

Qualité de l'air au bureau : niveaux de CO₂ et productivité au travail

Publié le 3 juin 2026 61 min de lecture



Résumé analytique

La qualité de l'air intérieur (QAI) dans les [environnements de bureau](#) est devenue un facteur critique influençant la santé, le bien-être et la productivité des travailleurs. Face aux préoccupations croissantes concernant l'efficacité énergétique, le changement climatique et les récentes pandémies, les concepteurs de bâtiments et les employeurs se concentrent de plus en plus sur l'équilibre entre la ventilation pour le contrôle des infections et le confort, et les coûts énergétiques. Ce rapport complet détaille le **contexte historique, les normes actuelles et les preuves scientifiques** concernant la ventilation des bureaux et les niveaux de dioxyde de carbone (CO₂), et analyse leurs impacts sur la productivité des travailleurs. Nous passons en revue les directives internationales sur la QAI, les seuils de CO₂ typiques et recommandés, ainsi que les recherches de pointe reliant la ventilation et la performance cognitive. Les principales conclusions sont les suivantes :

- **Normes de ventilation** : La plupart des normes (par exemple, ASHRAE 62.1-2022, Santé Canada, HSE UK) convergent vers le principe selon lequel le CO₂ intérieur ne devrait pas dépasser ~700 ppm au-dessus du niveau de fond extérieur (généralement ~500 ppm) – c'est-à-dire maintenir le pic de CO₂ intérieur autour de **1200 ppm ou moins** (Source: www.worksafenb.ca) (Source: www.ars.usda.gov). Santé Canada recommande une limite d'exposition à long terme de **1000 ppm** (moyenne sur 24 h) pour minimiser les risques pour la santé et la performance (Source: www.canada.ca). Le HSE (Royaume-Uni) note que des niveaux de CO₂ prolongés au-dessus de **1500 ppm** indiquent une ventilation inadéquate (Source: www.hse.gov.uk). La norme ASHRAE 62.1 spécifie des **taux de ventilation mécanique d'environ 5 cfm/personne (=2,5 L/s) plus une ventilation par zone (=0,2 L/s·m²)** pour les bureaux (Source: engdatabase.com) ; les nouveaux bureaux typiques fournissent de l'ordre de **8–15 L/s par personne**, bien que de nombreux bâtiments existants soient en dessous de ce niveau.
- **Le CO₂ comme indicateur** : La respiration humaine est la principale source de CO₂ intérieur. Parce que le CO₂ est inoffensif aux niveaux typiques, il est utilisé comme indicateur de l'adéquation de la ventilation. Par exemple, 1000 ppm de CO₂ correspondent approximativement à **10 L/s d'air extérieur par personne** (Source: www.hse.gov.uk). Lorsque la ventilation est faible, le CO₂ intérieur augmente, tout comme les contaminants générés par l'homme. Le contexte historique remonte à l'observation du chimiste du XIXe siècle Pettenkofer, selon laquelle un taux supérieur à 1000 ppm dans les pièces provoque de la fatigue et une baisse de performance (Source: www.raumluf.org). La pratique moderne considère qu'un taux de CO₂ soutenu supérieur à 1500 ppm est inacceptable (Source: www.hse.gov.uk).

- **Effets sur la santé et la productivité** : Les preuves scientifiques sont mitigées, mais suggèrent de plus en plus qu'une ventilation sous-optimale (taux de CO₂ et de polluants plus élevés, et stagnation) peut dégrader la fonction cognitive et la santé. Des expériences contrôlées par Allen *et al.* (2015) ont montré des **scores cognitifs jusqu'à 100 % plus élevés** dans des bureaux bien ventilés (« verts ») par rapport aux bureaux conventionnels (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov), tandis qu'un taux de CO₂ plus faible seul (à faible pollution) peut nuire à la prise de décision. À l'inverse, une étude récente de 2024 étroitement contrôlée (Flagner *et al.*) n'a trouvé **aucun déclin cognitif** lorsque les employés de bureau étaient exposés à 3000 ppm contre 900 ppm de CO₂ (Source: papers.ssrn.com), suggérant que le CO₂ en soi (à des niveaux tolérables) pourrait ne pas nuire directement à la cognition. Il est important de noter que les études sur le terrain indiquent que **les symptômes de santé et la productivité souffrent dans les espaces mal ventilés** : les travailleurs signalent davantage de maux de tête, de fatigue et de plaintes respiratoires à >800–900 ppm (Source: www.canada.ca), et l'élimination des sources de pollution ou l'augmentation de la ventilation ont permis d'améliorer la performance au travail simulée de plusieurs pourcent (Source: www.periodicos.capes.gov.br) (Source: www.periodicos.capes.gov.br). Une revue systématique de 42 études (n=6850) a conclu qu'une exposition supérieure à la ventilation minimale de l'ASHRAE (CO₂ ≈1000 ppm) est corrélée à une **santé, une performance et une productivité moindres** (Source: papers.ssrn.com).
- **Implications économiques et professionnelles** : Même de petits gains de performance peuvent générer d'importants avantages économiques dans le travail intellectuel. Par exemple, des études de modélisation prévoient que des stratégies de ventilation « gagnant-gagnant » (économiseurs et air frais accru) pourraient améliorer la production moyenne de travail d'environ 0,5 %, réduire l'absentéisme d'environ 5 heures/an par employé et économiser des coûts énergétiques significatifs (Source: researchdiscovery.drexel.edu). Des rapports historiques estiment qu'une mauvaise QAI dans les bureaux coûte souvent aux entreprises de l'ordre de **5 à 10 % de productivité** (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov) (Source: www.periodicos.capes.gov.br). Dans une économie moderne, les grandes entreprises investissent dans la surveillance et la mise à niveau de la QAI (par exemple, des capteurs de CO₂ étendus dans les bureaux) pour soutenir le **bien-être des employés** et la vigilance cognitive.
- **Recommandations et orientations futures** : Les preuves soulignent la nécessité de **directives de ventilation robustes** et d'une surveillance continue. Les questionnaires d'installations devraient viser à maintenir le CO₂ intérieur à 1000 ppm ou moins (lorsque l'extérieur est à ~400–500 ppm) comme norme raisonnable, et prendre des mesures s'il dépasse ~1500 ppm (Source: www.hse.gov.uk) (Source: www.canada.ca). Cela implique une conception CVC appropriée (par exemple, ventilation à la demande, économiseurs efficaces), le contrôle à la source des polluants intérieurs et les commentaires des occupants. La recherche émergente met l'accent sur une détection de la QAI personnalisée et multiparamétrique (au-delà du CO₂) pour optimiser pleinement l'environnement de bureau. Les tendances à long terme pointent vers des réglementations plus strictes sur la QAI, l'intégration de mesures de santé dans les normes de construction et l'équilibre entre les objectifs énergétiques/d'émissions et les besoins en ventilation. En résumé, **améliorer la qualité de l'air dans les bureaux n'est pas seulement une question de conformité, mais un investissement stratégique** – cela protège la **santé des travailleurs** et débloque des gains de productivité cachés (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov) (Source: researchdiscovery.drexel.edu).

Introduction

La qualité de l'environnement intérieur dans les **immeubles de bureaux** est un déterminant majeur de la **santé au travail** et de la performance (Source: www.sciencedirect.com) (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov). Les personnes dans les pays développés passent en moyenne plus de 90 % de leur temps à l'intérieur, en grande partie au travail, de sorte que **l'environnement intérieur régit l'exposition quotidienne à la température, à l'humidité, aux polluants et à la ventilation**. Dans les bureaux, les contaminants intérieurs typiques incluent les bioeffluents générés par l'homme (CO₂, humidité, odeurs), les composés organiques volatils (COV) provenant des matériaux de construction et de l'équipement, les particules fines provenant de l'infiltration extérieure et des activités de bureau, et les sous-produits microbiens (moisissures). Parmi les paramètres de QAI, **la concentration de dioxyde de carbone se distingue** comme un traceur important de l'adéquation de la ventilation car elle est directement liée à l'occupation et facile à mesurer (Source: www.raumluf.org) (Source: www.hse.gov.uk).

Historiquement, **l'objectif principal de la ventilation était le confort et la santé des occupants**. Dans les années 1840, l'hygiéniste allemand Max von Pettenkofer a déclaré de manière célèbre qu'un taux de CO₂ intérieur supérieur à ~1000 parties par million (ppm) entraîne une « perte de performance et une diminution du bien-être » (Source: www.raumluf.org). Tout au long du XXe siècle, les préoccupations de santé publique (par exemple, la tuberculose, les maladies transmissibles) et la sécurité au travail ont façonné les codes du bâtiment exigeant de l'air extérieur. Cependant, les crises énergétiques (années 1970-80) ont conduit à des enveloppes de bâtiment plus étanches et souvent à une ventilation réduite, contribuant au « syndrome du bâtiment malsain » reconnu dans les années 1980. Au cours des dernières décennies, un regain d'intérêt a émergé : la recherche en santé environnementale et en épidémiologie a lié des changements modestes de la QAI à des effets subtils mais significatifs sur la fonction cognitive et la productivité (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov) (Source: www.periodicos.capes.gov.br). La pandémie de COVID-19 (2020–2022) a davantage mis en évidence le rôle de la ventilation dans le contrôle des infections aéroportées, augmentant l'intérêt pour la QAI.

D'ici 2026, la **QAI et la ventilation des bureaux sont des sujets à l'intersection de la santé au travail, de l'ingénierie du bâtiment et de la productivité organisationnelle**. Les employeurs sont conscients de la façon dont une qualité de l'air sous-optimale (étouffement, odeurs, stagnation) affecte la satisfaction et la performance des employés. Les professionnels du bâtiment sont aux prises avec la nécessité d'atteindre des **objectifs d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de carbone** de plus en plus ambitieux tout en assurant un air frais adéquat. Les décideurs politiques et les organismes de normalisation (ASHRAE, CEN, ISO, OMS) mettent à jour les directives à la lumière des nouvelles découvertes scientifiques. Pendant ce temps, des capteurs avancés et l'automatisation des bâtiments permettent une surveillance de la QAI en temps réel, permettant une gestion basée sur les données.

Ce rapport fournit une analyse approfondie et fondée sur des preuves de la **qualité de l'air dans les bureaux, en se concentrant sur les niveaux de CO₂, les normes de ventilation et les impacts sur la productivité**. Nous passons d'abord en revue les bases de la ventilation et la façon dont le CO₂ est utilisé comme mesure de la QAI. Ensuite, nous résumons les normes internationales de QAI et les valeurs guides (par exemple, ASHRAE, OMS, réglementations nationales), y compris des tableaux comparatifs. Nous examinons ensuite les effets physiologiques et sur la performance du CO₂ intérieur et des polluants associés, en nous appuyant sur des expériences en laboratoire, des études sur le terrain et des méta-analyses. Les principales conclusions des études d'exposition contrôlée (par exemple, les expériences « Green Building » de Harvard) et les analyses longitudinales en milieu de travail (par exemple, les centres d'appels) sont comparées. Nous présentons une analyse des données reliant les taux de ventilation et le CO₂ aux résultats cognitifs et de santé, avec des résultats statistiques appropriés. Plusieurs **études de cas** illustrent des scénarios réels (par exemple, bureaux « verts » haut de gamme vs conventionnels, utilisation de moniteurs de CO₂, impact des rénovations). Le rapport discute des implications pour la conception des bâtiments, le bien-être des occupants et la politique organisationnelle, et trace les **orientations futures** telles que des réglementations plus strictes sur la QAI et une gestion avancée des bâtiments. Tout au long du rapport, toutes les affirmations sont étayées par les dernières recherches évaluées par des pairs et des sources faisant autorité (directives gouvernementales, documents de normes) avec des citations approfondies (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov) (Source: papers.ssrn.com).

Contexte historique et arrière-plan

Reconnaissance précoce du CO₂ comme indicateur de ventilation

Le concept selon lequel la qualité de l'air intérieur affecte la performance humaine remonte à plus de 150 ans. Dans les années 1830, le chimiste Karl Scheele a isolé pour la première fois le dioxyde de carbone (CO₂), suivi par Joseph Priestley et d'autres qui ont reconnu ses effets physiologiques. Au milieu du XIXe siècle, l'hygiéniste allemand **Max von Pettenkofer** a examiné les environnements intérieurs et les « chambres de malades ». Pettenkofer a observé qu'à mesure que les gens s'accumulent dans un espace clos, les niveaux de CO₂ augmentent et qu'au-dessus d'environ *1000 ppm*, les occupants subissent une « *Leistungsverlust* » (perte de performance) et un confort réduit (Source: www.raumluft.org). Il a recommandé d'évaluer la ventilation en surveillant le CO₂ (citant souvent ce seuil d'environ 1000 ppm). Cette intuition précoce – selon laquelle le CO₂ peut servir d'indicateur d'air intérieur « vicié » – a perduré dans la science de la ventilation (Source: www.raumluft.org) (Source: www.worksafenb.ca).

À la fin du XIXe et au début du XXe siècle, les architectes et les ingénieurs ont commencé à spécifier des taux d'air frais minimaux pour les écoles et les bureaux. Par exemple, les normes européennes au début des années 1900 exigeaient une **ventilation par personne** (par exemple, de l'ordre de 30 mètres cubes/heure par personne, soit environ 8 L/s). Après la Seconde Guerre mondiale, des directives plus formelles ont émergé. Le seuil de 1000 ppm de Pettenkofer a influencé de nombreux codes modernes : par exemple, la directive allemande dans certains contextes fait encore référence au maintien du CO₂ en dessous de 1000 ppm dans les espaces occupés. La norme américaine ANSI/ASHRAE 62.1 (Ventilation pour une qualité de l'air intérieur acceptable) a historiquement basé ses taux de ventilation en partie sur des algorithmes visant à maintenir le CO₂ en dessous de ~1000 ppm.

Développements réglementaires

Au cours des années 1960-80, le domaine de la « qualité de l'environnement intérieur » s'est élargi. Le lien entre la ventilation et la santé a été documenté dans la recherche sur le syndrome du bâtiment malsain : une ventilation inadéquate était associée à des maux de tête, de la fatigue et une irritation des muqueuses. Des études séminales (par exemple, Fisk et Rosenfeld, 1997) ont estimé qu'améliorer la ventilation dans les bureaux américains jusqu'à 15 L/s par personne pourrait améliorer la productivité de 1 à 3 % par occupant (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov).

En matière de sécurité au travail, l'**Occupational Safety and Health Administration (OSHA)** et l'**American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)** ont fixé des limites d'exposition pour les polluants intérieurs. Remarquablement, le CO₂ lui-même a une limite professionnelle : la **limite d'exposition admissible (PEL)** de l'OSHA et la **limite d'exposition recommandée (REL)** du NIOSH pour une journée de travail de 8 heures sont toutes deux de **5000 ppm** (Source: www.dnaci.com). Ces limites réglementaires sont très élevées (protégeant

principalement contre les effets physiologiques directs comme la narcose à des concentrations extrêmes) et sont bien supérieures aux niveaux intérieurs typiques. Cependant, elles confirment que les effets sur la santé à court terme (étourdissements, asphyxie) n'apparaissent qu'à **plusieurs milliers de ppm** (5 000–30 000 ppm) (Source: www.dnaci.com). Ainsi, la norme CO₂ de l'OSHA n'est pas ce qui régit le « confort » ou les effets cognitifs ; il s'agit plutôt d'un seuil de danger sur le lieu de travail.

Pendant ce temps, les préoccupations environnementales (pluies acides, puis changement climatique dû au CO₂) ont influencé la ventilation des bâtiments. Les crises énergétiques des années 1970 ont conduit à une construction plus étanche et au déploiement généralisé de la climatisation, ainsi qu'à une certaine réduction des points de consigne de ventilation pour économiser l'énergie – parfois au détriment de la QAI. Les études des années 1980 et 1990 sur les soi-disant « bâtiments malsains » ont documenté que certains employés de bureau ressentaient des symptômes dus à une ventilation inadéquate, ce qui a incité à un retour vers l'accent mis sur l'air frais dans les normes (par exemple, l'édition 1989 de l'ASHRAE 62 a introduit des augmentations modérées des taux d'air frais par rapport aux versions précédentes).

Émergence de la recherche sur la productivité

À la fin des années 1990 et dans les années 2000, la recherche liant explicitement la qualité de l'air intérieur à la productivité des occupants a connu un essor considérable. Wyon (2004) a passé en revue plusieurs études expérimentales et a rapporté que l'élimination des sources de pollution intérieure ou l'augmentation des taux de ventilation **amélioraient significativement les performances des tâches de bureau** (Source: www.periodicos.capes.gov.br) (Source: www.periodicos.capes.gov.br). Il a fait état d'améliorations typiques de la productivité de **6 à 9 %** grâce au contrôle des polluants ou de la ventilation (Source: www.periodicos.capes.gov.br). Fanger a également publié des conclusions suggérant des gains de productivité de 1 à 3 % par tranche de 10 L/s par personne d'air extérieur (Source: www.periodicos.capes.gov.br). Ces chiffres, bien que modestes, impliquent des avantages économiques importants pour l'ensemble d'une main-d'œuvre. Au milieu des années 2000, les analystes en énergie ont commencé à quantifier ces impacts économiques ; par exemple, Fisk et al. (2009) ont estimé que les améliorations de la productivité par personne pourraient permettre d'économiser **des centaines de dollars par employé et par an** (Source: indoor.lbl.gov) (Source: researchdiscovery.drexel.edu).

Grâce à l'augmentation de la puissance de calcul et aux capteurs en temps réel, les dernières années (2015–2026) ont vu apparaître des études beaucoup plus granulaires. Le groupe « Cognitive Function and Human Performance » de Harvard, dirigé par Joseph Allen, a publié en 2015 une expérience marquante d'exposition contrôlée mesurant directement, en temps réel, les fonctions cognitives supérieures dans différents scénarios de qualité de l'air intérieur (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov). Dans le monde entier, des dizaines d'études, de tailles variées, ont été publiées dans des revues à comité de lecture (*Building & Environment*, *Indoor Air*, *Env. Health Perspectives*, etc.), examinant systématiquement des polluants spécifiques (CO₂, COV, particules fines) et leurs effets à court terme sur les sujets humains.

Parallèlement, les **normes de qualité de l'air intérieur (QAI) et les certifications de bâtiments** ont évolué. La norme 62.1 de l'American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) a été mise à jour (version 2022) avec des contrôles plus stricts et inclut désormais des références aux recherches sur les fonctions cognitives. De nouveaux programmes de certification, tels que le WELL Building Standard (v2) et Fitwel, accordent des crédits pour la surveillance de la ventilation, et certains codes du bâtiment nationaux encouragent désormais le suivi du CO₂. Les organismes de réglementation (par exemple, les directives de l'Union européenne sur l'énergie et l'air intérieur) débattent des exigences en matière de ventilation mécanique dans les bâtiments à consommation nette d'énergie quasi nulle.

Enfin, la **COVID-19** a radicalement recentré l'attention sur la ventilation en tant qu'outil de contrôle des maladies. L'Organisation mondiale de la santé et les CDC ont publié des directives (entre 2020 et 2022) soulignant la nécessité d'augmenter les taux de renouvellement d'air dans les espaces publics intérieurs (bureaux, écoles). De nombreux bureaux ont réagi en installant des moniteurs de CO₂, en améliorant les filtres CVC et en encourageant des politiques d'ouverture des fenêtres. Cet élan a accéléré la recherche sur ce que devrait être une ventilation idéale après la pandémie, tant pour le contrôle des infections que pour la santé cognitive.

En résumé, le paysage de la QAI et de la ventilation des bureaux en 2026 est façonné par une confluence de connaissances historiques (la limite de Pettenkofer), de normes en évolution, de sciences émergentes sur la productivité et de priorités urgentes en matière de santé publique. Les sections suivantes détaillent ce paysage sous plusieurs angles techniques et socio-économiques.

Fondamentaux de la qualité de l'air et de la ventilation des bureaux

Le dioxyde de carbone comme indice de ventilation

Le dioxyde de carbone (CO₂), bien qu'étant un gaz non toxique aux niveaux habituels, est un **indicateur** crucial de l'efficacité de la ventilation dans les espaces occupés. Dans les bureaux, la source dominante de CO₂ intérieur est l'expiration humaine (environ 0,5 L/min par personne au repos, contenant environ 4 % de CO₂). À l'extérieur, le CO₂ atmosphérique est d'environ 415 ppm (en 2026) et augmente avec les émissions mondiales. Dans une pièce mal ventilée, le CO₂ expiré s'accumule : la concentration augmente par rapport à la ligne de base extérieure, atteignant finalement un état d'équilibre où **la dilution par la ventilation égale la génération par les occupants**. Comme la mesure du CO₂ est simple et relativement peu coûteuse, de nombreuses directives de construction l'utilisent pour déduire le taux de ventilation et évaluer la QAI (Source: www.hse.gov.uk) (Source: www.worksafenb.ca).

Le **calcul du taux de ventilation** est directement lié au CO₂ par une équation de bilan massique. Pour un espace avec N personnes expirant chacune G (L/s) de CO₂ pur, et un apport d'air extérieur à une concentration C_{ext} (≈ 415 ppm), la concentration intérieure à l'équilibre C_{int} est déterminée par :

$$C_{\text{int}} \approx C_{\text{ext}} + (N \cdot G / \dot{V}) \cdot 10^6 \text{ ppm},$$

où \dot{V} est le débit d'air extérieur (L/s) introduit dans la zone. Réarrangé, le taux de ventilation par personne est :

$$\dot{V}_{\text{extérieur}} \approx \frac{N \cdot G}{(C_{\text{int}} - C_{\text{ext}}) / 10^6}.$$

Pour des employés de bureau sédentaires typiques (expirant environ 0,005 m³/min = 0,083 L/s au repos, avec environ 40 000 ppm dans l'air expiré), on peut utiliser la règle empirique selon laquelle **10 L/s par personne d'air extérieur maintiendront le CO₂ près de 1000 ppm** en partant de 400–600 ppm à l'extérieur (Source: www.hse.gov.uk). En effet, le Health and Safety Executive (HSE) britannique note que « **1000 ppm équivaut à environ 10 L/s par personne** » de ventilation (Source: www.hse.gov.uk). À l'inverse, si la ventilation chute à seulement 5 L/s par personne, le CO₂ pourrait monter vers ~1500 ppm.

Parce que les concentrations de CO₂ intègrent l'occupation et la ventilation, elles sont largement utilisées pour **surveiller les bureaux en temps réel**. Un capteur de CO₂ (type NDIR) dans une salle de conférence ou un bureau en espace ouvert fournit une approximation de l'apport en air frais. Si le CO₂ dépasse certains seuils (par exemple 800–1000 ppm), les gestionnaires savent que la ventilation liée à l'occupation est insuffisante. Comme le conseille le HSE, « les moniteurs de CO₂ sont un moyen utile d'estimer les débits d'air » (Source: www.hse.gov.uk). Un niveau intérieur constamment supérieur à **1500 ppm indique fortement une mauvaise ventilation** (Source: www.hse.gov.uk) et devrait déclencher une action corrective (augmentation de l'air frais, réduction de l'occupation, etc.).

Note : Le CO₂ lui-même n'a ni odeur ni couleur, et des élévations modérées n'entraînent que peu de symptômes de santé immédiats. Cependant, comme le CO₂ métabolique humain est corrélé aux niveaux de bio-effluents et éventuellement d'autres polluants (odeurs corporelles, virus, COV), le CO₂ sert de marqueur conservateur de la qualité de l'air intérieur. Par exemple, deux espaces avec le même taux de CO₂ peuvent avoir des niveaux de COV très différents si l'un d'eux présente des émanations chimiques. Par conséquent, le CO₂ est spécifiquement un **marqueur de la fraction d'air expiré**, et non une toxine directe aux niveaux typiques (bien en dessous de la limite de 5000 ppm de l'OSHA) (Source: www.ars.usda.gov) (Source: www.dnaci.com). La plupart des normes de QAI avertissent que « **les mesures de CO₂ ne sont qu'un guide général de la ventilation** » (Source: www.hse.gov.uk). Pourtant, comme la ventilation mélange et dilue souvent toutes les émissions humaines et du bâtiment, le CO₂ reste une métrique pratique liée à la fraîcheur perçue de l'air et aux résultats cognitifs (Source: www.raumluf.org) (Source: papers.ssrn.com).

Autres polluants intérieurs et facteurs de QEI

Bien que le CO₂ soit au centre de cette étude, la QAI des bureaux implique également d'autres paramètres. Un taux élevé de CO₂ est généralement corrélé à une **faible teneur en oxygène** (bien que dans les bureaux typiques, l'O₂ ne baisse que marginalement) et à des concentrations élevées d'autres bio-effluents (ammoniac, acétone, etc.) pouvant causer somnolence ou irritation. De plus, les bureaux contiennent souvent des **composés organiques volatils (COV)** provenant des tapis, des finitions, des imprimantes et des produits de nettoyage. Des niveaux élevés de COV (par exemple benzène, formaldéhyde) peuvent causer des maux de tête et des troubles cognitifs indépendamment du CO₂ (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov). Les particules fines (PM) provenant de l'air extérieur (trafic, cuisine ou feux de forêt) peuvent s'infiltrer et impacter la santé (irritation respiratoire, résultats cardiovasculaires). La filtration et le mélange d'air frais doivent traiter les PM_{2.5}, surtout dans les zones urbaines.

Nous devons également considérer le **confort thermique et l'acoustique**, qui interagissent avec la ventilation. Si les systèmes fournissent trop d'air refroidi pour obtenir une ventilation élevée sans contrôle de l'humidité, cela peut causer un inconfort pour les occupants (trop froid ou trop sec). Parallèlement, les anciens systèmes CVC peuvent bourdonner ou souffler l'air bruyamment. Les erreurs de température et de bruit peuvent elles-mêmes réduire la productivité. Par conséquent, lorsque nous discutons des **stratégies de ventilation** et de la productivité, nous les analysons dans un contexte multifactoriel (Source: www.sciencedirect.com).

Méthodes de ventilation pour les bureaux

Il existe plusieurs approches principales pour ventiler les espaces de bureau :

- **Ventilation naturelle** : Utilisation de fenêtres ouvrables ou d'aérations passives. La simplicité et le faible coût sont des avantages, mais la performance dépend des conditions météorologiques. Les tours et les gratte-ciel ne peuvent souvent pas compter sur l'ouverture des fenêtres pour une ventilation adéquate. Néanmoins, certains bureaux économes en énergie intègrent le *refroidissement nocturne* ou une *ventilation personnalisée* via les fenêtres, exploitant l'air nocturne plus frais.
- **Ventilation mécanique (VM)** : La méthode la plus courante, où le CVC central apporte l'air extérieur mécaniquement (ventilateurs, conduits). Les systèmes peuvent être à débit constant ou à débit d'air variable (VAV). La plupart des bureaux commerciaux modernes utilisent la VM avec des chauffages et des refroidisseurs pour conditionner l'air entrant.
- **Systèmes hybrides** : Ils utilisent de manière adaptative la ventilation naturelle lorsque cela est possible (par exemple, par temps doux) et la mécanique sinon. Les immeubles de bureaux à « mode mixte » disposent souvent de capteurs pour basculer entre les fenêtres ouvertes et le fonctionnement des ventilateurs, mais cela complique le contrôle.
- **Ventilation personnalisée (de poste)** : Des unités sous le bureau ou sur le bureau fournissent de l'air conditionné aux occupants individuels. Ces systèmes ont été étudiés expérimentalement (par exemple, le système Berkeley Task/Ambient), mais sont rares en pratique en raison de leur complexité.
- **Ventilation à la demande (VAD)** : De nombreux systèmes incluent des registres d'air extérieur variables contrôlés par des capteurs d'occupation ou de CO₂, augmentant l'air frais uniquement lorsque le CO₂ augmente. C'est désormais courant dans les conceptions de bâtiments écologiques pour économiser l'énergie tout en maintenant le confort.

Le choix approprié dépend du climat et du type de bâtiment. Quoi qu'il en soit, les systèmes de ventilation doivent être *conçus* et *mis en service* avec soin : les fuites dans les conduits ou les erreurs de contrôle peuvent entraîner des taux d'air frais bien inférieurs aux objectifs de conception dans de nombreux bâtiments. Dans les données citées plus loin, les études sur le terrain rapportent souvent une ventilation réelle par personne **inférieure** aux valeurs spécifiées par l'ASHRAE en pratique.

Cadres réglementaires actuels

Norme ASHRAE 62.1 (États-Unis)

La norme **ASHRAE 62.1-2022** est la directive américaine dominante pour les bâtiments non résidentiels. Elle définit les taux de ventilation extérieure minimaux pour divers espaces occupés. Pour un *espace de bureau* typique, le tableau 6.1.1 de l'ASHRAE spécifie :

- **5 cfm (2,36 L/s) par personne** (catégorie « Bureau » dans le tableau 6-1)
- **0,06 cfm/ft²** ($\approx 0,3$ L/s·m²) par unité de surface au sol.

Par exemple, un bureau avec 8 m² par personne nécessiterait ~ 5 cfm + $(0,06 \times 86 \text{ ft}^2 = 5,16 \text{ cfm}) \approx$ **10,2 cfm/personne** ($\sim 4,8$ L/s). En termes numériques, cela équivaut à environ **10–12 L/s par personne** dans un bureau à densité typique. (Dans les études de laboratoire ci-dessus, un CO₂ autour de 1000 ppm correspond à ~ 10 L/s.)

L'ASHRAE 62.1 ne fixe pas de valeur de CO₂ fixe mais met en œuvre la procédure de taux de ventilation. Cependant, le document de position de l'ASHRAE sur la QAI recommande de **maintenir le CO₂ intérieur à pas plus de 700 ppm au-dessus de l'extérieur** (Source: www.worksafenb.ca), faisant écho à la directive de Pettenkofer. En pratique, de nombreuses listes de contrôle de conformité 62.1 garantissent simplement que des capteurs ou des compteurs de CO₂ sont en place. Certains États et codes (par exemple, le titre 24 de Californie) interprètent l'ASHRAE pour viser ~ 925 ppm à l'intérieur (en supposant 400 ppm à l'extérieur) pour maintenir le confort.

Directives de l'OMS et européennes

L'**Organisation mondiale de la santé (OMS)** publie des directives sur la qualité de l'air intérieur (bien que ses directives de 2010 sur la QAI couvraient la pollution particulaire, le radon, etc., plutôt que le CO₂ en soi). Cependant, la *Feuille de route sur la ventilation* de l'OMS (2021) pour la COVID a souligné la nécessité d'atteindre une ventilation de **10–12 L/s par personne** dans les espaces publics intérieurs (Source: www.hse.gov.uk).

Bien qu'ils ne soient pas juridiquement contraignants, les conseils de l'OMS influencent les politiques nationales. L'OMS souligne également que de nombreux virus respiratoires se propagent plus facilement dans les environnements peu ventilés et à forte teneur en CO₂.

Dans l'**Union européenne**, il n'existe pas de loi unique sur la limite de CO₂ pour les bureaux. Certains pays de l'UE adoptent des normes comme l'**EN 16798-1** qui catégorise la qualité de l'air intérieur (QAI) par satisfaction cible des occupants, vaguement liée aux niveaux de CO₂. Par exemple, la qualité **Cat. II** (« normale ») est similaire à ~1000 ppm. Une directive belge suggère <1000 ppm dans les bureaux, <1200 pour d'autres espaces. Les autorités de santé publique aux Pays-Bas et en France, par exemple, recommandent un CO₂ intérieur <1200–1400 ppm.

Directives nationales de santé publique

- **Canada (Santé Canada)** : Les **Directives sur la qualité de l'air intérieur résidentiel** de Santé Canada (finalisées en 2021) recommandent une limite d'exposition intérieure à long terme de **1000 ppm** pour le CO₂ (Source: www.canada.ca). Ils citent explicitement des preuves épidémiologiques (sur les environnements de bureau/école) de plaintes de confort et d'effets cognitifs au-dessus de ce niveau. La directive stipule que 1000 ppm représente une ventilation adéquate et minimise les risques (Source: www.canada.ca). (Notamment, c'est plus strict que les 1200 de l'ASHRAE.)
- **Royaume-Uni** : Le Health and Safety Executive (HSE) du Royaume-Uni ne mandate pas légalement les niveaux de CO₂, mais fournit des conseils. Le HSE note que **1500 ppm** constants « indiquent une mauvaise ventilation » (Source: www.hse.gov.uk) et que « *des niveaux de CO₂ constamment supérieurs à 1500 ppm dans une pièce occupée indiquent une mauvaise ventilation et vous devriez prendre des mesures pour l'améliorer.* » Ils notent également que 1000 ppm équivaut à environ 10 L/s par personne (Source: www.hse.gov.uk). Certaines normes de construction britanniques visant une bonne qualité de l'air intérieur (comme celles utilisées dans les bâtiments du NHS) recommandent de maintenir un pic de CO₂ à ~800–1000 ppm.
- **Australie/Nouvelle-Zélande** : Les normes (par exemple AS1668) recommandent une ventilation de 5–8 L/s par personne. De nombreuses directives locales alignées sur l'ASHRAE suivent implicitement 1000–1200 ppm comme références.
- **Santé au travail** : Les pays ont souvent des exigences de ventilation sur le lieu de travail (par exemple, « suffisamment d'air frais pour le confort des occupants ») mais peu quantifient explicitement le CO₂. Par exemple, WorkSafe au Nouveau-Brunswick (Canada) cite la règle des 700 ppm de l'ASHRAE 62.1 (Source: www.worksafenb.ca).

Résumé des valeurs de référence

Voici un résumé des seuils de QAI typiques provenant de sources clés (CO₂ en ppm) :

ORGANISATION/NORME	SEUIL DE CO ₂	COMMENTAIRES
ASHRAE 62.1-2022	(Pas de ppm fixe ; formule de ventilation)	par ex. 5 cfm/personne + 0,06 cfm/ft ² (Source: engdatabase.com). Équivaut à ~8–15 L/s-personne.
Position ASHRAE (1985)	700 ppm au-dessus de l'extérieur (≈1200 ppm max intérieur)	Toujours cité dans les réglementations (par ex. N.B. WorkSafe) (Source: www.worksafenb.ca).
OMS (directives ventilation)	Viser 5–6 renouvellements/h ou 10–12 L/s-personne	Implique ~1000 ppm ; utilisé pour les précautions COVID.
UK HSE 2021	1500 ppm (niveau d'action)**	« Constamment au-dessus de 1500 ppm » indique une mauvaise ventilation (Source: www.hse.gov.uk).
Santé Canada RIAQGs (2021)	1000 ppm (exposition long terme 24h) (Source: www.canada.ca)	Basé sur des études de santé et cognitives ; s'aligne sur ~10 L/s par personne.
Chine (norme QAI intérieure)	1000–1400 ppm (espaces climatisés)	Variable selon la zone (écoles vs logements) dans les anciens codes.
NIOSH/OSHA (travail)	5000 ppm (Moyenne pondérée 8h) (Source: www.dnaci.com)	Limite de sécurité, pas une directive de confort QAI.

Tableau 1 : Exemples de critères de CO₂/ventilation dans les directives et normes de qualité de l'air intérieur (QAI) sur le lieu de travail. Sources : ASHRAE 62.1 (États-Unis) (Source: engdatabase.com) ; HSE (Royaume-Uni) (Source: www.hse.gov.uk) ; Santé Canada 2021 (Source: www.canada.ca) ; WorkSafeNB NC 191-91 citant l'ASHRAE 62.1 (Source: www.worksafenb.ca) ; NIOSH POCKET GUIDE (Source: www.dnaci.com).

Concentrations typiques de CO₂ dans les bureaux

Les études menées dans des immeubles de bureaux réels montrent une large gamme de niveaux de CO₂, dépassant souvent les valeurs idéales. Plusieurs enquêtes sur le terrain rapportent que de nombreux bureaux occupés atteignent régulièrement **800–1500 ppm** pendant les heures de travail, selon le contrôle de la ventilation. Par exemple, un rapport de Santé Canada note que le CO₂ intérieur fluctuant typique dans les immeubles de bureaux canadiens oscillait souvent autour de 600–1000 ppm pendant l'occupation, avec des pics allant jusqu'à 1500 ppm (Source: www.canada.ca). Au Royaume-Uni, des enquêtes menées dans des écoles (espaces analogues à haute densité) ont révélé que le CO₂ moyen était fréquemment supérieur à 1000 ppm lorsqu'elles étaient mal ventilées. Dans une étude menée à Détroit, le CO₂ moyen dans les salles de conférence atteignait environ 2000 ppm lorsqu'elles étaient inoccupées pendant la nuit, et ne descendait à 800–1200 ppm en journée qu'avec un apport limité d'air frais (Source: www.hse.gov.uk).

Pour quantifier, considérons un bureau paysager avec 5 m² par personne et une activité modérée. À 8 L/s par personne d'air extérieur, le CO₂ en régime permanent monterait à environ 800–1000 ppm. Si la ventilation chute à 4 L/s par personne (la moitié), le CO₂ pourrait dépasser 1500–1800 ppm. En effet, Wargocki (2014) et d'autres ont mesuré que de nombreux bureaux ou salles de classe « naïfs » fonctionnent régulièrement autour de 1000–1500 ppm, ce qui indique une ventilation limite. Il n'est pas inhabituel dans les nouveaux bureaux « intelligents » de voir des pics de CO₂ enregistrés de 1300–1700 ppm dans les salles de réunion, ce qui suscite des inquiétudes.

Ainsi, dans les bureaux réels, le **CO₂ dépasse fréquemment le niveau de 1000 ppm** pendant les périodes d'affluence, surtout si les occupants oublient d'ouvrir les fenêtres ou si le système CVC coupe les ventilateurs pour économiser de l'énergie en dehors des heures de bureau. Certains bâtiments modernes installent des alarmes ou des tableaux de bord de CO₂. Un exemple de déploiement en entreprise (Salesforce) a utilisé des centaines de capteurs et a révélé que dans les salles de réunion de type « cabine téléphonique », la réutilisation de l'air sans ventilation pouvait faire grimper le CO₂ dans la plage des 2000 ppm, les conduisant à ajouter une ventilation dans ces cabines (Source: learn.kaiterra.com).

Comprendre ces niveaux est important car ils définissent le domaine de la plupart des études sur la productivité : les expériences simulent généralement le CO₂ à environ 600–2500 ppm pour observer les effets par rapport à une base de référence bien ventilée (souvent ~400–600 ppm).

Niveaux de dioxyde de carbone et effets sur l'homme

Effets physiologiques directs et sur le confort

Le dioxyde de carbone est légèrement plus lourd que l'air et inodore. Bien qu'il soit normalement inoffensif, à *très fortes concentrations*, il peut produire des symptômes physiologiques : l'inhalation de CO₂ >~5000 ppm pendant des durées prolongées entraîne une légère augmentation de la respiration. Des niveaux extrêmement élevés (>20 000 ppm) provoquent des maux de tête et un essoufflement. Les normes professionnelles (NIOSH/OSHA) fixent donc **5000 ppm** comme limite d'exposition sur 8 heures (Source: www.dnacih.com). Les expositions à court terme allant jusqu'à 30 000 ppm, voire 40 000 ppm (limites à court terme du NIOSH/OSHA), sont considérées comme immédiatement dangereuses pour la vie ou la santé (IDLH) (Source: www.dnacih.com). Dans les bureaux, de tels niveaux ne se produisent pratiquement jamais ; ils ne sont rencontrés que lors de rejets accidentels de CO₂ élevé (par exemple, extincteurs à CO₂ industriels ou accidents de stockage de glace carbonique).

Aux niveaux pertinents pour la QAI des bureaux (<3000 ppm), les **effets directs sur la santé sont minimes**. Selon l'examen de Santé Canada, aucune preuve convaincante ne montre d'effets toxiques directs du CO₂ en dessous d'environ 5000 ppm (Source: www.canada.ca). Les gens ne perçoivent pas le CO₂ ; il n'a ni odeur ni qualité irritante. Certaines études ont montré de légères augmentations de la fréquence respiratoire et de la pression artérielle uniquement lorsque le CO₂ dépasse ~5 % (50 000 ppm) (Source: www.canada.ca). Ainsi, la préoccupation principale concernant le CO₂ modéré (~800–2000 ppm) est *indirecte* : il indique une mauvaise ventilation, ce qui signifie que d'autres polluants s'accumulent et que l'oxygène est réduit.

Cependant, le CO₂ peut contribuer à l'inconfort subjectif de manière subtile. Une expérience allemande souvent citée (Nielsen et al.) a révélé que les travailleurs dans un bureau ventilé à 400 L/s par rapport à un bureau à 12 L/s signalaient moins de productivité, de fatigue et d'irritation oculaire lorsque le CO₂ et les odeurs étaient plus élevés. Même si cela est incident, un CO₂ élevé peut provoquer une sensation d'étouffement dans un espace confiné. Le tableau de Santé Canada (reproduit ci-dessous) montre que des symptômes comme la gorge sèche, la toux et les éternuements sont corrélés à des expositions supérieures à ~800 ppm (Source: www.canada.ca) (avec l'étude de référence Tsai et al. 2012). Ces données suggèrent qu'à mesure que le CO₂ dépasse 800–900 ppm, les gens commencent à signaler une irritation des muqueuses et un inconfort général (Source: www.canada.ca).

Tableau 3 de Santé Canada (Sélection) :

CATÉGORIE DE SYMPTÔMES	OBSERVÉ À CO ₂ (PPM)	NOTES
Irritation des yeux/gorge, éternuements	~876 ppm vs 431 ppm (étude sur les salles de classe) (Source: www.canada.ca)	Les employés de bureau ont signalé plus de toux/douleurs oculaires lors des journées à CO ₂ plus élevé.
« Difficulté respiratoire » (auto-évaluée)	867 vs 655 ppm dans les salles de classe (Source: www.canada.ca)	Inconfort respiratoire transitoire légèrement plus élevé.
Sensation de somnolence/assoupissement	Légère ↑ à 3000–4000 ppm (études en laboratoire)	(non listé ci-dessus, mais d'autres revues notent la fatigue).
Maux de tête, Hypertension	>20 000 ppm (très élevé)	L'OSHA note que ce niveau est rare dans les bureaux.

Adapté de Santé Canada (2021) (Source: www.canada.ca) et d'autres publications.

Bien que le tableau ci-dessus montre certaines corrélations à ~800–900 ppm, d'autres études (par exemple, Pilcher et al., 2002 sur la somnolence) ont constaté une augmentation des rapports de somnolence uniquement à des niveaux plus élevés (~5000 ppm). En résumé, **des symptômes légers tels que la fatigue ou la sécheresse peuvent apparaître à mesure que le CO₂ approche 1000 ppm dans des environnements mal ventilés**. Aucun effet grave sur la santé (à long terme) n'est documenté à moins que la ventilation ne reste gravement inadéquate (CO₂ >>2000 ppm).

Fonction cognitive et prise de décision

Un axe majeur ces dernières années est l'effet du CO₂ (et de la ventilation) sur la performance cognitive. De nombreuses tâches de bureau nécessitent de l'attention, de la mémoire, du jugement et de la prise de décision – des facultés potentiellement sensibles à des changements physiologiques même légers. Les chercheurs ont conçu des études contrôlées où les participants effectuent des tests cognitifs dans différentes conditions de QAI.

- **Expériences « Green Building » de Harvard (Allen 2013, 2015)** : Ces études phares ont isolé les impacts de la ventilation, du CO₂ et des COV sur la fonction cognitive de vrais employés de bureau. Dans un essai clé, 24 sujets ont passé des journées de travail dans un bureau « conventionnel » (ventilation de base ~20 pi³/min par personne, ~800–1000 ppm de CO₂) et dans deux conditions de bureau « vert » : (a) Vert avec des matériaux à faible teneur en COV (~même ventilation, peu de polluants) et (b) Vert+ avec une ventilation plus élevée (~2× air extérieur) et peu de COV. Les tests cognitifs (prise de décision exécutive, stratégie, réponse aux crises) ont montré des différences spectaculaires (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov) : en moyenne, les scores de performance étaient **61 % plus élevés** dans la condition verte standard par rapport à la condition conventionnelle, et **101 % plus élevés dans la condition Vert+** par rapport à la condition conventionnelle (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov) (p<0,0001). L'augmentation de la ventilation (CO₂ plus faible) et la réduction des COV ont indépendamment amélioré les scores, en particulier dans les domaines cognitifs de haut niveau comme les tâches de « crise stratégique » (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov). Cette étude suggère fortement que faire baisser le CO₂ de ~1000 à ~600 ppm (et contrôler les polluants) peut pratiquement doubler le rendement cognitif dans certains tests. (Mise en garde : il s'agissait d'un échantillon restreint et d'une étude en laboratoire à court terme, mais elle comportait des contrôles rigoureux et est très citée.)
- **Flagner et al. (2024)** : Une expérience rigoureuse récente a remis en question le fait que le CO₂ *seul* altère la cognition. Dans une chambre hermétique, 20 sujets ont travaillé des journées de 8 heures en respirant soit 900 ppm, soit **3000 ppm** de CO₂ (toutes choses égales par ailleurs). Étonnamment, aucune différence cognitive ou physiologique significative n'a été trouvée (Source: papers.ssrn.com). Temps de réaction, mémoire, tests de décision – tout était identique. Ces résultats impliquent que le **CO₂ seul, jusqu'à 3000 ppm, pourrait ne pas altérer gravement la cognition**. Cela contraste avec les résultats d'Allen, mais la différence pourrait être que la comparaison Vert vs Conventionnel d'Allen ne variait pas simplement le CO₂, elle modifiait également les COV et postulait des effets interactifs. La découverte de Flagner suggère que les humains peuvent s'acclimater même à 3000 ppm pendant une journée sans déclin mental notable (Source: papers.ssrn.com). (Important : 3000 ppm est bien au-dessus des niveaux normaux de bureau, et les participants n'étaient peut-être pas en train de faire de l'exercice vigoureux dans cette chambre.)
- **Autres études contrôlées** : Wargocki (2014) a demandé à des sujets d'effectuer des tâches de bureau de base à des niveaux de CO₂ d'environ 600, 1000, 2500 ppm et a constaté qu'à 2500 ppm, les résultats (vitesse de frappe, erreurs, tâches de « compréhension ») étaient moins bons qu'à 600 ppm. Shendell et ses collègues dans les écoles ont constaté que les résultats des tests des élèves et l'assiduité s'amélioraient avec une meilleure ventilation (CO₂ plus faible). Fisk et al. rapportent que les expériences en laboratoire (faisant varier la température ou le CO₂) donnent des améliorations de performance de quelques pour cent jusqu'à ~15 % en optimisant tous les paramètres.

Le consensus scientifique est nuancé : des élévations modérées de CO₂ (disons 1000–1500 ppm) *pourraient* dégrader subtilement la prise de décision complexe ou l'apprentissage, mais les ampleurs sont souvent faibles et dépendent des tâches. L'effet le plus important pourrait provenir de ce que représente le CO₂ : moins de ventilation signifie **accumulation de COV, de bioeffluents, et des températures ou une humidité plus élevées**. Une ventilation plus faible peut provoquer une fatigue accrue, des maux de tête ou des réponses allergiques, qui entravent indirectement le travail. Par exemple, l'étude d'Allen a noté que l'élimination des COV et une ventilation plus élevée contribuaient chacune à environ la moitié des gains cognitifs (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov). Selon Santé Canada, des études épidémiologiques ont lié ~1000 ppm à des congés de maladie plus fréquents et à une faible vigilance auto-déclarée (Source: www.canada.ca).

Résumé des preuves sur la productivité

Compte tenu des résultats mitigés, que peut-on conclure sur la productivité ? Le tableau 2 ci-dessous résume quelques résultats représentatifs :

ÉTUDE / CONTEXTE	CONDITIONS (CO ₂ OU VENT)	CHANGEMENT DE PERFORMANCE	CITATION
Harvard Green Building (Employés de bureau)	Conv vs Vert (faible COV) vs Vert+ (haute Ventilation)	+61 % (Vert vs Conv) ; +101 % (Vert+ vs Conv) sur le score cognitif	Allen et al. 2015 (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov)
Simulations de bureaux danois (Wyon, 2004)	Ventilation 3 → 10–30 L/s par personne	Jusqu'à +6–9 % sur les tâches de bureau par l'élimination des polluants/augmentation de la ventilation	Wyon 2004 (Source: www.periodicos.capes.gov.br)
Centre d'appels (vrais travailleurs, séries temporelles)	Ventilation variée 12 → 48 L/s par personne	<1 % de différence globale ; ~2 % <i>pire</i> transport avec CO ₂ > extérieur+75ppm (Source: indoor.lbl.gov)	Fisk et al. 2003 (Source: indoor.lbl.gov)
Bureaux américains modélisés (économiseur vs base)	Base 9,4 L/s, augmenté de 5–10 L/s	+0,5 % de performance de travail moyenne ; 5h/an de moins de congés maladie/ personne (Source: researchdiscovery.drexel.edu)	Ben-David et al. 2017 (Source: researchdiscovery.drexel.edu)
Revue systématique (42 études, diverses tâches)	Ventilation au-dessus/en dessous du min ASHRAE (17cfm)	Expositions <17cfmpp CO ₂ élevé (~1000ppm) avaient « une santé/performance médiocre accrue » (Source: papers.ssrn.com)	Palacios et al. 2021 (Source: papers.ssrn.com)

Les études ci-dessus illustrent des **résultats divergents**. Les tests cognitifs sophistiqués observent des effets importants (Allen), tandis que les études sur le terrain donnent des effets modestes ou négligeables (Fisk). Les méta-analyses et les problèmes de biais de survie sous-tendent probablement les différences : les expériences contrôlées isolent étroitement les variables mais peuvent exagérer les différences ; les questionnaires dans les études observationnelles ciblent le confort (fermer les stores, ajuster la température), ce qui confond l'effet pur du CO₂.

Néanmoins, il est **sûr de conclure** que le maintien d'une bonne ventilation (et donc le contrôle du CO₂ à ~800–1000 ppm ou moins) *tend* à favoriser une meilleure performance cognitive et moins de symptômes d'inconfort. Cela est également corrélé à une réduction de l'absentéisme (Source: researchdiscovery.drexel.edu). L'ampleur précise de l'amélioration de la productivité dépend du contexte : peut-être quelques pour cent dans les bureaux typiques, mais atteignant des dizaines de pour cent dans le meilleur scénario contrôlé. Puisqu'une amélioration de la productivité de seulement 1 % dans une entreprise de 10 000 employés équivaut à des milliers d'heures de travail par an, investir dans la QAI a un potentiel de rendement démesuré.

Normes de ventilation et niveaux de CO₂ recommandés

Cette section détaille les normes, codes et valeurs guides spécifiques qui définissent la qualité de l'air intérieur et les concentrations de CO₂ acceptables dans les immeubles de bureaux et les bâtiments publics. Dans la mesure du possible, nous identifions des références quantitatives et citons les sources faisant autorité.

Normes internationales et nationales

Norme ASHRAE 62.1 (États-Unis)

L'ASHRAE 62.1 définit des taux de ventilation minimaux mais ne prescrit pas de limite de CO₂ fixe. Elle utilise plutôt des formules d'ingénierie. Par exemple, le tableau 6.1.1 de la version 2022 indique que pour une utilisation « Bureau – général », le débit d'air extérieur minimal est de **5 cfm (2,36 L/s) par personne plus 0,06 cfm/pi² (=0,3 L/s·m²)** (Source: engdatabase.com). Une règle empirique courante dérivée de cela est d'environ 8–12 L/s par occupant pour des bureaux modérément denses. En pratique, de nombreux bureaux ventilent à environ 8–10 L/s/personne (ce qui donne un CO₂ en régime permanent d'environ 1000 ppm). Les manuels d'utilisation de l'ASHRAE notent souvent que de tels taux permettent d'atteindre un différentiel de CO₂ d'environ 700 ppm au-dessus de l'air extérieur, s'alignant sur l'ancien critère de « 680 ppm au-dessus du bruit de fond ».

Il est important de noter que le document de position de l'ASHRAE (2009) sur la qualité de l'air intérieur (QAI) approuve explicitement l'utilisation du **CO₂ comme indicateur** : il cite des travaux historiques montrant qu'un taux de 700 ppm au-dessus du niveau ambiant (soit environ 1200 ppm au total) garantit que moins de 20 % des occupants sont incommodés par les bioeffluents humains. De nombreux codes du bâtiment qui adoptent la norme 62.1 (par exemple l'ICC) utilisent donc implicitement une valeur de CO₂ ≈ 1200 ppm comme objectif de performance. En ce qui concerne les preuves scientifiques, lorsque Santé Canada et d'autres organismes recommandent 1000 ppm, ils mettent l'accent sur la recherche en santé humaine plutôt que sur la perception du confort olfactif (Source: www.canada.ca).

Normes européennes (ex. EN 16798)

En Europe, la série de normes EN 16798 (remplaçant les anciennes EN 13779 et EN 15251) classe la qualité de l'air intérieur en quatre catégories (I à IV) correspondant à des niveaux de satisfaction des occupants de 80 à 95 %. Pour les espaces de bureaux, la catégorie II est souvent citée comme « normale » (≥ 80 % de satisfaits). Bien que la norme EN 16798 ne liste pas explicitement de valeurs de CO₂, elle associe en pratique la **catégorie II à environ 10–20 L/s par personne** (selon le schéma précis). Certaines annexes nationales proposent des recommandations plus directes : par exemple, les directives belges assimilent la catégorie II à une augmentation maximale du CO₂ de 560 ppm au-dessus du niveau extérieur.

Réglementations et directives sur le lieu de travail

Les agences de **santé environnementale au travail** exigent généralement un « air frais suffisant » mais autorisent différentes interprétations. Les références notables incluent :

- **Santé Canada (2021)** : La directive sur la QAI résidentielle pour le CO₂ note dans son résumé : « *La limite d'exposition à long terme recommandée pour le CO₂ est de 1000 ppm (basée sur une moyenne de 24 heures)* » (Source: www.canada.ca). Il s'agit d'un seuil de protection de la santé, choisi pour couvrir les sous-groupes vulnérables. Santé Canada le déduit d'études épidémiologiques (expériences dans des écoles/bureaux) montrant qu'un taux > 1000 ppm est associé à des augmentations de plusieurs dizaines de pour cent des maladies signalées, des baisses cognitives et des symptômes du syndrome des bâtiments malsains (SBM). Il s'agit, en fait, d'une approbation officielle indiquant que maintenir le CO₂ des bureaux autour de 1000 ppm présente un risque minimal.
- **UK HSE (Conseils sur la ventilation)** : Le HSE **n'impose pas** la limite de 1000 ppm, mais conseille qu'un « *taux de CO₂ intérieur constamment supérieur à 1500 ppm indique une mauvaise ventilation* » (Source: www.hse.gov.uk). Il explique également la conversion 1000 ppm ≈ 10 L/s par personne (Source: www.hse.gov.uk). Le seuil du HSE est intentionnellement moins strict (1500 ppm) pour tenir compte des bâtiments britanniques typiques et n'impose pas de limite légale. Il est conçu comme un système de « feu tricolore » : au-dessus de 1500 ppm (rouge) nécessite une action, 800–1000 ppm (vert) est bon, 1000–1500 (jaune) nécessite de la prudence.
- **Norme australienne/néo-zélandaise AS/NZS 1668.2** : Prescrit une ventilation minimale pour le « confort des occupants », mais sous forme de débits et non de taux de CO₂. Généralement 7–10 L/s par personne dans l'enseignement, 5–8 L/s par personne dans les bureaux. De nombreux bâtiments australiens visent donc un taux intérieur d'environ 1000–1200 ppm.
- **Limites de CO₂ de l'OSHA/NIOSH** : L'OSHA et le NIOSH aux États-Unis fixent une **limite d'exposition admissible (PEL) / limite d'exposition recommandée (REL) de 5000 ppm (moyenne pondérée sur 8 heures)** (Source: www.dnaci.com). Ces limites visent à éviter la toxicité aiguë ou la narcose, et non à traiter la QAI. Pour rappel, 5000 ppm en mg/m³ équivaut à environ 9000 mg/m³. Il n'existe pas de normes primaires plus basses pour le CO₂ liées au confort dans l'OSHA. Cependant, si le CO₂ atteint plusieurs milliers de ppm de manière répétée, la ventilation est clairement inadéquate du point de vue de l'OSHA.

Directives pratiques sur le CO₂ pour les bureaux

Pour les gestionnaires d'installations et les concepteurs, les conseils de travail sont souvent résumés comme suit :

- **QAI optimale : CO₂ ≤ 800 ppm**. De nombreuses normes de bâtiments écologiques et laboratoires de recherche utilisent 800 ppm comme niveau où les occupants ressentent que l'air est très frais. Cela nécessite généralement environ 12–20 L/s par personne d'air frais, soit au-dessus des niveaux minimaux du code.
- **Confort acceptable : CO₂ 800–1000 ppm**. Correspond à une ventilation conforme aux normes ASHRAE et à un bon confort des occupants. À ce niveau, moins de 20 % des personnes peuvent occasionnellement remarquer un air vicié (Source: www.raumluft.org) (Source: www.canada.ca).
- **Prudence / Vérification de la ventilation : CO₂ 1000–1500 ppm**. L'air devient sensiblement plus étouffant. Les données scientifiques de Santé Canada suggèrent que les signes d'inconfort apparaissent ici (Source: www.canada.ca). De nombreuses directives recommanderaient d'améliorer la ventilation ou de réduire l'occupation si le taux reste supérieur à 1000 ppm.

- **Action requise : CO₂ > 1500 ppm.** Selon le HSE, cela signale une attention urgente. Santé Canada qualifierait même un taux de 1200–1500 ppm comme étant supérieur à la limite recommandée à long terme. Des niveaux chroniques > 1500 sont probablement liés à une augmentation des symptômes (maux de tête, fatigue) et justifient une correction (Source: www.hse.gov.uk) (Source: www.canada.ca).

Tableau 2 : Catégories de concentration de CO₂ pour la ventilation des bureaux (approximatif)

CO ₂ (PPM)	VENTILATION*	DIRECTIVES/IMPLICATION
Extérieur (~400)	—	Concentration extérieure de référence.
600–800	~12–15 L/s-pers	Excellente ventilation ; air très frais. Problèmes de QAI minimes.
800–1000	~10 L/s-pers	Bonne ventilation (cible courante) ; limite de Santé Canada à 1000 ppm (Source: www.canada.ca). Confortable.
1000–1200	~8 L/s-pers	Limite. Envisager de vérifier les sources de CO ₂ ou d'ajouter de l'air.
1200–1500	~4–6 L/s-pers	Mauvaise ventilation ; plaintes accrues et possible déclin cognitif (Source: www.canada.ca). Corriger en ajoutant de l'air.
>1500	<4 L/s-pers	Très mauvaise. >1500 ppm « indique une mauvaise ventilation » (Source: www.hse.gov.uk). Action : augmenter l'air frais immédiatement.

* Ventilation par personne qui maintiendrait approximativement le CO₂ stable donné, en supposant 400 ppm à l'extérieur. Sources : Calculs ASHRAE 62.1 (Source: engdatabase.com), directives HSE/Santé Canada (Source: www.hse.gov.uk) (Source: www.canada.ca).

Le tableau 2 synthétise diverses directives : il montre que la plupart des normes visent ≤ 1000 ppm, signalent des actions au-dessus de 1500 ppm et impliquent que 1000–1200 ppm constitue une zone de prudence. La colonne de ventilation dérivée de l'ASHRAE illustre pourquoi : doubler l'air frais réduit approximativement de moitié la différence de CO₂ en régime permanent.

Normes de qualité de l'air intérieur (QAI) au-delà du CO₂

Bien que le CO₂ soit utilisé ici comme indicateur de substitution, d'autres contaminants ont leurs propres normes qui interagissent avec la ventilation :

- **Particules fines (PM_{2.5})** : Les directives actualisées de l'OMS de 2021 sur la qualité de l'air ambiant recommandent une moyenne sur 24h de PM_{2.5} ≤ 15 µg/m³. De nombreuses stratégies de ventilation des bureaux incluent une filtration à haute efficacité (MERV-13 ou supérieure) pour éliminer les particules fines. Une mauvaise ventilation dans les zones à forte pollution extérieure peut augmenter les PM_{2.5} intérieures si l'air extérieur n'est pas filtré.
- **COV et polluants chimiques** : Il n'existe aucune limite légale internationale à faible niveau pour les COV totaux dans les bureaux (sauf dans certains pays qui fixent des normes pour le formaldéhyde). Les systèmes de certification (ex. GREENGUARD, WELL) exigent la mesure et la limitation de COV spécifiques. Une bonne ventilation aide à diluer les concentrations de COV provenant de sources telles que les imprimantes et les produits de nettoyage.
- **Humidité relative (HR)** : L'ASHRAE recommande de maintenir l'HR dans les bureaux entre 30 et 60 % pour le confort et pour inhiber la croissance des moisissures ; la déshumidification est souvent nécessaire dans le traitement de l'air soufflé.
- **Température** : Le système CVC doit maintenir le confort thermique (~22–24°C). Notez qu'augmenter la ventilation peut imposer des charges de chauffage/refroidissement ; des systèmes bien conçus peuvent préconditionner l'air extérieur pour éviter l'inconfort lié aux courants d'air.
- **Bruit et vibrations** : Les systèmes de ventilation doivent respecter des critères de bruit ; par exemple, les vitesses de flux d'air dans les zones occupées sont maintenues en dessous de ~0,15 m/s pour éviter les courants d'air.

- **Distribution de l'air frais** : Les critères couvrent également l'uniformité du flux d'air : par exemple, la norme peut exiger une ventilation par déplacement ou des plans de mélange pour garantir qu'aucune partie d'une pièce ne soit privée d'air.

Les régulateurs définissent des directives pour garantir une QAI acceptable pour tous les paramètres, et le CO₂ n'en est qu'un élément. Le consensus est que **la ventilation doit fournir une dilution suffisante pour maintenir les polluants générés par l'homme à des concentrations acceptables**. De nombreux nouveaux cadres de QAI (ex. concept « Air » de WELL, performance QAI de LEED v4) exigent explicitement de démontrer le contrôle du CO₂, en plus de surveiller les niveaux de COV et de particules.

Impact de la ventilation et du CO₂ sur la productivité : Analyse des données et études de cas

Après avoir posé le contexte des normes, nous nous penchons maintenant sur les **preuves quantitatives** reliant la ventilation (et le CO₂) à la productivité et à la santé des travailleurs. Nous examinons les données issues d'expériences, d'essais sur le terrain et de méta-analyses pour tirer des conclusions fondées sur des preuves.

Études expérimentales en milieu de bureau

Tests cognitifs contrôlés

Comme noté dans l'introduction, Allen *et al.* (2015) ont mené une étude d'exposition contrôlée de plusieurs jours avec des employés de bureau *sur site*. Détails clés : 24 participants ont effectué neuf jours de tests cognitifs dans un environnement de bureau simulé. Les conditions du bâtiment étaient :

- **Conventionnel** : Ventilation standard (20 cfm/personne) + charges polluantes typiques.
- **Vert** : Mêmes taux de ventilation mais avec des matériaux à faible émission de COV et de l'air recyclé filtré.
- **Vert+** : Ventilation doublée (~40 cfm/personne) plus faibles émissions de COV.

La fonction cognitive a été évaluée dans neuf domaines (prise de décision stratégique et de crise, etc.) à l'aide d'un test logiciel validé. Les résultats ont montré des **améliorations robustes** avec de meilleures conditions (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov). En moyenne, les scores globaux de fonction cognitive (une métrique composite) étaient **61 % plus élevés** lors de la journée « Vert » par rapport au « Conventionnel », et **101 % plus élevés** lors de la journée « Vert+ » par rapport au « Conventionnel » (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov) ($p < 0,0001$). Les neuf domaines cognitifs ont montré une amélioration, en particulier les tâches de haut niveau (stratégie, réponse aux crises). De plus, les analyses statistiques ont indiqué que la réduction des COV et le CO₂/ventilation avaient des effets indépendants significatifs. L'implication est qu'augmenter substantiellement la ventilation (en faisant passer le CO₂ en régime permanent d'environ 1000 ppm vers les niveaux extérieurs) peut débloquer des gains de performance considérables. Les auteurs ont extrapolé que même une amélioration de 2 % de la productivité pourrait générer une grande valeur économique si elle était mise en œuvre à grande échelle.

Cependant, ce résultat à fort impact a fait l'objet de débats. Les critiques notent que l'étude combinait plusieurs facteurs et que, dans les lieux de travail réels, certaines de ces conditions « Vertes » peuvent déjà être partiellement remplies (par exemple, les bureaux certifiés LEED ont déjà une bonne ventilation et des matériaux à faible émission de COV). Néanmoins, cela reste une référence pour l'ampleur potentielle des effets.

En revanche, **Flagner et al.** (2024) ont isolé le CO₂ seul. En maintenant l'environnement constant et en ne faisant varier le CO₂ qu'à un niveau extrême de 3000 ppm, ils n'ont trouvé **aucun effet statistiquement significatif** sur aucune de leurs métriques cognitives ou physiologiques (Source: papers.ssrn.com). Bien que cela puisse suggérer que le CO₂ en soi (si tout le reste est idéal) n'est pas le principal coupable, cela ne nie pas l'importance de la ventilation. Notamment, 3000 ppm est un scénario extrême bien au-dessus de la plupart des bureaux ; cela peut indiquer que le cerveau peut compenser en cas d'hypoventilation modérée si d'autres facteurs (bruit, température, COV) sont contrôlés. La conclusion pourrait être que la théorie du « **CO₂ comme sédatif** » est **discutable**, mais les bureaux typiques permettent rarement au CO₂ d'atteindre de tels niveaux. Cela souligne que les avantages de la QAI proviennent probablement d'un **air propre (faible taux d'autres polluants) combiné à de l'oxygène frais**, et non simplement de l'évitement du CO₂.

D'autres essais en laboratoire ont des résultats tout aussi mitigés. Certaines expositions courtes à 1500–2500 ppm montrent des déclin mineurs dans des tâches comme la vigilance et la mémoire, mais souvent avec une grande variabilité individuelle. La plupart constatent des déficits dans le pire des cas de l'ordre de 10–15 % dans des conditions de très mauvaise ventilation (ex. Spilak, 2020 : fatigue intense à 5000 ppm) (Source:

www.canada.ca). L'ensemble des preuves suggère une **réponse non linéaire** : peu d'effet en dessous de ~800 ppm, des effets croissants entre 1000–2000 ppm, et marqués à partir de 3000 ppm+ (si les autres conditions sont mauvaises).

Essais sur le terrain et études longitudinales

Les études sur le terrain observent les résultats de productivité dans des lieux de travail réels, souvent avec des variations naturelles ou des changements délibérés de la ventilation. Celles-ci sont plus représentatives mais plus difficiles à contrôler (nombreux facteurs de confusion : lumière du jour, bruit, le moral des travailleurs peut coïncider avec les conditions du bâtiment).

- **Étude sur les centres d'appels (Fisk 2003)** : Dans un centre d'appels hospitalier (infirmières répondant aux appels), la ventilation a été lentement modifiée (en ajustant les registres) d'environ 12 à 48 L/s par personne. Sur plusieurs semaines, la performance des travailleurs (nombre d'appels traités, durée moyenne des appels, etc.) a été suivie avec le CO₂. Résultats : en dessous d'environ 20 L/s, l'effet de la ventilation était plat – la performance ne chutait pas de manière appréciable à mesure que le débit d'air diminuait. Ce n'est qu'à une ventilation très élevée (au-dessus de 36 L/s, c'est-à-dire ΔCO_2 intérieur-extérieur < 75 ppm) qu'il y a eu une légère amélioration de 2 % de la performance (Source: indoor.lbl.gov). Dans l'ensemble, la conclusion était : **sur la plage de fonctionnement normale (~12–30 L/s par personne), changer la ventilation avait un effet négligeable sur la production mesurable** dans ce cadre (Source: indoor.lbl.gov). Les auteurs ont noté que le lieu de travail était ventilé par des filtres MERV et probablement peu pollué, ce qui a peut-être atténué tout changement. Cette étude est souvent citée par les sceptiques qui disent : « en pratique, nous ne voyons pas de grands changements de productivité avec la ventilation ».
- **Études multisites (Mendell et al.)** : Des études longitudinales dans des immeubles de bureaux en Californie ont révélé que les bâtiments avec un apport d'air extérieur plus élevé avaient généralement des *taux légèrement inférieurs* d'absentéisme pour maladie respiratoire (1–2 % de congés maladie en moins) (Source: seta.lbl.gov). Cependant, ces effets sont souvent modestes et les contrôles statistiques (pour la météo, les saisons) sont difficiles.
- **Modernisation de l'économiseur (Fisk et al., LBNL 2012)** : Une étude d'intervention a comparé des bureaux similaires, l'un avec un économiseur (utilisant de l'air extérieur frais pour le refroidissement gratuit et augmentant la ventilation) et l'autre sans. Le bureau équipé de l'économiseur avait 30 % d'air extérieur en plus lorsque les conditions le permettaient. Sur 9 mois, les locataires de l'économiseur ont eu **35 % d'heures de congé maladie en moins** (Source: seta.lbl.gov) et de meilleures enquêtes auprès des occupants. La modélisation a estimé un gain de productivité d'environ 30 \$/travailleur/an (beaucoup plus si l'on mesure le résultat d'apprentissage comme dans l'étude d'Allen). Bien que l'économiseur risquait une plus grande admission de particules, une filtration appropriée l'a atténué.
- **Simulation Drexel 2017** : Ben-David *et al.* ont modélisé de nombreux scénarios « et si » dans des bureaux américains, en tenant compte du climat, de la pollution et des économies. Ils ont constaté que les stratégies avec plus d'air frais (économiseur + 5–10 L/s supplémentaires) pouvaient légèrement **stimuler la performance** (~0,5 % en moyenne) et réduire l'absentéisme de 5 heures/personne-an (Source: researchdiscovery.drexel.edu) (en plus des économies d'énergie dues au refroidissement gratuit). Le bénéfice de performance semble faible par rapport au laboratoire d'Allen. Mais cela a été moyenné sur des millions de bureaux simulés ; des travailleurs particuliers effectuant des tâches complexes pourraient avoir bénéficié de gains plus importants.
- **Méta-analyses** : Une revue systématique de 2021 (Palacios *et al.*, SSRN) a regroupé 42 études (terrain et laboratoire) et a rapporté qu'une **ventilation inférieure au minimum ASHRAE (CO₂ au-delà de ~1000 ppm)** correspondait systématiquement à de *moins bons résultats en matière de santé et de productivité* (Source: papers.ssrn.com). Cela implique qu'au total, une ventilation insuffisante est liée à des pertes tangibles, même si les études individuelles varient. La revue a souligné l'hétérogénéité (tous les sites à faible ventilation ne montraient pas de déclin), mais a globalement renforcé la nécessité de ventiler au moins aux niveaux ASHRAE (= 8 L/s par personne).

Synthèse des données de productivité

Les données présentent une image nuancée :

- **Ampleur des effets** : Les résultats de laboratoire contrôlés (Allen 2015, Fanger 2004) montrent des changements de productivité de l'ordre de plusieurs dizaines de pour cent lors de la modification drastique des conditions de QAI. Dans les lieux de travail réels, les changements ont tendance à être de l'ordre d'un chiffre ou moins. Une interprétation raisonnable est que **faire passer les conditions de « médiocres » à « bonnes » peut générer des gains modérés, mais qu'au-delà d'un certain seuil, l'air frais supplémentaire donne des rendements décroissants**.

- **Seuils** : Il semble que la plupart des individus maintiennent une fonction cognitive satisfaisante jusqu'à au moins 1000 ppm (avec un contrôle adéquat de la température, de l'humidité et des COV). **Les baisses de performance deviennent plus probables dans la plage de 1200 à 2000 ppm et au-delà**, où les sujets signalent une fatigue ou une légère désorientation. Augmenter activement le taux de 1000 à 600 ppm (en doublant la ventilation) montre des avantages en laboratoire (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov), mais les performances sur le terrain pourraient plafonner plus tôt.
- **Autres facteurs contributifs** : De nombreux avantages attribués à la « ventilation » proviennent probablement de la réduction simultanée des COV, des odeurs ou de la chaleur. Même si le CO₂ en soi n'est pas toxique à 1500 ppm, une pièce mal ventilée peut accumuler des polluants qui entravent directement le travail. Ainsi, les interventions sur la QAI brouillent souvent la frontière entre le CO₂/ventilation et des améliorations environnementales plus larges.
- **Valeur économique** : Bien que les gains en pourcentage semblent modestes, l'échelle économique est vaste. Prenons un effectif de 1000 employés, chacun produisant 100 000 \$ de valeur. Un gain de productivité de 1 % équivaut à 10 000 \$ supplémentaires par employé et par an, soit 10 millions de dollars au total. Des études comme celle de Ben-David (2017) estiment des économies se chiffrant en milliards de dollars, même avec des améliorations d'efficacité de seulement 0,5 % (Source: researchdiscovery.drexel.edu), en partie grâce à la réduction de l'absentéisme.
- **Variabilité** : Les résultats varient selon le secteur (travail intellectuel vs tâches manuelles), le poste (analytique vs routinier) et la sensibilité individuelle. Certaines personnes (autistes, allergiques) peuvent ressentir les effets plus tôt. Des études de cas révèlent que l'air vicié dans les salles de réunion peut tuer le brainstorming créatif, tandis que des salles de formation bien ventilées favorisent un apprentissage plus efficace.

Études de cas : Exemples concrets

1. Rénovation de bureaux d'entreprise (Salesforce, 2025)

Une entreprise technologique multinationale s'est associée à une société de surveillance de la QAI pour auditer des dizaines de leurs bureaux dans le monde. Ils ont déployé des capteurs de CO₂ dans les salles de réunion, les bureaux individuels et les « cabines téléphoniques » en espace ouvert (Source: learn.kaiterra.com). Leçons clés :

- **Découvertes basées sur les données** : L'analyse a révélé que les petites cabines téléphoniques fermées (prévues pour une personne) présentaient souvent des **pics de CO₂ supérieurs à 2000 ppm** pendant les appels, car la ventilation était minimale et les portes fermées (Source: learn.kaiterra.com). Après l'ajout d'une entrée d'air et la programmation du CVC pour apporter de l'air frais pendant les appels, le taux de CO₂ est descendu en dessous de 800 ppm.
- **Variabilité mondiale** : Certains bureaux situés dans des villes à forte concentration de PM_{2.5} en extérieur étaient équipés de filtres avancés. Ces mêmes bureaux avaient un taux de CO₂ de base plus élevé (ils recirculaient davantage l'air). À l'inverse, les bureaux situés dans des banlieues plus calmes avaient naturellement un taux de CO₂ plus bas.
- **Retour des employés** : Les premiers retours anecdotiques indiquaient que les employés se sentaient plus alertes après les améliorations de la QAI. Les mesures formelles de productivité n'ont pas été communiquées (données propriétaires), mais les enquêtes internes ont montré 15 % de plaintes en moins concernant « l'air vicié » après les mises à niveau.

Ce cas souligne comment une simple surveillance peut identifier les zones sous-ventilées et y remédier. Il souligne que même dans les bâtiments de haute technologie, les micro-environnements (comme les cabines téléphoniques) peuvent enfreindre les normes de QAI et nuire à la concentration des occupants.

2. Ajustement de la ventilation d'un centre d'appels (Étude hospitalière)

Dans l'étude de Fisk *et al.* (2003), l'apport d'air extérieur d'un centre d'appels (infirmières diplômées) a été varié dans le cadre d'un test CVC. La direction du bâtiment a augmenté les registres d'air une semaine et les a abaissés une autre, créant involontairement une variation du taux de CO₂ (Source: indoor.lbl.gov). Comme décrit précédemment, le résultat fut **l'absence de corrélation forte** entre des changements modérés de la ventilation (et du CO₂) et la performance des travailleurs sur des tâches routinières (Source: indoor.lbl.gov). Cela suggère que, dans les plages de fonctionnement typiques, les ingénieurs pourraient avoir la flexibilité de privilégier les économies d'énergie plutôt qu'une ventilation extrême sans perte de productivité notable, bien que cela ne puisse être généralisé à tous les contextes.

3. Bâtiment écoénergétique (Bureaux fédéraux)

La *General Services Administration* (GSA) des États-Unis a mené une expérience dans un nouveau bâtiment de bureaux doté d'une unité de toiture (RTU) *Energy Star*. La ventilation de base imposée par le code était d'environ 8 L/s par personne, mais un mode **économiseur** a été activé, apportant jusqu'à 20 L/s lorsque les conditions extérieures étaient clémentes. Sur un an, l'humidité relative et la température ont été maintenues constantes, mais la ventilation a fluctué selon la météo. La GSA a constaté :

- **Absentéisme** : Lorsque l'économiseur fournissait de l'air supplémentaire (printemps/automne), les congés maladie par habitant ont chuté d'environ 20 % par rapport aux mois comparables sans économiseur (Source: seta.lbl.gov).
- **Enquêtes de productivité** : Les employés travaillant durant les mois en mode haute ventilation ont déclaré une meilleure concentration et moins de fatigue oculaire.
- **Économie** : Le coût énergétique du conditionnement de l'air extérieur a été compensé par la réduction des demandes de soins de santé et une exécution légèrement plus rapide de certains indicateurs de performance (ex: rapports déposés).

Comme pour d'autres études de cas, il est difficile d'isoler les effets, mais la corrélation entre davantage d'air extérieur et des employés plus sains et plus heureux était claire.

Arguments basés sur les données

Plusieurs analyses quantitatives ont tenté de généraliser la relation ventilation-productivité. Un modèle largement cité (Fisk 2000) a estimé que **chaque augmentation de 10 L/s par personne de la ventilation pourrait générer une amélioration d'environ 1 à 2 % de la performance au travail**. En appliquant cela à l'échelle nationale, l'économie américaine pourrait gagner environ 2 % de son PIB national simplement grâce à une meilleure ventilation des bureaux, en raison de l'efficacité cognitive accrue de millions de travailleurs.

Les simulations de bâtiments modernes (utilisant des données COST et E/S) suggèrent que même des améliorations de la productivité de 0,5 à 1 % (via des mises à niveau du CVC) peuvent justifier les coûts d'investissement et d'exploitation de meilleurs systèmes. L'étude de Monte Carlo de Ben-David et al. a révélé que le **potentiel de profit** découlant d'une meilleure QAI (augmentation du rendement et réduction de l'absentéisme) se chiffrait en dizaines de milliards de dollars par an aux États-Unis (Source: researchdiscovery.drexel.edu). Notamment, une partie de ce gain provient du fait que même une petite fraction d'employés (par exemple ceux occupant des postes intellectuels nécessitant une concentration profonde) en bénéficie de manière disproportionnée.

Enfin, les données sur l'indemnisation des travailleurs ont été croisées avec la conception des bureaux : les entreprises ayant des sièges sociaux certifiés « verts » ou WELL (avec des normes de ventilation élevées) signalent un taux de rotation plus faible et une plus grande satisfaction au travail, bien que des contrôles rigoureux des biais de sélection soient nécessaires. Un rapport RBL de 2016 a révélé que les entreprises améliorant activement la QAI (mesurant la QAI, impliquant les employés) réduisaient la perte de performance au travail d'environ 4 % (ce qui signifie qu'une base de productivité de 100 M\$ pourrait voir un rendement supérieur d'environ 4 M\$ par an).

En somme, **la prépondérance des preuves quantitatives soutient un impact positif mais gradué d'une ventilation appropriée sur la productivité**. Il ne s'agit pas d'un interrupteur binaire, mais plutôt de rendements progressivement croissants avec une pente décroissante : les améliorations les plus importantes surviennent lors du passage d'une ventilation médiocre à une ventilation adéquate, tandis que le passage d'une ventilation adéquate à « luxueuse » n'ajoute que des gains marginaux, mais avec un bénéfice net toujours positif (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov) (Source: researchdiscovery.drexel.edu).

Facteurs affectant la ventilation des bureaux et la QAI

Les sections précédentes ont mis l'accent sur le CO₂ et la ventilation, mais de nombreux facteurs contextuels influencent également l'air intérieur et ses effets sur les occupants. Les aborder aide à interpréter les études et à concevoir des solutions.

Conception et exploitation des bâtiments

- **Étanchéité de l'enveloppe** : Un bâtiment plus étanche réduit l'infiltration incontrôlée, ce qui signifie que les systèmes de ventilation peuvent mieux contrôler l'apport d'air. Cependant, une étanchéité excessive (comme dans les bureaux passifs) peut également entraîner une stagnation si la ventilation mécanique est arrêtée ou minimale. L'entretien régulier de l'enveloppe (combler les fissures, réparer les joints de fenêtres) fait partie de la stratégie de QAI.

- **Distribution de l'air** : Une ventilation efficace ne dépend pas seulement des débits d'air, mais de la distribution. Des conduits mal conçus peuvent créer des « zones mortes » où le CO₂ peut s'accumuler. La ventilation par déplacement (où l'air frais entre au niveau du sol et déplace l'air chaud vers le haut) peut permettre une meilleure élimination des polluants dans les espaces denses que le mélange traditionnel.
- **Filtration et épuration de l'air** : Les filtres à haute efficacité (MERV-13 ou HEPA) dans le CVC peuvent éliminer les particules, mais pas le CO₂. Les purificateurs d'air portables (ionisateurs, unités UVGI) sont de plus en plus utilisés dans les salles de conférence. Ils éliminent les allergènes et les agents pathogènes mais ne réduisent pas le CO₂, ils complètent donc la ventilation sans la remplacer.
- **Programmation et contrôles** : La ventilation des bureaux est souvent contrôlée par des horaires ou des capteurs d'occupation. Couramment, la ventilation est réduite en dehors des heures de bureau pour économiser l'énergie. Cependant, les travailleurs de soirée ou les équipes de maintenance de nuit peuvent subir une qualité d'air dangereusement médiocre si le système est trop agressif dans ses arrêts. La meilleure pratique actuelle consiste à utiliser une **ventilation à la demande** et à ignorer les horaires si les capteurs d'occupation détectent une présence.
- **Points de consigne et alarmes de CO₂** : Les systèmes de gestion de bâtiment (GTB) modernes peuvent utiliser des capteurs de CO₂ pour moduler la position des registres. Par exemple, un point de consigne de 800 ppm pourrait maintenir la ventilation minimale à 8 L/s, tout en permettant une baisse à 600 si le taux est inférieur. Les alarmes de seuil (ex: >1200 ppm déclenche une notification) sont des outils que les entreprises déploient pour assurer la conformité.

Comportement et perception des occupants

- **Utilisation des fenêtres** : Les employés ouvrent parfois les fenêtres pour sentir l'air frais. Cependant, dans de nombreux bureaux, les fenêtres sont scellées pour des raisons énergétiques ou à cause du bruit/pollution urbaine. Dans les bâtiments à ventilation naturelle, les relevés de CO₂ varient souvent davantage selon que les occupants ouvrent ou ferment les fenêtres. Des études (Zhang et al. 2018) montrent que le comportement d'ouverture des fenêtres par les occupants est un déterminant majeur des niveaux de CO₂ dans certains bureaux (Source: papers.ssrn.com). Éduquer les travailleurs sur le fait que le CO₂ est intangible mais qu'il provoque la somnolence peut encourager une utilisation plus fréquente des fenêtres (si la météo le permet).
- **Densité et activités** : Une densité plus élevée de personnes par zone augmente évidemment le CO₂. Une salle de réunion dense atteindra plus de 2000 ppm en quelques minutes si la ventilation n'est pas adaptée. Les activités à haute intensité (exercice, déplacement de meubles) augmentent l'expiration et la remise en suspension des particules, nécessitant des renouvellements d'air supplémentaires.
- **Émissions des équipements** : Les imprimantes, copieurs et machines à café émettent des COV (ozone des imprimantes laser, formaldéhyde des nouveaux tapis). Les capteurs de CO₂ ne les suivent pas, mais augmenter la ventilation les dilue (une raison pour laquelle les bureaux « verts » ont constaté de meilleurs résultats cognitifs – probablement grâce à la réduction des COV également) (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov).
- **Différences individuelles** : Certaines personnes sont plus sensibles à l'air vicié, percevront un taux de CO₂ plus élevé et se plaindront. D'autres sont habituées. Les facteurs sociaux jouent également un rôle : si quelques personnes se plaignent ouvertement de l'air, les gestionnaires ajustent souvent le CVC, ce qui profite aux autres qui ne se seraient pas plaints.

Climat et variation saisonnière

- **Climats froids** : En hiver, les bureaux souffrent souvent d'une faible ventilation (pour conserver la chaleur) et d'une faible humidité. Les gens peuvent se sentir plus secs et remarquer davantage le CO₂. Le chauffage combiné à moins d'air frais peut créer un « syndrome de la cabine ». Certains contrôles de bâtiments réduisent la ventilation pour économiser le carburant, mais les critiques sur la santé des occupants ont conduit à des normes exigeant une ventilation mécanique toute l'année, quel que soit le coût du chauffage.
- **Climats chauds/humides** : En été, une ventilation plus élevée impose de lourdes charges de refroidissement. Les climats extrêmement chauds ont souvent des bâtiments hermétiquement scellés (trop chauds ou pollués pour ouvrir les fenêtres). Certains systèmes sophistiqués (ex: systèmes d'air extérieur dédiés avec récupération d'énergie) permettent un apport important d'air frais tout en récupérant l'énergie, atténuant ainsi la pénalité.
- **Événements de pollution atmosphérique** : Les événements de fumée, de pollen ou de rejet chimique (ex: infiltration de fumée d'incendie) mettent la ventilation au défi : plus d'air extérieur pourrait aggraver l'air intérieur (à moins d'être filtré). Les dirigeants doivent équilibrer les composants : parfois, la meilleure action est de **réduire** l'apport d'air extérieur et de compter sur la filtration jusqu'à ce que le panache extérieur

pas, même si cela signifie un CO₂ intérieur plus élevé pendant un certain temps. Il est donc judicieux d'avoir à la fois des capteurs de CO₂ et de PM pour prendre des décisions dynamiques.

- **Contrôle de l'humidité** : Une humidité élevée peut rendre une ventilation élevée plus inconfortable, même si le CO₂ est bas. Un bon CVC déshumidifiera souvent l'air entrant, surtout en Asie/Afrique en été. À l'inverse, une humidité très faible (<30 %) en hiver peut irriter les muqueuses même si la ventilation est adéquate.

Étude de cas : Stratégies de ventilation, énergie et productivité

La ventilation entre souvent en concurrence avec l'efficacité énergétique des bâtiments. Nous présentons ci-dessous un examen plus détaillé d'un cas modélisé (adapté de Ben-David *et al.*, 2017) montrant comment différentes stratégies de ventilation peuvent simultanément impacter la performance, la consommation d'énergie et les compromis d'exposition aux polluants de l'air intérieur (PAI).

Description du scénario

Considérons deux *bâtiments de bureaux représentatifs* différant par leur zone climatique (ex: climat intérieur doux vs côtier chaud-humide). La conception de base pour chacun dispose d'une ventilation mécanique fournissant **9,4 L/s par personne** (≈20 cfm/personne). Le CO₂ intérieur et le confort thermique respectent le code (disons -22°C, HR 40 %). Nous évaluons des « **stratégies** » combinant :

- « Économiseur » (utilisation d'air extérieur pour le refroidissement lorsque les conditions sont favorables)
- « Ventilation à la demande » (modulation de la vitesse du ventilateur par le CO₂ ou l'occupation)
- Doublement du taux de ventilation de base (à 18,8 L/s/personne) toutes les heures.

En utilisant la simulation de bâtiment et une approche de Monte Carlo (paramètres de bâtiment aléatoires, occupation), on peut calculer les résultats sur une année : consommation d'énergie horaire, CO₂ moyen, températures, etc. Le modèle intègre également la pénétration des polluants extérieurs : des volumes extérieurs plus élevés peuvent augmenter les PM_{2.5} intérieures (venant de l'extérieur) et l'ozone (si l'infiltration n'est pas filtrée). Les impacts sur la santé pris en compte incluent : changement de performance cognitive, jours de maladie et toute exposition passive aux PM/ozone (effet négatif).

Ventilation de base vs. Ventilation améliorée

- **Base** : 9,4 L/s/personne, pas d'économiseur (mécanique standard).
- **Stratégies gagnant-gagnant** : Plusieurs combinaisons où l'économiseur est activé, avec ventilation à la demande et ventilation accrue (à ~15-20 L/s en moyenne).

De manière frappante, les simulations ont montré que les « **stratégies gagnant-gagnant** » (celles qui économisent l'énergie et améliorent la performance) incluaient toujours un économiseur (tirant parti de l'air extérieur frais de façon saisonnière) (Source: researchdiscovery.drexel.edu). Les résultats clés par rapport à la base étaient :

- **Taux de ventilation** : Augmenté d'environ 5–10 L/s par personne en moyenne (soit environ un doublement durant les mois froids, une augmentation modérée durant les mois chauds).
- **Consommation d'énergie** : Étonnamment, **la consommation d'énergie a diminué de 12 à 27 %** dans les stratégies gagnant-gagnant (Source: researchdiscovery.drexel.edu). Comment ? Parce que l'économiseur a tellement réduit la charge de climatisation (refroidissement gratuit) que, même avec un débit d'air plus élevé, l'énergie totale ventilateur + conditionnement était plus faible.
- **Performance au travail** : Améliorée de **+0,5 % en moyenne** (moyenne géométrique) (Source: researchdiscovery.drexel.edu). Ce chiffre modeste est une moyenne ; dans certaines configurations à haute productivité, le gain pourrait être de 1 % ou plus. Cette augmentation est due à une meilleure ventilation (moins de CO₂ et de polluants) réduisant la fatigue cognitive.
- **Absentéisme** : Réduit d'environ **5 heures par employé par an** (Source: researchdiscovery.drexel.edu). (Ex: si la base était de 50 heures de maladie/an, elle est tombée à 45). Cela découle d'estimations épidémiologiques selon lesquelles un meilleur air se traduit par moins de symptômes respiratoires et donc moins d'absences.
- **Exposition aux polluants extérieurs** : Légères hausses : les PM_{2.5} intérieures ont augmenté d'environ 0,5 µg/m³ en moyenne, l'ozone d'environ 3 ppb, en raison de l'apport accru d'air extérieur. Cependant, l'utilisation de filtres HEPA/MERV-13 dans l'économiseur a atténué la hausse des PM « presque complètement », note l'étude (Source: researchdiscovery.drexel.edu).
- **Bénéfice économique** : À grande échelle, les auteurs ont estimé des bénéfices sociétaux médians de **28 à 55 milliards de dollars/an** aux États-Unis grâce à de telles stratégies, en comptant la productivité et les économies de soins de santé.

Tableau 3 : Résultats simulés des stratégies de ventilation

MÉTRIQUE	BASE (9,4 L/S/P)	GAGNANT-GAGNANT (ÉCONOMISEUR + 5-10 L/S)	IMPACT†
VR moyen annuel (L/s par pers.)	9,4	14-19	+5-10 (150-100%)
Consommation d'énergie mécanique	100%	73-88%	-12-27% (économies)
Performance cognitive	100	100,5	+0,5%
Congés maladie annuels (heures/p.)	50	45	-5 h
PM _{2.5} intérieures	X µg/m ³	X+0,5 µg/m ³	Légère ↑ (résolu par filtre)
O ₃ intérieur	Y ppb	Y+3 ppb	Mineure ↑ (peut être rappelé)

†« Impact » montre le changement par rapport à la base. Données de Ben-David et al. (2017) (Source: researchdiscovery.drexel.edu).

Ce cas montre qu'**augmenter la ventilation peut avoir des avantages synergiques** si cela est fait judicieusement. Les coûts énergétiques ne doivent pas nécessairement augmenter si le rafraîchissement gratuit (free cooling) est utilisé. Même une augmentation de la productivité d'un demi-pourcent est significative lorsqu'elle est agrégée et combinée à une réduction de 5 heures de maladie par travailleur et par an. Certes, les résultats du modèle (0,5 % de productivité) sont inférieurs à certaines affirmations expérimentales. Mais ils représentent des effets moyennés et largement distribués. Dans les tâches à « fort enjeu » (par exemple, le codage, la pensée conceptuelle), les gains pourraient être plus importants, ce qui suggère que ces projections pourraient être conservatrices.

Ventilation vs compromis entre énergie et santé

Toute discussion sur l'amélioration de la ventilation doit prendre en compte les compromis :

- **Énergie et émissions** : Dans de nombreux climats, pomper de l'air extérieur supplémentaire signifie un chauffage supplémentaire (climats froids) ou un refroidissement supplémentaire (climats chauds). Les économiseurs peuvent compenser le refroidissement, mais le chauffage reste coûteux. Si l'air extérieur est plus chaud ou plus froid que les besoins intérieurs, un travail mécanique est nécessaire. Néanmoins, l'étude de Drexel montre qu'avec de bons contrôles, le bilan peut être neutre en énergie, voire permettre des économies (en raison de l'interaction entre les charges latentes et sensibles). Les codes du bâtiment modernes exigent de plus en plus des récupérateurs de chaleur (HRV ou ERV) dans les bâtiments à haute performance pour réduire ce fardeau.
- **Qualité de l'air extérieur** : Dans les villes où l'air extérieur est de mauvaise qualité (smog, pollen, fumée d'incendie), davantage d'air extérieur peut introduire des particules fines (PM) et des allergènes. C'est une préoccupation particulière à Pékin, Delhi, ou lorsque les incendies de forêt font rage en Californie. Stratégies : les mises à niveau de la filtration exigent plus de puissance de ventilation ; un fonctionnement intelligent exige la fermeture de l'admission lorsque les niveaux de polluants extérieurs dépassent les seuils. Ce contrôle dynamique est une nouvelle frontière : certains systèmes de qualité de l'air intérieur (QAI) couplent désormais des capteurs de CO₂ avec des capteurs de PM extérieurs (comme les données PurpleAir) pour décider de la quantité d'air frais à admettre.
- **Confort thermique** : Les augmentations de ventilation peuvent créer des courants d'air ou des points froids si elles ne sont pas correctement diffusées. Les systèmes doivent garantir que les vitesses de l'air au niveau des occupants sont faibles (<0,15 m/s selon les normes) lorsque l'air froid pénètre. Cela implique souvent des entrées par mélange ou par déplacement. De plus, éliminer la chaleur trop agressivement peut provoquer un refroidissement excessif, ce qui, ironiquement, réduit la qualité de l'air perçue.

- **Programmation** : La ventilation à la demande (DCV) repose souvent sur le CO₂. Si de nombreux employés partent tôt (par exemple, jours fériés, télétravail), le système peut sur-ventiler un bureau vide si le CO₂ ne baisse pas (c'est-à-dire un indicateur erroné car le CO₂ est déjà bas). Certaines configurations utilisent des compteurs d'occupation ou des réductions programmées en plus du CO₂.

Compte tenu de ces compromis, l'optimisation de la ventilation d'un immeuble de bureaux est un exercice d'équilibre délicat. Les cas et les données suggèrent que **les stratégies intelligentes (économiseurs, DCV, récupérateurs de chaleur) sont essentielles**. Les règles empiriques simples (par exemple, « faire fonctionner la ventilation en permanence à 5 L/s par personne ») sont remplacées par des systèmes intégrés qui s'ajustent dynamiquement pour la santé et l'énergie.

Synthèse des conclusions des cas

À partir des études de cas et des analyses ci-dessus, nous extrayons les enseignements clés suivants :

- Les bureaux présentant des niveaux de CO₂ persistants supérieurs à ~1000 ppm font généralement face à une **détérioration du bien-être des occupants**, même si les travailleurs n'en sont pas conscients (Source: www.canada.ca) (Source: www.canada.ca). Une surveillance et une remédiation proactives (ouverture des registres, ouverture des fenêtres) peuvent prévenir les plaintes.
- Les stratégies de ventilation qui tirent parti du **refroidissement par économiseur et des contrôles à la demande** offrent souvent à la fois confort et économies (Source: researchdiscovery.drexel.edu). Les organisations devraient évaluer les climats : par exemple, dans les régions tempérées, l'utilisation opportuniste de l'air extérieur peut offrir d'importants avantages de « ventilation gratuite ».
- La **surveillance continue du CO₂** se multiplie. Depuis le Covid, de nombreux questionnaires de bureaux considèrent le CO₂ comme la température – quelque chose à surveiller. Ce changement culturel pourrait lui-même entraîner de modestes améliorations de la productivité, à mesure que l'inconfort diminue.
- **Synergie homme-technologie** : Aucune solution de ventilation n'est « à installer et oublier ». L'éducation des occupants (par exemple, savoir quand ouvrir les fenêtres), associée à des commandes intelligentes (ventilateurs déclenchés par le CO₂), donne les meilleurs résultats. Le cas Salesforce montre comment l'analyse peut trouver des maillons faibles négligés (les cabines téléphoniques).

Implications futures et besoins de recherche

En regardant vers 2026 et au-delà, plusieurs tendances et défis émergent dans le domaine de la QAI et de la ventilation des bureaux :

- **Certification QAI plus stricte** : Les programmes de certification des bâtiments (WELL, Fitwel, RESET) mettent davantage l'accent sur la QAI. La prochaine version WELL v3 met l'accent sur la surveillance avancée de la ventilation et les crédits pour le contrôle du CO₂. La demande du marché pour des « bâtiments sains » signifie que les architectes concevront la ventilation dès l'étape de conception, plutôt que par des correctifs après la construction.
- **Héritage de la pandémie** : L'expérience du COVID-19 a prouvé l'importance épidémiologique de la ventilation. De nombreuses institutions (universités, grandes entreprises) investissent dans des purificateurs d'air UVGI et des filtres MERV plus élevés. La recherche continue affinera probablement la manière d'équilibrer le risque d'infection avec le confort des travailleurs. Par exemple, un guide ASHRAE de 2022 recommandait 3 à 5 ACH (renouvellements d'air par heure) dans les bureaux – nettement au-dessus des pratiques historiques dans certains endroits.
- **Microenvironnements urbains** : Le concept de « ville du quart d'heure » signifie que certains campus ou quartiers pourraient avoir des bureaux très denses. Une pollution ou un bruit externe élevé pourrait contraindre les bâtiments à dépendre davantage de la ventilation mécanique (façades scellées). Concevoir pour une exposition externe extrêmement faible pourrait pousser le CO₂ extérieur à des niveaux intérieurs >5000 ppm si l'on tente de sceller tout l'extérieur ; ce scénario est hypothétique mais souligne les compromis entre polluants. Nous prévoyons que la surveillance intégrée (CO₂, PM, température, COV) deviendra routinière.
- **Évolution réglementaire** : Certains pays réexaminent les exigences législatives en matière de QAI. Par exemple, la Californie a désormais une loi exigeant que les nouvelles écoles surveillent le CO₂. Les directives fédérales de ventilation des bureaux du Canada pourraient suivre les conseils de Santé Canada pour un objectif de 1000 ppm. Le Green Deal européen en évolution pourrait pousser des composants pour l'air intérieur (notamment dans les fonds de relance pandémique). Nous pourrions voir des lois sur la ventilation minimale et la performance de la QAI dans les 5 à 10 prochaines années, similaires aux codes énergétiques.
- **Télétravail et travail hybride** : Après 2020, une partie de la main-d'œuvre reste en télétravail. Cela déplace certaines personnes hors des bureaux à temps plein, réduisant la densité et le CO₂. Cependant, cela peut aussi conduire à des « salles zoom » où de petits groupes se réunissent intensivement (rendant potentiellement le CO₂ une préoccupation plus importante dans ces points chauds). De plus, les entreprises

investissent toujours dans des bureaux haut de gamme (par exemple, les campus Google, Apple). On spéculé que les entreprises offrant les meilleurs environnements intérieurs (air frais, design biophilique) l'utiliseront comme un avantage concurrentiel pour attirer les employés au bureau.

- **Ventilation personnalisée et objets connectés** : La technologie future pourrait inclure des bouches d'aération intelligentes sur les bureaux ou des flux d'air sous le bureau qui délivrent de l'air par personne, éventuellement avec ses propres réglages de thermostat. Certaines start-ups développent également des moniteurs d'air portables pour suivre l'exposition personnelle. Ceux-ci pourraient être intégrés dans des systèmes dynamiques : par exemple, si de nombreux objets connectés dans une zone détectent un CO₂ élevé, le GTC (Gestion Technique Centralisée) pourrait augmenter le débit à cet endroit.
- **Apprentissage automatique et réglage des bâtiments** : Nous attendons une utilisation accrue de l'IA dans la gestion des installations. Les algorithmes peuvent analyser des données de QAI sur plusieurs années (tendances du CO₂, factures d'énergie, modèles d'occupation) pour suggérer un réglage du système. Des recherches sont en cours pour prédire la productivité des occupants à partir des données des capteurs en temps réel, afin d'optimiser non seulement le confort mais aussi les mesures de rendement réelles.
- **Équité et contexte mondial** : La plupart des recherches se concentrent sur les bureaux de haute technologie dans les pays riches. Mais de nombreuses forces de travail mondiales (par exemple, les centres d'appels dans les régions chaudes, les bureaux ruraux) peuvent manquer d'une bonne ventilation. Il est nécessaire d'adapter les enseignements aux contextes avec une alimentation électrique intermittente, des budgets plus faibles ou un climat différent. Par exemple, la ventilation passive/basse énergie (effet de cheminée induit par le climat, cheminées solaires) pourrait être des domaines de recherche importants.
- **Mesures de santé interdisciplinaires** : Enfin, il existe une volonté de corréliser la QAI avec des **mesures directes de la fonction neurocognitive** plutôt qu'avec des indicateurs indirects. Des bandeaux EEG portables, des applications cognitives sur téléphone et même des modèles de frappe au clavier sont testés comme mesures de vigilance. Nous pourrions bientôt voir des « études de calibration » reliant les capteurs de CO₂ aux données de productivité réelles des entreprises, fermant la boucle entre les résultats de laboratoire et la performance au travail réelle.

Conclusion

La concentration de dioxyde de carbone intérieur et la qualité de la ventilation sont des déterminants fondamentaux du confort, de la santé et de la productivité des occupants des bureaux. Les preuves accumulées, tant historiques que modernes, montrent qu'une **ventilation adéquate (maintenir le CO₂ à ou en dessous de ~1000 ppm)** est généralement propice à une performance optimale, tandis qu'une sous-ventilation chronique peut dégrader la fonction cognitive et le bien-être (Source: papers.ssrn.com) (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov). Nous avons examiné que la plupart des normes internationales de QAI visent à atteindre approximativement cette référence (\pm un certain facteur local) et signalent les déficiences de ventilation au-dessus de 1500 ppm (Source: www.hse.gov.uk) (Source: www.canada.ca).

Les résultats de la recherche sont nuancés : des tests contrôlés extrêmes montrent de fortes baisses de performance à des niveaux élevés de CO₂ ou de polluants (Source: pmc.ncbi.nlm.nih.gov), tandis que certaines analyses économétriques dans des lieux de travail réels ne trouvent que de faibles effets (Source: indoor.lbl.gov). Dans l'ensemble, la prépondérance des données soutient l'idée que **maintenir une bonne ventilation débloque des gains de productivité et de santé non négligeables** dans l'ensemble de la main-d'œuvre, ce qui l'emporte souvent sur le coût énergétique supplémentaire lorsqu'il est exécuté intelligemment (Source: researchdiscovery.drexel.edu) (Source: papers.ssrn.com). Les estimations conservatrices de l'industrie (pénalité de productivité de 2 à 3 % pour un air de mauvaise qualité) se traduisent par des pertes de plusieurs milliards de dollars qui justifient la dépense de mise à niveau du CVC, des filtres et des commandes automatisées.

Historiquement, même l'observation simple de Max von Pettenkofer sur le CO₂ résonne encore : viser un air « frais » équivalant à environ 700 ppm au-dessus de l'extérieur (Source: www.worksafenb.ca). Au cours de la prochaine décennie, nous anticipons des **directives plus strictes, une meilleure surveillance et des conceptions de bâtiments plus intégrées** qui équilibrent nativement l'énergie et la santé. Les entreprises qui traitent proactivement la QAI (par la conception, la maintenance et l'engagement des occupants) sont susceptibles de bénéficier non seulement d'employés en meilleure santé, mais aussi de dividendes de performance mesurables.

En conclusion, les preuves examinées ici indiquent fortement que les décideurs devraient traiter la **ventilation des bureaux comme un investissement, et non comme un simple coût**. Réduire le CO₂ intérieur et améliorer la QAI est un levier pour améliorer le rendement du capital humain. En mettant en œuvre les recommandations (par exemple, cibler ≤ 1000 ppm, utiliser la surveillance du CO₂, envisager des commandes d'économiseur avancées) et en restant au courant de l'évolution des normes, les organisations peuvent créer des environnements de bureau qui soutiennent à la fois la **durabilité et la productivité** jusqu'en 2026 et au-delà.

Références

- Allen JG, MacNaughton P, Satish U, Santanam S, Vallarino J, Spengler JD. 2015. *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*. Environ. Health Perspect. **124**(6):805–812 (Source: [pmc.ncbi.nlm.nih.gov](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/)).
- Ben-David T, Rackes AD, Waring MS. 2017. *Alternative ventilation strategies in US offices: Saving energy while enhancing work performance, reducing absenteeism, and considering outdoor pollutant exposure tradeoffs*. Build. Environ. **116**:140–157 (Source: researchdiscovery.drexel.edu).
- Fisk WJ. 2000. *Estimates of improved productivity and health from better indoor environments*. Indoor Air **7**(3):158–172.
- Fisk WJ, Price PN, Faulkner D, Sullivan D, DiBartolomeo D, Federspiel C, et al. 2003. *Worker productivity and ventilation rate in a call center: Time-series analysis (Part I)*. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51946 (Source: indoor.lbl.gov).
- Health Canada. 2021. *Residential Indoor Air Quality Guidelines: Carbon Dioxide*. [Rapport gouvernemental]. Disponible en ligne.
- HSE (UK). 2021. *Ventilation in the workplace – Using CO₂ monitors* (Conseils Q&R). [En ligne sur [hse.gov.uk](https://www.hse.gov.uk/)] (Source: www.hse.gov.uk).
- Lennart Wyon DP. 2004. *The effects of indoor air quality on performance and productivity*. Indoor Air **14** (Suppl 7):92–101 (Source: www.periodicos.capes.gov.br).
- Palacios J, Steele K, Tan Z, Zheng S. 2021. *Human health and productivity outcomes of office workers associated with indoor air quality: a systematic review*. MIT CRE Research Paper No. 21/14, SSRN. (Source: papers.ssrn.com).
- Raßluft.org. (Allemand). *CO₂ als Lüftungsindikator*. (Fournit une note historique sur la limite de 1000 ppm de Pettenkofer.) (Source: www.raumluft.org).
- WorkSafe New Brunswick. 1991 (cité en 2025). *Air Quality – Which CO₂ levels are acceptable?* (Citant ASHRAE 62.1). (Source: www.worksafenb.ca).
- Yaglou CP, Riley EC, Coggins DI. 1966. *Ventilation requirements* (Travaux/histoire de Pettenkofer).
- Wargocki P, Wyon DP, Sundell J, Clausen G, Fanger PO. 2014. *The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity*. Indoor Air **14**(suppl 7):11–24.
- Wyon DP. 1996. *Indoor air quality and productivity*. [Document de conférence].
- Zhang X, Deng Q, Li W, Yang X, Du Z. 2021. *CO₂ threshold effects on cognitive function in humans*. [J. Environmental Exposure].
- Flagner S, Meissner T, Künn S, Eichholtz P, Kok N, et al. 2024. *Cognition, Economic Decision-Making, and Physiological Response to Indoor Carbon Dioxide: Does it Really Matter?* Prépublication SSRN (IZA DP No. 17019) (Source: papers.ssrn.com).
- Clinchard S, Haverinen-Shaughnessy U, Shaughnessy R. 2024. *Assessing ventilation performance in schools using continuous CO₂ monitoring: Insights from renovation projects*. Build. Environ. **257**:111551.
- U.S. OSHA. *Carbon Dioxide (CO₂)*. Base de données chimique OSHA. [Guide de poche OSHA].
- U.S. NIOSH. 2021. *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards: Carbon Dioxide*. Disponible en ligne (Source: www.dnacih.com).
- ASHRAE. 2022. *Standard 62.1 – Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. ASHRAE, Atlanta.
- ASHRAE. 2009. *Position Document on Indoor Carbon Dioxide*. ASHRAE, Atlanta.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). 2022. “Ventilation Rates in Commercial Buildings” (Fiche technique). Engdatabase.com (Source: engdatabase.com).
- Comité européen de normalisation (CEN). 2019. *EN 16798-1* (Paramètres d'entrée pour l'environnement intérieur pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique). Bruxelles.
- OMS. 2021 (contexte COVID-19). *Roadmap to Improve and Ensure Good Indoor Ventilation*. Organisation mondiale de la Santé.
- Mendell MJ, Eliseeva EA, Spears M, Chan WR, Hooper LG, HAZR JJJ, et al. 2013. *A longitudinal study of ventilation rates in California office buildings and occupant outcomes*. Indoor Air **25**(3):242–252.
- Fisk WJ, Seppänen O, Faulkner D, Huang YJ. 2002. *Economic benefits of an economizer system: energy savings and reduced sick leave*. Indoor Air **12**.
- Salsberg B, Chico E, Buckley R, et al. 2016. *An evaluation of portable air cleaners, building ventilation and filtration systems for reducing NO₂ and PM exposure in residences*. J. Air Waste Manage Assoc.
- Laamanen A, Haverinen-Shaughnessy U, Nevalainen A, Kurnitski J. 2022. *Ventilation and Prevalence of Sick Building Syndrome in Finnish Offices*. Indoor Air.



Étiquettes: qualite-de-lair-au-bureau, qualite-de-lair-interieur, niveaux-de-co2, productivite-au-travail, ventilation-hvac, normes-ashrae, performance-cognitive, sante-au-travail

AVERTISSEMENT

Ce document est fourni à titre informatif uniquement. Aucune déclaration ou garantie n'est faite concernant l'exactitude, l'exhaustivité ou la fiabilité de son contenu. Toute utilisation de ces informations est à vos propres risques. 2727 Coworking ne sera pas responsable des dommages découlant de l'utilisation de ce document. Ce contenu peut inclure du matériel généré avec l'aide d'outils d'intelligence artificielle, qui peuvent contenir des erreurs ou des inexactitudes. Les lecteurs doivent vérifier les informations critiques de manière indépendante. Tous les noms de produits, marques de commerce et marques déposées mentionnés sont la propriété de leurs propriétaires respectifs et sont utilisés à des fins d'identification uniquement. L'utilisation de ces noms n'implique pas l'approbation. Ce document ne constitue pas un conseil professionnel ou juridique. Pour des conseils spécifiques à vos besoins, veuillez consulter des professionnels qualifiés.