans le monde (The Blue Angel, [s.d.]). Le Canada aurait été le second pays à emboîter le pas, avec le lancement du programme Choix environnemental (aussi connu sous le nom d'ÉcoLogo) (Morin et collab., 2008; Charles et collab., 2005). De nos jours, l'Ecolabel Index (2016) indique qu'il existerait plus de 450 types d'étiquettes environnementales, couvrant 25 secteurs industriels et touchant 197 pays. Cet index, qui n'est pas exhaustif, montre le nombre important de certifications existantes à l'échelle internationale. Il importe donc de clarifier les différents principes de l'étiquetage environnemental et les composantes générales retrouvées sur les étiquettes ou les logos des différentes certifications.

L'étiquetage environnemental vise principalement à informer les consommateurs sur les caractéristiques et les avantages environnementaux de divers produits et matériaux offerts sur le marché, idéalement en fonction d'une analyse de leur cycle de vie. Il vise également à inciter les producteurs et les fournisseurs à réduire les impacts environnementaux de leurs produits et matériaux pour répondre à la demande des consommateurs (Morin et collab., 2008).

Pour qu'un programme d'étiquetage environnemental soit efficace et crédible, le Global Ecolabelling Network (2004) identifie plusieurs principes à respecter, dont la participation volontaire et la conformité à la réglementation environnementale existante. De plus, il importe d'assurer la comparabilité des produits étiquetés et non étiquetés en termes de qualité et de performance. Le maintien d'exigences techniques strictes basées sur des principes scientifiques reconnus est aussi d'une grande importance. Par ailleurs, les critères de certification devraient être développés afin de démontrer un certain leadership du produit comparativement à d'autres produits similaires, et doivent être crédibles, pertinents, réalisables, en plus d'être vérifiables ou mesurables. Enfin, le processus de certification devrait être indépendant, flexible, ouvert et responsable (Global Ecolabelling Network, 2004).

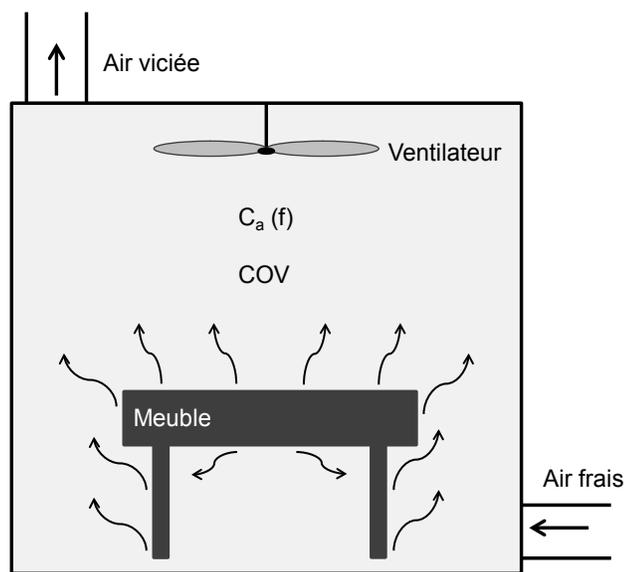
Pour établir un système d'étiquetage environnemental, il faut d'abord déterminer quels contaminants seront évalués lors des tests. Selon les différents systèmes d'étiquetage, le nombre de substances sélectionnées peut varier de quelques-unes à plus d'une centaine (Liu et collab., 2012). Celles-ci se regroupent généralement en 2 catégories, soit les substances cancérigènes et les COV. Ensuite, des valeurs seuils doivent être déterminées pour chacun des contaminants ciblés. Dans la majorité des cas, ces valeurs représentent des concentrations d'émissions par unité de surface ou taux d'émission du produit.

Il est à noter que la valeur seuil pour un même contaminant peut varier d'un système à un autre, et qu'il faut être prudent lors de la comparaison de ces valeurs. Ce phénomène est d'abord attribuable aux diverses exigences sur la durée des tests, celle-ci pouvant varier de 1 à 28 jours. De plus, les valeurs seuils calculées peuvent s'appliquer à différents types de produits, tels que les revêtements de sol, les produits de construction et de décoration, ou encore s'appliquer uniquement aux meubles de bureau. Enfin, certaines valeurs seuils peuvent être adaptées au milieu de travail plutôt qu'au milieu résidentiel (Liu et collab., 2012).

Une fois les contaminants ciblés et les valeurs seuils établies, il faut ensuite procéder aux tests sur les produits et matériaux afin d'obtenir les concentrations émises par ceux-ci. La méthode la plus couramment utilisée est la méthode d'essai en chambre (voir figure 1), bien que plusieurs autres

techniques soient disponibles (Marc, Namiesnik et Zabiegała, 2014; Yu et Crump, 2003; Xiong, Zhang et Huang, 2011). Cette méthode consiste à placer le produit dans une chambre dans laquelle la température et l'humidité sont constantes (généralement entre 20 et 25 °C et entre 30 et 50 % d'humidité relative [Kolarik et collab., 2011]), puis à alimenter la chambre avec de l'air propre à débit constant. L'air qui est alors mélangé aux émissions de COV provenant de l'échantillon est ensuite évacué par une sortie d'air dans laquelle les concentrations de COV peuvent être mesurées (Liu et collab., 2012). L'objectif du test d'émission est donc de déterminer les concentrations de COV libérées d'un échantillon donné, pour un temps donné, et dans des conditions contrôlées. En comparant les résultats de ces tests avec les valeurs seuils établies préalablement, il est ensuite possible de déterminer si un produit ou un matériau peut obtenir l'étiquette environnementale.

Figure 1 Schéma d'un essai en chambre



Traduit de Liu et collab., 2012.

Les nombreux systèmes d'étiquetage environnemental n'ont pas tous le même statut juridique. En général, la plupart d'entre eux sont volontaires, la demande des consommateurs pour des matériaux plus sains ou à faibles émissions étant le principal incitatif pour obtenir une certification. Alors que certains systèmes sont promus par des gouvernements (p. ex. Blue Angel), d'autres sont soutenus par des chaînes de détaillants (p. ex. Natureplus), par des associations industrielles (p. ex. Business + Institutional Furniture Manufacturers Association), ou encore par des organisations indépendantes (p. ex. GREENGUARD) (Liu et collab., 2012).

Finalement, la décision de certifier ou non les produits et matériaux devra être prise. Il existe 3 manières de certifier les produits : 1) l'utilisation de critères précis pour certifier ou non un produit; 2) la classification des produits et matériaux en différentes classes selon les résultats des tests d'émissions ; 3) la détermination des délais après l'installation dudit produit pour atteindre la concentration acceptable d'un contaminant dans l'air intérieur (Liu et collab., 2012).

Types d'étiquetage environnemental

L'organisation internationale de normalisation (ISO) (<http://www.iso.org/iso/fr>) a développé plusieurs standards afin d'encadrer les étiquettes et les déclarations environnementales et d'en assurer la fiabilité. Les normes ISO 14024, 14021 et 14025 définissent notamment les principes et méthodes pour la mise au point de programmes d'étiquetage environnemental de type I, II et III. Les trois types d'étiquetages sont présentés au tableau 1.

Tableau 1 Étiquetage environnemental de type I, II et III de l'ISO

Types Caractéristiques de la norme	TYPE I	TYPE II	TYPE III
	ISO 14024	ISO 14021	ISO 14025
Objectif	<ul style="list-style-type: none"> Établir des principes et des méthodes pour la mise au point de programmes d'étiquetage environnemental « classiques ». 	<ul style="list-style-type: none"> Harmoniser les autodéclarations environnementales afin de fournir des informations précises et vérifiables aux consommateurs, et de prévenir les déclarations douteuses. 	<ul style="list-style-type: none"> Établir des principes et spécifier des modes opératoires pour communiquer des informations environnementales quantifiées sur les produits, basées sur les données relatives au cycle de vie; Présenter la performance environnementale d'un produit par le biais d'un « écoprofil » afin de permettre des comparaisons objectives entre produits remplissant la même fonction (utilisé surtout dans le secteur industriel).
Volontaire	Oui	Autodéclaration	Oui
Considération du cycle de vie	Oui	Non	Oui
Vérification par une tierce partie	Oui	Préférable, mais non obligatoire	Oui (lorsque les données sont destinées aux consommateurs)
Nombre de caractéristiques du produit évaluées	Multiples	Souvent une seule	Multiples
Exemples	<ul style="list-style-type: none"> Blue Angel; Programme Choix environnemental (ÉcoLogo). 	<ul style="list-style-type: none"> Exemple d'une autodéclaration douteuse : « ami de l'environnement »; Le symbole de la boucle de Möbius, lorsqu'utilisé correctement, doit signifier « recyclable » ou « contenu recyclé », et être utilisé selon les critères de la norme ISO 14021. 	<ul style="list-style-type: none"> Déclarations environnementales de produits (DEP).

Source : ISO, [s.d.]; Morin et collab., 2008; Voir Vert, 2015b; ICC-ES, 2015.

L'étiquetage environnemental de type I est donc celui qui fournit aux consommateurs les informations les plus utiles afin d'effectuer des choix éclairés quant aux produits pouvant être installés dans les habitations et qui pourront contribuer à améliorer la QAI.

Annexe 7

**Aperçu des systèmes d'étiquetage environnemental
de produits et matériaux fréquemment rencontrés**

Les étiquettes environnementales présentées au tableau 1 sont les plus souvent mentionnées dans les systèmes de certification de bâtiments (p. ex. LEED, Novoclimat 2.0).

Tableau 1 Principales étiquettes environnementales associées aux certifications de bâtiments

Certification	Aspects touchant à la QAI	Aperçu des produits concernés	Logo
ÉcoLogo (1988)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Certification de plusieurs produits et matériaux en lien avec leurs émissions de COV. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Matériaux de construction, revêtements de planchers, produits chimiques et de nettoyage, etc. 	
FloorScore (2005)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Évaluation et certification de la conformité des revêtements et adhésifs de planchers aux exigences touchant la QAI et les émissions de COV. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Planchers de vinyle, linoléum, caoutchouc, céramique, bois, laminé, etc. 	
Green Label/Green Label Plus (Carpet and Rug Institute) (1992)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Identification des tapis, sous-tapis et adhésifs ayant de très basses émissions de COV (et autres contaminants chimiques) afin d'améliorer la QAI. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Tapis, sous-tapis et adhésifs. 	
Green Seal (1989)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Réduction de l'utilisation de substances dangereuses et contenu à faible émission de COV. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Matériaux de construction, peintures, adhésifs, teintures et scellants, produits domestiques et de nettoyage, etc. 	
GREENGUARD (2000)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Évaluation des émissions provenant de divers types de produits (pour plusieurs contaminants de la QAI, tels que les aldéhydes totaux et les COV) par rapport aux limites établies. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Matériaux de construction, de bois, peintures et enduits, adhésifs et produits d'étanchéité, isolation, revêtements de planchers, systèmes de plafond, revêtements muraux, produits de nettoyage et d'entretien, matelas, mobilier pour enfants, etc. 	
Indoor Advantage et Indoor Advantage Gold (2007)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Vérification et certification des produits concernés au regard des standards de la QAI relatifs aux émissions pouvant être néfastes pour l'humain et l'environnement (émissions de COV). 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mobilier, sièges et systèmes de bureau, adhésifs et produits d'étanchéité, bois composite, isolants, revêtements muraux. 	

Annexe 8

Aperçu de l'efficacité de la filtration de l'air en milieu résidentiel

Tableau 1 Résultats d'études récentes portant sur l'efficacité de dispositifs de filtration au regard de divers contaminants de l'air intérieur

Études	Contaminants étudiés	Filtres testés	Résultats
Noh et Hwang, 2010	PM ₁₀	MERV 11	<ul style="list-style-type: none"> Recommandation de l'utilisation de filtres MERV 11 (ou plus performants) pour atténuer les PM de source extérieure.
Liu et collab., 2015	PM _{2,5}	Filtre transparent de polyacrylonitrile appliqué aux fenêtres	<ul style="list-style-type: none"> Atténuation de ~99 % sous des conditions où la concentration extérieure > 250 µg/m³.
Brown et collab., 2014	Particules allergènes	MERV 12	<ul style="list-style-type: none"> Réduction des déclencheurs de l'asthme de plus de 50 %.
Candiani, Del Curto et Cigada, 2012	PM	Carton ondulé et tissu antistatique plissé	<ul style="list-style-type: none"> Produit alternatif efficace au filtre HEPA.
Scheepers et collab., 2012	PM _{2,5} et PM ₁₀	HEPA	<ul style="list-style-type: none"> Atténuation des concentrations des PM₁₀ (70-87 %) et des PM_{2,5} (80-89 %) des milieux inoccupés. L'occupation des milieux intérieurs engendre une importante diminution de l'efficacité de ces systèmes.
MacIntosh et collab., 2008	PM _{2,5}	HEPA; système de ventilation centralisé	<ul style="list-style-type: none"> Réduction des PM d'origines intérieure et extérieure de façon significative.
Barn et collab., 2007	PM _{2,5} (incendies de forêt)	HEPA, système portatif	<ul style="list-style-type: none"> Atténuation de 55 % à 65 % des PM de source extérieure.
Xu et collab., 2010	PM	HEPA, système portatif	<ul style="list-style-type: none"> Réduction des concentrations moyennes des PM (72 %) et des COV (59 %); Réduction des symptômes chez les personnes asthmatiques.
Hospodsky et collab., 2012	PM ₁₀ (squames et bactéries)	HEPA, système portable	<ul style="list-style-type: none"> Réduction des concentrations de PM de source humaine et des bactéries associées.
Green et collab., 1999	Allergènes canins	HEPA	<ul style="list-style-type: none"> Atténuation des concentrations de 90 % en 24 h.
Cheng, Lu et Chen, 1998	Spores fongiques	HEPA	<ul style="list-style-type: none"> Atténuation des concentrations de 80 % en 24 h.
Batterman, Godwin et Jia, 2005	Fumée de combustion	HEPA	<ul style="list-style-type: none"> Atténuation des concentrations de 30-70 % en 2 mois.
Bräuner et collab., 2008	PM _{2,5} (circulation routière)	HEPA	<ul style="list-style-type: none"> Atténuation des concentrations de ~40 % en 24 h.
Allen et collab., 2011	PM _{2,5} (fumée de combustion du bois)	HEPA	<ul style="list-style-type: none"> Atténuation des concentrations de ~60 % en 7 jours.

Centre d'expertise
et de référence

www.inspq.qc.ca