



Comité canadien sur la  
qualité de l'air intérieur

# Guide sur la qualité de l'air intérieur

## Module 14

### Quality de l'environnement intérieur (QEI) et la productivité dans les lieux de travail/ l'accomplissement dans les écoles

2020

# Comité canadien sur la qualité de l'air intérieur (CCQAI)

## Avertissement

Les guides et autres documents produits par le Comité canadien sur la qualité de l'air intérieur (CCQAI) sont des compilations de données existantes tirées de nombreuses sources. Si le CCQAI s'efforce dans toute la mesure du possible de vérifier l'exactitude de ces données, il ne peut pas garantir la pleine exactitude de l'information publiée dans ces documents.

À l'exception des employés des ministères et des organismes du gouvernement du Canada, les membres du Comité sont nommés pour leurs champs d'intérêt personnels et leurs compétences plutôt que comme représentants de groupes ou d'associations spécifiques. Les points de vue exprimés dans les documents sont le reflet du jugement collectif du Comité, et non de celui des membres ou des organisations dont ils sont issus. Les références à d'autres sources et organisations, et les liens vers celles-ci visent à servir de renseignements supplémentaires, et devraient être utilisés avec prudence. Le CCQAI n'appuie en aucune façon ces organisations, l'information qu'elles diffusent ou les produits qu'elles recommandent.

La qualité de l'air intérieur est une question très complexe, et il existe actuellement un écart important entre la connaissance des effets de la QAI sur la santé des occupants, et l'efficacité de diverses technologies et solutions en matière de qualité de l'air intérieur. Les utilisateurs sont invités à faire preuve de discernement.

## Préambule

Le but du CCQAI est, en définitive, d'améliorer la qualité de l'air intérieur pour tous les Canadiens dans tous les types de bâtiments. Le CCQAI a décidé de se concentrer d'abord sur les bâtiments que les Canadiens fréquentent hors de leur domicile pour travailler, apprendre, faire des courses, se divertir, etc. Dans l'ensemble, ces bâtiments sont desservis par des équipements de chauffage, ventilation et conditionnement d'air centraux relativement complexes exploités et gérés par des personnes averties. Le tableau ci-dessous donne des exemples de tels bâtiments selon la classification du *Code national du bâtiment du Canada* (CNB). Les documents publiés par le CCQAI sont rédigés principalement à l'intention des gestionnaires et des exploitants de bâtiments, mais les renseignements qu'ils renferment peuvent être utiles à tous ceux qui cherchent à comprendre de façon générale les questions liées à la qualité de l'air intérieur.

Le CCQAI reconnaît l'importance de compréhension comment l'environnement en salle peut affecter la santé et la productivité dans les bâtiments aussi bien que l'accomplissement dans les écoles et ce qui peut être fait pour créer des environnements en salle plus en bonne santé. Le module 14 – Qualité de l'environnement intérieur (QEI) et la productivité dans les lieux de travail/l'accomplissement dans les écoles, est une réponse à ce besoin important.

Le CCQAI veut être saisi de l'opinion des utilisateurs des documents et de leurs suggestions pour l'élaboration de nouveau matériel. Vous êtes invités à communiquer avec le CCQAI à <https://iaqresource.ca/contact-us/> ou à vous inscrire sur le site internet à [www.IAQResource.ca](http://www.IAQResource.ca).

<b>Classification du CNB</b>	<b>Exemples</b>
Groupe A, Division 1	Théâtres, cinémas et autres installations pour les arts du spectacle
Groupe A, Division 2	Galeries d'art, musées, bibliothèques, bâtiments éducatifs (écoles, collèges et universités), gymnases, gares ferroviaires et aéroports
Groupe A, Division 3	Arénas et piscines
Groupe C	Appartements, hôtels, résidences d'étudiants
Groupe D	Bureaux, y compris les cabinets médicaux et dentaires
Groupe E	Magasins à rayons, supermarchés, boutiques, espace pour le commerce de détail

### **Reproduction non commerciale**

L'information sur le présent site est affichée dans le but de la rendre facilement accessible à des fins personnelles et publiques non commerciales et peut être reproduite en tout ou en partie et par tous les procédés. Nous demandons seulement que :

- les utilisateurs prennent les mesures voulues pour vérifier l'exactitude du matériel reproduit;
- le Comité canadien sur la qualité de l'air intérieur soit reconnu comme étant la source; et
- le matériel reproduit n'est pas présenté comme une version officielle réalisée en collaboration ou avec l'appui du CCQAI.

### **Reproduction commerciale**

Il est interdit de reproduire des exemplaires multiples du matériel sur le présent site, en tout ou en partie, à des fins de distribution commerciale.

## Table des matières

1. Objet du module.....	1
2. Introduction.....	1
2.1. Qu'est-ce que la qualité de l'environnement intérieur (QEI)?.....	2
2.2. Avantages de l'optimisation de la QEI.....	2
2.2.1. Abordabilité de la QEI par rapport à la productivité des étudiants et des employés 2	
2.2.2. Options pour la QEI.....	3
2.2.3. Réponses aux crises climatiques.....	4
2.3. Comment utiliser ce guide.....	4
3. Qualité de l'environnement intérieur (QEI) et productivité.....	5
3.1. Qualité de l'air intérieur, dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ) et autres contaminants.....	5
3.1.1. Ventilation pour la qualité de l'air.....	7
3.1.2. Température et humidité relative.....	10
3.1.3. Rayonnement infrarouge.....	11
3.2. Confort, productivité et adaptation.....	11
3.3. Éclairage.....	12
3.4. Acoustique.....	14
3.5. Conception, ergonomie.....	16
3.6. Résilience, environnement et esthétique.....	17
3.7. Eau.....	18
3.8. Entretien et propreté.....	19
3.9. Interactions entre les facteurs de la QEI.....	19
4. Enjeux en évolution.....	20
4.1. Bâtiments à consommation énergétique nette zéro.....	20
4.2. Interconnectivité électronique.....	21
4.3. Changements de paradigme en milieu de travail et en classe.....	24
5. Discussion et conclusions.....	25
6. Références.....	28
7. Ressources : Qualité environnementale des bâtiments - Organisations et groupes de recherche, et domaines des lignes directrices.....	43

## 1. Objet du module

Le présent guide vise à informer les concepteurs de bâtiments, les gestionnaires, les exploitants, les autorités scolaires, les employeurs, les occupants et les visiteurs au sujet de la qualité de l'environnement intérieur (QEI) en ce qui a trait au bien-être, aux résultats des élèves dans les milieux scolaires et à la productivité des travailleurs.

La QEI est un concept général qui comprend et complète la qualité de l'air intérieur. Les initiatives dans les « bâtiments écologiques », (présenté sous forme de tableau dans la Section 7) ont l'intention de réduire l'utilisation d'énergie avec un but de nette zéro, en optimisant la qualité aérienne, le confort thermal, la lumière, l'acoustique et d'autres facteurs fonctionnels et esthétiques. Les modules précédents du Comité canadien sur la qualité de l'air intérieur (CCQAI) traitent de nombreux sujets liés à la qualité de l'air intérieur. On peut y accéder à l'adresse suivante : <https://iaqresource.ca/en/home-iaq-resource/>

Ce guide est rédigé dans le contexte ci-après : 1) les défis croissants découlant des conditions météorologiques extrêmes, alors que les concepteurs, les gestionnaires des opérations et d'autres intervenants visent à améliorer à la fois l'efficacité énergétique et la résilience des bâtiments; 2) les progrès rapides de la technologie et des pratiques pour surveiller et contrôler les opérations des bâtiments et la QEI, et 3) des adaptations en réponse à la pandémie de la COVID-19 de 2020, et pour réduire la contagion dans l'environnement bâti.

Les efforts de lutte contre les changements climatiques ne doivent pas répéter les conséquences malheureuses des réductions de la ventilation en réponse à la crise du pétrole du Golfe dans les années 1980, ce qui entraîne des symptômes de « bâtiments malades » ([Module 13, Aborder la question de la sensibilité aux produits chimiques](#)<sup>1</sup>).

Ce module examine un large éventail d'études sur les facteurs qui influent sur la résilience et l'efficacité à mesure qu'ils se recoupent avec la QEI et, en retour, sur les effets de la QEI sur le bien-être, le rendement et la productivité dans les établissements d'enseignement et les milieux de travail.

## 2. Introduction

Les bâtiments, y compris les écoles et les bureaux, présentent des occasions de réduire les gaz à effet de serre (GES) et la consommation d'énergie à chaque étape de la planification, de la conception, de la construction et de la mise en service, pour les rénovations et les nouvelles constructions. Dans les bâtiments existants, la majorité des GES sont le résultat des activités continues pour répondre aux attentes et aux besoins des occupants, ainsi que les activités des occupants. Les détails de la conception, de l'équipement et des opérations de CVCA, des appareils et de l'entretien peuvent également avoir une incidence sur la probabilité de contagion. La qualité de

l'environnement intérieur, qui est le résultat direct du continuum depuis le concept et la conception globale jusqu'aux opérations et aux détails des espaces intérieurs, peut soutenir ou diminuer les réussites des étudiants et des travailleurs.

## **2.1. Qu'est-ce que la qualité de l'environnement intérieur (QEI)?**

La QEI comporte de multiples facettes, allant au-delà de la qualité de l'air pour inclure le confort thermique, l'acoustique, l'ergonomie, les facteurs électromagnétiques (éclairage, infrarouge dans la mesure où il affecte le confort thermique et les communications sans fil), les technologies, les services et les contrôles, l'approvisionnement en eau et l'élimination des eaux, ainsi que les éléments subjectifs comme la conception et l'esthétique.

Il est impossible, dans les limites de ce module, de couvrir tous les détails de la QEI. Ce module donne un aperçu, et plus de détails sont disponibles dans les nombreuses références, ressources et liens vers les organisations de premier plan qui figurent en annexe (sections 6 et 7).

## **2.2. Avantages de l'optimisation de la QEI**

Les étudiants et les travailleurs connaissent plus de succès dans des environnements de grande qualité,<sup>2</sup> de sorte que le présent guide examine précisément les moyens et les avantages d'optimiser les éléments de la QEI dans les « bâtiments écologiques » pour le rendement et la santé (y compris la santé mentale) des occupants des établissements d'enseignement<sup>3,4,5,6,7</sup> et des bureaux.<sup>5,6,8,9</sup> Les étudiants et les employés qui étudient et travaillent dans des installations dotées d'une QEI supérieure ont des temps de réaction plus courts et une plus grande précision, et connaissent également moins de maladies, d'absentéisme et de roulement du personnel. Les interactions et la collaboration sociales sont également de meilleure qualité.<sup>10</sup>

### **2.2.1. Abordabilité de la QEI par rapport à la productivité des étudiants et des employés**

Les conseils scolaires, les gouvernements et les entreprises fonctionnent habituellement avec de nombreuses demandes et des ressources limitées, et il se peut qu'on ne reconnaisse pas que la valeur des salaires, de l'assiduité et de la productivité l'emportent largement sur les coûts financiers de la ventilation, du chauffage et de la climatisation.<sup>3</sup> Le bien-être et la productivité des étudiants et des travailleurs peuvent être absents des bilans des établissements. En effet, la santé publique devrait être considérée comme une raison suffisante pour maintenir une ventilation, un chauffage et un refroidissement optimaux des environnements intérieurs occupés.

Un cadre d'établissement des coûts de la ventilation axé sur les résultats pour évaluer de façon exhaustive le rendement, la santé et les répercussions sur l'énergie a été utilisé pour examiner une base de données sur les locaux à bureaux commerciaux aux États-Unis.<sup>11</sup> La



rentabilité a été optimisée en minimisant les pertes (p. ex., les coûts de chauffage et de ventilation) tout en maximisant la rentabilité (p. ex., rendement au travail et absentéisme plus faible) dans le contexte des paramètres de la qualité de l'air connus pour avoir une incidence sur la santé (ozone et particules).<sup>11</sup> En utilisant des valeurs moyennes dans le modèle, les profits maximums fondés sur la santé des occupants ont été réalisés avec des taux de ventilation très élevés dépassant 45 L/s par personne, tandis que le modèle le plus prudent indiquait un taux optimal à 17 L/s. C'est deux fois plus que la recommandation de la norme 62.1 de l'American Society for Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) de 8,5 L/s par personne.<sup>11</sup> En fin de compte, les résultats axés sur la santé (bien-être, absentéisme, apprentissage et travail) offrent une valeur considérable par rapport aux coûts de l'énergie. La ventilation est abordée plus en détail à la section 3.1.1.

La performance environnementale et la résilience des bâtiments affectent la santé mentale de façon tangible et intangible. Les contaminants intérieurs et les facteurs de stress nocifs peuvent toucher directement le cerveau et le système nerveux, sans compter que les personnes peuvent également souffrir d'« écoanxiété » et vouloir étudier, travailler et vivre dans des espaces qui reflètent leurs priorités et leurs valeurs clés.<sup>10</sup>

### 2.2.2. Options pour la QEI

En faisant face aux impératifs de climat, l'utilisation d'énergie est le haut d'esprit. De nombreuses normes « écologiques » pour la conception, la construction et l'exploitation des bâtiments (voir la section 7) offrent une multitude d'options pour réduire la perte de chaleur. Ces facteurs peuvent être pris en compte tout au long du concept, du choix de l'emplacement (p. ex., optimisation de l'apport solaire en hiver), de la conception (p. ex., objectif net zéro, et choix de matériaux durables, à faible empreinte carbone et à haute teneur en carbone), de la construction. (p. ex., isolation améliorée, masse thermique élevée, méthodes pour éviter les ponts thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment et joints à vapeur méticuleux), installation et mise en service du bâtiment fini (p. ex., stores et rideaux pour réduire la perte de chaleur par les fenêtres pendant l'hiver et pour réduire le gain d'énergie solaire et le réchauffement pendant l'été), fonctionnement des systèmes du bâtiment et entretien.

QEI est affecté par et plus large que, l'efficacité énergétique. La comparaison des normes écologiques peut aider à déterminer les options et à choisir les priorités (voir les ressources à la section 7). Par exemple, les avantages des bâtiments écologiques sur le plan cognitif et du bien-être (p. ex., grâce à la lumière naturelle, aux vues de la nature et aux éléments de la végétation, en plus de l'efficacité du chauffage et de la climatisation) dépassent ceux des bâtiments à haut rendement. (C.-à-d. écoénergétique avec une qualité de l'air supérieure, et autres caractéristiques). Il a été suggéré que l'ampleur, la complexité et l'interdépendance des aspects de la conception et de l'exploitation qui contribuent au rendement du bâtiment soient considérées comme de la « bâtinomique », à l'instar des études sur les déterminants complexes de la santé comme la génomique.<sup>6</sup> En effet, un bâtiment supérieur sur le plan environnemental en termes d'efficacité énergétique et de QEI, conformément aux normes internationales en matière de bâtiments

écologiques, peut représenter un avantage concurrentiel en attirant et en maintenant en poste des employés de grande qualité et une clientèle privilégiée; en plus d'optimiser le rendement des bâtiments et la productivité des occupants.<sup>12,13</sup>

### 2.2.3. Réponses aux crises climatiques

Les crises climatiques provoquent une révolution rapide dans tous les aspects des bâtiments, de la conception à la rénovation en passant par l'exploitation. L'ASHRAE affirme que « le changement climatique est le défi environnemental le plus redoutable que la société ait jamais eu à relever. Il existe des possibilités... d'offrir des solutions pour réduire les émissions de GES ». <sup>14</sup> Des occasions se présentent pendant la conception et la construction, l'entretien, la rénovation et le remplacement et la modernisation de l'équipement, afin d'améliorer la résilience et de moderniser les systèmes et les contrôles du bâtiment. En tirant parti de ces possibilités, on peut réaliser des économies grâce à des gains d'efficacité et à des caractéristiques de conception qui facilitent l'entretien et évitent les problèmes dans les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC). <sup>6,15</sup>

Les efforts de lutte contre les changements climatiques ne doivent pas répéter les conséquences malheureuses des réductions de la ventilation en réponse à la crise du pétrole du Golfe dans les années 1980, y compris l'humidité, la mauvaise qualité de l'air intérieur et les symptômes de « bâtiments malades » ([Module 13, Aborder la question de la sensibilité aux produits chimiques](#) ).

De multiples stratégies pour les bâtiments et les occupants seront nécessaires pour s'adapter aux changements climatiques. La recherche internationale sur la performance humaine dans différentes conditions environnementales a suscité de l'intérêt pour les capacités d'adaptation des personnes et l'élargissement des plages acceptables d'utilisation thermique et énergétique pour la QEI. Cela exige un réexamen des conditions physiques qui favorisent l'excellence en matière de productivité au travail et de réussite scolaire.

## 2.3. Comment utiliser ce guide

Ce guide donne un aperçu des considérations de la QEI pour améliorer la performance environnementale ainsi que la productivité et le bien-être des personnes dans les établissements d'enseignement et les lieux de travail. Le guide présente des options progressistes pour les propriétaires d'immeubles, les gestionnaires d'installations, les exploitants d'immeubles, les occupants, les entreprises, les fournisseurs de services d'éducation et les gouvernements, ainsi que pour les architectes et les concepteurs, dans le contexte de nombreuses priorités axées sur l'efficacité énergétique, la résilience et la santé des infrastructures.



### 3. Qualité de l'environnement intérieur (QEI) et productivité

La QEI comprend la qualité de l'air intérieur ainsi que de nombreux facteurs abordés dans cette section, y compris l'éclairage, l'acoustique, l'eau, l'ergonomie, l'esthétique et les facteurs liés au site, et la technologie de l'information.

L'optimisation de la qualité de l'air intérieur a été abordée en grande partie dans les modules précédents du CCQAI, y compris la conception, la surveillance, l'entretien, les rénovations et la collaboration entre les occupants.<sup>16</sup> [Module 13, Aborder la question de la sensibilité aux produits chimiques.](#)<sup>1</sup> conclut : « que l'amélioration de la QAI par des moyens qui tiendraient compte de la sensibilité aux produits chimiques peut améliorer la santé et la productivité des autres personnes dans l'environnement partagé,<sup>9</sup> aidant ainsi à protéger les personnes les plus vulnérables (p. ex. fœtus en développement et enfant)<sup>17,18,19</sup> ainsi qu'à contribuer à des objectifs environnementaux plus vastes comme la réduction de la pollution et des gaz à effet de serre.<sup>20</sup> »

Dans la présente section, on fait des distinctions entre les mesures qui peuvent être facilement prises dans les établissements d'enseignement et les lieux de travail, et le tableau plus complet. Par exemple :

- la qualité réelle de l'air, y compris tous les produits chimiques, n'est que partiellement représentée par les marqueurs mesurés (habituellement le CO<sub>2</sub> ou les composés organiques volatils totaux [COVT]);
- la température de l'air, l'humidité et la vitesse ne permettent pas à elles seules de prévoir le confort thermique, car les occupants peuvent porter des vêtements appropriés à la température ou être exposés à une chaleur rayonnante;
- le confort perçu ou la qualité de l'environnement peuvent ne pas toujours prédire le rendement des élèves ou des travailleurs.

De nombreux éléments de confort (p. ex., la qualité de l'air intérieur perçue par rapport à la qualité réelle de l'air intérieur, le bruit, l'éclairage, l'esthétique, les commodités) interagissent avec les préférences et les priorités des personnes pour déterminer leur satisfaction ultime. Enfin, les nuances du confort et de l'acceptabilité des paramètres de la QEI, par rapport à la productivité à l'école ou au travail, sont résumées.

#### 3.1. Qualité de l'air intérieur, dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et autres contaminants

Une mauvaise qualité de l'air intérieur peut se produire lorsque la ventilation naturelle dans les vieux bâtiments « qui fuient » est réduite par des rénovations qui resserrent l'enveloppe du bâtiment, surtout si la ventilation mécanique est également limitée afin de réduire l'énergie utilisée pour le chauffage, la climatisation et la manipulation de l'air. Certains bâtiments plus anciens, comme les écoles utilisant des radiateurs, peuvent avoir une ventilation et une climatisation limitées.

L'optimisation de la qualité de l'air intérieur d'un bâtiment exige des efforts pour minimiser et atténuer les contaminants provenant de la structure et du contenu du

bâtiment. Par exemple, les choix de conception, de construction et de rénovation doivent viser à réduire au minimum le dégagement gazeux des matériaux, l'infiltration d'eau et l'humidité à l'intérieur. En exploitation, les bâtiments doivent capter et évacuer à la source les émissions provenant des procédés et de l'équipement comme les imprimantes ou dans les cuisines, et les produits exempts de composés chimiques organiques volatils (sans COV) doivent être utilisés pour le nettoyage et l'entretien.

Les produits chimiques provenant des occupants et des visiteurs sont inévitables. Nous respirons tous de l'oxygène et expirons du CO<sub>2</sub>, qui s'accumule dans l'air intérieur. Le CO<sub>2</sub> est également un marqueur fiable pour d'autres bioeffluents tels que les produits chimiques présents dans l'haleine et les odeurs corporelles.<sup>2,21</sup> Dans un lieu donné, les niveaux de CO<sub>2</sub> peuvent également refléter des COV potentiellement évitables provenant de l'utilisation de parfums par des personnes et de produits chimiques provenant de produits personnels et d'habitudes personnelles (p. ex., résidus de fumée); toutefois, le CO<sub>2</sub> n'est pas lié aux dégagements gazeux des éléments du bâtiment (p. ex., structure, tapis, ameublement, etc.) et des activités (p. ex., cuisson, photocopie, etc.). Les produits chimiques provenant du bâtiment et de l'entretien sont néanmoins importants; par exemple, les enfants assis sur des tapis et respirants de la poussière près du sol sont à la fois plus exposés et plus vulnérables aux effets nocifs des produits chimiques dans les matériaux de construction, l'ameublement, les nettoyeurs et les pesticides utilisés à l'intérieur.<sup>1,22,23,24,25,26</sup>

L'optimisation de la qualité de l'air intérieur en portant attention à ces types de détails est abordée dans le [Module 13, Aborder la question de la sensibilité aux produits chimiques](#).<sup>1</sup>

Avec un taux d'occupation élevé dans les espaces clos et/ou une alimentation en air extérieur insuffisante, les conditions de CO<sub>2</sub> intérieur élevé (plus les bioeffluents non mesurés et d'autres contaminants) peuvent engendrer de la fatigue et nuire à la pensée critique et à la cognition.<sup>27,28</sup> Dans plusieurs études, les niveaux de CO<sub>2</sub> étaient corrélés avec les performances des tâches cognitives et décisionnelles,<sup>8</sup> tandis que l'ajout expérimental de CO<sub>2</sub> dans l'alimentation en air extérieur a révélé une altération directe des compétences pour le travail de bureau associé au CO<sub>2</sub> lui-même, en dehors des autres COV.<sup>9,27</sup>

Les niveaux de CO<sub>2</sub> peuvent être utilisés dans les modèles mathématiques de l'occupation, de la ventilation et du volume de la pièce comme substitut de nombreux contaminants atmosphériques liés aux occupants.<sup>29</sup> Les modèles relient les réponses des occupants dans les situations d'essai à la qualité de l'air et aux taux de ventilation connexes.

Les chercheurs cherchent également à distinguer les effets du CO<sub>2</sub>, d'autres polluants aériens bioeffluent non mesurés, qui augmentent avec CO<sub>2</sub>. Un examen multidimensionnel de dizaines d'études a fait état des mécanismes physiologiques et des effets du CO<sub>2</sub> inhalé, ainsi que des effets de l'air intérieur auxquels on a ajouté divers niveaux de CO<sub>2</sub>.<sup>30</sup> On a observé que les changements cardiovasculaires augmentaient entre 500 ppm et 5 000 ppm, et que les « symptômes liés à la construction » (p. ex., toux

sèche, irritation oculaire, maux de tête, fatigue, étourdissements) dépassaient les 700 ppm.<sup>31</sup> Les enfants dans les garderies et les écoles ont également souffert de toux sèche, de rhinite (nez qui coule) et de respiration sifflante. L'exposition à court terme à 1 000 ppm de CO<sub>2</sub> a entraîné une baisse de la performance psychomotrice dans la recherche avec de jeunes adultes exposés à une ventilation constante, les niveaux de CO<sub>2</sub> étant manipulés par l'ajout de gaz ultrapur. Les auteurs ont conclu qu'il est urgent de s'attaquer au CO<sub>2</sub> atmosphérique parce qu'en plus des catastrophes climatiques, les tendances actuelles peuvent entraîner des concentrations ambiantes à l'intérieur qui sont nuisibles en cas d'exposition chronique, même avec des taux de ventilation qui seraient suffisants pour diluer d'autres bioeffluents.<sup>30</sup> Le CO<sub>2</sub> atmosphérique a dépassé les 400 ppm en 2015 et continue de grimper.<sup>31</sup>

Les études expérimentales à court terme menées auprès de jeunes étudiants du collège, qui sont incluses dans l'examen approfondi ci-dessus, montrent que les effets physiologiques liés uniquement au CO<sub>2</sub> ne se sont pas traduits par une baisse de productivité.<sup>32,33</sup> Une exposition pendant plus de 2,5 heures à de l'air propre contenant de très faibles concentrations de bioeffluents, complétée par du CO<sub>2</sub> pur jusqu'à 3 000 ppm ou 5 000 ppm (limite d'exposition professionnelle), produit une augmentation de la tension artérielle et des biomarqueurs du stress dans le sang et la salive, mais provoque peu d'effets à court terme sur les résultats des tests cognitifs et des tâches ressemblant à du travail de bureau. La diminution de la productivité et les réactions physiologiques négatives au cours de différentes sessions avec un échange d'air plus faible étaient liées à la totalité des bioeffluents, plutôt qu'à la seule concentration de CO<sub>2</sub>.<sup>32,33,34</sup> Il n'est pas clair comment les résultats chez les jeunes étudiants se traduiraient par des effets chez les travailleurs adultes.

En fin de compte, bien que les structures, le mobilier et les pratiques à faibles émissions (p. ex., l'utilisation de produits de nettoyage sans parfum) soient importants pour la qualité de l'air intérieur, la ventilation utilisant l'air extérieur est essentielle pour optimiser la productivité en diluant le CO<sub>2</sub>, les bioeffluents et d'autres produits chimiques personnels. La consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement pendant la ventilation pendant les températures extérieures extrêmes peut être réduite grâce à des échangeurs/économiseurs de chaleur échangeant de l'énergie entre l'air d'admission et d'évacuation.<sup>35</sup>

### **3.1.1. Ventilation pour la qualité de l'air**

La maximisation de l'efficacité énergétique pour répondre aux impératifs climatiques comprendra l'optimisation du système de ventilation du bâtiment.

La ventilation, qui consiste à échanger l'air intérieur contre l'air extérieur, est essentielle pour évacuer les bioeffluents ainsi que les substances atmosphériques liées aux bâtiments et aux activités. L'ASHRAE a résumé que pour les occupants à faible activité, une ventilation de 7,5 L/s par personne avec de l'air extérieur maintiendra les niveaux de CO<sub>2</sub> à environ 700 ppm au-dessus des niveaux extérieurs.<sup>36</sup> Cela se traduit par plus de

1 100 ppm au moment de la rédaction de la présente – un niveau connu pour causer des effets physiologiques et potentiellement cognitifs.<sup>30</sup>

Lorsque les occupants sont plus actifs, le CO<sub>2</sub> est produit plus rapidement, ce qui nécessite des taux de ventilation plus élevés pour maintenir de faibles niveaux et une bonne qualité de l'air intérieur.<sup>36</sup> Comme les taux de ventilation sont par personne, les environnements surpeuplés exigent des taux de renouvellement d'air proportionnellement plus élevés, ainsi qu'un bon mélange de l'air. Par conséquent, des niveaux d'activité plus élevés et des espaces plus bondés exigent un plus grand nombre d'événements pour assurer une qualité de l'air adéquate et uniforme, ainsi qu'un confort thermique et acoustique.

Les taux de ventilation dans les études de recherche vont de moins de 3 L/s par personne à des dizaines de L/s par personne, avec des niveaux de CO<sub>2</sub> allant de 500 ppm (pas beaucoup plus élevés que les niveaux actuels moyens de l'air extérieur, qui ont dépassé 400 ppm<sup>37</sup>) à des milliers de ppm. À mesure que les niveaux mondiaux de CO<sub>2</sub> augmentent, au-delà de 400 ppm, l'atteinte d'un niveau de CO<sub>2</sub> de 500 ppm à l'intérieur est de plus en plus difficile, et les écoles peuvent continuer à dépasser largement cette valeur optimale fondée sur les résultats.<sup>3</sup>

Des taux de ventilation plus élevés sont nécessaires pour soutenir le rendement des étudiants et des travailleurs. Une étude portant sur des travailleurs choisis de façon aléatoire et exposés à leur insu à différents niveaux de qualité de l'air pendant plusieurs journées a révélé que, comparativement à un bureau conventionnel, l'environnement vert (faible teneur en COV) a obtenu une note 61 % plus élevée pour les fonctions cognitives, tandis qu'un environnement vert à haute ventilation a obtenu une note 101 % plus élevée.<sup>9</sup> Dans un examen de grande envergure démontrant d'importantes améliorations progressives de la productivité du lieu de travail à des taux de ventilation allant jusqu'à 17 L/s par personne, cela représentait à l'époque un niveau de CO<sub>2</sub> de 500 ppm.<sup>8</sup> Dans une autre étude, un cadre d'établissement des coûts de la ventilation fondé sur les résultats a modélisé des données en temps réel provenant de bureaux aux États-Unis.<sup>11</sup> En utilisant des valeurs moyennes pour les coûts (salaires, absentéisme), la santé (sous l'effet de l'ozone et de la pollution particulaire) et l'énergie (électricité et gaz naturel), un nombre optimal basé sur la santé des occupants a été identifié pour des taux de ventilation très élevés, dépassant 45 L/s par personne.<sup>11</sup>

La ventilation « naturelle » ou passive est courante, en particulier dans les écoles qui sont peu occupées pendant les chaleurs estivales. Il se peut que les écoles canadiennes n'aient ni climatisation ni échangeur d'air, ou que la climatisation soit partiellement modernisée (p. ex., présent dans le gymnase ou la bibliothèque) en raison de l'augmentation des températures. La ventilation passive se produit par l'échange d'air par les fissures dans les bâtiments et par l'ouverture des fenêtres et des portes. Comme il est indiqué ci-dessous, les attentes, la satisfaction, la productivité et les résultats scolaires de la QEI peuvent être atteints dans la plus grande gamme et la plus grande variabilité des températures observées lorsque les températures intérieures et extérieures affichent des tendances semblables, et lorsque les occupants ont un certain contrôle sur l'environnement. (p. ex.,

ouvrir les fenêtres, abaisser les stores ou faire fonctionner les ventilateurs) comme dans le cas de la ventilation passive.

La qualité de l'air intérieur est plus difficile lorsque l'air extérieur utilisé pour la ventilation a été dégradé par la pollution urbaine, les émissions industrielles ou les substances liées à des catastrophes comme la fumée des feux de forêt ou la croissance microbienne dans les bâtiments humides. Par conséquent, pour créer et maintenir une QEI saine, il faut relever les défis liés à la conception et à l'exploitation en matière de résilience, d'efficacité énergétique, d'échange d'air, de contrôle de l'humidité et d'élimination des polluants. La synchronisation des taux de ventilation de pointe peut procurer des avantages, comme la ventilation pendant les périodes de faible circulation ou de fumée, ou pendant la nuit pour profiter des températures plus basses pendant les saisons où le refroidissement est nécessaire.<sup>38</sup> Des filtres peuvent être installés sur les prises d'air ou être envisagés pour des salles particulières.<sup>35</sup>

L'optimisation des algorithmes de ventilation pour améliorer la qualité de l'air intérieur a été étudiée dans le cadre d'une grande étude expérimentale et de modélisation de petits et moyens bureaux américains.<sup>11,39</sup> Le rendement des sujets a été mis à l'essai dans diverses conditions de la QEI, et les effets sur la santé publique étaient liés aux concentrations de particules et d'ozone. À l'aide de mesures de la température extérieure et intérieure et de la qualité de l'air, ainsi que de 19 paramètres du bâtiment, les modélisateurs ont manipulé la synchronisation de la ventilation pour tirer parti de la température de l'air extérieur, ils ont aspiré l'air extérieur en réponse aux niveaux de CO<sub>2</sub> à l'intérieur, économisé sur le chauffage et la climatisation à l'aide d'échangeurs de chaleur, filtré la pollution par particules et, dans certains cas, doublé le taux de ventilation de base pour réduire le CO<sub>2</sub>. Cette modélisation mathématique a permis de déterminer des économies potentielles pouvant atteindre 28 milliards de dollars américains par an grâce à des stratégies de ventilation améliorées pour le scénario d'économies d'énergie optimales, et 55 milliards de dollars américains par an pour le scénario d'optimisation de la productivité et de la santé des travailleurs (une combinaison de données d'essai de prise de décisions, d'absentéisme et de symptômes du syndrome des bâtiments malsains).<sup>39</sup>

La réduction des virus et des bactéries en suspension dans l'air est facilitée par un échange d'air élevé (idéalement un remplacement complet sans recyclage) et des filtres à haute efficacité et bien entretenus.<sup>40,41,42</sup> Bien que l'approvisionnement en air extérieur à 100 % ne soit pas utilisé couramment, cette capacité devrait être un facteur de conception pour la préparation aux épidémies.<sup>42</sup> Une autre option consiste à évacuer l'air des toilettes et à aspirer de l'air provenant d'environnements moins contaminés à des environnements plus contaminés.<sup>42</sup> Des particules infectieuses peuvent se trouver dans les excréments et être transportées dans l'air lorsque la chasse des toilettes est tirée (l'utilisation de couvercles sur les toilettes aide à réduire ce risque) et être mobilisées par des dispositifs de séchage à l'air des mains lorsque les mains sont mal nettoyées. Il en résulte que les toilettes sont les pièces les plus contaminées, comme l'indique une étude sur la COVID-19 à Wuhan, en Chine.<sup>42</sup> D'autres mesures de lutte contre les infections, y compris la conception et les commodités, la facilité et la pratique de l'entretien, ainsi que l'eau et les déchets, sont décrites plus loin.

### 3.1.2. Température et humidité relative

Les bâtiments canadiens offrent des environnements accueillants, malgré des températures extérieures extrêmes de 60 degrés Celsius ou plus, et un taux d'humidité relative couvrant toute l'échelle, de l'air froid et sec d'hiver à la quasi-saturation pendant les étés étouffants.

L'air plus chaud peut contenir beaucoup plus de vapeur d'eau que l'air plus froid, de sorte que la teneur en eau est mesurée par rapport à la capacité de l'air à une température donnée, appelée humidité relative. L'humidité relative est importante à la fois pour le confort, car les occupants se sentent plus chauds et en sueurs à des températures plus chaudes et à une humidité plus élevée; les températures plus élevées sont plus tolérables avec une humidité relative inférieure à l'air. Comme indiqué dans les modules précédents du CCQAI,<sup>16</sup> il faut prévenir l'humidité, y compris la condensation sur les surfaces plus froides et pendant la nuit, ainsi que dans les systèmes de traitement de l'air, afin de prévenir la croissance microbienne, la détérioration de la structure et du contenu, et la dégradation de la qualité de l'air intérieur.

Les ventilateurs-récupérateurs de chaleur (VRC) transfèrent la chaleur entre l'air sortant et l'air entrant, et les ventilateurs à récupération d'énergie (VRE) captent également l'énergie considérable provenant de la condensation de l'eau. Ces systèmes récupèrent la chaleur en hiver, réduisent la température et l'humidité de l'air entrant en été, peuvent être équipés ou accompagnés de filtres à particules, peuvent également contrôler l'humidité relative et réduire considérablement l'énergie nette nécessaire au chauffage, à la climatisation et à la déshumidification.

Selon le climat et les activités à l'intérieur, l'humidification en hiver peut aider à réduire la sécheresse de la peau, des yeux et des muqueuses. Les contagions ont tendance à persister plus longtemps dans des conditions froides et sèches; une humidité relative de 40 à 60 % peut être optimale pour minimiser la persistance, comme celle du SRAS-CoV-2 sur les surfaces.<sup>42</sup>

L'énergie nécessaire pour changer la température de l'air est beaucoup moins importante que celle des solides et des liquides, de sorte que la température de l'air est très sensible au chauffage ou au refroidissement, tandis que les structures qui stockent la chaleur peuvent amortir la température de l'air intérieur.

La température apparente est le résultat d'un réchauffement et d'un refroidissement personnels selon de nombreux paramètres.<sup>43</sup> Les outils en ligne pris en charge par le Center for the Built Environment (CBE) de l'université de Berkeley permettent de prévoir le confort sur une large gamme d'humidité, de température de l'air, de température radiante (déterminée par la température des murs, du plancher et du plafond) et de débit d'air.<sup>44,45</sup>



### 3.1.3. Rayonnement infrarouge

La chaleur du soleil, ou la chaleur d'un feu ou d'une cuisinière, est en grande partie infrarouge. L'un des paramètres de la QEI est la « température du globe », qui indique à quel point on se sent chaud en raison du rayonnement infrarouge.

Les bâtiments dont les enveloppes sont principalement en verre peuvent recevoir une plus grande quantité de chaleur provenant du rayonnement solaire, ce qui peut augmenter les besoins en climatisation pendant l'été. Les stores extérieurs peuvent réduire l'insolation lorsque le soleil est élevé, tout en permettant le réchauffement pendant les mois d'hiver lorsque le soleil est plus faible.

On peut utiliser des radiateurs à infrarouges – souvent dans les garages, les ateliers et les lieux de travail industriels, mais peut-être dans d'autres situations – pour réchauffer les personnes sans réchauffer toute la structure ou maintenir une température ambiante élevée.<sup>46</sup> Les radiateurs à infrarouges sont rapides, efficaces et écoénergétiques dans la mesure où le chauffage est ciblé, bien que le confort thermique puisse souffrir d'un réchauffement excessif de la tête et de membres inférieurs plus froids lors de l'utilisation d'appareils placés au plafond.<sup>47</sup>

En revanche, les murs frais, les planchers et surtout les fenêtres font en sorte que les habitants se sentent plus frais qu'ils ne le seraient autrement, malgré une température de l'air apparemment adéquate. Cette température radiative est incorporée dans les modèles du CBE de l'université de Berkeley.<sup>44,45</sup>

## 3.2. Confort, productivité et adaptation

La recherche et les évaluations de la QEI permettent souvent de déterminer le confort et l'acceptabilité de l'environnement intérieur à l'aide de sondages auprès des occupants. Bien que la satisfaction soit sans doute plus importante et plus facile à évaluer (habituellement au moyen d'un bref sondage) que le rendement des travailleurs (ce qui exige des tests sur des sujets et des instruments/capteurs pour diverses mesures), la productivité ou l'apprentissage optimaux peut ne pas correspondre exactement aux perceptions de la QEI. Notamment, un travail optimal peut correspondre à la sensation de se sentir au frais.<sup>48</sup>

La sensation de température est le résultat du chauffage ou du refroidissement net de la peau lié à la conduction liée à la température et à la vitesse de l'air; au chauffage ou au refroidissement radiatif; au refroidissement par évaporation lié à la vitesse de l'air et à l'humidité relative; et aux vêtements.<sup>43</sup>

Une approche normative de longue date à une plage de température optimale étroitement définie est mise à l'épreuve par une approche adaptative. Les personnes peuvent avoir une capacité considérable, peut-être méconnue, de s'adapter à des conditions de chaleur ou de froid.<sup>49</sup> La recherche permet de déterminer que les attentes et l'adaptation des occupants en fonction des températures extérieures influent sur les plages de confort, et que les

individus peuvent être productifs dans un plus grand nombre de conditions thermiques que celles prescrites précédemment par l'ASHRAE et d'autres autorités.<sup>50,51</sup>

Les aventuriers affirment qu'il n'y a pas de mauvais temps, seulement de mauvais vêtements, et dans cet esprit, les plages de températures « acceptables » peuvent être prolongées en permettant aux vêtements de tenir compte des plages de températures tout au long de l'année.<sup>14</sup> La consommation d'énergie est réduite lorsque les températures intérieures suivent les températures extérieures. Dans ce cas, le confort doit être assuré avec des vêtements saisonniers.<sup>14,50</sup> Par exemple, les plages mesurées d'acceptabilité de la température chez les patients taïwanais étaient beaucoup plus larges que les courbes de l'ASHRAE.<sup>52</sup> Dans une étude portant sur des écoliers chinois, on a déterminé que 14 °C était la température optimale en hiver pour l'apprentissage.<sup>53</sup> Une étude détaillée des vêtements en Inde a examiné les choix de vêtements comme moyen insuffisamment étudié pour s'adapter aux environnements intérieurs saisonniers dans les bâtiments sans climatisation.<sup>54</sup> Les matériaux (p. ex., le coton légèrement tissé par opposition aux produits de synthèse modernes qui protègent contre les courants d'air) plus le style pour la modestie et pour répondre aux exigences religieuses peuvent tous être pris en compte dans les discussions et les lignes directrices afin d'obtenir un confort thermique suffisant pour une productivité élevée des occupants.

De nombreuses innovations permettent à la fois un contrôle individuel sur le chauffage ou la climatisation et des économies d'énergie grâce à des systèmes locaux plutôt qu'à l'échelle du bâtiment. Il peut s'agir, par exemple, d'une alimentation en air propre (filtré) individualisée qui permet de contrôler la température individuelle pour le chauffage ou le refroidissement,<sup>55</sup> de fournir un chauffage ou un refroidissement local dans une chaise de bureau<sup>56</sup> ou d'utiliser un appareil de chauffage à infrarouge.

### 3.3. Éclairage

La lumière visible, à des fréquences plus élevées et à des longueurs d'onde plus courtes que l'infrarouge, est la forme de rayonnement électromagnétique la plus couramment reconnue. Les sources, l'intensité et les couleurs de la lumière contribuent toutes à la QEI.

La lumière du jour, le spectre complet de la lumière visible, est préférable aux spectres plus étroits de l'éclairage à haute efficacité.<sup>57</sup> Les recherches indiquent que tant qu'il y a un contrôle de la lumière directe et de l'éblouissement, le travail et les résultats pour les patients dans les soins de santé,<sup>58</sup> ainsi que les résultats des élèves dans les écoles,<sup>59,60</sup> sont meilleurs avec plus de lumière du jour et de vues à l'extérieur, en particulier des paysages naturels (« verts ») et de l'activité. L'attention des élèves s'améliore davantage après les séances d'éducation en plein air.<sup>61</sup> Certains établissements d'enseignement et lieux de travail peuvent également être dotés de petites fenêtres et d'un minimum de lumière naturelle ou de vues sur le plein air, en particulier sur les murs nord.<sup>62</sup> Les fenêtres et les « conduits de lumière » offrent des avantages sur le plan de la qualité de la lumière et des économies potentielles en matière d'ampoules et de tubes, et les fenêtres à haute efficacité, bien ombragées et munies de stores, sont efficaces et présentes dans les bâtiments récents à consommation énergétique nette zéro.

L'éclairage peut consommer beaucoup d'énergie dans les bâtiments, ce qui donne lieu à un remplacement par des ampoules à diodes électroluminescentes (DEL) à haut rendement. Les ampoules à incandescence sont progressivement éliminées, et les lampes halogènes, les lampes fluorescentes compactes et les tubes sont remplacés. Les lampes fluorescentes ont attiré l'attention parce qu'elles peuvent entraîner des pointes de tension, parfois appelées « électricité sale ». Les lampes fluorescentes compactes contiennent également du mercure; le Canada a ratifié la Convention de Minamata contre ce polluant mondial.<sup>63</sup>

À l'origine, les DEL étaient vendues avec un redresseur externe pour transformer le courant alternatif (c.a.) en courant continu (c.c.), et les systèmes c.c. offrent des économies de matériaux et d'énergie.<sup>64</sup> De nos jours, les ampoules de remplacement sont de qualité diverse, avec potentiellement des niveaux élevés de lumière bleue ou de champs magnétiques. L'alimentation en courant continu pour l'éclairage et d'autres applications peut être privilégiée dans les nouvelles constructions ou les rénovations.<sup>64</sup>

La lumière visible a d'importants effets biologiques, y compris la régulation du cycle circadien, car le déclin naturel de la lumière bleue en fin de journée déclenche une production saine de mélatonine « hormone du sommeil ».<sup>65,66</sup> Au-delà d'un sommeil réparateur et normal, la mélatonine a de nombreux effets bénéfiques pour la réparation cellulaire, la désintoxication et le rajeunissement du lendemain, et même la prévention des maladies chroniques et du cancer.<sup>66,67,68</sup> Les travailleurs de nuit sont à risque, car on a reconnu que le travail par quarts augmente les risques d'obésité, de maladies chroniques et de cancer.<sup>69</sup> On a déterminé que la lumière artificielle au travail de nuit pouvait favoriser et accélérer le cancer du sein chez les jeunes femmes exposées conjointement aux gaz d'échappement des moteurs cancérigènes aux postes frontaliers canadiens.<sup>70</sup>

La majorité de la population est principalement exposée à l'éclairage intérieur. L'éclairage à haute intensité (mesurée en lumens) est courant dans les entrepôts et les ateliers, où une lumière plus vive aide à l'exécution des tâches fines et augmente la vigilance. Cependant, une lumière vive ne se traduit pas nécessairement par une amélioration des performances. Dans une étude sur la conduite simulée, la lumière vive enrichie en bleu a augmenté l'excitation, augmenté les erreurs du conducteur et n'a pas amélioré le temps de réaction.<sup>71</sup>

Les ampoules et les écrans lumineux peuvent sembler bleuâtres puisqu'ils émettent des rayons violets et parfois ultraviolets. La lumière ultraviolette (UV) dans la lumière du soleil est connue pour les coups de soleil et les dommages à la peau et aux yeux, et l'exposition à long terme à de faibles niveaux par l'éclairage intérieur peut causer des dommages cumulatifs. Les optométristes canadiens considèrent les ampoules DEL modernes à « spectre chaud » comme une grande avancée pour la santé oculovisuelle.<sup>72</sup> La lumière des écrans des appareils électroniques a également des effets biologiques, comme les cataractes, la dégénérescence maculaire liée à l'âge, la fatigue oculaire, le retard et la diminution de la production de mélatonine et les problèmes de sommeil.<sup>72</sup> Il est possible d'utiliser des lunettes teintées de jaune ou de bleu réfléchissant, bien que leur

efficacité fasse l'objet d'un débat. Un examen par le gouvernement français des effets sur la santé de la lumière bleue émise par les DEL et les écrans a révélé que les enfants étaient particulièrement vulnérables aux dommages oculaires et à la modulation de la mélatonine. Le gouvernement a publié des lignes directrices visant à limiter le temps passé devant l'écran des enfants, surtout avant le coucher, et à utiliser des options qui émettent moins de lumière bleue.<sup>73</sup>

Le syndrome de la vision relié à l'ordinateur,<sup>74</sup> y compris la vision floue, la fatigue oculaire, les maux de tête et d'autres symptômes physiques associés à l'ergonomie du travail prolongé à l'ordinateur, aura sans aucun doute une incidence sur la productivité. Ce syndrome peut être lié à la qualité de la lumière de l'écran et de la lumière ambiante (proximité et éclairage direct d'une luminosité semblable à celle de l'écran, et éclairage naturel), à l'humidité de l'air, à la vitesse de l'air et aux concentrations de particules, et aux facteurs ergonomiques. La réduction du clignotement, la mauvaise posture, le manque de mouvement et la concentration prolongée, les changements liés à l'âge dans la composition des larmes ainsi que l'utilisation et l'entretien des lentilles de contact peuvent tous contribuer aux symptômes.<sup>75</sup> La recommandation 20/20/20 est de se concentrer toutes les 20 minutes à au moins 20 pieds de distance pendant 20 secondes<sup>76</sup> (pour un bonus, clignez des yeux 20 fois). Les mesures compensatoires comprennent le réglage de la luminosité de l'écran, du contraste, de la couleur et de la taille de la police.

Pour réaliser des économies d'énergie, éteindre les lumières, les écrans et l'équipement lorsqu'ils ne sont pas nécessaires est naturellement inclus dans tout programme d'efficacité énergétique, avec une sophistication allant des autocollants de rappel sur les commutateurs de lumière aux détecteurs de mouvement, aux minuteries et aux télécommandes.

Les rayons UV et la lumière du jour réduisent la persistance des contagions en suspension dans l'air. La lumière naturelle est encouragée, et les appareils d'éclairage UV protégés de la vue directe pour protéger la vision peuvent être installés dans les conduits d'air ou soigneusement déployés en milieu clinique pour réduire les virus en suspension dans l'air et les charges bactériennes.<sup>42,77</sup>

### **3.4. Acoustique**

L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a déterminé que « le bruit environnemental est un important problème de santé publique, qui compte parmi les principaux risques environnementaux pour la santé. Il a des effets négatifs sur la santé et le bien-être humains et constitue une préoccupation croissante du grand public et des décideurs politiques en Europe. »<sup>78</sup> Des lignes directrices ont été élaborées à partir d'une série de revues systématiques examinant les effets du bruit sur l'irritation, les effets cardiovasculaires, l'obésité et les effets métaboliques (comme le diabète), les troubles cognitifs, les troubles du sommeil, les troubles auditifs et l'acouphène, les effets indésirables à la naissance, la qualité de vie, la santé mentale et le bien-être.<sup>79</sup>

Les environnements intérieurs ont des « paysages sonores » caractéristiques découlant de l'exploitation du bâtiment et des activités des occupants à l'intérieur de celui-ci, ainsi que de la circulation, des aéronefs, des trains et des activités des personnes à l'extérieur.<sup>80</sup> La « pression acoustique » désigne le bruit total ressenti par l'occupant (bruit), tandis que la « puissance acoustique » est mesurée à la source. Ces deux valeurs sont exprimées en décibels (dB).

Le bruit excessif des systèmes CVCA peut être réglé par l'entretien, les réparations et la modernisation des systèmes. Le bruit peut également être atténué par le tapis, l'insonorisation dans et au-dessus des carreaux de plafond et des panneaux entre les bureaux, ou presque éliminé dans les salles pour des applications spéciales (p. ex., l'enregistrement sonore ou les tests auditifs), mais le calme est rare dans les établissements d'enseignement et les lieux de travail.

Quel que soit l'origine, qu'il s'agisse du système de CVCA<sup>81</sup> ou du son extérieur des trains, des avions ou de la circulation,<sup>82</sup> le bruit affecte la capacité de comprendre la parole, ainsi que la concentration des occupants et les niveaux de réalisation, avec des différences marquées de réponse selon la physiologie, les sensibilités et la personnalité, par exemple entre introvertis et extravertis.<sup>83</sup>

Les bruits qui peuvent être une source de distraction ou de détresse comprennent les conversations intelligibles,<sup>84</sup> les bruits aigus de « pleurnichement », les bruits soudains et les grondements qui peuvent aussi être perçus comme des vibrations, comme des bruits de métro ou des activités de construction, de démolition ou de dynamitage.

L'intelligibilité de la parole est un paramètre clé qui cause de la distraction et de l'agacement chez les collègues adultes dans les bureaux à aires ouvertes, où une quantité limitée de « bruit blanc » peut masquer les bruits intermittents et accroître la productivité du travail de bureau. (Toutefois, le bruit excessif peut être contre-productif, car il mène à des discours plus bruyants.)<sup>84,85</sup> En classe, cependant, il est nécessaire d'être capable de discerner la parole pour optimiser l'apprentissage. Il faut donc réduire au minimum le bruit extérieur.<sup>81,82,86</sup>

Un examen des effets du bruit sur les écoliers a révélé que, « les effets généraux de l'exposition chronique au bruit chez les enfants sont des déficits d'attention et d'attention visuelle soutenues; une discrimination auditive et une perception de la parole plus faibles; une mémoire plus faible pour des tâches qui exigent un traitement élevé du matériel sémantique; et une capacité de lecture et des résultats scolaires inférieurs aux tests normalisés nationaux »<sup>86</sup>. On a signalé que la pression acoustique acceptable dans les salles de classe allait de 30 à 45 dB. La réverbération, c'est-à-dire la tendance du son à se faire entendre dans les espaces à surfaces dures, en particulier avec un faible taux d'occupation, est également mesurée et signalée, et devrait être réduite au minimum dans les salles de classe et les lieux de travail.

La conception de l'atténuation du bruit exige de la prudence, car les tapis et les panneaux qui absorbent le bruit peuvent transporter des produits chimiques nocifs comme des

ignifugeants, des produits chimiques résistants aux taches et des matériaux qui absorbent et réémettent les COV et les semi-COV (p. ex., les pesticides) utilisés à l'intérieur.

### 3.5. Conception, ergonomie

La « conception » est un concept large, allant de l'emplacement, de l'aménagement paysager et de l'architecture, des vues extérieures et de la lumière naturelle, à l'attribution d'espace pour diverses activités (p. ex., réunions, activités de groupe, travail de bureau solitaire), aux systèmes du bâtiment et aux détails de l'équipement, du mobilier et de l'aménagement. La QEI pour les étudiants et les travailleurs comprend également des commodités comme des toilettes, des installations de cuisine, des aires de repas de groupe, des douches et des espaces de rangement pour les vélos afin de permettre les déplacements actifs, ou de l'équipement et de l'espace d'exercice. Les services de sécurité, le stationnement et la disponibilité du transport en commun influent également sur la perception des occupants et des visiteurs de l'installation.

Le Comité canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST) définit l'espace de travail comme suit : « tout endroit où le travail d'une personne est effectué, y compris les espaces de bureau traditionnels et non traditionnels (p. ex., bureaux à domicile, véhicules et emplacements temporaires), ainsi que le mobilier, les accessoires, l'équipement, les conditions environnementales, et les facteurs psychosociaux en milieu de travail à ces endroits. »<sup>87</sup>

Au fil des décennies, les espaces de travail ont eu tendance à rétrécir. Le CCHST fait référence aux Normes d'aménagement du gouvernement du Canada relatives à l'initiative Milieu de travail 2.0 pour les aires *maximales* dans les bureaux, les postes de travail et les salles de réunion fermés<sup>87</sup>; toutefois, d'autres normes internationales recommandent des *minimums* qui sont considérablement plus élevés.<sup>88</sup> Pour les employés qui effectuent un travail individuel, de nombreux facteurs peuvent avoir une incidence sur le rendement, y compris l'intimité, le stress, le bruit à proximité et les exigences en matière de ventilation pour maintenir la qualité de l'air dans les espaces plus occupés. Une vaste enquête longitudinale sur la QEI a révélé que la superficie attribuée (cubicule ou bureau) figurait parmi les trois principales préoccupations parmi les 15 facteurs consultés.<sup>89</sup>

Une solution à de multiples préoccupations – pour le surpeuplement en milieu de travail (le fait de limiter la distanciation physique), l'empreinte environnementale du navettage et les besoins différents pendant le travail en solitaire par rapport aux réunions de groupe – est le « bureau à la carte », où les travailleurs télétravaillent (travail à domicile ou hors site via Internet) une partie du temps, et utilisent un poste de travail partagé pendant les jours au bureau, en dehors des heures de réunion. Le télétravail est abordé plus en détail à la section 4.3.

Les aspects de la conception qui contribuent à l'efficacité et à la réduction des risques de préjudices liés au travail, y compris l'éclairage et d'autres sujets abordés précédemment, sont souvent regroupés sous la rubrique « ergonomie ».<sup>90</sup> Toutefois, le CCHST définit l'« ergonomie » de façon plus étroite comme la science qui consiste à jumeler le travail au



travailleur et les produits et outils (p. ex., la configuration de la chaise et de l'ordinateur) à l'utilisateur, à des fins de prévention des blessures.<sup>91</sup>

Comme le travail est de plus en plus axé sur les activités informatiques et sur le Web, le Commission des accidents du travail de l'Alberta<sup>92</sup> et les Centres de santé des travailleurs et travailleuses de l'Ontario<sup>93</sup> offrent des ressources détaillées sur la configuration et l'utilisation des postes de travail informatiques afin de réduire au minimum les blessures liées au stress à long terme (travail répétitif). Il s'agit notamment de l'aménagement physique; du bureau et de la chaise pour favoriser une bonne posture et un bon alignement des yeux; de l'éclairage pour réduire au minimum l'éblouissement; de la lumière bleue, et de la fatigue oculaire; et même des bureaux qui s'ajustent pour utiliser la position assise ou debout afin de prévenir et de traiter le dos et d'autres problèmes musculosquelettiques.<sup>94</sup> Par exemple, la productivité d'un centre d'appels a été améliorée grâce à la mise en place de bureaux pour travailler debout qui réduisent le temps passé en position assise.<sup>95</sup> Des améliorations cognitives et du rendement ont été constatés dans deux catégories d'emploi, la productivité ayant augmenté de 23 % après un mois, et de 53 % après six mois, comparativement aux collègues sédentaires.<sup>96</sup> Il est bien connu que l'activité physique et la condition physique, dans le cadre des programmes offerts pendant ou en dehors de la journée de travail, réduisent l'absentéisme lié à la maladie.<sup>96</sup>

Si l'espace est suffisant, les détails de conception peuvent réduire les surfaces fréquemment touchées, comme l'élimination des portes des toilettes, comme on le voit dans les aéroports.

### 3.6. Résilience, environnement et esthétique

Les conditions météorologiques extrêmes peuvent entraîner plus que des températures extrêmes et fluctuantes qui représentent des défis pour l'exploitation des bâtiments. Les conditions de conception changent dans les zones densément peuplées en raison du réchauffement climatique. Les inondations peuvent avoir une incidence sur l'intégrité structurelle de l'environnement et des bâtiments. La résilience de la conception du bâtiment et des caractéristiques du site, à la fois pour résister aux événements indésirables et modérés, sont des nécessités pratiques et une source de réconfort pour les occupants. Il est important d'en tenir compte lors de la conception initiale des bâtiments et de toute rénovation future.

Les éléments extérieurs et l'environnement du bâtiment ont des répercussions sur la QEI, l'environnement et les perceptions des occupants. Il s'agit notamment:<sup>97,98</sup>

- construit des éléments qui atténuent les « îlots de chaleur » urbains et intègrent des systèmes naturels tels que :
  - surfaces extérieures réfléchissantes (p. ex., toits et surfaces solides);
  - d'éléments naturels comme des toits verts ou des murs (à l'intérieur ou à l'extérieur) qui refroidissent par évapotranspiration à travers les feuilles;
  - naturalisation de l'environnement avec des arbres à feuilles caduques au sud et des conifères au nord pour se protéger des vents du nord et pour modérer l'insolation pendant les mois d'été; (nota, la perte de gain solaire attribuable à

- un ombrage limité pendant les mois d'hiver est moins importante que le refroidissement de la saison chaude et d'autres avantages);
- la végétation et les caractéristiques de l'eau et des terres humides pour modérer les températures, ainsi que pour soutenir la faune comme les pollinisateurs, les prédateurs de ravageurs comme les libellules, les oiseaux, les amphibiens et d'autres espèces;
- conception visant à réduire au minimum les impacts d'oiseaux, y compris les vitres visibles par les oiseaux;<sup>99</sup>
- les effets de l'éblouissement des bâtiments avoisinants, à des angles particuliers du soleil.<sup>100</sup>

Un autre défi à la résilience est le feu, qui menace les paysages, les infrastructures, les bâtiments et la qualité de l'air (potentiellement traité par la filtration de l'air intérieur). Bien qu'un paysage de béton et de pierre ne brûle pas, il n'absorbe pas non plus le CO<sub>2</sub> et ne fournit pas de refroidissement naturel, de rétention d'eau ou de soutien aux écosystèmes, contrairement à la végétation. De nombreuses mesures peuvent atténuer le potentiel d'incendie, comme les systèmes de gicleurs, les pièces d'eau, le choix de plantes qui brûlent plus lentement (p. ex., peupliers, bouleaux ou feuillus plutôt que de conifères) et un toit métallique.

### 3.7. Eau

L'eau potable est un besoin humain fondamental et, malheureusement, c'est un problème de longue date dans certaines collectivités canadiennes. Entre-temps, les sécheresses et les inondations sont devenues un sujet central de préoccupation en raison des changements climatiques. La quantité et la qualité de l'approvisionnement en eau potable, la conservation et la réutilisation, les pièces d'eau sur place et la résilience aux inondations sont tous des éléments importants de la qualité environnementale des bâtiments.

Les approvisionnements en eau sont généralement de grande qualité dans les villes canadiennes, bien que certains établissements puissent choisir de filtrer l'eau potable pour y détecter les sous-produits de la chloration, les contaminants résiduels et le plomb. L'approvisionnement en eau potable est régi de façon plus stricte que l'eau embouteillée, de sorte que les stations de remplissage de bouteilles ou de tasses d'eau sont préférables à l'approvisionnement en eau embouteillée et à l'élimination du plastique, dont l'empreinte environnementale est importante.

Dans les villes et les régions rurales du Canada, les tuyaux d'approvisionnement et les conduites en plomb, les soudures et les accessoires contenant du plomb demeurent parfois en place, ce qui peut augmenter la charge corporelle en plomb.<sup>101</sup> Le plomb est un métal toxique qui s'accumule dans les os et les organes; de faibles niveaux d'exposition nuisent au développement précoce, à l'apprentissage et aux fonctions motrices; la réduction du contrôle des impulsions qui en résulte prédispose les jeunes adultes à la violence; et chez les adultes plus âgés, le plomb cause des problèmes cardiovasculaires chroniques, des maladies neurologiques et métaboliques.<sup>102,103,104</sup> Les infrastructures en plomb ne peuvent pas être cataloguées par les administrations locales ou les propriétaires et exploitants de

bâtiments, de sorte que les conduites d’approvisionnement doivent être évaluées par les propriétaires, les locataires et les rénovateurs de propriétés plus anciennes, et l’eau potable doit être analysée conformément aux normes canadiennes.<sup>102</sup> Il est à noter que le plomb est également présent dans les anciennes peintures<sup>105</sup> et doit être réduit au moyen de protocoles de protection.<sup>106</sup>

D’autres caractéristiques souhaitables comprennent la réutilisation de l’eau, comme le recyclage des eaux ménagères pour les toilettes ou l’arrosage à l’extérieur, la collecte des eaux de pluie, les surfaces de stationnement perméables et l’aménagement paysager pour maximiser l’infiltration et ralentir la migration de l’eau dans le paysage pendant les précipitations, les zones de rétention des eaux pluviales et les caractéristiques de l’eau qui fournissent également un habitat pour la biodiversité.

Les bactéries et les virus peuvent être rejetés dans l’urine et les matières fécales, contaminer les aérosols provenant de la chasse d’eau des toilettes et entraîner des charges plus élevées de contagions dans les toilettes.<sup>42</sup> L’utilisation d’un couvercle de toilette est utile, tandis que les appareils moins turbulents méritent d’être examinés. Les sècheurs à air forcé mobilisent également les fines particules d’aérosol avec les contagions lorsque les mains ne sont pas bien lavées; les essuie-tout ne présentent pas ce risque.

### **3.8. Entretien et propreté**

La santé, le bien-être et la productivité sont soutenus dans un environnement propre, organisé et purifié.

Lorsque l’équipement de CVCA et l’intérieur des bâtiments sont faciles à entretenir, la facilité de l’entretien de routine soutient la QEI et la qualité de l’air. De nombreux modules de la collection du CCQAI traitent de sujets pertinents.<sup>16</sup>

La réduction des déchets par la réutilisation (p. ex., postes de remplissage de bouteilles d’eau, vaisselle réutilisable et lave-vaisselle dans les cuisines), le compostage des matières organiques et le recyclage figurent également parmi les priorités de la QEI.

Le nettoyage fréquent, en particulier des surfaces et des salles de bain fréquemment touchées, permet d’intercepter la transmission de la contagion.<sup>40</sup> Le savon et l’eau sont efficaces contre le SRAS-CoV-2 (virus à l’origine de la COVID-19), tandis que les nettoyeurs à base de peroxyde sont inodores et peuvent être mieux tolérés que les nettoyeurs à base de chlore ou d’ammonium.

### **3.9. Interactions entre les facteurs de la QEI**

Les sensations et les exigences imposées aux étudiants et aux travailleurs sont intégrées par les personnes, alors il n’est pas surprenant que les effets des facteurs de la QEI interagissent les uns avec les autres, de sorte que l’inconfort découlant d’un facteur peut être exprimé par les personnes comme de l’insatisfaction à l’égard d’un autre. Voici quelques exemples.

Le volume et le type de son (musique, eau, babillage ou ventilateur) interagissent avec le niveau d'éclairage, les femmes étant plus sensibles ou perceptives.<sup>108</sup> Dans un examen plus poussé de la QEI (confort thermique, éclairage et son), l'environnement acoustique a eu les effets les plus importants sur le confort global dans des conditions de neutralité thermique (25 °C, 45 % d'humidité relative).<sup>108</sup>

Une autre étude réalisée auprès de travailleurs de bureau sur la perception de la QEI en termes de température de l'air, de température du globe (chaleur rayonnante), d'humidité relative, de concentration de dioxyde de carbone, d'éclairage et de niveau de bruit de fond a révélé des interactions entre la température et l'acceptabilité perçue d'autres paramètres. La productivité du travail de bureau se situait au mieux à des températures neutres et légèrement froides.<sup>48</sup>

Une vaste étude de la satisfaction fondée sur un sondage qui comprenait les interactions de 15 paramètres de la QEI a révélé que les facteurs les plus importants étaient la quantité d'espace (cubicule ou bureau – et non l'espace brut), le niveau de bruit et l'intimité visuelle.<sup>89</sup> Les participants à cette étude d'observation des lieux de travail établis ont été exposés à une gamme plus étroite de températures, de sorte que l'interaction thermique n'était pas aussi prédominante.

La mise en œuvre réussie de bureaux, d'écoles et de logements « écologiques »<sup>109</sup> peut réduire les contaminants de l'air intérieur et améliorer la santé, l'apprentissage et la productivité. La perception que le bâtiment est « écologique » peut toutefois fausser les réponses subjectives au sondage. Les personnes qui se disent préoccupées par l'environnement sont plus susceptibles de trouver des températures plus élevées « acceptables » lorsqu'un bâtiment est « écologique »,<sup>110</sup> bien que des recherches plus détaillées révèlent que les symptômes liés à la température sont déterminés par des facteurs physiologiques et psychologiques établis.<sup>111</sup> Néanmoins, la santé publique doit être une considération de premier plan dans l'établissement du confort thermique et de la qualité de l'air intérieur.

## 4. Enjeux en évolution

### 4.1. Bâtiments à consommation énergétique nette zéro

Les impératifs visant à freiner les crises climatiques, ainsi que l'importante empreinte de GES des bâtiments, ont entraîné une attention considérable à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Le but ultime des bâtiments à consommation énergétique nette zéro est de compenser leur consommation (faible) d'énergie avec de l'électricité sans émissions, tout en atteignant une excellente QEI. Cela suppose des améliorations de l'isolation et de l'étanchéité à l'air, des gains d'efficacité dans tous les systèmes (p. ex., éclairage, chauffage, refroidissement, ventilation, équipement et technologies d'information et de contrôle), l'utilisation de technologies efficaces (p. ex., thermopompes) et l'électricité solaire sur place ou produite ailleurs. Les bâtiments à consommation énergétique nette

zéro ont pour point culminant l'attention portée à de nombreux détails, catalogués par exemple dans les guides avancés de conception énergétique pour les bureaux<sup>12</sup> et pour les écoles.<sup>13</sup> Ces guides comprennent des conseils sur la conception et les services (p. ex., eau chaude, chauffage, échange d'air), les opérations avancées « au besoin » (p. ex., interrupteurs pour éteindre l'équipement inutilisé, réglage de l'intensité ou arrêt des lumières lorsque ce n'est pas nécessaire) et les systèmes pour assurer le bon fonctionnement (p. ex., alarmes pour les portes non verrouillées). On peut mettre l'accent sur la masse thermique pour ralentir les changements de température et pour s'assurer qu'il n'y a pas de « ponts thermiques » qui peuvent transférer la chaleur plus facilement à travers l'enveloppe du bâtiment. La tension évidente entre l'efficacité énergétique et la ventilation doit être réglée dans la mesure du possible en améliorant la récupération d'énergie plutôt qu'en compromettant la qualité de l'air en limitant la ventilation.

Les stratégies pour les bâtiments à consommation énergétique nette zéro varient selon le climat et le site, répondant aux plus grands besoins en énergie (p. ex., chauffage dans les climats plus froids par opposition au refroidissement dans les zones plus tempérées). À la conférence COP25, le gouvernement du Canada s'est engagé à légiférer l'objectif de consommation énergétique nette zéro d'ici 2050, avec des objectifs quinquennaux et des rapports de progrès.<sup>112</sup>

## 4.2. Interconnectivité électronique

Les technologies de l'information (TI) sous-tendent de plus en plus les systèmes de contrôle des grands immeubles et sont au cœur des bureaux et des établissements d'enseignement.

Les capteurs et commandes interconnectés visent à améliorer la consommation d'énergie et la qualité de l'air intérieur, ainsi que l'efficacité et l'efficacité des systèmes complexes de commande des bâtiments.<sup>113</sup> Un apprentissage machine sophistiqué a été appliqué pour raffiner les algorithmes de commande des systèmes de CVCA, en anticipant les demandes et les mesures d'occupation en fonction du mouvement, de la voix et du CO<sub>2</sub>, des températures et de l'humidité à l'intérieur et à l'extérieur, et des préférences des individus.<sup>114</sup> Des économies d'énergie de 7 à 52 % ont été réalisées grâce à l'application d'un refroidissement adaptatif dans les bureaux et les salles de réunion, principalement ceux où le taux d'occupation est plus faible.<sup>115</sup> La forme d'une surveillance et d'une commande étendues des TI peut être réduite au fil du temps, car les commandes locales offrent une sécurité, des commandes et des ressources à des coûts inférieurs à ceux de l'exploitation dans le « nuage », et les économies promises grâce à la haute technologie et à l'apprentissage machine pour améliorer l'efficacité des bâtiments peuvent être excessives pour des réseaux coûteux de capteurs et de commandes.<sup>115</sup>

Les choix d'équipement de TI offrent des possibilités d'optimiser la QEI et d'améliorer l'efficacité énergétique, la résilience et la sécurité en réduisant au minimum les services sans fil et en maximisant l'utilisation des options câblées.<sup>116,117</sup> Les signaux entre de nombreux petits émetteurs et récepteurs radio nécessitent plus d'énergie pour émettre des signaux qu'il n'en faut pour envoyer de l'information par un fil ou une fibre.<sup>116</sup> Les

solutions sans fil peuvent être mises en œuvre rapidement, mais d'autres inconvénients environnementaux comprennent le fait que les appareils ont besoin de ressources non renouvelables, que bon nombre d'entre eux ont une durée de vie relativement courte et qu'ils dépendent de piles qui peuvent être difficiles à recycler plutôt que de l'électricité provenant de sources principales.

Les meilleurs services à large bande comprennent la fibre optique ou le fil qui relie et traverse les bâtiments pour l'accès à Internet et les connexions de TI (p. ex., aux tableaux intelligents, aux télécopieurs, aux numériseurs, aux imprimantes, aux projecteurs, aux souris, aux claviers, aux haut-parleurs, aux écouteurs ou aux microphones) pour les étudiants, les employés et les visiteurs; et un minimum de commandes « intelligentes » câblées des systèmes du bâtiment pour optimiser la QEI, l'efficacité énergétique et le rendement. Les « microcellules » intérieures – radios pour l'accès à Internet via de petits points d'accès sans fil au besoin – offrent des avantages en termes d'énergie et d'exposition plus faible au rayonnement radiofréquence. On fait souvent la promotion d'« Internet des objets » pour les appareils, les bâtiments et les villes « intelligents » dans un format sans fil, mais la plupart des appareils en milieu de travail et dans les établissements d'enseignement peuvent et doivent être connectés physiquement à un fil ou aux fibres optiques. Après tout, les systèmes du bâtiment ne sont pas mobiles.

Les progrès réalisés dans le domaine des communications sans fil ont fait augmenter les niveaux ambiants de rayonnement de radiofréquences modulées pour les communications mobiles sans fil et l'accès à Internet (Wi-Fi). D'autres augmentations de la fréquence actuelle et des fréquences supplémentaires sont mises en œuvre pour les systèmes de cinquième génération ou de 5G,<sup>118</sup> alors que la 6G est envisagée.

Les preuves démontrant les dommages causés par le rayonnement des appareils sans fil sont suffisantes pour prendre régulièrement des précautions afin de réduire au minimum les émissions et, par conséquent, l'exposition. Au Canada, les limites d'exposition aux radiofréquences et aux rayonnements non ionisants à basse fréquence (Code de sécurité 6<sup>119</sup>) visent à éviter l'échauffement apparent des tissus et les décharges électriques, respectivement. L'évaluation n'intègre pas encore la recherche scientifique indiquant les effets sur la biochimie, la perméabilité membranaire et l'ADN, ou la reproduction humaine, le développement précoce, les conditions chroniques et le cancer, qui se produisent à des niveaux d'exposition aux radiofréquences courants.<sup>117,120,121</sup>

Les téléphones cellulaires sont de plus en plus courants, même chez les préadolescents, et ils sont très distrayants en classe. Cela a amené le gouvernement de l'Ontario à limiter leur utilisation aux applications d'apprentissage amorcées par l'enseignant, comme appareils fonctionnels pour les personnes handicapées et pour les communications d'urgence. Lorsqu'ils sont utilisés ou transportés contre le corps, les téléphones cellulaires peuvent excéder les lignes directrices d'exposition stipulées dans le Code de sécurité 6 du Canada<sup>122</sup> ou de l'Agence Nationale des Fréquences de la France.<sup>123</sup> Les appareils électroniques utilisés pour des activités autres que celles de la salle de classe, comme le jeu ou le furetage des médias sociaux, sont une source de distraction et nuisent à l'apprentissage et à la performance de l'utilisateur et des voisins.<sup>124</sup> Une analyse de la



London School of Economics des résultats des essais normalisés dans les écoles du Royaume-Uni a montré que l'interdiction des téléphones cellulaires dans les salles de classe a amélioré les résultats des essais.<sup>125</sup> Les améliorations étaient plus marquées chez les élèves qui avaient déjà eu un mauvais rendement, ce qui a entraîné une amélioration de l'équité.<sup>125</sup>

Mis à part la technologie, les effets subtils du rayonnement sans fil peuvent être difficiles à discerner, mais ont d'importantes répercussions sur la santé publique et les succès dans la société. L'exposition continue de faible niveau peut nuire au développement du cerveau, à la mémoire et au comportement,<sup>117,120,121</sup> y compris l'augmentation de la vitesse de réaction et la diminution de la précision (caractéristiques de l'impulsivité) et de la mémoire chez les enfants d'âge scolaire.

Le rayonnement sans fil affecte les membranes dans les cellules, ce qui peut rendre les produits chimiques, comme le plomb neurotoxique, encore plus dangereux. Les effets observés dans des dizaines d'études sur les animaux<sup>126</sup> ont été reproduits, par exemple, dans une étude portant sur 2 244 enfants d'écoles primaires. Les élèves dont le taux de plomb dans le sang était supérieur à la moyenne (ce qui est typique des enfants canadiens) qui faisaient également trois appels de téléphone cellulaire ou plus par jour présentaient des symptômes significativement plus élevés de trouble d'hyperactivité avec déficit de l'attention (TDAH).<sup>127</sup>

À l'intérieur, le rayonnement des radiofréquences se reflète sur les structures, les fenêtres et le mobilier à revêtement métallique (en particulier le métal comme les appareils ménagers et les classeurs).<sup>118</sup> Lorsque la technologie cellulaire (y compris la cinquième génération ou la 5G) est déployée au moyen d'une infrastructure sans fil plutôt que de la fibre optique, l'exposition anormale élevée provenant d'installations permanentes à l'intérieur et à proximité de bâtiments (p. ex., émetteurs-récepteurs pour les services cellulaires et Wi-Fi) peut être détectée au moyen d'un contrôle électromagnétique à l'aide de compteurs spécialisés. La santé peut se détériorer avec une exposition à long terme (p. ex., si un bureau est malheureusement placé dans un « point d'accès sans fil » invisible), mais ces expositions sont évitables en choisissant des connexions câblées plutôt que sans fil.

Les champs magnétiques à basse fréquence peuvent être causés par des problèmes de câblage, certains moteurs ou certaines ampoules à haute efficacité (pas toutes). Une fois identifiées par les experts, la correction du câblage et le remplacement de l'éclairage de remplacement sont des solutions simples.

Dans l'ensemble, les essais sont essentiels pour détecter et résoudre les champs électromagnétiques qui ne sont généralement pas ressentis, goûtés, vus ou entendus. Il existe de nombreuses solutions de TI moins énergivores, plus sécuritaires, plus sûres et plus durables.<sup>116,117</sup>

### 4.3. Changements de paradigme en milieu de travail et en classe

La pandémie de la COVID-19 a entraîné une conversion et une adaptation rapides au télétravail, à l'apprentissage en ligne ou au travail à distance. Cela dépend de la disponibilité d'Internet à large bande et peut se traduire par des gains d'efficacité et de commodité. Tout en économisant potentiellement de l'énergie et des ressources, le télétravail, les conférences Web et l'apprentissage en ligne facilitent également les interactions avec des personnes et des experts à l'extérieur d'une institution ou d'une région donnée. Le télétravail, du moins à temps partiel, peut accroître l'efficacité (particulièrement avec les outils de collaboration en nuage et les séries de programmes).<sup>128</sup> Il permet également de poursuivre l'apprentissage et le travail pendant les périodes de perturbation des itinéraires ou d'intervention en cas de pandémie. Le travail à distance offre également des possibilités d'optimiser la connectivité Internet (voir la section 4.2).

Les employés qui travaillent et les étudiants qui étudient dans leur propre espace, souvent à la maison, peuvent faire économiser aux employeurs et aux conseils scolaires les coûts de fourniture, de ventilation, de chauffage, de refroidissement et d'entretien des bureaux et des salles de classe. Le travail et l'apprentissage à la maison ou à l'extérieur peuvent réduire le transport et les émissions de CO<sub>2</sub> connexes si des journées entières sont passées à l'extérieur du bureau ou de la salle de classe. Le fait de travailler et d'apprendre à la maison entraînera une augmentation des coûts de chauffage et de climatisation résidentiels, car il est peu probable que les thermostats programmables fonctionnent avec les mêmes chutes de température pendant les périodes de travail et d'apprentissage à la maison.

Les résultats du télétravail ne sont pas tous souhaitables. Les différences de productivité entre le télétravail et l'apprentissage en ligne peuvent ne pas être apparentes en termes de résultats au travail ou aux essais; toutefois, la diminution des interactions personnelles peut avoir des répercussions négatives sur la satisfaction et des facteurs intangibles liés aux interactions interpersonnelles.<sup>129,30</sup> Les exigences des cours en ligne des écoles secondaires de l'Ontario ont été réduites de quatre à deux cours en novembre 2019 à la suite du tollé soulevé par le public; néanmoins, l'apprentissage en ligne à distance continuera de figurer dans l'enseignement supérieur, et a été rapidement développé et adopté en réponse aux fermetures en raison de COVID-19.

Si l'assiduité en personne est réduite, le temps passé à l'école ou en milieu de travail peut se concentrer davantage sur des activités comme l'apprentissage et le travail pratiques et la collaboration en personne. Pour ce faire, il faudra peut-être utiliser davantage les espaces communautaires que les bureaux individuels en rangées ou les cubicules de bureau. Ainsi, alors que les modes de travail changent, la conception de l'apprentissage et des espaces de travail évoluera également selon les activités et aux besoins pour distanciation sociale.

Il est important d'établir des limites pour le télétravail, car le travail à domicile peut entraîner la sensation d'être « toujours au travail ». Le CCHST résume de nombreuses

considérations, y compris des recommandations sur les habitudes, l'évitement des distractions, les communications et le fait que tous les lieux de travail doivent être également sécuritaires – aménagés et configurés adéquatement pour de longues périodes de travail.<sup>131</sup>

## 5. Discussion et conclusions

Les répercussions de l'augmentation des gaz à effet de serre sur les écosystèmes, l'agriculture, les océans et les pêches, les incendies et les conditions météorologiques sont à l'origine de la nécessité de changements rapides et judicieux dans la vie des Canadiens, ainsi que dans les pratiques environnementales exemplaires et la construction résiliente en réponse aux changements climatiques. Il faut beaucoup de travail, d'ingéniosité et d'attention aux détails pour réduire et remplacer par des gains d'efficacité et de l'énergie renouvelable, soit environ le tiers de la consommation d'énergie actuelle du Canada pour la ventilation, le chauffage, le refroidissement, l'éclairage et l'exploitation des bâtiments. L'urgence de santé publique découlant de la COVID-19 met également l'accent sur l'importance de la conception, de la sélection des matériaux pour un nettoyage efficace, des commodités (en particulier dans les salles de bain) et de l'entretien pour réduire au minimum les risques de contagion aérienne et sur les surfaces.<sup>42</sup>

Cela met l'accent sur le défi que doivent relever les bâtiments pour fournir efficacement des environnements sains et sécuritaires qui favorisent le bien-être et la productivité des occupants, en particulier au travail et à l'école. Il est essentiel de ne pas répéter les erreurs des années 1980, lorsque les restrictions énergétiques ont été respectées en resserrant les enveloppes des bâtiments et en réduisant les taux de ventilation, ce qui a entraîné des maladies et des invalidités. Des preuves accablantes provenant de recherches contrôlées et d'enquêtes sur des centaines de bâtiments indiquent que la productivité de l'apprentissage et du travail s'améliore avec des taux de ventilation dépassant les recommandations de l'ASHRAE, car le CO<sub>2</sub>, les bioeffluents et les contaminants atmosphériques liés aux bâtiments diminuent tous la santé, l'apprentissage et la productivité. En effet, à l'échelle internationale, les activités actuelles de certains établissements et bureaux d'enseignement, avec des taux d'occupation croissants, dépassent les niveaux de CO<sub>2</sub>, de bioeffluent et d'autres contaminants, ce qui a des répercussions négatives sur l'apprentissage et le rendement.<sup>3,4</sup> La pondération de la productivité des employés, de l'apprentissage et des résultats des élèves, de la santé physique et mentale, de l'absentéisme et des salaires, par rapport aux coûts d'exploitation des bâtiments, révèle la fausse économie de la qualité de l'air intérieur sous-optimale et, de façon plus générale, de la QEI.<sup>2,11</sup> Habituellement, les entreprises consacrent environ 1 % de leur budget de dépenses à l'énergie, 9 % aux frais de location et 90 % aux salaires.<sup>132</sup> Bien qu'il soit important de réduire les coûts de chauffage et de climatisation, ils représentent généralement un très faible pourcentage des coûts d'exploitation globaux, et par conséquent, il est important de maintenir la ventilation des bâtiments pour maintenir la qualité de l'air intérieur.

Le Conseil mondial du bâtiment durable, une coalition de représentants de 94 pays, figure en annexe parmi les organisations exemplaires, dans la partie 7, les Ressources. Il a publié une analyse de rentabilisation pour les bâtiments écologiques, ainsi qu'une collection d'études de cas sur les nouvelles constructions et les rénovations qui se traduisent par des « gains » partout, avec des émissions moindres ou nettes zéro, et une amélioration de la santé, de la satisfaction et de la productivité des employés.<sup>133,134</sup> Certains projets étaient même dirigés par des locataires.

Les lignes directrices évolutives en matière de construction pour relever les défis climatiques, intitulées Net Zero, accordent une grande priorité à la QEI et à la résilience des écoles<sup>13</sup> et des bureaux.<sup>12</sup> Bien que les initiatives et les normes relatives aux maisons à consommation énergétique nette zéro et passive qui comprennent l'emplacement et la planification des nouvelles constructions soient renforcées et éprouvées en pratique (voir la partie 7, les Ressources), le parc immobilier actuel constitue un défi de taille. Au cours des dernières décennies, des progrès importants ont été réalisés dans l'échange d'énergie entre l'air d'admission et l'air d'échappement, et des capteurs et des algorithmes de commande modernes peuvent commander les systèmes de CVC, d'éclairage et autres du bâtiment afin d'optimiser l'efficacité. Des mesures simples et peu coûteuses sont possibles, comme la climatisation locale ou l'isolation des stores pour améliorer l'isolation et/ou contrôler le gain solaire.

Les normes et les exigences relatives à la QEI évoluent également. Le contrôle du climat intérieur progresse, passant d'une température intérieure constante toute l'année à une tendance avec la température annuelle et quotidienne. Les comportements adaptatifs et le choix de vêtements peuvent contribuer au maintien de la productivité et d'une bonne qualité de l'air avec moins de chauffage et de refroidissement.

Le télétravail pour le travail ou l'éducation offre du temps et des économies d'énergie, ainsi que des possibilités d'apprentissage et de collaboration à l'extérieur de la région. Les considérations importantes comprennent le maintien d'un espace de travail de qualité et d'une routine, ainsi que l'établissement de limites face à la connectivité constante. L'utilisation de fils et de fibres pour la connectivité des TI (tant pour les systèmes du bâtiment que pour Internet) permet d'économiser de l'énergie à la fois sur place et hors site, et est plus sécuritaire et résiliente, elle entraîne également une exposition plus faible aux rayonnements potentiellement non ionisants.

La qualité de l'environnement est un sujet vaste et à multiples facettes, et ce module vise à aiguïser l'appétit plutôt qu'à fournir des conseils exhaustifs. De nombreuses organisations de premier plan sont énumérées à la section 7, et on espère qu'avec une science solide et des approches pragmatiques, les Canadiens pourront travailler et apprendre dans des environnements intérieurs de grande qualité, tout en respectant les limites de la Terre.

La collection de documents d'orientation du CCQAI aborde des sujets pertinents.<sup>16</sup> *Module 4 du CCQAI – [Reconnaître et régler les problèmes de QAI](#)* qui aident à déterminer les lacunes dans l'approvisionnement en air frais et la qualité de l'air, et le

*Module 9 du CCQAI – [Qualité de l'air intérieur et efficacité énergétique](#) offre des recommandations pour maintenir la qualité de l'air intérieur dans les bâtiments tout en mettant en œuvre diverses méthodes et systèmes pour réduire la consommation d'énergie. La section 7 répertorie les normes et les initiatives qui font progresser les bâtiments écoénergétiques et sains.*

## 6. Références

1. Comité canadien sur la qualité de l'air intérieur (CCQAI). Module 13 - Aborder les sensibilités chimiques. Canada: IAQResource; 2019 [cited 2020 Avr 24]. Disponible à: <https://iaqresource.ca/iaq-guides/>
2. UL Environment. Effects of indoor environmental quality on performance and productivity. Underwriters' Laboratories; 2016 [cited 2019 Jul 20]. Disponible à (anglais seulement): <https://legacy-uploads.ul.com/wp-content/uploads/sites/40/2018/01/2016.03.Effects-of-Indoor-Environmental-Quality-on-Performance-and-Productivity.pdf>
3. Fisk WJ. The ventilation problem in schools: literature review. *Indoor Air*. 2017 [cited 2019 Oct 22];27(6):1039–51. Disponible à (anglais seulement): <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ina.12403>
4. Salthammer T, Uhde E, Schripp T, Schieweck A, Morawska L, Mazaheri M, et al. Children's well-being at schools: Impact of climatic conditions and air pollution. *Environment International*. 2016 Sep 1 [cited 2019 Nov 7];94:196–210. Disponible à (anglais seulement): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412016301829>
5. Wargocki P, Wyon DP. Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork. *Building and Environment*. 2017 Feb 1 [cited 2019 Sep 5];112:359–66. Disponible à (anglais seulement): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132316304449>
6. MacNaughton P, Satish U, Laurent JGC, Flanigan S, Vallarino J, Coull B, et al. The impact of working in a green certified building on cognitive function and health. *Building and Environment*. 2017 Mar [cited 2019 Sep 6];114:178–86. Disponible à (anglais seulement): <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132316304723>
7. Haverinen-Shaughnessy U, Shaughnessy RJ. Effects of Classroom Ventilation Rate and Temperature on Students' Test Scores. *PLOS ONE*. 2015 Aug 28 [cited 2019 Sep 5];10(8):e0136165. Disponible à (anglais seulement): <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0136165>
8. Seppänen O, Fisk WJ, Lei QH. Ventilation and performance in office work. *Indoor Air*. 2006 Feb;16(1):28–36.
9. Allen JG, MacNaughton P, Satish U, Santanam S, Vallarino J, Spengler JD. Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments. *Environmental Health Perspectives*. 2015 [cited 2018 Dec 16]; Disponible à (anglais seulement): <https://dash.harvard.edu/handle/1/27662232>

10. Finell E, Tolvanen A, Haverinen-Shaughnessy U, Laaksonen S, Karvonen S, Sund R, et al. Indoor air problems and the perceived social climate in schools: A multilevel structural equation analysis. *Science of The Total Environment*. 2018 May 15 [cited 2019 Sep 5];624:1504–12. Disponible à (anglais seulement): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717335520>
11. Rackes A, Ben-David T, Waring MS. Outcome-based ventilation: A framework for assessing performance, health, and energy impacts to inform office building ventilation decisions. *Indoor Air*. 2018 [cited 2019 Nov 7];28(4):585–603. Disponible à (anglais seulement): <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ina.12466>
12. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), American Institute of Architects (AIA), Illuminating Engineering Society (IES), U.S. Green Building Council (USGBC). *Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings. Achieving Zero Energy*. 2019. Disponible à (anglais seulement): <https://www.ashrae.org/technical-resources/aedgs/zero-energy-aedg-free-download>
13. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), American Institute of Architects (AIA), Illuminating Engineering Society (IES), US Green Building Council (USGBC), US Department of Energy. *Advanced Energy Design Guide for K–12 School Buildings. Achieving Zero Energy*. Georgia, USA; 2018 [cited 2019 Sep 20]. Disponible à (anglais seulement): <https://www.ashrae.org/technical-resources/aedgs/zero-energy-aedg-free-download>
14. Brundage D, Deru M, Galasso E, Lemens J, Nandkeolyar M, Tomlinson E, et al. ASHRAE Position Document on Climate Change. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, and Chartered Institution of Building Services Engineers; 2018 [cited 2019 Oct 24] p. 20. Disponible à (anglais seulement): <https://www.ashrae.org/File%20Library/About/Position%20Documents/ASHRAE-Position-Document-on-Climate-Change.pdf>
15. MacNaughton P, Cao X, Buonocore J, Cedeno-Laurent J, Spengler J, Bernstein A, et al. Energy savings, emission reductions, and health co-benefits of the green building movement. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. 2018 Jan 30 [cited 2018 Feb 19];1. Disponible à (anglais seulement): <https://www-nature-com.proxy.bib.uottawa.ca/articles/s41370-017-0014-9>
16. Comité canadien sur la qualité de l'air intérieur (CCQAI). IAQResource. IAQResource. [cited 2020 Avr 24]. Disponible à: <https://iaqresource.ca/>
17. Pickett AR, Bell ML. Assessment of Indoor Air Pollution in Homes with Infants. *Int J Environ Res Public Health*. 2011 Dec [cited 2018 Dec 16];8(12):4502–20. Disponible à (anglais seulement): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3290986/>
18. Oluwole O, Kirychuk SP, Lawson JA, Karunanayake C, Cockcroft DW, Willson PJ, et al. Indoor mold levels and current asthma among school-aged children in



Saskatchewan, Canada. *Indoor Air*. 2017 [cited 2018 Dec 16];27(2):311–9.  
Disponible à (anglais seulement):  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ina.12304>

19. Liu W, Huang C, Li BZ, Zhao ZH, Yang X, Deng QH, et al. Household Renovation Before and During Pregnancy in Relation to Preterm Birth and Low Birth Weight in China. *Indoor Air*. 2018 Dec 31 [cited 2019 Jan 23]; Disponible à (anglais seulement): <http://doi.wiley.com/10.1111/ina.12534>
20. McDonald BC, Gouw JA de, Gilman JB, Jathar SH, Akherati A, Cappa CD, et al. Volatile chemical products emerging as largest petrochemical source of urban organic emissions. *Science*. 2018 Feb 16;359(6377):760–4.
21. Tang X, Misztal PK, Nazaroff WW, Goldstein AH. Volatile Organic Compound Emissions from Humans Indoors. *Environ Sci Technol*. 2016 Dec 6 [cited 2019 Nov 7];50(23):12686–94. Disponible à (anglais seulement): <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04415>
22. Roberts JR, Karr CJ, Council on Environmental Health. Pesticide Exposure in Children. *Pediatrics*. 2012 Dec [cited 2019 May 3];130(6):e1765–88. Disponible à (anglais seulement): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5813803/>
23. Glorennec P, Serrano T, Fravallo M, Warembourg C, Monfort C, Cordier S, et al. Determinants of children's exposure to pyrethroid insecticides in western France. *Environment International*. 2017 Jul 1 [cited 2018 Feb 26];104:76–82. Disponible à (anglais seulement): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412016308558>
24. Grandjean P. Delayed discovery, dissemination, and decisions on intervention in environmental health: a case study on immunotoxicity of perfluorinated alkylate substances. *Environmental Health*. 2018 Jul 31 [cited 2018 Aug 1];17(1):62. Disponible à (anglais seulement): <https://doi.org/10.1186/s12940-018-0405-y>
25. Gibson EA, Stapleton HM, Calero L, Holmes D, Burke K, Martinez R, et al. Flame retardant exposure assessment: findings from a behavioral intervention study. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. 2019 Jan [cited 2019 Mar 13];29(1):33. Disponible à (anglais seulement): <http://www.nature.com/articles/s41370-018-0049-6>
26. Dodson RE, Camann DE, Morello-Frosch R, Brody JG, Rudel RA. Semivolatile Organic Compounds in Homes: Strategies for Efficient and Systematic Exposure Measurement Based on Empirical and Theoretical Factors. *Environ Sci Technol*. 2015 Jan 6 [cited 2018 Oct 30];49(1):113–22. Disponible à (anglais seulement): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4288060/>
27. Satish Usha, Mendell Mark J., Shekhar Krishnamurthy, Hotchi Toshifumi, Sullivan Douglas, Streufert Siegfried, et al. Is CO<sub>2</sub> an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO<sub>2</sub> Concentrations on Human Decision-Making Performance.

- Environmental Health Perspectives. 2012 Dec 1 [cited 2018 Oct 29];120(12):1671–7. Disponible à (anglais seulement): <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.1104789>
28. Vehviläinen T, Lindholm H, Rintamäki H, Pääkkönen R, Hirvonen A, Niemi O, et al. High indoor CO<sub>2</sub> concentrations in an office environment increases the transcutaneous CO<sub>2</sub> level and sleepiness during cognitive work. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2016 Jan 2;13(1):19–29.
  29. Batterman S. Review and Extension of CO<sub>2</sub>-Based Methods to Determine Ventilation Rates with Application to School Classrooms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017 Feb [cited 2019 Sep 6];14(2):145. Disponible à (anglais seulement): <https://www.mdpi.com/1660-4601/14/2/145>
  30. Azuma K, Kagi N, Yanagi U, Osawa H. Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance. *Environment International*. 2018 Dec [cited 2019 Sep 6];121:51–6. Disponible à (anglais seulement): <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160412018312807>
  31. Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), U.S. Department of Commerce. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. [cited 2020 Mar 22]. Disponible à (anglais seulement): <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
  32. Zhang X, Wargocki P, Lian Z. Effects of Exposure to Carbon Dioxide and Human Bioeffluents on Cognitive Performance. *Procedia Engineering*. 2015 [cited 2019 Sep 5];121:138–42. Disponible à (anglais seulement): <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187770581502768X>
  33. Zhang X, Wargocki P, Lian Z. Human responses to carbon dioxide, a follow-up study at recommended exposure limits in non-industrial environments. *Building and Environment*. 2016 May [cited 2019 Sep 6];100:162–71. Disponible à (anglais seulement): <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132316300580>
  34. Zhang X, Wargocki P, Lian Z. Physiological responses during exposure to carbon dioxide and bioeffluents at levels typically occurring indoors. *Indoor Air*. 2017 Jan [cited 2019 Sep 6];27(1):65–77. Disponible à (anglais seulement): <http://doi.wiley.com/10.1111/ina.12286>
  35. Santé Canada. La ventilation et le milieu intérieur. 2018 Apr 19 [cited 2020 Feb 6]; Disponible à: <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/ventilation-milieu-interieur.html>
  36. American National Standards Institute / American Society for Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers ANSI/ASHRAE. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Addendum to ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016. Addendum to ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016. 2018 [cited 2019 Oct 30];6. Disponible à (anglais seulement):

[https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Standards%20and%20Guidelines/Standards%20Addenda/62.1-2016/62\\_1\\_2016\\_d\\_20180302.pdf](https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Standards%20and%20Guidelines/Standards%20Addenda/62.1-2016/62_1_2016_d_20180302.pdf)

37. Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, Blunier T, Barnola J-M, Siegenthaler U, et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*. 2019 Sep 19 [cited 2019 Nov 25];453(7193):379–82. Disponible à (anglais seulement): <http://www.nature.com/articles/nature06949>
38. MacNeill M, Dobbin N, St-Jean M, Wallace L, Marro L, Shin T, et al. Can changing the timing of outdoor air intake reduce indoor concentrations of traffic-related pollutants in schools? *Indoor Air*. 2016 Oct 1 [cited 2018 Sep 26];26(5):687–701. Disponible à (anglais seulement): <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ina.12252>
39. Ben-David T, Rackes A, Waring MS. Alternative ventilation strategies in U.S. offices: Saving energy while enhancing work performance, reducing absenteeism, and considering outdoor pollutant exposure tradeoffs. *Building and Environment*. 2017 May 1 [cited 2019 Nov 29];116:140–57. Disponible à (anglais seulement) : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317300574>
40. World Health Organization (WHO), United Nations International Children’s Emergency Fund (UNICEF). Water, sanitation, hygiene and waste management for COVID-19. 2020 [cited 2020 Mar 26]. Disponible à (anglais seulement) : <https://www.who.int/publications-detail/water-sanitation-hygiene-and-waste-management-for-covid-19>
41. Liu Y, Ning Z, Chen Y, Guo M, Liu Y, Gali NK, et al. Aerodynamic Characteristics and RNA Concentration of SARS-CoV-2 Aerosol in Wuhan Hospitals during COVID-19 Outbreak. *Microbiology*; 2020 Mar [cited 2020 Mar 26]. Disponible à (anglais seulement): <http://biorxiv.org/lookup/doi/10.1101/2020.03.08.982637>
42. Dietz L, Horve PF, Coil D, Fretz M, Wymelenberg KVD. 2019 Novel Coronavirus (COVID-19) Outbreak: A Review of the Current Literature and Built Environment (BE) Considerations to Reduce Transmission. 2020 Mar 12 [cited 2020 Mar 26]; Disponible à (anglais seulement): <https://www.preprints.org/manuscript/202003.0197/v1>
43. Blazejczyk K, Epstein Y, Jendritzky G, Staiger H, Tinz B. Comparison of UTCI to selected thermal indices. *Int J Biometeorol*. 2012 May 1 [cited 2020 Mar 23];56(3):515–35. Disponible à (anglais seulement): <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>
44. Center for the Built Environment. CBE Thermal Comfort Tool for EN-15251. [cited 2019 Dec 7]. Disponible à (anglais seulement): <https://comfort.cbe.berkeley.edu/EN>
45. Center for the Built Environment. CBE Thermal Comfort Tool for ASHRAE-55. [cited 2019 Dec 7]. Disponible à (anglais seulement): <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>

46. Roth K, Dieckmann J, Brodrick J. Infrared Radiant Heaters. American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers (ASHRAE); 2007 [cited 2019 Oct 25]. Disponible à (anglais seulement): [https://www.reverberray.com/wp-content/uploads/2013/01/emerging\\_tech\\_small.pdf](https://www.reverberray.com/wp-content/uploads/2013/01/emerging_tech_small.pdf)
47. Infrared (IR) or Radiant Heating Review. Engineers Edge. [cited 2019 Oct 27]. Disponible à (anglais seulement): <https://www.engineersedge.com/industrial-equipment/infrared-ir-radiant-heating.htm>
48. Geng Y, Ji W, Lin B, Zhu Y. The impact of thermal environment on occupant IEQ perception and productivity. *Building and Environment*. 2017 Aug [cited 2019 Sep 6];121:158–67. Disponible à (anglais seulement) : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132317302020>
49. Brazaitis M, Eimantas N, Daniuseviciute L, Baranauskiene N, Skrodeniene E, Skurvydas A. Time Course of Physiological and Psychological Responses in Humans during a 20-Day Severe-Cold–Acclimation Programme. *PLOS ONE*. 2014 Apr 10 [cited 2019 Nov 3];9(4):e94698. Disponible à (anglais seulement): <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0094698>
50. Halawa E. The adaptive approach to thermal comfort: A critical overview. *Energy and Buildings*. 2012 [cited 2019 Oct 28];51:101–10. Disponible à (anglais seulement): [https://www.academia.edu/26169509/The\\_adaptive\\_approach\\_to\\_thermal\\_comfort\\_A\\_critical\\_overview](https://www.academia.edu/26169509/The_adaptive_approach_to_thermal_comfort_A_critical_overview)
51. de Dear RJ, Akimoto T, Arens EA, Brager G, Candido C, Cheong KWD, et al. Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor Air*. [cited 2019 Oct 24];23(6):442–61. Disponible à (anglais seulement): [https://www.academia.edu/13285222/Progress\\_in\\_thermal\\_comfort\\_research\\_over\\_the\\_last\\_twenty\\_years](https://www.academia.edu/13285222/Progress_in_thermal_comfort_research_over_the_last_twenty_years)
52. Liang H-H, Chen C-P, Hwang R-L, Shih W-M, Lo S-C, Liao H-Y. Satisfaction of occupants toward indoor environment quality of certified green office buildings in Taiwan. *Building and Environment*. 2014 Feb [cited 2019 Sep 6];72:232–42. Disponible à (anglais seulement): <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132313003211>
53. Jiang J, Wang D, Liu Y, Xu Y, Liu J. A study on pupils' learning performance and thermal comfort of primary schools in China. *Building and Environment*. 2018 Apr [cited 2019 Sep 6];134:102–13. Disponible à (anglais seulement): <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132318301082>
54. Manu S. Clothing insulation as a behavioural adaptation for thermal comfort in Indian office buildings. [cited 2019 Dec 8]; Disponible à (anglais seulement): [https://www.academia.edu/33548232/Clothing\\_insulation\\_as\\_a\\_behavioural\\_adaptation\\_for\\_thermal\\_comfort\\_in\\_Indian\\_office\\_buildings](https://www.academia.edu/33548232/Clothing_insulation_as_a_behavioural_adaptation_for_thermal_comfort_in_Indian_office_buildings)

55. Melikov AK, Skwarczynski MA, Kaczmarczyk J, Zabecky J. Use of personalized ventilation for improving health, comfort, and performance at high room temperature and humidity. *Indoor Air*. 2013 [cited 2019 Sep 6];23(3):250–63. Disponible à (anglais seulement): <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ina.12012>
56. Carmichael S, Booten C, Robertson J, Chin J, Christensen D, Pless J, et al. Annual Energy Savings and Thermal Comfort of Autonomously Heated and Cooled Office Chairs. 2016 Jul [cited 2019 Nov 8] p. NREL/TP--6A80-66431, 1273063. Report No.: NREL/TP--6A80-66431, 1273063. Disponible à (anglais seulement): <http://www.osti.gov/servlets/purl/1273063/>
57. Veitch JA. Full spectrum lighting effects on performance, mood and health. Institute for Research in Construction Internal Report, 1994-06. 1994;(659):112. Disponible à (anglais seulement): <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=e536e379-14e4-4fa3-8aa5-7447f6b7aa6b>
58. Huisman ERCM, Morales E, van Hoof J, Kort HSM. Healing environment: A review of the impact of physical environmental factors on users. *Building and Environment*. 2012 Dec 1 [cited 2019 Jan 12];58:70–80 Disponible à (anglais seulement) : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132312001758>
59. Aumann D, Heschong L, Group HM, Wright R, Peet R. Windows and Classrooms: Student Performance and the Indoor Environment. *American Council for and Energy Efficient Economy*. 2004;15.
60. Li D, Sullivan WC. Impact of views to school landscapes on recovery from stress and mental fatigue. *Landscape and Urban Planning*. 2016 Apr 1 [cited 2019 Nov 11];148:149–58. Disponible à (anglais seulement): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204615002571>
61. Kuo M, Browning MHEM, Penner ML. Do Lessons in Nature Boost Subsequent Classroom Engagement? Refueling Students in Flight. *Front Psychol*. 2018 [cited 2019 Nov 11];8. Disponible à (anglais seulement): <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2017.02253/full>
62. Kelting S, Montoya M. Green Building Policy, School Performance, and Educational Leaders' Perspectives in USA. :8. Disponible à (anglais seulement): <https://pdfs.semanticscholar.org/e766/edec27abfdb1d3356a1d98b9cd8e219fd3a1.pdf>
63. Environnement et Changement climatique Canada. Mercure : Convention de Minamata . 2019 [cited 2019 Oct 28]. Disponible à: <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/organisation/affaires-internationales/partenariats-organisations/mercure-convention-minamata.html>

64. Jhunjhunwala A, Vasudevan K, Kaur P, Ramamurthi B, Kumaravel, Bitra S, et al. Energy efficiency in lighting: AC vs DC LED lights. In: 2016 First International Conference on Sustainable Green Buildings and Communities (SGBC). 2016. p. 1–4.
65. Wahl S, Engelhardt M, Schaupp P, Lappe C, Ivanov IV. The inner clock—Blue light sets the human rhythm. *Journal of Biophotonics*. [cited 2019 Oct 28];0(0):e201900102. Disponible à (anglais seulement): <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jbio.201900102>
66. Tähkämö L, Partonen T, Pesonen A-K. Systematic review of light exposure impact on human circadian rhythm. *Chronobiol Int*. 2019 Feb;36(2):151–70.
67. Stevens RG, Blask DE, Brainard GC, Hansen J, Lockley SW, Provencio I, et al. Meeting Report: The Role of Environmental Lighting and Circadian Disruption in Cancer and Other Diseases. *Environ Health Perspect*. 2007 Sep [cited 2017 Apr 29];115(9):1357–62. Disponible à (anglais seulement): <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1964886/>
68. Mortazavi SAR, Mortazavi SMJ. Women with hereditary breast cancer predispositions should avoid using their smartphones, tablets, and laptops at night. *Iran J Basic Med Sci*. 2018 Feb [cited 2019 Feb 11];21(2):112–5. Disponible à (anglais seulement): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5811748/>
69. Ward EM, Germolec D, Kogevinas M, McCormick D, Vermeulen R, Anisimov VN, et al. Carcinogenicity of night shift work. *The Lancet Oncology*. 2019 Aug 1 [cited 2019 Oct 28];20(8):1058–9. Disponible à (anglais seulement): [https://www.thelancet.com/journals/lanonc/article/PIIS1470-2045\(19\)30455-3/abstract](https://www.thelancet.com/journals/lanonc/article/PIIS1470-2045(19)30455-3/abstract)
70. Gilbertson M, Brophy J. Causality Advocacy: Workers’ Compensation Cases as Resources for Identifying and Preventing Diseases of Modernity. *New Solut*. 2018 Nov 22 [cited 2018 Dec 10];1048291118810900. Disponible à (anglais seulement): <https://doi.org/10.1177/1048291118810900>
71. Rodríguez-Morilla B, Madrid JA, Molina E, Correa A. Blue-Enriched White Light Enhances Physiological Arousal But Not Behavioral Performance during Simulated Driving at Early Night. *Front Psychol*. 2017 [cited 2019 Oct 22];8 Disponible à (anglais seulement): <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2017.00997/full>
72. Association Canadienne des Optométristes. Blue Light – Is there risk of harm?. The Canadian Association of Optometrists. 2016 [cited 2019 Nov 11]. Disponible à (anglais seulement): <https://opto.ca/health-library/blue-light-is-there-risk-of-harm>
73. LEDs & blue light | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l’alimentation, de l’environnement et du travail. [cited 2019 Oct 25]. Disponible à: <https://www.anses.fr/en/content/leds-blue-light>

74. Association Canadienne des Optométristes. Syndrome de vision informatique (fatigue oculaire numérique). Association Canadienne des Optométristes. 2016 [cited 2019 Nov 11]. Disponible à: <https://opto.ca/fr/health-library/syndrome-de-vision-informatique-fatigue-oculaire-numerique>
75. Tauste A, Ronda E, Molina M-J, Seguí M. Effect of contact lens use on Computer Vision Syndrome. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2016 [cited 2019 Nov 8];36(2):112–9. Disponible à (anglais seulement): <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/opo.12275>
76. Association Canadienne des Optométristes. la règle du 20-20-20. Association Canadienne des Optométristes. 2015 [cited 2019 Nov 11]. Disponible à: <https://opto.ca/fr/health-library/la-regle-du-20-20-20>
77. Welch D, Buonanno M, Grilj V, Shuryak I, Crickmore C, Bigelow AW, et al. Far-UVC light: A new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases. *Sci Rep*. 2018 Feb 9 [cited 2020 Mar 30];8. Disponible à (anglais seulement): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5807439/>
78. Clark C, Paunovic K. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Quality of Life, Wellbeing and Mental Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018 Oct 29 [cited 2018 Nov 16];15(11):2400. Disponible à (anglais seulement): <https://www.mdpi.com/1660-4601/15/11/2400>
79. Jarosińska D, Héroux M-È, Wilkhu P, Creswick J, Verbeek J, Wothge J, et al. Development of the WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: An Introduction. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018 Apr 20 [cited 2018 Nov 16];15(4):813. Disponible à (anglais seulement): <https://www.mdpi.com/1660-4601/15/4/813>
80. Brown B, Rutherford P, Crawford P. The role of noise in clinical environments with particular reference to mental health care: A narrative review. *International Journal of Nursing Studies*. 2015 Sep 1 [cited 2019 Sep 5];52(9):1514–24. Disponible à (anglais seulement): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020748915001406>
81. Pujol S, Levain J-P, Houot H, Petit R, Berthillier M, Defrance J, et al. Association between Ambient Noise Exposure and School Performance of Children Living in An Urban Area: A Cross-Sectional Population-Based Study. *J Urban Health*. 2014 Apr [cited 2019 Dec 9];91(2):256–71 Disponible à (anglais seulement): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3978148/>
82. Haines M, Stansfeld S, Head J, Job R. Multilevel modelling of aircraft noise on performance tests in schools around Heathrow Airport London. *J Epidemiol Community Health*. 2002 Feb [cited 2019 Dec 9];56(2):139–44. Disponible à (anglais seulement): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1732072/>



83. Dobbs S, Furnham A, McClelland A. The effect of background music and noise on the cognitive test performance of introverts and extraverts. *Applied Cognitive Psychology*. 2011 [cited 2019 Nov 9];25(2):307–13. Disponible à (anglais seulement): <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/acp.1692>
84. Hongisto V, Varjo J, Oliva D, Haapakangas A, Benway E. Perception of Water-Based Masking Sounds—Long-Term Experiment in an Open-Plan Office. *Front Psychol*. 2017 [cited 2019 Jul 25];8. Disponible à (anglais seulement): <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2017.01177/full>
85. Balazova I, Clausen G, Rindel JH, Poulsen T, Wyon DP. Open-plan office environments: A laboratory experiment to examine the effect of office noise and temperature on human perception, comfort and office work performance. *Indoor Air*. 2008;Paper ID: 703:8.
86. Shield BM, Dockrell JE. The Effects of Noise on Children at School: A Review. *Building Acoustics*. 2003 Jun [cited 2019 Sep 5];10(2):97–116. Disponible à (anglais seulement): <http://journals.sagepub.com/doi/10.1260/135101003768965960>
87. Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST). Superficie minimale du poste de travail dans un bureau. 2018 [cited 2019 Nov 11]. Disponible à: [https://www.cchst.ca/oshanswers/ergonomics/office/working\\_space.html](https://www.cchst.ca/oshanswers/ergonomics/office/working_space.html)
88. Voss J. Revisiting Office Space Standards. *At Work Office Interiors*; 2011 p. 6. Disponible à (anglais seulement): <https://www.atworkofficeinteriors.ca/files/resources/Revisiting-office-space-standards-white-paper.pdf>
89. Frontczak M, Schiavon S, Goins J, Arens E, Zhang H, Wargoeki P. Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design: Indoor environmental quality. *Indoor Air*. 2012 Apr [cited 2019 Jul 23];22(2):119–31. Disponible à (anglais seulement): <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1600-0668.2011.00745.x>
90. Brand JL. Office Ergonomics: A Review of Pertinent Research and Recent Developments. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*. 2008 Oct [cited 2019 Nov 8];4(1):245–82. Disponible à (anglais seulement): <http://journals.sagepub.com/doi/10.1518/155723408X342871>
91. Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST). Ergonomie : Fiches d'information Réponses SST. 2019 [cited 2019 Oct 28]. Disponible à: <https://www.cchst.ca/oshanswers/ergonomics/index.html>
92. Commission des accidents du travail de l'Alberta. L'ergonomie au bureau.. 2007 [cited 2020 May 11]. Disponible à: [https://www.wcb.ab.ca/assets/pdfs/public/office\\_ergo\\_french.pdf](https://www.wcb.ab.ca/assets/pdfs/public/office_ergo_french.pdf)

93. Centres de santé des travailleurs (ses) de l'Ontario (CSTO). Office Ergonomics Handbook, 5th Edition. 2008. Disponible à (anglais seulement): <https://www.ohcow.on.ca/edit/files/workbooks/24234%20OHCOW%20Office%20Ergonomics%20Handbook%20Website.pdf>
94. Callaghan JP, De Carvalho D, Gallagher K, Karakolis T, Nelson-Wong E. Is Standing the Solution to Sedentary Office Work? *Ergonomics in Design*. 2015 Jul 1 [cited 2019 Sep 5];23(3):20–4. Disponible à (anglais seulement): <https://doi.org/10.1177/1064804615585412>
95. Garrett G, Benden M, Mehta R, Pickens A, Peres SC, Zhao H. Call Center Productivity Over 6 Months Following a Standing Desk Intervention. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*. 2016 Jul 2 [cited 2020 Feb 26];4(2–3):188–95. Disponible à (anglais seulement): <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21577323.2016.1183534>
96. Bueno RL, Mallén JAC. Physical activity as a tool to reduce disease-related work absenteeism in sedentary employees: a systematic review. *Rev Esp Salud Pública*. 2018 Oct 1;92:12.
97. Akbari H, Cartalis C, Kolokotsa D, Muscio A, Pisello AL, Rossi F, et al. Local climate change and urban heat island mitigation techniques – the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2016 [cited 2019 Nov 25];22(1):1–16. Disponible à (anglais seulement): <https://journals.vgtu.lt/index.php/JCEM/article/view/2312>
98. Shishegar N. The Impact of Green Areas on Mitigating Urban Heat Island Effect: A Review. *International Journal of Environmental Sustainability*. 2014 Jan;9(1):9. Disponible à (anglais seulement): [http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/19121/The\\_impact\\_of\\_green\\_areas\\_on\\_mitigating\\_urban.pdf](http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/19121/The_impact_of_green_areas_on_mitigating_urban.pdf)
99. American Bird Conservancy, New York City Audubon. Bird-Friendly Building Design. 2016 [cited 2019 Nov 10]. Disponible à (anglais seulement): [https://abcbirds.org/wp-content/uploads/2015/05/Bird-friendly-Building-Guide\\_LINKS.pdf](https://abcbirds.org/wp-content/uploads/2015/05/Bird-friendly-Building-Guide_LINKS.pdf)
100. Design guidance - City of London. [cited 2019 Sep 3]. Disponible à (anglais seulement): <https://www.cityoflondon.gov.uk/services/environment-and-planning/planning/design/Pages/design-guidance.aspx>
101. Sweeney E, Yu ZM, Parker L, Dummer TJB. Lead in drinking water: a response from the Atlantic PATH study. *Environ Health Rev*. 2017 Mar 1 [cited 2017 Mar 15];60(1):9–13. Disponible à (anglais seulement): <http://pubs.ciphi.ca/doi/abs/10.5864/d2017-002>
102. Santé Canada. Rapport final sur l'état des connaissances scientifiques concernant les effets du plomb sur la santé humaine.. Ottawa: Santé Canada; 2013 [cited 2019 Nov

- 18]. Disponible à: <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/sante-environnement-milieu-travail/rapports-publications/contaminants-environnementaux/rapport-final-etat-connaissances-scientifiques-concernant-effets-plomb-sante-humaine.html>
103. Lanphear BP, Hornung R, Khoury J, Yolton K, Baghurst P, Bellinger DC, et al. Low-Level Environmental Lead Exposure and Children's Intellectual Function: An International Pooled Analysis. *Environ Health Perspect.* 2005 Jul [cited 2017 Mar 15];113(7):894–9. Disponible à (anglais seulement): <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1257652/>
104. Patrick L. Lead Toxicity, A Review of the Literature. Part I: Exposure, Evaluation, and Treatment. *Alternative Medicine Review.* 2006;11(1):21. Disponible à (anglais seulement): <http://archive.foundationalmedicinereview.com/publications/11/1/2.pdf>
105. Santé Canada. Réduire votre exposition au plomb. 2012 [cited 2020 Feb 26]. Disponible à: <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/securite-maison-et-jardin/reduire-votre-exposition-plomb.html>
106. Ministère du Travail, de la Formation et du Développement des compétences. L'exposition au plomb sur les chantiers de construction. 2004 [cited 2019 Dec 7]. Disponible à: <https://www.labour.gov.on.ca/french/hs/pubs/lead/index.php>
107. Yang W, Moon HJ. Combined effects of sound and illuminance on indoor environmental perception. *Applied Acoustics.* 2018 Dec [cited 2019 Sep 6];141:136–43. Disponible à (anglais seulement): <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003682X18303207>
108. Yang W, Moon HJ. Combined effects of acoustic, thermal, and illumination conditions on the comfort of discrete senses and overall indoor environment. *Building and Environment.* 2019 Jan [cited 2019 Sep 6];148:623–33. Disponible à (anglais seulement): <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132318307352>
109. Colton MD, MacNaughton P, Vallarino J, Kane J, Bennett-Fripp M, Spengler JD, et al. Indoor Air Quality in Green Vs Conventional Multifamily Low-Income Housing. *Environ Sci Technol.* 2014 Jul 15 [cited 2019 Nov 29];48(14):7833–41. Disponible à (anglais seulement): <https://doi.org/10.1021/es501489u>
110. Holmgren M, Kabanshi A, Sörqvist P. Occupant perception of “green” buildings: Distinguishing physical and psychological factors. *Building and Environment.* 2017 Mar 1 [cited 2019 Nov 29];114:140–7. Disponible à (anglais seulement): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013231630508X>
111. MacNaughton P, Spengler J, Vallarino J, Santanam S, Satish U, Allen J. Environmental perceptions and health before and after relocation to a green building. *Building and Environment.* 2016 Aug 1 [cited 2019 Nov 7];104:138–44. Disponible à (anglais seulement): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132316301639>

112. Environnement et Changement climatique Canada. Déclaration nationale du Canada à la COP25. *gcnews*. 2019 [cited 2020 Feb 3]. Disponible à: <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/nouvelles/2019/12/cop25.html>
113. Eichholtz P, Palacios J, Kok N, Willeboordse M. Indoor Environmental Quality and Human Performance: Evidence from a Large-Scale Field Study. :26.
114. Peng Y, Rysanek A, Nagy Z, Schlüter A. Using machine learning techniques for occupancy-prediction-based cooling control in office buildings. *Applied Energy*. 2018 Feb 1 [cited 2020 Feb 26];211:1343–58. Disponible à (anglais seulement): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917317129>
115. Burlig F, Knittel C, Rapson D, Reguant M, Wolfram C. Machine Learning from Schools about Energy Efficiency. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research; 2017 Oct [cited 2020 Feb 25] p. w23908. Report No.: w23908. Disponible à (anglais seulement): <http://www.nber.org/papers/w23908.pdf>
116. Schoechle T. Re-Inventing Wires: The Future of Landlines and Networks. National Institute for Science, Law & Public Policy. Washington DC, USA; 2018 [cited 2019 May 27]. Disponible à (anglais seulement): <http://electromagnetichealth.org/wp-content/uploads/2018/05/Wires.pdf>
117. Clegg FM, Sears M, Friesen M, Scarato T, Metzinger R, Lee Russell C, et al. Building science and radiofrequency radiation: What makes smart and healthy buildings. *Building and Environment*. 2019 Aug 6;106324.
118. Carlberg M, Hedendahl L, Koppel T, Hardell L. High ambient radiofrequency radiation in Stockholm city, Sweden. *Oncol Lett*. 2019 Feb [cited 2020 Feb 11];17(2):1777–83. Disponible à (anglais seulement): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6341832/>
119. Santé Canada. Limites d'exposition humaine à l'énergie électromagnétique radioélectrique dans la gamme de fréquences de 3 kHz à 300 GHz Code de sécurité 6 . 2015 [cited 2017 Mar 24]. Disponible à: <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/securite-et-risque-pour-sante/limites-exposition-humaine-energie-electromagnetique-radioelectrique-gamme-3-300.html>
120. Miller AB, Sears ME, Morgan LL, Davis DL, Hardell L, Oremus M, et al. Risks to Health and Well-Being From Radio-Frequency Radiation Emitted by Cell Phones and Other Wireless Devices. *Front Public Health*. 2019 [cited 2019 Aug 13];7. Disponible à (anglais seulement): <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2019.00223/full>
121. Belyaev I, Dean A, Eger H, Hubmann G, Jandrisovits R, Kern M, et al. EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses. *Reviews on Environmental Health*. 2016 [cited 2017 Mar 14];31(3):363–397. Disponible à (anglais seulement):

<https://www.degruyter.com/view/j/reveh.ahead-of-print/reveh-2016-0011/reveh-2016-0011.xml?format=INT>

122. Canadian Broadcasting Corporation. The secret inside your phone: Cellphone safety and testing - Episodes - Marketplace. 2017 [cited 2017 Jun 15]. Disponible à (anglais seulement): <http://www.cbc.ca/marketplace/the-secret-inside-your-phone>
123. Agence Nationale des Fréquences (France). DAS téléphonie mobile. 2017 [cited 2019 Dec 4]. Disponible à: <https://data.anfr.fr/explore/dataset/das-telephonie-mobile/table/>
124. Glass AL, Kang M. Dividing attention in the classroom reduces exam performance. *Educational Psychology*. 2019 Mar 16 [cited 2019 Dec 8];39(3):395–408. Disponible à (anglais seulement): <https://doi.org/10.1080/01443410.2018.1489046>
125. Beland L-P, Murphy R. Ill Communication: Technology, distraction & student performance. *Labour Economics*. 2016 Aug [cited 2019 Dec 7];41:61–76. Disponible à (anglais seulement): <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927537116300136>
126. Lerchl A, Klose M, Grote K, Wilhelm AFX, Spathmann O, Fiedler T, et al. Tumor promotion by exposure to radiofrequency electromagnetic fields below exposure limits for humans. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2015 Apr 17 [cited 2018 Sep 15];459(4):585–90. Disponible à (anglais seulement): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006291X15003988>
127. Byun Y-H, Ha M, Kwon H-J, Hong Y-C, Leem J-H, Sakong J, et al. Mobile Phone Use, Blood Lead Levels, and Attention Deficit Hyperactivity Symptoms in Children: A Longitudinal Study. *PLOS ONE*. 2013 Mar 21 [cited 2019 May 18];8(3):e59742. Disponible à (anglais seulement): <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0059742>
128. Pearce JA. Successful Corporate Telecommuting with Technology Considerations for Late Adopters. *Organizational Dynamics*. 2009 Jan [cited 2020 Feb 11];38(1):16–25. Disponible à (anglais seulement): <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0090261608000806>
129. Pei L, Wu H. Does online learning work better than offline learning in undergraduate medical education? A systematic review and meta-analysis. *Med Educ Online*. 2019 Sep 17 [cited 2020 Feb 25];24(1). Disponible à (anglais seulement): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6758693/>
130. Kemp N, Grieve R. Face-to-face or face-to-screen? Undergraduates' opinions and test performance in classroom vs. online learning. *Front Psychol*. 2014 Nov 12 [cited 2020 Feb 25];5. Disponible à (anglais seulement): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4228829/>

131. Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST). Télétravail /travail à distance: Fiches d'information Réponses SST. 2019 [cited 2020 Feb 26]. Disponible à: <https://www.cchst.ca/oshanswers/hsprograms/telework.html>
132. Alker J, Malanca M, Pottage C, O'Brien R. Health, Wellbeing & Productivity in Offices. The next chapter for green building. World Green Building Council; 2014 Sep.
133. World Green Building Council. Building the Business Case: Health, Wellbeing and Productivity in Green Offices. 2016 Oct [cited 2020 Feb 27]. Disponible à (anglais seulement): <https://www.worldgbc.org/>
134. World Green Building Council. Doing Right by Planet and People: The Business Case for Health and Wellbeing in Green Building. 2018 Apr [cited 2020 Feb 27]. Disponible à (anglais seulement): [https://www.worldgbc.org/sites/default/files/WorldGBC%20-%20Doing%20Right%20by%20Planet%20and%20People%20-%20April%202018\\_0.pdf](https://www.worldgbc.org/sites/default/files/WorldGBC%20-%20Doing%20Right%20by%20Planet%20and%20People%20-%20April%202018_0.pdf)

## 7. Ressources : Qualité environnementale des bâtiments - Organisations et groupes de recherche, et domaines des lignes directrices

Organisation	Domaines
American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) <a href="https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines">https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines</a>	Lignes directrices détaillées et méthodes de prévision pour le chauffage, la climatisation, la ventilation, le confort thermique et les objectifs d'efficacité énergétique dans les bâtiments nouveaux et existants de divers types, dans divers climats.
Baubiologie MAES  <a href="https://buildingbiology.com/site/wp-content/uploads/randbedingungen-2015-englisch.pdf">https://buildingbiology.com/site/wp-content/uploads/randbedingungen-2015-englisch.pdf</a> and <a href="https://buildingbiology.com/site/wp-content/uploads/richtwerte-2015-englisch.pdf">https://buildingbiology.com/site/wp-content/uploads/richtwerte-2015-englisch.pdf</a>	<b>Champs, ondes, rayonnement électromagnétique</b> Toxines, polluants, Climat intérieur Champignons, bactéries, allergènes
BOMA BEST Association canadienne des propriétaires et administrateurs d'immeubles du Canada  <a href="http://bomacanada.ca/fr/bomabest/aboutbomabest/">bomacanada.ca/fr/bomabest/aboutbomabest/</a> Voir une vaste série de liens	Énergie, eau, air, confort, santé et bien-être, achat, garde, déchets, site, mobilisation des intervenants
BREEAM Planification et certification internationales pour les collectivités, l'infrastructure, les nouvelles constructions, les bâtiments commerciaux et les remises à neuf <a href="http://www.breeam.com/discover/technical-standards/">www.breeam.com/discover/technical-standards/</a>  <a href="https://www.bregroup.com/news/connected-cities-start-with-connected-homes/">https://www.bregroup.com/news/connected-cities-start-with-connected-homes/</a>	Sujets similaires, notamment les <b>villes et les bâtiments connectés, l'utilisation de connexions câblées (non sans fil) pour éviter les difficultés avec les matériaux d'efficacité énergétique interférant avec les signaux</b>



Organisation	Domaines
<p>Building Biology Institute (international) buildingbiologyinstitute.org</p> <p>De nombreux liens, notamment</p> <p><a href="https://buildingbiologyinstitute.org/wp-content/uploads/2019/05/Indoor-Climate-Fact-Sheet.pdf">https://buildingbiologyinstitute.org/wp-content/uploads/2019/05/Indoor-Climate-Fact-Sheet.pdf</a></p> <p><a href="https://buildingbiologyinstitute.org/course/electromagnetic-radiation/">https://buildingbiologyinstitute.org/course/electromagnetic-radiation/</a></p>	<p>Qualité de l'environnement intérieur : QAI, gestion de l'humidité; contrôle et choix des matériaux; qualité et traitement de l'eau; finitions</p> <p>Climat intérieur (y compris les qualités électromagnétiques); ventilation</p> <p>Rayonnement électromagnétique : Éclairage; micro-surtensions (« électricité sale »); systèmes électriques photovoltaïques; technologies des communications; recherche et solutions; réduction de la radioactivité</p>
<p>Built Green Canada <a href="http://www.builtgreencanada.ca">www.builtgreencanada.ca</a> [véhicule publicitaire pour les produits]</p> <p><a href="http://www.builtgreencanada.ca/i-envelope-and-energy-systems">www.builtgreencanada.ca/i-envelope-and-energy-systems</a> <a href="http://www.builtgreencanada.ca/ii-materials-and-methods">www.builtgreencanada.ca/ii-materials-and-methods</a></p> <p>nombreux autres</p>	<p>Énergie</p> <p>Eau (récupération de chaleur)</p> <p>Matériaux durables</p> <p>Les matériaux comprennent des composants recyclés</p> <p>Imperméabilisation à l'humidité</p> <p>Déchets – Compostage sur place ou collecte de matériaux de compostage pour le compostage hors site, le cas échéant</p> <p>Revêtement perméable</p>
<p>Conseil du bâtiment durable du Canada <a href="http://www.cagbc.org">www.cagbc.org</a></p> <p><a href="http://www.cagbc.org/makingthecase">www.cagbc.org/makingthecase</a></p>	<p>Arguments en faveur des bâtiments à <b>carbone zéro</b> – rapport complet</p> <p>Fait progresser la norme LEED et la norme de construction carbone zéro</p> <p>LEED - Site (p. ex., friches industrielles), eaux pluviales, irrigation, utilisation de l'eau, <b>réduction des îlots de chaleur</b>, pollution lumineuse, solutions de rechange en matière de transport et soutien au cyclisme, énergie, matériaux et déchets, <b>éclairage, y compris la lumière du jour</b>, émissions de matériaux et QAI</p>
<p>Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail</p> <p><a href="https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/iaq_intro.html">https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/iaq_intro.html</a></p>	<p>QAI</p> <p>Bruit</p> <p>Confort thermique</p> <p>Ergonomie</p> <p>Éclairage</p>

Organisation	Domaines
Énergide (n'importe quelle maison) Energy Star (nouvelle construction)  <a href="http://www.rncan.gc.ca/efficacite-energetique/energide-au-canada/evaluations-energide-lefficacite-energetique-votre-maison/20554?_ga=2.148391668.252854277.1586895467-533156398.1586895467">www.rncan.gc.ca/efficacite-energetique/energide-au-canada/evaluations-energide-lefficacite-energetique-votre-maison/20554?_ga=2.148391668.252854277.1586895467-533156398.1586895467</a> <a href="http://www.rncan.gc.ca/efficacite-energetique/energy-star-canada/18954">www.rncan.gc.ca/efficacite-energetique/energy-star-canada/18954</a>	Efficacité énergétique pour les rénovations  Efficacité énergétique pour les maisons neuves, les bâtiments, en milieu de travail et pour les produits
Envirohome  Le compte et les ressources sont réservés aux membres de l'Association canadienne des constructeurs d'habitations.	R2000 + Initiative de maisons saines de la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL), comme la santé des occupants, l'efficacité énergétique, l'efficacité des ressources, la responsabilité environnementale et l'abordabilité.
Equilibrium Initiative de démonstrations de la SCHL  <a href="http://publications.gc.ca/site/eng/9.857925/publication.html">publications.gc.ca/site/eng/9.857925/publication.html</a>  <a href="http://publications.gc.ca/collections/collection_2018/schl-cmhc/nh18-1-2/NH18-1-2-196-2013-eng.pdf">http://publications.gc.ca/collections/collection_2018/schl-cmhc/nh18-1-2/NH18-1-2-196-2013-eng.pdf</a>  <a href="http://publications.gc.ca/collections/collection_2018/schl-cmhc/nh18-1-2/NH18-1-2-196-2013-eng.pdf">publications.gc.ca/collections/collection_2018/schl-cmhc/nh18-1-2/NH18-1-2-196-2013-eng.pdf</a>	Économie d'eau et d'énergie + projets de démonstration de production d'énergie photovoltaïque
Green Globes <a href="http://www.greenglobes.com">http://www.greenglobes.com</a>	BOMA BEST + ECD Energy et Environment Canada Ltd
Green Building Canada - ressources : <a href="http://greenbuildingcanada.ca">greenbuildingcanada.ca</a>	Ressources, coordination et organisation éducative
Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)	voir CBDCA
International Living Future Institute Living-future.org  Défi du bâtiment vivant « Un chemin visionnaire vers un avenir régénérateur » (note les progrès lents à ce jour et la nécessité d'accélérer) <a href="https://living-future.org/wp-content/uploads/2019/08/LBC-4_0_v13.pdf">https://living-future.org/wp-content/uploads/2019/08/LBC-4_0_v13.pdf</a>	Énergie Eau Lumière Intérieur et extérieur sains (surtout qualité de l'air) Matériaux et approvisionnement Conception biophysique Éducation et inspiration

Organisation	Domaines
Novoclimat	Québec, efficacité énergétique dans les bâtiments, transport L'objectif est de réduire la consommation d'énergie d'au moins 1 % par année.
Passive House Alliance (États-Unis) <a href="http://www.phius.org">www.phius.org</a> <a href="http://www.phius.org/phius-2015-new-passive-building-standard-summary">www.phius.org/phius-2015-new-passive-building-standard-summary</a> <a href="http://www.phius.org/phius-certification-for-buildings-products/project-certification/documents-for-download">www.phius.org/phius-certification-for-buildings-products/project-certification/documents-for-download</a>	<b>Objectif : maisons/bâtiments à consommation énergétique nette zéro</b> Norme élevée
R2000 <a href="https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeefiles/pdf/2012%20R2000%20Standard%20FR.pdf">https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeefiles/pdf/2012%20R2000%20Standard%20FR.pdf</a>	Efficacité énergétique, étanchéité à l'air, responsabilité environnementale dans les nouvelles constructions
Ville de Londres au Royaume-Uni Directives de conception (principalement à l'extérieur) <a href="http://www.cityoflondon.gov.uk">www.cityoflondon.gov.uk</a>  <a href="https://www.cityoflondon.gov.uk/services/environment-and-planning/planning/design/Pages/design-guidance.aspx">https://www.cityoflondon.gov.uk/services/environment-and-planning/planning/design/Pages/design-guidance.aspx</a>	Microclimat du vent Éblouissement solaire Convergence solaire Lumière du soleil Principales connexions des services publics, y compris les télécommunications
AUSSI <i>Document de la conférence :</i> <i>Mise à l'essai de la corrélation entre la qualité de l'environnement intérieur et le temps productif</i>  <a href="https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/52660/items/1.0076354">https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/52660/items/1.0076354</a>	Thermique, qualité de l'air, ventilation Lumière, confort visuel Bruit Confidentialité sonore Confidentialité visuelle Quantité d'espace / surpeuplement Facilité d'interaction entre les occupants et les TI Confort, ajustement du mobilier Propreté et entretien des bâtiments et des espaces de travail