



L'ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR DANS LES ÉCOLES

Livre blanc

Contents

1. Extrait	3	7. Faits et résultats de recherche	24
		Environnement intérieur	24
2. Contexte	4	Température et humidité relative	25
Faits concernant le parc immobilier	4	Concentration de dioxyde de carbone	26
En Europe et Amérique du Nord	5	Composés organiques volatiles	26
		Confort, performance et ventilation	27
3. Temps passé dans les écoles	6	Différents types et débits de	
Étapes éducatives	6	ventilation	27
Années, semaines, heures à l'école	6	Lumière du jour, éclairage et vues sur	
L'éducation à l'échelle mondiale	9	l'extérieur	29
		Contrôle de l'acoustique	30
4. Normes et règlements relatifs au confort et à la ventilation dans les écoles	10	Au-delà des quatre murs - le contexte est important	32
EN 16798 -1:2019	10	Pollution de l'environnement extérieur	
ASHRAE 62.1:2019	11	et sources proches	32
Bulletin du bâtiment 101:2018	12	Absentéisme dans les écoles	33
Exigences Passive House dans les écoles	14	Psychologie environnementale et autres facteurs	33
5. Exigences essentielles pour les établissements d'enseignement	16	8. Conclusion	34
Conception et planification	16	La santé dans les écoles	34
Structures spatiales et besoins	17	Le nouveau paradigme de la ventilation dans les écoles	34
Conception et utilisation réelle	18	Relations dynamiques	35
		Éducation au développement durable et au climat	35
		L'avenir de l'éducation et des écoles	35
6. Remplacement de l'air	20		
Infiltration	20	9. Références	36
Ventilation naturelle	21		
Ventilation mécanique	22		

Extrait

Il y a plusieurs centaines d'années, les premières écoles ont fait leur apparition et le système éducatif a connu d'importantes évolutions à travers l'histoire... Aujourd'hui, l'éducation représente jusqu'à ¼ environ de notre vie, et la plupart de ce temps est passé à l'intérieur - dans les bâtiments scolaires.

De nombreuses études démontrent que l'environnement, qu'il soit extérieur ou intérieur, affecte notre santé. Et des décennies de résultats scientifiques et de recherches montrent qu'il existe déjà des preuves substantielles et solides de la manière dont un climat intérieur sain et une bonne ventilation affectent les enfants et leurs performances à l'école.

Le bâtiment scolaire représente une excellente occasion d'intervenir et de protéger la santé de nos enfants. L'école doit garantir un environnement sain tout en étant durable et économe en énergie. L'environnement scolaire doit être vivable et propice à l'apprentissage : plein d'air frais, de la lumière naturelle, privilégiant une atmosphère confortable et offrant de bonnes conditions acoustiques.

Les tendances actuelles dans les bâtiments scolaires se concentrent sur des systèmes qui sont flexibles, intelligents et adaptables aux exigences potentielles et futures et basés sur la demande afin de fournir un climat intérieur adéquate aux besoins qui fluctuent énormément dans ces bâtiments.

Les élèves méritent de se développer, d'apprendre et de s'épanouir dans un environnement sain qui optimise leur potentiel de réussite et préserve leur bien-être.

Contexte

Faits concernant le parc immobilier

Une grande partie du parc immobilier européen (bâtiments résidentiels et non résidentiels) a besoin d'être rénovée, car les deux tiers du parc immobilier ont été construits avant les années 1970. On peut supposer sans risque que la plupart de ces bâtiments seront encore debout dans les années 2050.

Chaque année, les nouvelles constructions de bâtiments en Europe ne représentent qu'environ 1 % du parc immobilier existant (Artola, 2016).

En Europe, environ 75% des bâtiments sont résidentiels, et le reste - 25% - sont des bâtiments tertiaires. Les bâtiments d'enseignement quant à lui représente 17% de ce parc (ou respectivement 4,25% du parc immobilier total, voir Figure 1).

Il est à noter qu'en Amérique (États-Unis et Canada), le parc immobilier est d'âge moyen et que la plus grande partie des bâtiments ont été construits avant les années 1980. Aux États-Unis, les bâtiments d'enseignement, les commerces, les bureaux et les entrepôts/stockages représentent 60 % de la surface commerciale totale et 50 % des bâtiments (EIA, 2018).

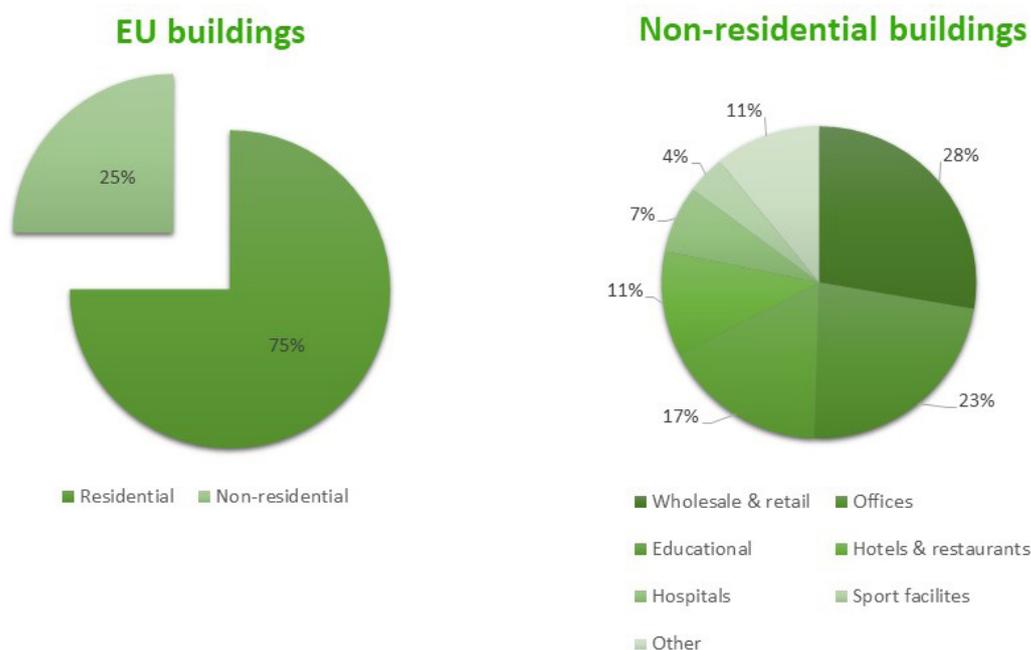


Figure 1 : Vue d'ensemble du parc immobilier non résidentiel et résidentiel en Europe (Rapport BPIE, 2011) sur le parc immobilier non résidentiel et résidentiel en Europe (Rapport BPIE, 2011)



En Europe et Amérique du Nord

- Le parc immobilier éducatif européen est relativement ancien, souvent en mauvais état, affichant une mauvaise performance énergétique.
- La plupart des bâtiments scolaires européens ont été construits pour un enseignement traditionnel où les cours sont dispensés de manière frontale.
- Une grande partie des coûts de fonctionnement des écoles d'Europe centrale et des pays scandinaves est absorbée par le chauffage et la maintenance et l'entretien des bâtiments.
- Le parc immobilier actuel est déjà ancien, mais il sera encore debout dans les années 2050. Cependant, la durée de vie moyenne d'un bâtiment varie considérablement en fonction des matériaux et des équipements techniques du bâtiment. En outre, la durée de vie d'un bâtiment dépend beaucoup de la qualité de la construction et du niveau d'entretien (parmi de nombreux autres facteurs).
- Il n'existe pas de modèle prédéfini de bâtiment scolaire en Europe et en Amérique.
- Certaines écoles ont une très grande superficie au sol et sont très étalées, situées à l'extérieur des zones à forte densité de population.
- L'âge global des bâtiments scolaires aux États-Unis est de 44 ans (et 12 ans depuis la rénovation majeure), et la durée de vie des bâtiments scolaires est également estimée à environ 40 ans au Canada.
- En Amérique, lorsqu'un bâtiment scolaire a 20 ou 30 ans, le remplacement des équipements est nécessaire. Après 30 ans, les équipements d'origine devraient avoir été remplacés, y compris le toit et les équipements électriques. Après 40 ans, le bâtiment scolaire commence à se délabrer, et après 60 ans, la plupart des écoles sont abandonnées.

Temps passé dans à écoles

Les enfants, en tant qu'étudiants, passeront la majeure partie de leur vie à l'école, c'est pourquoi l'environnement intérieur des écoles est si important.

Les étapes éducatives

La plupart des pays ont des étapes éducatives formelles, certaines obligatoires et d'autres volontaires. Ces étapes varient d'un pays à l'autre, mais comprennent généralement l'éducation préscolaire (jardin d'enfants, école maternelle), l'éducation primaire pour les jeunes enfants (école primaire ou élémentaire), l'éducation secondaire pour les adolescents (école secondaire, collège ou lycée) et l'éducation supérieure (collège, université), voir la figure 2.

Il existe également de nombreux établissements d'enseignement alternatif (pour des besoins éducatifs spécifiques, religieux, privés, etc.) et des écoles pour adultes (par exemple, académie de formation, école de commerce, etc.). L'enseignement indépendant est l'enseignement à domicile ou l'enseignement à distance.

Les niveaux éducatifs



Figure 2 : étapes de l'éducation applicables à la plupart des pays développés

Années, semaines et heures à l'école

Les enfants passent de nombreuses années à l'école. Les différentes étapes et les écoles varient selon les pays, mais en général, les enfants commencent l'éducation à l'âge de 6-7 ans, suivie par l'école primaire à l'âge de 7-10 ans, l'école secondaire de 10-14 ans et un second cycle de 14-18 ans (dans certains pays jusqu'à 16 ans). En général, les enfants atteignent l'âge de 18 ans et poursuivent leur éducation de troisième niveau dans une université ou une école spécialisée pendant 3 à 5 ans, voir la figure 3.

Les enfants peuvent également suivre une éducation volontaire avant l'âge de 6 ans. Et après avoir obtenu leur diplôme universitaire, ils poursuivent souvent leur éducation académique ou divers programmes éducatifs/de formation tout au long de la vie.

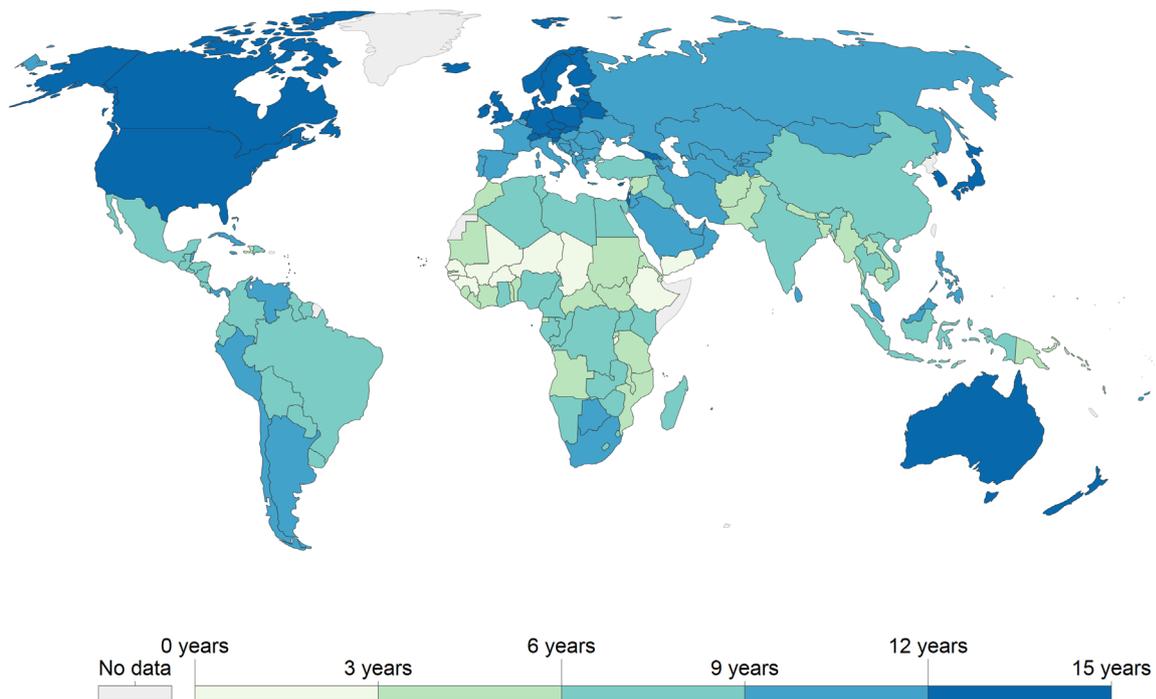


Figure 3 : nombre moyen d'années de scolarité dans le monde en 2017, tous niveaux d'enseignement confondus, pour la population âgée de 25 ans et plus (Notre monde en données, 2016).

Les systèmes éducatifs les plus développés exigent que les élèves aillent à l'école entre 175 et 220 jours par an (ou entre 35 et 45 semaines). La journée scolaire moyenne dure entre 5 et 8,5 heures par jour, voir la figure 4. Cette variation suggère que le nombre total de jours (ou d'heures) d'école par an n'est pas un facteur déterminant de la performance des élèves. (NCEE, 2018)

Notez que le total des vacances peut aller de 8 à 16 semaines (y compris les vacances d'été de 5 à 11,5 semaines par an + des pauses supplémentaires tout au long de l'année).

Sur la base de ces informations, l'éducation formelle peut être estimée, en général, à 10-12 ans (minimum), 17-20 ans (standard avec l'éducation universitaire), et elle peut également prendre jusqu'à plus de 20 ans (avec l'éducation post-universitaire).

* Notez que ceci s'applique principalement aux pays développés.

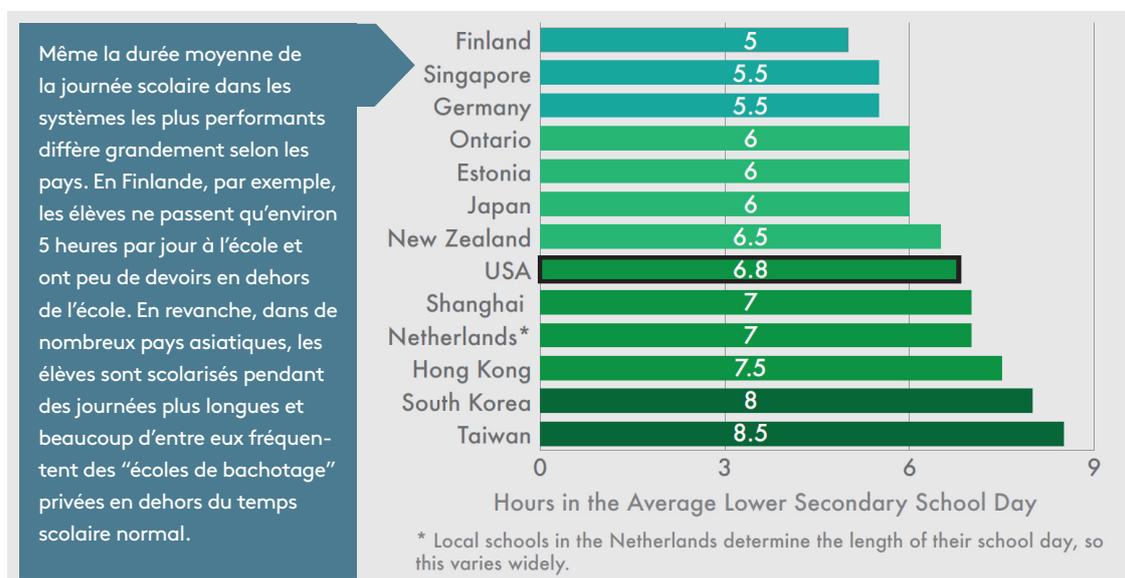


Figure 4 : durée moyenne d'une journée scolaire (NCEE, 2018).



Lorsqu'il s'agit des performances des élèves, la manière dont ils passent leur temps en classe est plus importante que le temps qu'ils y passent (NCEE).

L'éducation à l'échelle mondiale

En 2021, la population mondiale actuelle est d'environ 7,8 milliards d'habitants. La population en âge scolaire (6-25 ans) représente environ 33% de la population mondiale (Worldometers, 2021).

Cependant, il faut noter que tous les enfants n'ont pas accès à une éducation adéquate, surtout dans les pays sous-développés. Et dans les pays développés, il existe aussi certaines disparités:

- La population actuelle en Europe représente 9,8 % de la population mondiale (soit environ 747 millions), et les statistiques européennes montrent qu'en 2018, environ 76,2 millions d'étudiants étaient inscrits dans des écoles (dont 15,7 millions dans des établissements préscolaires) et 17,5 millions d'autres étudiants dans l'enseignement supérieur. Cela équivaut à un total de 76,2 millions d'étudiants (Eurostat, 2020).
- La population de l'Amérique du Nord représente 4,7 % de la population mondiale (environ 370 millions). Les statistiques des États-Unis et du Canada montrent qu'en 2020, il y avait 56,4 millions d'étudiants (dans les écoles primaires, les collèges et les lycées) + 19,7 millions d'étudiants (dans les collèges et les universités) + 2,1 millions d'étudiants au Canada. Cela donne un total de 78,2 millions d'étudiants.

D'une manière générale, la durée de l'enseignement dans les écoles augmente régulièrement. Si les taux actuels de scolarisation par âge restent stables, la figure 5 montre le nombre d'années qu'un enfant en âge d'être scolarisé peut espérer recevoir.

En Europe et en Amérique du Nord, à partir d'une espérance de vie moyenne de 79 ans (82 pour les femmes et 76 pour les hommes) et d'une durée de scolarité comprise entre 10 et 20 ans, on peut estimer qu'une personne passe environ 1/7, voire un quart de sa vie à l'école (l'apprentissage avant/après l'école n'est pas prise en compte).

Cela correspond à 8 765 heures et jusqu'à 175 200 heures passées dans les écoles.

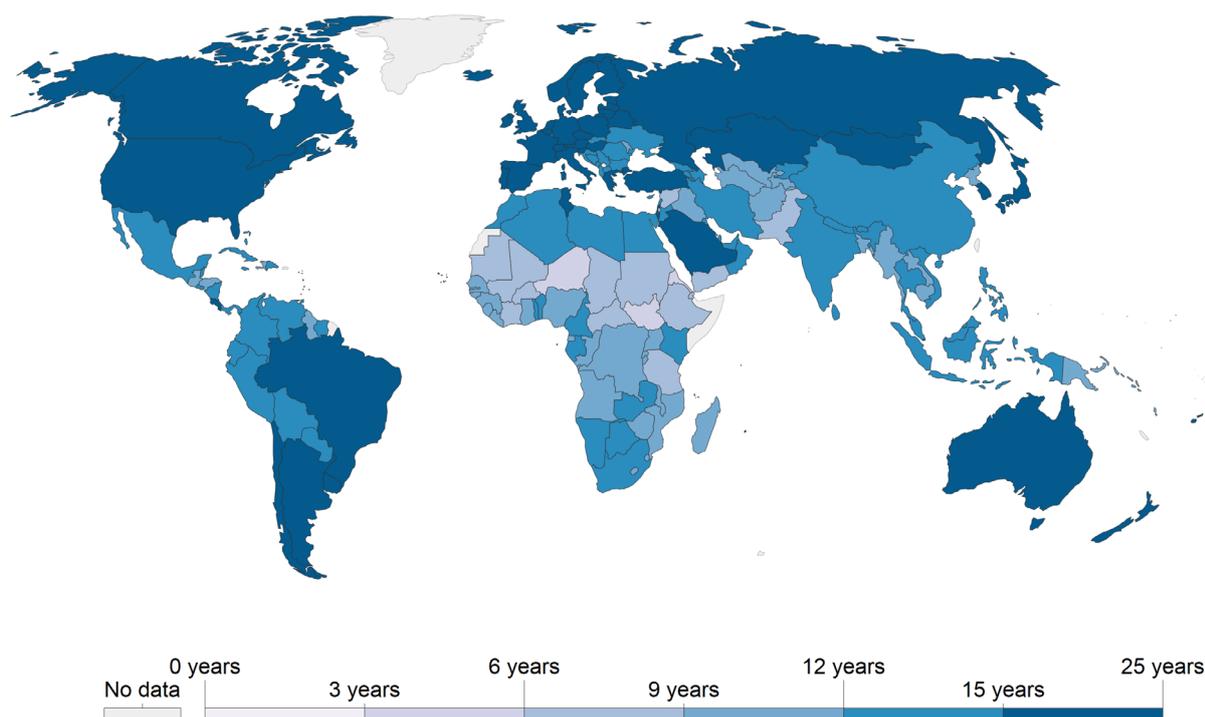


Figure 5 : Années de scolarisation attendues en 2017 si le taux de scolarisation actuel persiste (Notre monde en données, 2016).

Normes et règlements relatifs au confort et à la ventilation dans les écoles

La ventilation dans les écoles affecte la qualité de l'air intérieur (QAI), qui est généralement évaluée par la température, l'humidité relative, la concentration de dioxyde de carbone (CO₂) et les taux de ventilation. Il faut souligner que la QAI fait partie de la qualité de l'environnement intérieur (QIE), qui comprend également d'autres paramètres (basés sur le PMV et le PPD), tels que le confort thermique, la lumière du jour/l'éclairage et les conditions sonores, etc.

Le vote moyen prédit (PMV) et le pourcentage prédit de mécontents (PPD) sont des indices qui expriment la satisfaction des occupants d'un bâtiment vis-à-vis de l'environnement thermique (sur la base de l'évaluation subjective des occupants).

Les normes de construction recommandent des valeurs de conception pour différents types de bâtiments. Ces valeurs sont généralement acceptées aux niveaux international et national. Voir le tableau 1 des normes de construction européennes (REHVA) et le tableau 2 des normes de construction américaines (ASHRAE). Il existe également des directives de construction spécifiques pour les écoles - ventilation, confort et QAI (Bulletin de construction et exigences Passive House).

Les normes pour les écoles (salles de classe, amphithéâtres et autres espaces) spécifient souvent les températures d'été et d'hiver (min, max en °C), l'humidité relative (%), le CO₂ (ppm), le taux de ventilation ou taux de renouvellement d'air entre autres. Et il existe également des directives pour les niveaux visuels et acoustiques.

EN 16798-1:2019

Les niveaux de lumière nécessaires pour une tâche particulière et les valeurs recommandées pour les écoles sont de 100 lux pour les déplacements dans les couloirs, 300 lux pour les tâches simples dans les salles de classe, 500 lux pour les tâches modérément complexes dans les auditoriums et les laboratoires, et 750 à 1 000 lux pour les tâches complexes.

Le niveau sonore recommandé (à l'intérieur) est de 35 dB(A) pour les salles de classe et de 40 dB(A) pour les autres zones.

EN 16798-1:2019

Performance énergétique des bâtiments. Ventilation des bâtiments. Paramètres d'entrée de l'environnement intérieur pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments concernant la qualité de l'air intérieur, l'environnement thermique, l'éclairage et l'acoustique.

	QIE I (élevée)	QIE II (moyenne)	QIE III (modéré)	QIE IV (basse)
Plage de température [°C] pour l'hiver avec clo 1,0 (*avec un niveau d'activité de 1.2)	21-23 [°C]	20-24 [°C]	19-25 [°C]	17-25 [°C]
Plage de température [°C] pour l'été avec clo 0,5 (*adaptatif - limites de température moins strictes)	23.5-25.5 [°C]	23-26 [°C]	22-27 [°C]	21-28 [°C]
Humidité relative - avec des niveaux optimaux de 40-60%.	30-50%	25-60 [%]	20-70 [%]	<20, >70 [%]
Concentration de CO ₂ - niveaux maximaux (*niveaux supérieurs à la concentration extérieure de 480 ppm + concentration maximale autorisée ci-dessus)	1030 [ppm] (480+550)	1280 [ppm] (480+800)	1830 [ppm] (480+1,350)	>1830 [ppm] (480+>1,350)
Taux de ventilation (*apport d'air frais de minimum 10-18-28 m ³ /h/p)	3,6-21,0 [m ³ /h, m2]	2,5-14,5 [m³/h, m2]	1,5-8,6 [m ³ /h, m2]	1,1-7,2 [m ³ /h, m2]

Tableau 1 : Paramètres des bâtiments issus des normes de construction européennes

Cette norme se concentre sur la définition de nouvelles règles et exigences concernant les paramètres d'environnement intérieur pour l'environnement thermique, la qualité de l'air intérieur, l'éclairage et l'acoustique, et explique comment utiliser ces paramètres pour la conception des systèmes de construction et les calculs de performance énergétique. (CEN, 2021)

ASHRAE 62.1:2019

ASHRAE recommande 300-500 lux et 30-45 dB(A) pour la salle de classe.

ASHRAE 62.1:2019 Ventilation pour une qualité d'air intérieur acceptable ASHRAE 55:2020 Conditions d'environnement thermique pour l'occupation humaine		
Plage de températures [°C] pour l'hiver (*en supposant une activité sédentaire et peu active)		20-24 [°C] (68-75°F)
Plage de température [°C] en été		23-26 [°C] (73-79°F)
Humidité relative - avec des niveaux optimaux		30-60 [%]
Concentration de CO ₂ (*concentration extérieure de 400 ppm)		1,000 [ppm] pour les établissements scolaires (*1,500 [ppm] niveau maximum)
Taux de ventilation	Salle de classe, salle d'art plastique, laboratoire informatique (*densité d'occupation 20-35 personnes par 100 m ²)	10 [ft ³ /min/p (or cfm/p)] or 5 [l/s/p] or 0.6 [l/s, m ²]
	Salle de cours, salle de conférence (*densité d'occupation 65-150 personnes par 100 m ²)	7.5 [ft ³ /min/p (or cfm/p)] or 3.8 [l/s/p] or 0.3 [l/s, m ²]

Tableau 2 : Paramètres des normes de construction américaines

Lorsque l'élève obtient son diplôme de fin d'études secondaires, il passe plus de 15 000 heures à l'école, ce qui représente la deuxième plus longue période d'exposition intérieure après le temps passé à la maison (Schools for Health).

Bulletin du bâtiment 101:2018

Un autre document intéressant est le B.B. 101:2018 Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools (publié par l'Education and Skills Funding Agency, Royaume-Uni) avec des objectifs de qualité de l'air plus stricts et le CO₂ comme indicateur clé pour la ventilation et la QAI. (BB 101, 2018).

- Si la ventilation naturelle est utilisée, l'air extérieur doit être suffisant pour atteindre une concentration moyenne quotidienne de CO₂ <1 500 ppm. La concentration maximale ne doit pas non plus dépasser 2 000 ppm pendant plus de 20 minutes consécutives chaque jour.
- Si une ventilation mécanique est utilisée, une quantité suffisante d'air extérieur doit être fournie pendant la période d'occupation pour atteindre une concentration moyenne quotidienne de CO₂ <1 000 ppm (la concentration maximale ne doit pas dépasser 1 500 ppm pendant plus de 20 minutes par jour).

Une ventilation recommandée doit être prévue pour limiter la concentration de dioxyde de carbone dans tous les espaces d'enseignement et d'apprentissage (Building Bulletin 101:2018).

- Le contrôle continu doit être utilisé pour surveiller et contrôler l'environnement intérieur, avec des paramètres tels que la température, le CO₂, la consommation d'énergie, etc.
 - La qualité de l'environnement intérieur (IEQ) dans les bâtiments scolaires suscite également des préoccupations croissantes, tout comme la nécessité de contrôler les polluants intérieurs et le CO₂.
 - Une partie importante de la pollution de l'air extérieur causée dans les lieux à forte densité (villes et centres-villes) est acheminée vers le bâtiment et augmente donc les polluants à l'intérieur. Cela signifie que l'air entrant doit être filtré à des niveaux plus élevés que d'habitude.
 - Un courant d'air (vitesse d'air élevée) est parfois causé par l'air extérieur fourni à la pièce par un système de ventilation mécanique, de sorte que la température acceptable de l'air soufflé pour tout type de pièce est généralement de 16°C (en supposant une température ambiante de 21°C).
- Dans un bâtiment neuf, la solution de ventilation doit être conçue pour atteindre une concentration de CO₂ <1 200 ppm la plupart du temps (ce qui équivaut à une concentration extérieure de 400 ppm + 800 ppm à l'intérieur) pour la majorité du temps d'occupation pendant l'année. Dans un bâtiment rénové, la concentration de CO₂ peut augmenter jusqu'à 1 750 ppm.

- La vitesse de l'air doit être maintenue dans une fourchette d'environ 0,12-0,25 m/s et dans une fourchette de température de 19-27°C.
- Le concept de confort thermique adaptatif est également introduit pour éviter la surchauffe dans les bâtiments, de sorte que le seuil de température peut changer quotidiennement, en fonction des conditions extérieures. Le critère principal étant que le nombre d'heures où la température opérationnelle prévue dépasse la température opérationnelle maximale acceptable de 1K ou plus, il ne doit pas dépasser 40 heures d'occupation dans la période du 1er mai au 30 septembre.
- Les niveaux de bruit dans une salle de classe standard ne doivent pas dépasser 35 dB(A), y compris le bruit extérieur. Les zones destinées aux élèves ayant des besoins éducatifs spéciaux (SEN) ne doivent pas dépasser 30 dB(A). Pour cela, il faut généralement combiner un fonctionnement silencieux du système de ventilation lui-même et une atténuation du bruit extérieur, soit par une isolation supplémentaire au niveau des conduits dans un système centralisé, soit par des unités autonomes qui intègrent des niveaux élevés d'isolation acoustique dans les gaines.

Il existe également d'autres bulletins de construction intéressants pour les écoles : le B.B. 87 (Guide pour la conception environnementale dans les écoles) et le B.B. 93 (Conception acoustique des écoles).



Exigences Passive House dans les écoles

Aujourd'hui, la norme Passive House est souvent utilisée pour tous les types de bâtiments, et un ensemble de critères a également été développé pour la construction d'écoles Passive House. (Passipedia, 2020)

Rappelons qu'il existe des exigences générales pour une maison passive : demande annuelle de chauffage de $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2.\text{a})$ (sur la base de la surface utile nette totale), étanchéité à l'air requise de $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$ ($< 0,3$ est recommandé), valeur U des fenêtres $\leq 0,85 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ (y compris les ponts thermiques d'installation), demande annuelle d'énergie primaire \leq pour $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2.\text{a})$ pour toutes les énergies non renouvelables fournies au bâtiment, etc.

- Une école moderne doit disposer d'un système de ventilation à commande mécanique pour fournir de l'air frais afin de répondre aux critères de qualité acceptable de l'air intérieur.
- Les débits d'air du système de ventilation de l'école doivent être basés sur des objectifs de santé et d'éducation et non sur les limites supérieures des critères de confort (niveaux de CO_2 de 1 200 à 1 500 ppm).
- Les débits d'air conçus doivent être compris entre 15 et 20 $\text{m}^3/\text{h}/\text{personne}$ (éventuellement plus pour l'âge moyen plus élevé des étudiants).
- Maintenir l'humidité relative intérieure au-dessus de $\sim 30\%$.
- Si les températures extérieures sont basses (inférieures à $\sim 14^\circ\text{C}$), un humidificateur d'air devra être utilisé et maintenu propre à tout moment.
- Les besoins en air frais dans une salle de classe sont d'environ 3 h^{-1} , voire plus si l'air frais est fourni par un système mécanique.
- Les systèmes de ventilation dans les écoles doivent fonctionner périodiquement ou en fonction de la demande.
- La régulation du volume d'air se fait selon la demande et en fonction de l'occupation (le CO_2 est utilisé comme indicateur de la qualité de l'air).
- Les écoles passives doivent être conçues avec une enveloppe de bâtiment offrant un haut niveau de protection thermique. C'est le critère décisif et crucial pour les écoles.
- Pour garantir le confort d'été dans une école passive, la fréquence des températures supérieures à 25°C doit être limitée à moins de 10 % des heures d'utilisation.
- En raison des charges internes temporaires extrêmement élevées dans les bâtiments scolaires, une attention particulière doit être accordée au confort d'été (pendant les périodes de chaleur, en utilisant une ventilation nocturne suffisante - refroidissement mécanique et/ou gratuit - et également un ombrage efficace des vitrages).

Swegon dans les écoles
Lycée Jean Giono à Marseille
Surface: 6,000 m²



Exigences essentielles pour les établissements d'enseignement

Conception et planification

Les écoles sont constituées de zones organisées en fonction de l'objectif d'enseignement et d'apprentissage, situées dans un ou plusieurs bâtiments. Les zones de base sont des salles de classe pour les matières principales (matières générales, informatique, langues, etc.), des ateliers (arts, sciences, laboratoires, etc.) et d'autres espaces éducatifs (médiathèque, bibliothèque).

En général, le bâtiment scolaire dispose également de grands espaces éducatifs/événementiels (auditorium et salle de conférence), de locaux administratifs (pour les enseignants, le personnel administratif, les visiteurs et les parents) et d'éducation physique (salle de sport, gymnase, etc.), y compris les équipements. Il existe également d'autres lieux tels qu'une cafétéria/salle à manger et des espaces extérieurs pour se détendre, entre autres (Hanover Research, 2011).

Tous les bâtiments scolaires résultent des actions sociales de divers acteurs pertinents (architectes, fonctionnaires, planificateurs, départements, commissions scolaires, étudiants, enseignants, etc.), qui peuvent influencer la planification et la conception d'un bâtiment et (ré)interpréter le bâtiment pendant son occupation.

La lumière, la température et la qualité de l'air sont des éléments essentiels impactant l'apprentissage en classe (Building better schools, Velux).

Swegon dans les écoles
Lycée général et technologique de Carquefou
Surface: 11,500 m²



Besoins en matière de conception

- Accessible et adaptable - conçu pour être flexible afin d'augmenter le potentiel, comme la modification des zones, la facilité de changer la disposition du mobilier et l'utilisation.
- Esthétique - équilibrée et reflétant les valeurs de l'éducation.
- Efficace et efficient - en termes de coûts et d'énergie, en équilibrant les coûts de conception et de construction avec les coûts de maintenance et d'exploitation.
- Respectueux de l'environnement - concernant les matériaux de construction, les équipements et les produits.
- Confortable et fonctionnel - un environnement scolaire productif pour offrir un environnement confortable, sûr et sain aux étudiants et au personnel. Notamment en ce qui concerne la qualité de l'air intérieur et le confort thermique des occupants.
- Sûr et durable - en ce qui concerne toutes les questions de sécurité et la sécurité des biens scolaires (biens humains et matériels pour les occupants et les visiteurs) et résilient aux changements environnementaux et climatiques.

Modèles spatiaux et exigences pour l'école

La conception/spatialité des écoles, les caractéristiques spécifiques à l'éducation et les conditions extérieures ont un impact considérable sur les bâtiments scolaires. Le passage des bâtiments scolaires traditionnels (tels que les écoles à classe unique des années 1900) aux exigences éducatives du 21^{ème} siècle (salles de classe à plan ouvert avec des espaces pour les tâches collaboratives) nécessite une stratégie efficace, et la flexibilité de tous les espaces doit toujours avoir la plus grande efficacité et adaptabilité dans le futur (Rigolon, 2010).

Selon l'Agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA), les écoles comptent jusqu'à quatre fois plus d'occupants que les immeubles de bureaux pour une même surface (EPA).

Il existe de nombreux types de bâtiments scolaires. Les méthodes d'apprentissage d'aujourd'hui sont basées sur des activités basées sur des projets qui impliquent activement les étudiants (plutôt que sur le simple transfert de connaissances comme par le passé), et donc une flexibilité efficace dans l'utilisation des espaces a une conséquence importante sur la conception des bâtiments scolaires.

La population de l'école est relativement élevée, allant de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'élèves. La salle de classe a une surface moyenne de 40 à 80 m². Le nombre d'élèves par classe varie entre 17 et 30, mais il peut y avoir de grandes différences entre les pays, voir la figure 6. Cela équivaut à une surface moyenne par élève comprise entre 2,27 m² et 3,63 m², sans tenir compte de la surface au sol occupée par le mobilier. (Trachte et al., 2015)

Il est surprenant de constater que les exigences en matière d'espace dans les bâtiments sont limitées et précisent les dimensions et le volume des salles de classe (en m² - ou m³ - et par étudiant). D'autres résultats de recherche indiquent la valeur guidée de 0,6-3 m²/étudiant pour les grandes salles de cours/auditorium (Engineering Toolbox, 2003).

En moyenne, il y a environ 10-13 étudiants par enseignant dans une salle de classe (Eurostat, 2020).

* Notez qu'en comparaison, les données relatives à l'occupation des bureaux indiquent 7-13 m²/occupant dans les immeubles de bureaux.

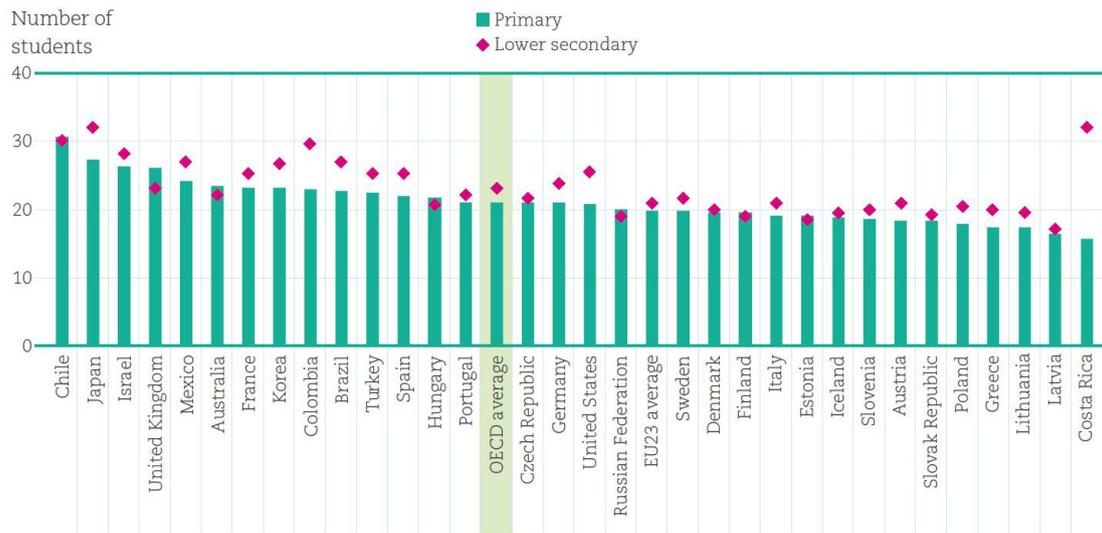


Figure 6 : nombre moyen d'élèves selon le niveau d'enseignement (OECD, 2018).

Conception versus l'utilisation réelle

Dans les bâtiments modernes, les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) sont bien souvent basés sur des programmes d'occupation simples (ainsi que d'autres systèmes tels que l'éclairage).

Ces valeurs de conception sont généralement utilisées au stade initial de la conception et, par la suite, les systèmes du bâtiment sont modifiés en fonction de l'occupation réelle (effective) sur la base de la collecte continue de données (ou surveillance).

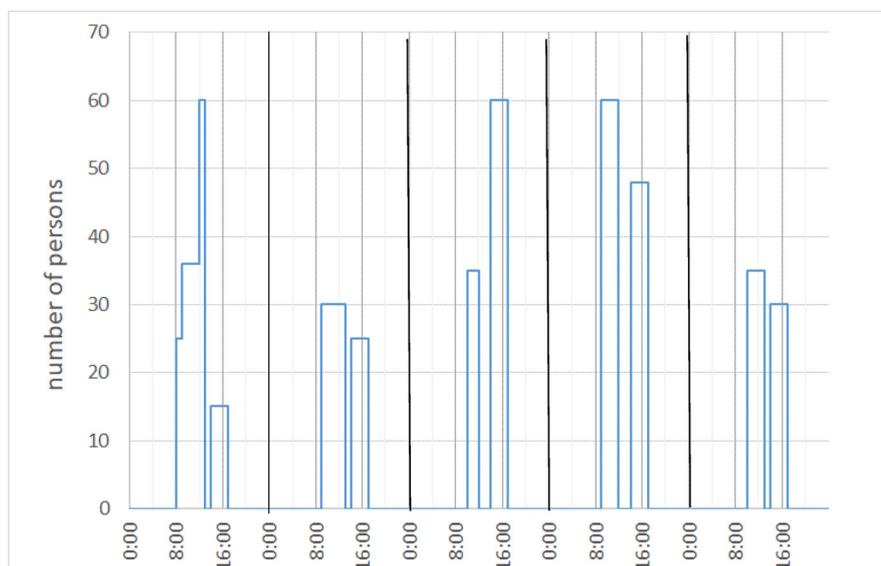


Figure 7 : Occupation réelle (mesurée) des salles de classe pendant une semaine (du lundi au vendredi) à la KU Leuven en Belgique. Notez que l'occupation maximale est de 80 personnes ou 1,78 m²/personne. (Breesch et al., 2019)

Mais les données d'occupation réelle montrent qu'en général, les salles de classe sont bien plus souvent inoccupées qu'occupées et que les écoles sont principalement occupées pendant les heures de cours et plus ou moins vides pendant les week-ends et les vacances, voir la figure 7.

L'utilisation des espaces dans les écoles dépend beaucoup : du type d'école/d'enseignement (un collège classique par rapport à une école scientifique), du type d'espace (l'utilisation d'une salle de classe ordinaire par rapport à des laboratoires informatiques) et du nombre d'espaces (généralement plusieurs salles de classe générales par rapport à une seule salle de sport), voir la figure 8.



Les bâtiments scolaires sont utilisés environ 30 semaines, soit 200 jours par an, avec des périodes relativement longues pendant lesquelles ils sont inoccupés et, en général, peu d'activités ont lieu le week-end et le soir, si ce n'est une occupation partielle des salles de sport, des gymnases ou de certains espaces culturels.

Un autre facteur qui rend les établissements d'enseignement quelque peu uniques est également la manière dont ils sont utilisés. Des études montrent que les taux d'utilisation sont généralement faibles, voire très faibles. Cela signifie qu'à tout moment, la plupart des pièces du bâtiment scolaire ne sont pas utilisées, et que la ventilation peut être réduite au minimum. D'autre part, lorsqu'elles sont utilisées, la demande de ventilation (et également d'un bon climat intérieur) est très élevée.

En bref, les données de recherche montrent que les écoles ont des problèmes de forte densité d'occupation dans les salles de classe, ce qui entraîne un surpeuplement et des besoins de ventilation plus élevés en raison des gains internes importants et des émissions significatives de polluants à l'intérieur (et souvent à l'extérieur) des bâtiments .

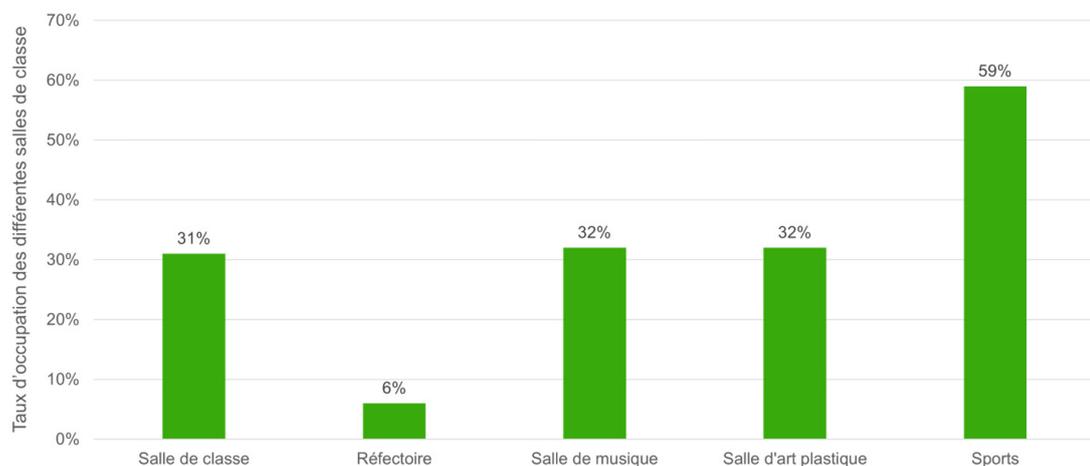


Figure 8 : taux d'occupation des différents types de pièces dans les bâtiments scolaires (Johansson, 2010).

Remplacement de l'air dans les écoles

Pour assurer un bon environnement intérieur, le bâtiment scolaire doit disposer d'un système de renouvellement de l'air - mouvement d'air naturel et/ou contrôlé. L'air peut être échangé par infiltration (à travers une enveloppe de bâtiment non étanche à l'air), aération (ouverture manuelle des fenêtres) et ventilation (naturelle, mécanique ou hybride). Pour en savoir plus, voir la figure 9.

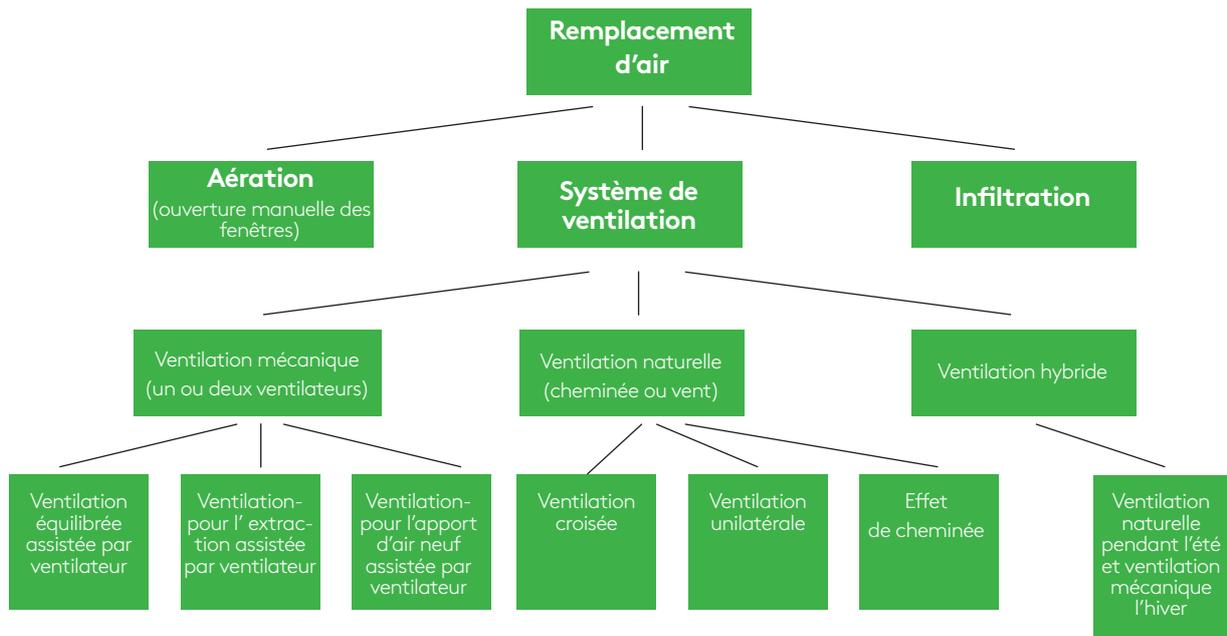


Figure 9 : typologie des systèmes de ventilation.

Infiltration

Les fuites d'air, ou également connues sous le nom d'infiltration, sont généralement involontaires et peuvent causer plusieurs problèmes tels que l'inefficacité énergétique (25-50% des coûts de refroidissement/chauffage), des problèmes de confort (courants d'air, fuites d'humidité, radon et moisissures), et il est presque impossible de maintenir et de contrôler l'environnement intérieur requis (Younes et al., 2011).

L'infiltration peut, en fait, être mesurée par un test Blower-Door. Par exemple, un bon niveau d'étanchéité à l'air est requis pour la certification des maisons passives, soit $n_{50} < 0,6$ h-1.

Le test de pression d'air, ou la valeur n_{50} , mesure la fuite totale à travers l'enveloppe du bâtiment (décrit les changements d'air à une pression différentielle de 50 Pa). Le taux de fuite n_{50} ne doit pas être supérieur à 0,6 h-1 pour être conforme aux critères de certification des maisons passives (selon le Passivhaus Institut).

Pour réduire efficacement l'infiltration, il faut un système de pare-air continu pour créer une enveloppe de bâtiment étanche à l'air, etc.

Il existe de nombreuses mesures de l'infiltration moyenne dans les salles de classe qui montrent une fourchette allant de moins de 0,6 h-1 (bâtiment scolaire moderne), et de 1,1-4,6 h-1 (bâtiments scolaires plus récents) et jusqu'à 7-9 h-1 (bâtiments scolaires standard).

Ventilation naturelle

L'aération, également appelée ventilation naturelle, est une technique traditionnelle de remplacement de l'air vicié par de l'air extérieur (frais). La ventilation naturelle est l'échange intentionnel d'air par des ouvertures (fenêtres/portes, bouches d'aération, cheminées de toit, etc.) Le fonctionnement des ouvertures peut être manuel, automatisé ou les deux. La force motrice de la ventilation naturelle est le vent et l'effet de cheminée. Il peut s'agir d'une ventilation unilatérale, d'une ventilation transversale ou de systèmes de ventilation par cheminée.

La ventilation naturelle dépend de la conception architecturale, de l'enveloppe du bâtiment, du rôle des occupants (fréquence à laquelle ils ouvrent ou non les fenêtres), ainsi que de l'environnement extérieur et intérieur.

L'ouverture des fenêtres pour l'aération peut poser des problèmes lorsque les conditions extérieures ne sont pas bonnes, que ce soit en raison de la pollution de l'air, du froid ou de la chaleur, du bruit extérieur, du vent, etc. Il est également difficile de contrôler la quantité de renouvellement d'air, c'est-à-dire de maintenir l'environnement intérieur, car les flux d'air sont plus complexes et difficiles à prévoir. Une partie de la ventilation naturelle peut également prendre la forme d'un refroidissement libre, généralement utilisé la nuit pour refroidir le bâtiment scolaire afin de réduire la surchauffe en été.

Pour que la ventilation naturelle soit efficace, l'apport d'air extérieur dans toutes les zones d'enseignement et d'apprentissage doit être d'au moins 3 l/s par personne, une moyenne quotidienne minimale de 5 l/s par personne et la capacité d'atteindre un minimum de 8 l/s par personne à tout moment occupé (BB 101, 2018).

Les recherches montrent que les fenêtres pourraient être utilisées pour fournir suffisamment d'air pour répondre aux exigences de qualité de l'air intérieur si la température extérieure était supérieure à 8°C - et si la vitesse du vent était inférieure à 10 m/s (Angelopoulos, 2017).

En cas d'utilisation de la ventilation naturelle (au moins 4 l/s/p), la recherche montre que la ventilation appropriée n'est atteinte que pendant environ un quart de l'année (24%), (Duarte et al., 2017).



Ventilation mécanique

Le remplacement de l'air, ou ventilation mécanique, est le moyen le plus efficace de fournir de l'air frais et filtré aux salles de classe. La ventilation est utilisée pour réduire l'exposition aux polluants atmosphériques qui affectent la réponse humaine, et la ventilation mécanique ne peut être qu'une partie de toute solution pour réduire l'exposition, voir la figure 10. L'exposition peut également être réduite par d'autres moyens, notamment le contrôle à la source, c'est-à-dire la réduction des émissions des produits utilisés dans les bâtiments ou la capture des polluants à leur source, la filtration et le nettoyage de l'air.

Au lieu de ces solutions, la ventilation mécanique peut être utilisée en même temps qu'elles, ou une fois que les autres solutions sont en place, et la ventilation mécanique est le dernier moyen d'améliorer la qualité de l'air intérieur, pour réduire les risques associés aux expositions qui n'ont pas pu être réduites par d'autres moyens. Tout repose sur l'hypothèse que l'air fourni à l'intérieur est propre, et cette condition préalable doit toujours être remplie. (Wargocki, 2021)

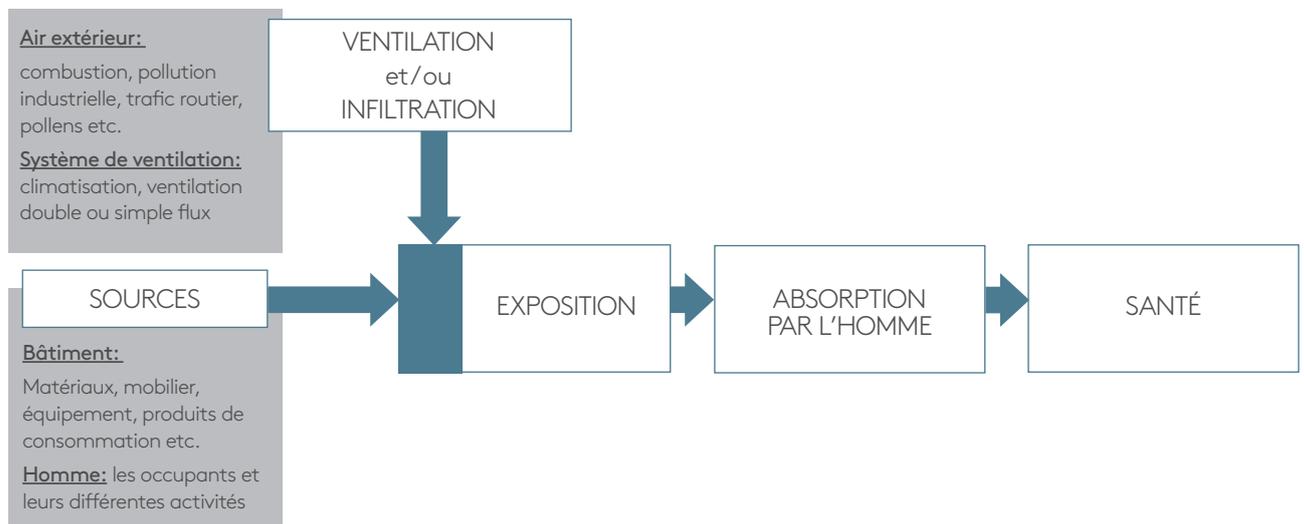


Figure 10 : la ventilation mécanique comme facteur médiateur, et non comme cause (Wargocki, 2021).

La ventilation mécanique assure un flux contrôlé d'air soufflé et extrait, permettant un contrôle essentiel de la température, de l'humidité et de la qualité de l'air de la pièce. Des capteurs de température, d'humidité relative et de CO₂ (qui pourrait être couplé à des COV) détectent les changements dans les niveaux de pollution et ajustent automatiquement la vitesse du ventilateur pour assurer un contrôle fiable de la qualité de l'air.

Il existe de nombreux types et systèmes de ventilation mécanique - centralisée ou décentralisée, par déplacement ou par zone, et constant ou variable ou contrôlé par la demande (CAV, VAV, DCV). La ventilation mécanique (HVAC) est un système complexe et comporte de nombreux composants tels que la récupération de chaleur, l'évacuation, les filtres à air, les ventilateurs, les gaines, les capteurs, le système de contrôle, etc.

La ventilation mécanique avec récupération de chaleur peut récupérer jusqu'à 92 % de l'énergie qui serait normalement perdue par d'autres types de remplacement d'air.

Swegon dans les écoles:
Lycée Olympes De Gouges
Montech
Surface: 12,600 m²



Faits et résultats de recherche

Les enfants et les écoles présentent un aspect unique. Le corps en développement des enfants peut être plus sensible aux expositions environnementales que celui des adultes. Les enfants respirent plus d'air, mangent plus de nourriture et boivent plus de liquides proportionnellement à leur poids corporel que les adultes. C'est pourquoi la qualité de l'air dans les écoles est particulièrement préoccupante. La fourniture adéquate d'air intérieur est plus qu'une question de "qualité" ; elle englobe la sécurité et la gestion de l'investissement dans les étudiants, le personnel et les installations.

Les enfants ne sont pas de petits adultes. Ils ont des besoins, des sensibilités et des vulnérabilités uniques. Et il est de plus en plus évident que les conditions actuelles de construction des écoles ne protègent pas suffisamment le corps et l'esprit en développement des élèves (Schools for Health).

De nombreux facteurs peuvent influencer les résultats scolaires des élèves, mais la qualité de l'environnement intérieur (IEQ) dans les salles de classe peut avoir un impact positif sur l'enseignement et l'apprentissage, ce qui augmente la probabilité de meilleurs résultats scolaires des élèves (voir figure 11).

De nombreuses écoles n'offrent pas aux élèves un bon environnement intérieur ; elles ne fournissent pas un taux d'apport d'air extérieur suffisant et sont souvent trop chaudes pendant les mois d'été. Les résultats des recherches indiquent une pollution de l'air intérieur, des niveaux excessifs de CO₂, des niveaux de lumière du jour inadéquats, des niveaux de bruit élevés et une mauvaise ventilation. Dans le contexte des écoles - au-delà des quatre murs de l'école - d'autres facteurs influencent les élèves, comme la pollution de l'air extérieur, le bruit et l'emplacement des sources extérieures. Plusieurs autres facteurs affectent l'air des écoles, résultant d'une infrastructure vieillissante, d'un entretien inadéquat des équipements, etc. De nombreux problèmes peuvent être constatés dans les bâtiments scolaires anciens, mais aussi dans les bâtiments de construction récente.

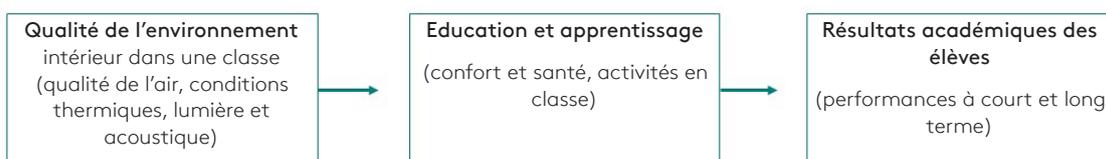


Figure 11 : cadre conceptuel de l'influence des conditions environnementales intérieures sur les résultats scolaires dans les écoles (Brink et al., 2020).

Environnement intérieur dans les écoles

Les problèmes d'environnement intérieur peuvent être subtils et n'ont pas toujours des effets facilement identifiables sur la santé, le bien-être ou les performances. L'environnement intérieur dans les écoles concerne la qualité de l'air intérieur (température, humidité relative, CO₂, COV, et autres) et d'autres conditions connexes (confort thermique, lumière, bruit, etc.). Cependant, dans les écoles, il existe également divers polluants provenant des matériaux de construction (produits chimiques, fournitures de nettoyage pour les arts et les sciences, etc.) et des problèmes locaux tels que les moisissures, l'amiante, le radon, etc.

L'environnement intérieur des écoles (qualité de l'air et confort thermique) influe sur le travail scolaire et est censé provoquer des sensations d'inconfort, détourner l'attention, réduire l'éveil, ainsi que la motivation (voir figure 12).

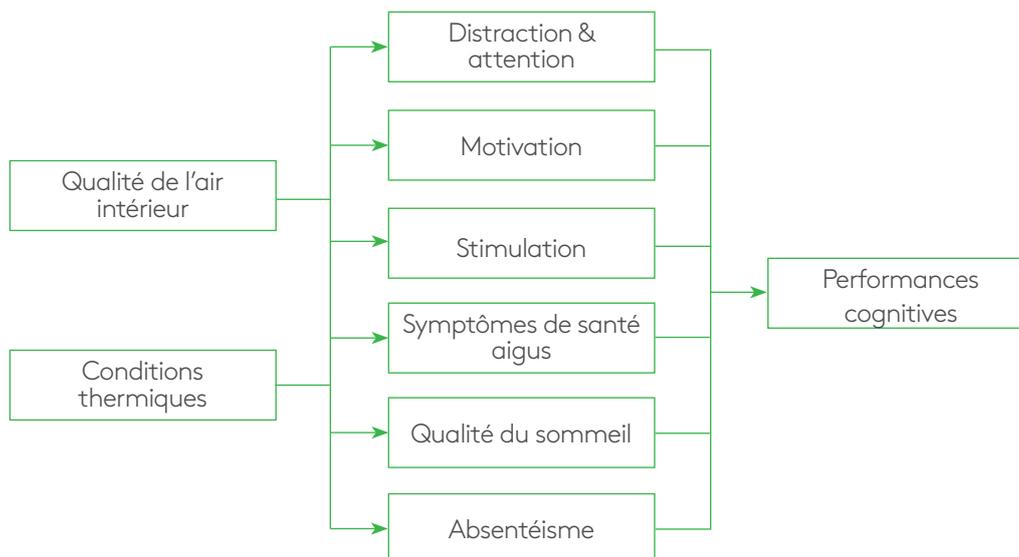


Figure 12 : le mécanisme par lequel le travail mental est affecté par la qualité de l'air intérieur et l'environnement thermique (Wargocki et al., 2016).

Température et humidité relative (T, RH)

- Une enquête menée auprès de plus de 4 200 élèves et 134 directeurs représentant 297 écoles en Finlande a examiné les associations entre les attributs du bâtiment de l'école, la QEI et les symptômes respiratoires déclarés par les élèves. Les chercheurs ont constaté que les symptômes des voies respiratoires supérieures signalés par les élèves étaient associés de manière significative aux températures insatisfaisantes (trop chaudes ou trop froides) des salles de classe signalées par les directeurs pendant la saison de chauffage (Toyinbo et al., 2016).
- Les températures plus chaudes des salles de classe étaient également associées à la perception par les élèves d'une mauvaise qualité de l'air, aux symptômes autodéclarés d'étouffement, aux maux de tête, aux symptômes des yeux, du nez et de la gorge, à la fatigue et aux difficultés respiratoires (Turunen et al., 2014 ; Bidassey-Manilal et al., 2016).
- Une autre étude portant sur des enfants de 10 à 12 ans a observé que l'abaissement de la température des salles de classe de 25 à 20 °C (77 à 68 °F) par temps chaud était associé à des améliorations significatives de la vitesse des élèves lors des tests d'arithmétique et de langue. Les enfants ont déclaré avoir ressenti l'air intérieur comme beaucoup plus frais. Sur la base de ces résultats, les chercheurs ont calculé une relation dose-réponse indiquant que chaque réduction de 1°C (1,8°F) de la température pouvait se traduire par une amélioration de 4 % de la vitesse d'exécution des élèves (Wargocki et al., 2013).
- Une étude portant sur plus de 3 000 écoliers répartis dans 140 classes de CM2 dans le sud-ouest des États-Unis a également indiqué que chaque baisse de 1°C de la température dans la fourchette 20-25°C (68-77°F) était associée à une augmentation supplémentaire de 12-13 points des résultats moyens des élèves aux tests de mathématiques. Les résultats aux tests de sciences et de lecture présentaient des effets d'une ampleur similaire, mais avec une plus grande variabilité. Les chercheurs ont conclu que les performances scolaires des élèves pourraient bénéficier de manière significative du maintien d'un confort thermique adéquat dans les salles de classe (Haverinen-Shaughnessy et al., 2015).
- Le rapport a examiné les résultats de plus de 200 études scientifiques. Parmi les résultats, citons : une enquête menée auprès de 75 000 lycéens de la ville de New York qui a révélé que les élèves étaient 12,3 % plus susceptibles d'échouer à un examen lors d'une journée à 32°C (90°F) par rapport à une journée à 24°C (75°F).

Concentration de dioxyde de carbone (CO₂)

- La respiration normale d'un enfant âgé de 7 à 9 ans génère 14 litres de CO₂ par heure, soit 50 % de moins que la quantité produite par un adolescent (dans des conditions d'activité physique modérée, un élève de 15 ans peut libérer jusqu'à 85 l de CO₂ par heure). Une concentration élevée de CO₂ rend les salles de classe inconfortables.
- Les résultats d'études portant sur 20 salles de classe ou plus montrent des valeurs de CO₂ allant de 1 400 ppm à 5 200ppm, voir la figure 13 (Fisk, 2017).
- Une concentration de CO₂ supérieure à 1 000ppm pourrait entraîner un manque de concentration, une vision trouble, des sueurs, de l'agitation, des vomissements, des rougeurs et même des attaques de panique.
- Des effets néfastes ont été signalés pour des niveaux élevés de CO₂ dans les salles de classe, notamment une diminution de la satisfaction à l'égard de la QAI (Chatzidiakou et al., 2014) et des symptômes de respiration sifflante chez les enfants dans les crèches (Carreiro-Martins et al., 2014).

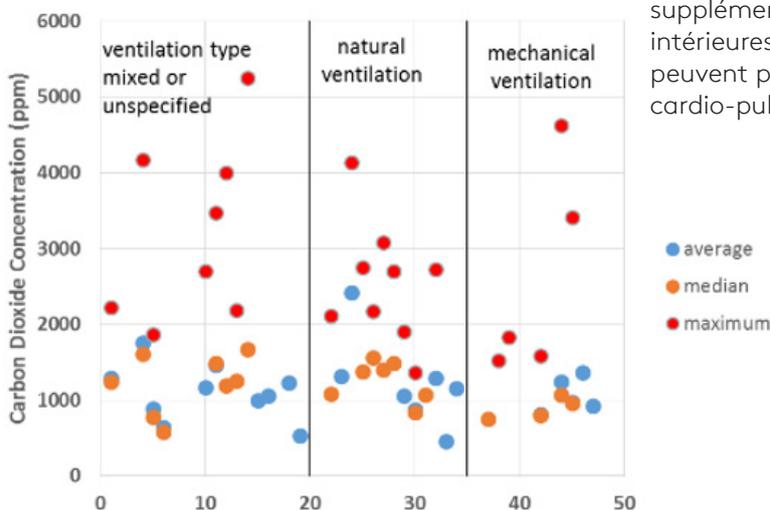


Figure 13 : concentration de CO₂ mesurée à partir d'études portant sur 20 salles de classe ou plus - moyenne dans le temps (Fisk, 2017).

- Avec des niveaux de CO₂ (et des taux de ventilation) tout aussi médiocres dans les bâtiments scolaires, il a été observé que les élèves ressentent une plus grande fatigue et des capacités d'attention réduites (Chatzidiakou et al., 2012) ; de moins bonnes performances dans les tests de concentration (Dorizas et al., 2015) ; et des niveaux de concentration plus faibles chez les étudiants universitaires pendant les cours, voir la figure 14 (Uzelac et al., 2015).

Composés organiques volatils (VOC)

- Les COV ne sont pas perceptibles à l'odorat mais peuvent avoir des effets négatifs sur la santé même à des concentrations inférieures à 3 µg/m³.
- L'exposition intérieure aux COV, tels que le formaldéhyde (présent dans de nombreux adhésifs, colles, polyuréthane, mousse isolante, panneaux de particules, contreplaqué, bois pressé, panneaux de fibres, endos de moquette et tissus), est associée à des symptômes de type asthme chez les écoliers (Annesi-Maesano et al., 2013) Et ainsi qu'à une irritation des yeux, du nez et de la gorge ; des maux de tête ; des nausées ; et plus encore (EPA, 2016).
- Les matières particulaires (PM_{2,5} et PM₁₀) représentent des polluants supplémentaires. Des concentrations intérieures élevées de PM_{2,5} et PM₁₀ peuvent provoquer des maladies cardio-pulmonaires.

Confort, performance et ventilation

Différents types et débits

Le taux de ventilation des salles de classe est directement associé aux résultats scolaires des élèves. Des progrès mesurables en mathématiques et en lecture (évalués par des tests standardisés) peuvent être observés lorsqu'on améliore la QAI dans les salles de classe.

- Cependant, les facteurs internes à la salle de classe qui affectent négativement la QAI semblent avoir un impact plus important que les polluants provenant de l'extérieur.
- Les types de systèmes de ventilation (naturels, mixtes et mécaniques) influencent également le CO₂ et les taux de ventilation, voir la figure 13. Conformément aux concentrations élevées de CO₂ rapportées, de nombreuses études font état de taux de ventilation moyens ou médians de l'ordre de 11 à 18 m³/h (6 à 11 cfm) par occupant, avec une moyenne aussi basse que 3,6 m³/h (2 cfm) par occupant (Fisk, 2017).
- Des taux de ventilation plus faibles ont été corrélés à un taux d'absentéisme plus élevé pour cause d'infections respiratoires (Toyinbo et al., 2016) ; une plus grande prévalence et incidence des symptômes du "syndrome des bâtiments malsains" (Chatzidiakou et al., 2015).
- Des taux de ventilation plus faibles peuvent entraîner une augmentation des symptômes asthmatiques, de la perméabilité nasale et du risque

d'infections virales (Chatzidiakou et al., 2012) ; et la transmission de maladies infectieuses aéroportées comme la varicelle, la rougeole et la grippe (Luongo et al., 2015).

- Les chercheurs ont observé un lien entre les taux de ventilation et les performances aux tests standardisés en mathématiques et en lecture, estimant que chaque augmentation de 4 m³/h/p du taux de ventilation était associée à une augmentation attendue de 2,9 % et 2,7 % des scores en mathématiques et en lecture, respectivement (Haverinen-Shaughnessy et al., 2011).
- Le lien entre la ventilation et les résultats a été corroboré dans une autre étude dans laquelle on a constaté que les élèves des écoles qui ne respectaient pas un taux de ventilation minimal d'au moins 22 m³/h/p étaient plus susceptibles d'obtenir de mauvais résultats aux tests de mathématiques (Toyinbo et al., 2016).
- Les résultats de 11 études montrent que les performances s'améliorent généralement de quelques pourcents, jusqu'à 15 %, avec une augmentation du taux de ventilation ou une concentration de CO₂ plus faible. Les améliorations des performances généralement rapportées avec l'augmentation du taux de ventilation vont de quelques pourcents jusqu'à 15 % (Fisk, 2017).

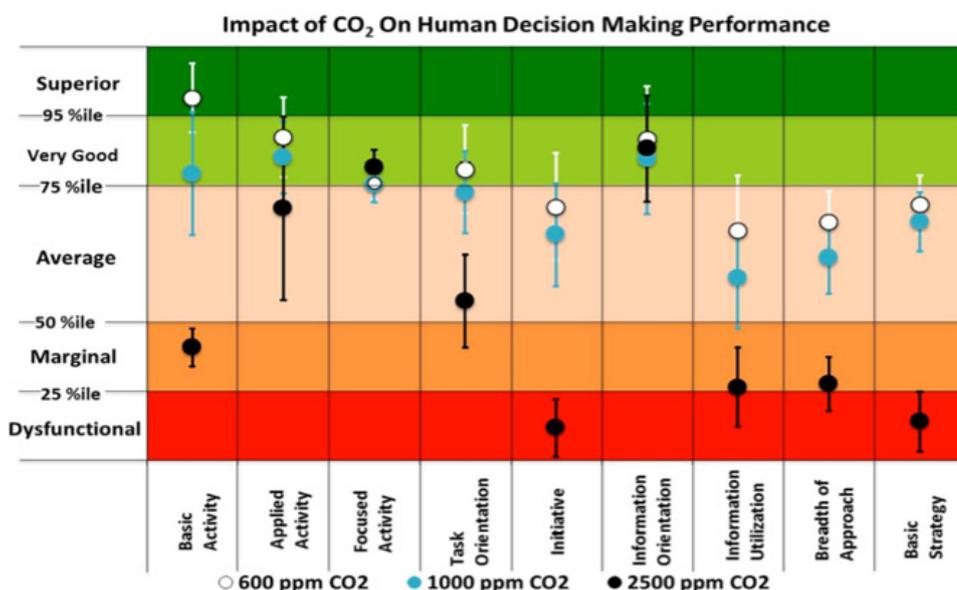


Figure 14 : impact du CO₂ sur la performance de la prise de décision humaine - pour les adultes (Satish et al, 2012).

- Doubler le taux d'apport d'air extérieur (de 11 à 34 m³/h/p) améliorerait les performances des travaux scolaires en termes de vitesse d'environ 8 % dans l'ensemble et de 14 % pour les tâches affectées de manière significative, avec seulement un effet négligeable sur les erreurs, voir la figure 15, (Wargocki et al., 2016).
- Une étude a mesuré les niveaux de CO₂ dans des classes de cinquième année dans 100 écoles aux États-Unis et a conclu qu'une mauvaise ventilation réduisait le nombre d'élèves parvenant à passer les tests de langue et de mathématiques. Une relation linéaire a été trouvée, suggérant que 3 % d'élèves supplémentaires réussissaient les tests pour chaque augmentation de la ventilation de 4 m³/h par personne jusqu'à 25 m³/h par personne (Haverinen-Shaughnessy et al., 2011).

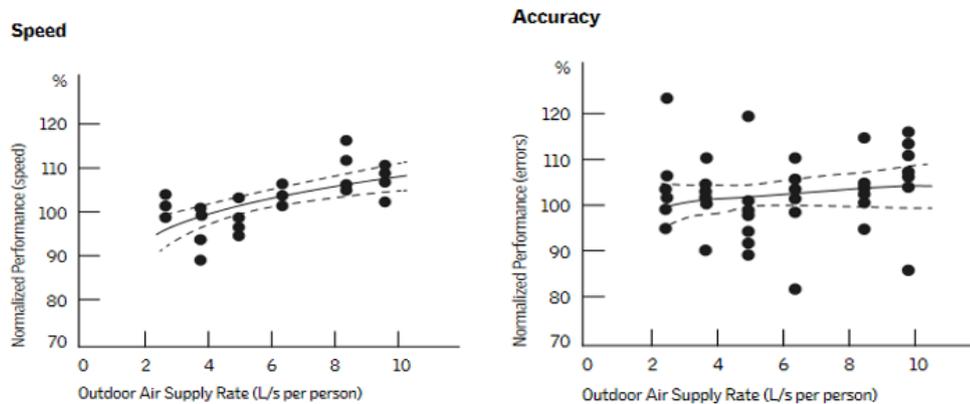


Figure 15 (a,b) : performance des élèves en fonction du taux de ventilation, d'après une étude menée au Danemark. Les performances étaient basées sur la vitesse (a) et la précision (b) de l'accomplissement de diverses tâches scolaires (Fisk, 2017).



Lumière du jour, éclairage et vues sur l'extérieur

- De nombreuses études sur les effets de la lumière du jour sur la santé ont mis en évidence des avantages, notamment une amélioration de la vision, une meilleure qualité du sommeil et une réduction des symptômes de la fatigue visuelle, des maux de tête et de la dépression.
 - L'étude *Clever Classrooms*, menée par l'Université de Salford au Royaume-Uni, a conclu qu'une bonne lumière du jour contribue à créer un sentiment de confort physique et mental : ses avantages sont plus étendus qu'une simple aide à la vue (Barrett et al., 2015).
 - L'accès à un éclairage de bonne qualité et adapté à la tâche à l'école est important car de nombreuses activités en classe - comme la lecture et l'écriture - sont orientées visuellement et forment l'apprentissage des élèves. La fluidité de la lecture orale (mesurée en mots lus correctement par minute) est un précurseur important dans le développement de la compréhension de la lecture.
-

Une étude menée auprès de 172 élèves américains de troisième année a permis de tester l'effet d'un éclairage " focalisé " à haute intensité (1 000 et 6 500 lux) et sans éblouissement sur les performances des élèves en matière de lecture orale pendant une année scolaire complète.

Au milieu du semestre, les élèves bénéficiant de l'éclairage " focalisé " ont montré un pourcentage d'augmentation plus élevé de leurs performances en matière de fluidité de lecture orale par rapport aux élèves des salles de classe à éclairage " standard " (500 lux contre 3 500 K) (36 % contre 17 %), (Mott et al., 2014).

- Les enfants sont plus sensibles à l'exposition à la lumière que les adultes, car leurs pupilles sont plus grandes et la suppression de la mélatonine induite par la lumière est nettement plus importante, les jeunes adolescents ayant une plus grande sensibilité du système circadien aux expositions à la lumière que les adolescents plus âgés (O'Hagan et al., 2016).
- De faibles niveaux de lumière à l'intérieur combinés à moins de temps passé à l'extérieur ont été associés à un risque accru de myopie (*myopia*). Et des études montrent également que l'augmentation du temps passé par les enfants à l'extérieur peut réduire le risque de développer une myopie ou ralentir sa progression (Kocak et al., 2015).
- Une étude de l'Université de la Sorbonne couvrant 13 pays européens et à laquelle ont participé 2 387 enfants a conclu que les performances scolaires peuvent augmenter de 15 % lorsque les élèves travaillent dans des salles de classe dotées de plus grandes fenêtres - en raison à la fois de l'augmentation de la lumière du jour et d'une meilleure vue sur l'environnement extérieur (Maesano, 2016).
- Chez les enfants, des niveaux plus élevés d'exposition quotidienne moyenne à la lumière du jour ont été associés à une réduction du temps sédentaire en semaine et le week-end et à une augmentation des niveaux d'activité physique le week-end (Aggio et al., 2015).

Contrôle du son et du bruit

- À l'école, l'acquisition de connaissances, de compétences et de normes sociales dépend très largement de la communication orale. Les élèves doivent être capables d'entendre, d'écouter et de comprendre la voix de l'enseignant. Compte tenu de l'importance pour les élèves d'apprendre à gérer leur propre bruit afin de ne pas perturber le groupe, la maîtrise du son et du bruit dans l'école permet un environnement acoustique de qualité adapté au développement physique et intellectuel des enfants. Les établissements d'enseignement sont donc des bâtiments dont l'environnement acoustique est intrinsèquement lié à leur qualité fonctionnelle.
- Les expositions chroniques à des sources de bruit internes et externes peuvent entraîner des déficits dans les résultats des tests. Les expositions au bruit sont souvent déterminées par l'emplacement, comme la proximité de grands axes routiers ou d'aéroports, mais les sources internes de bruit peuvent être tout aussi importantes, voir la figure 16.
- Un environnement acoustique optimal est fondamental pour une compréhension confortable pendant des périodes d'attention prolongées. L'apprentissage est plus facile et moins fatigant et l'enseignant est plus efficace et moins stressé (Deoux, 2010). Deux aspects importants pour bien entendre dans une salle de classe sont un faible bruit de fond (sons indésirables) et un temps de réverbération court (durée pendant laquelle le son persiste dans une pièce), (Acoustical Society of America, 2010).
- L'Acoustical Society of America recommande des niveaux d'exposition au bruit de fond maximum de 35 dB(A) pour les espaces d'apprentissage de base inoccupés dans les bâtiments scolaires permanents et un temps de réverbération maximum de 0,6-0,7 secondes, selon le volume de la salle de classe (Acoustical Society of America, 2010).
- Les enfants de moins de 15 ans sont plus sensibles aux conditions d'écoute difficiles car ils développent encore des compétences linguistiques matures. Par rapport aux adultes, les enfants ont plus de difficultés avec les tâches d'écoute complexes (Sullivan et al., 2015).

De plus en plus de recherches indiquent que les conditions de bruit et de réverbération dans les salles de classe varient et ne respectent souvent pas [les] normes recommandées (Lewis et al., 2014).

- Les interférences sonores en classe peuvent nuire à la parole et à la compréhension orale des enfants, ainsi qu'à leur concentration, à la compréhension des informations verbales, à la compréhension de la lecture et à la mémoire (Stansfeld et al., 2015).
- Le bruit a des effets auditifs, tels que la perte d'audition, et des effets non auditifs, tels que la gêne, les troubles du sommeil, le stress, l'hypertension et les effets sur les performances. Des études internationales sur les effets du bruit montrent divers effets sur la santé des étudiants, notamment une augmentation de la fatigue, du stress et de l'irritabilité (Seabi et al., 2015).
- Il a également été constaté que le bruit a des effets négatifs sur la lecture et l'écriture ; les recherches suggèrent que l'exposition chronique au bruit affecte le développement cognitif des enfants (Klatte et al., 2013).
- Par exemple, les systèmes CVC ont été identifiés comme une source commune de bruit de fond dans les salles de classe. Dans une étude portant sur 73 écoles élémentaires de Floride, on a constaté que les élèves des écoles dotées de systèmes CVC les plus bruyants avaient des résultats inférieurs aux tests de réussite des élèves par rapport aux élèves passant des tests dans des écoles équipées de systèmes plus silencieux (Jaramillo, 2013).
- En outre, la gêne liée au bruit ambiant a également été associée à de moins bons résultats aux tests de mathématiques chez les élèves des écoles secondaires urbaines (Zhang et al., 2015).

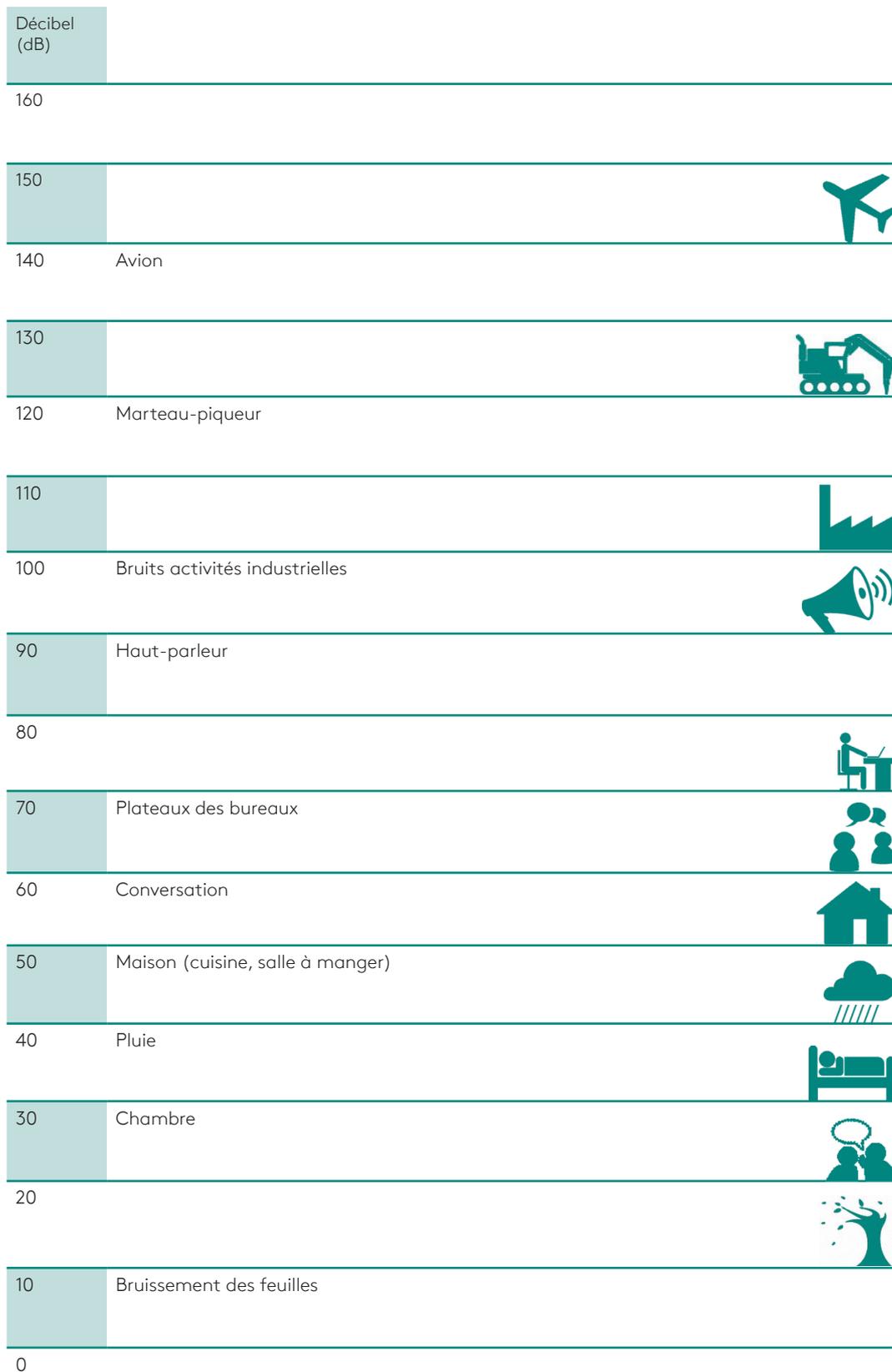


Figure 16 : niveaux sonores typiques (Bâtir de meilleures écoles, Velux).

Au-delà des quatre murs - le contexte est important

Outre les quatre murs du bâtiment scolaire, de nombreux contextes environnementaux et sociaux peuvent nuire au bien-être des élèves et influencer leur potentiel scolaire. Il existe également de nombreux autres facteurs influençant la santé et l'absence des élèves, par exemple : la proximité d'un trafic lourd et bruyant et d'installations industrielles et chimiques, entre autres, voir la figure 17.

Pollution de l'environnement extérieur et sources proches

- Le CO₂ peut également provenir de l'extérieur de l'école, étant largement produit par la combustion de fossiles ou le trafic routier et d'autres activités anthropiques responsables des émissions de dioxyde d'azote (NO₂).
- La recherche a montré une meilleure évolution (jusqu'à + 13 %) des indicateurs de développement cognitif - tels que la capacité d'attention et de mémorisation - dans les écoles présentant les niveaux les plus bas de particules ultrafines, de particules de carbone et de NO₂ liés au trafic.
- Les émissions de dioxyde d'azote NO₂, largement produites par la combustion de fossiles, le trafic routier et d'autres activités anthropiques, peuvent provoquer des problèmes respiratoires chez les écoliers (exacerbations de l'asthme, susceptibilité accrue aux infections virales, etc.)
- L'émission naturelle de radon gazeux provenant des cavités souterraines s'accumule généralement dans les salles de classe mal ventilées et peut affecter la fonction pulmonaire en cas d'exposition chronique.
- En outre, l'exposition à diverses particules fines liées au trafic a été associée à une probabilité accrue de respiration sifflante, d'essoufflement, d'utilisation d'inhalateurs et de symptômes d'asthme (Gent et al., 2009).
- Les écoles situées près des aéroports constituent un sous-ensemble unique d'écoles en raison des impacts du bruit des avions. Le bruit des avions est une source commune de nuisance sonore ; il peut affecter la qualité de vie d'un individu et provoquer une irritation, un inconfort, une détresse ou une frustration, des maux de tête et des maux d'estomac (Seabi, 2013).
- Dans ces écoles exposées à de grandes quantités de bruits, 86 % des enseignants ont déclaré garder les fenêtres fermées, même par temps plus chaud, et 38 % ont indiqué qu'ils entreprenaient moins d'activité (Bergstrom et al., 2015).

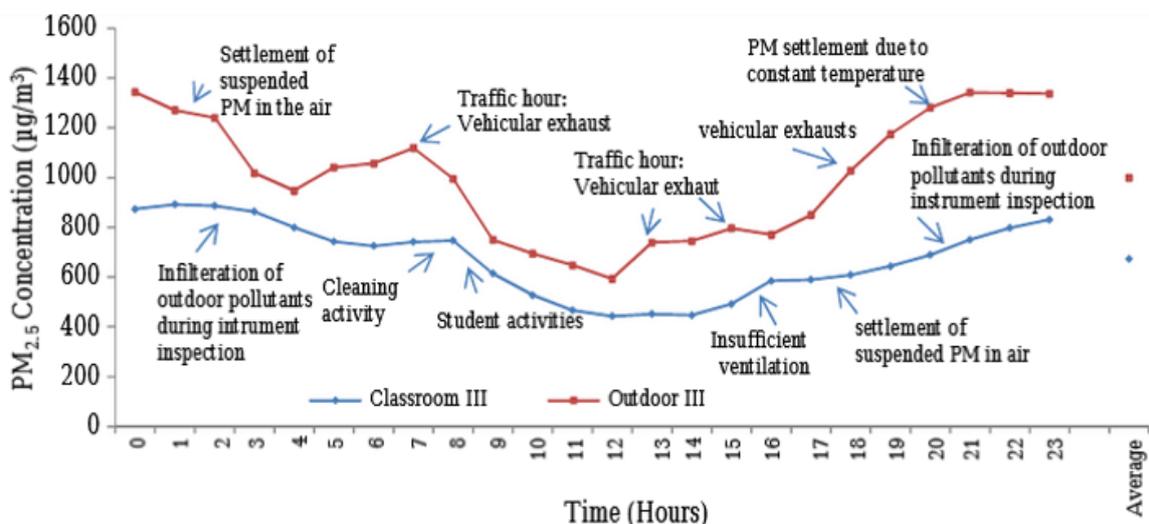


Figure 17 : concentrations moyennes de PM_{2,5} pendant 24 heures dans la salle de classe avec occupation (7:00-17:00). À noter que le taux de renouvellement d'air était de 0,43 h⁻¹ avec les portes fermées et de 1,1 h⁻¹ avec les portes ouvertes (Aziz et al., 2015).

Absentéisme dans les écoles

- Des niveaux plus élevés de pollution de l'air extérieur autour des écoles ont été liés à des taux accrus d'absentéisme chronique (MacNaughton et al., 2017).
- Près d'un enfant sur 13 en âge d'être scolarisé souffre d'asthme, la principale cause d'absentéisme scolaire dû à une maladie chronique. L'asthme est responsable de 13,8 millions de jours d'école manqués chaque année (Centres for Disease Control and Prevention, 2013).
- Il existe des preuves substantielles que l'exposition de l'environnement intérieur aux allergènes, tels que les acariens, les parasites et les moisissures, joue un rôle dans le déclenchement des symptômes de l'asthme. Ces allergènes sont courants dans les écoles (Centres for Disease Control and Prevention, 2015).
- L'étude la plus solide, qui a suivi 162 salles de classe pendant deux ans, a constaté une diminution de l'absence de 1,6 % pour chaque augmentation de 4 m³/h (2 cfm) par personne du taux de ventilation (Mendell et al., 2013).
- Une autre étude a constaté que l'absence diminuait de 0,4 jour par an pour chaque diminution de 100 ppm de la concentration de CO₂ (Gaihre et al., 2014).
- Une étude menée dans 434 salles de classe américaines a révélé que l'absence des élèves diminuait de 10 à 20 % lorsque la concentration de CO₂ diminuait de 1 000 ppm (Shendell et al., 2004).

Psychologie environnementale et autres facteurs

- Les chercheurs en psychologie environnementale (conception biophilique) s'intéressent de plus en plus aux effets réparateurs de l'accès visuel aux environnements naturels (Li et al., 2016).
- On a observé que les élèves des salles de classe ayant accès à des vues vertes par leurs fenêtres se rétablissaient nettement plus rapidement du stress et de la fatigue mentale et obtenaient des résultats nettement supérieurs aux tests de fonctionnement attentionnel, par rapport aux élèves des salles de classe sans fenêtres ou avec des fenêtres donnant sur les façades d'autres bâtiments (Li et al., 2016).
- Le facteur social - le maintien des enfants à l'école - est essentiel à leur éducation, et le niveau d'instruction a un impact plus important sur la santé à long terme que le statut socio-économique de l'enfance. Il a été démontré que l'augmentation du niveau d'instruction réduit les écarts en matière de santé et d'espérance de vie associés à un statut socio-économique disparate. (Montez et al., 2014).



Conclusion

La santé dans les écoles

Plusieurs décennies de recherche scientifique ont permis de mieux comprendre comment l'environnement intérieur affecte le bien-être et la santé des élèves. Ces résultats fournissent des preuves solides en matière de santé publique que les expositions environnementales dans les bâtiments scolaires peuvent avoir un impact sur la pensée et les performances des élèves. Les études montrent également que les facteurs environnementaux dans et autour du bâtiment scolaire peuvent interagir de manière complexe. Le bâtiment scolaire lui-même, où les élèves passent une partie importante de leur enfance, représente donc une excellente occasion d'intervenir et de protéger la santé des enfants - les citoyens les plus vulnérables.

Le temps passé par les enfants à l'école est essentiel pour leur croissance et leur développement physiologique, social et émotionnel, car les enfants sont plus sensibles que les adultes à de nombreuses conditions intérieures (Schools for Health).

Effets de l'environnement intérieur sur l'apprentissage

La qualité de l'environnement intérieur (QEI) à l'intérieur du bâtiment est un élément clé pour rendre le bâtiment adapté à l'apprentissage et au travail. Au cours des dernières décennies, les preuves recueillies ont montré que la grande variété de la QEI a une influence sur les processus et les résultats de l'éducation. Une bonne QEI dans les bâtiments éducatifs augmente les résultats scolaires des étudiants, c'est-à-dire leur productivité, leur efficacité et leur apprentissage. Elle affecte également l'efficacité, la concentration, la confiance en soi, les résultats d'apprentissage et l'absentéisme des élèves, etc. En outre, la QEI peut également affecter la qualité et l'efficacité de l'enseignement, entre autres. Dans l'ensemble, les effets de la QEI dans les écoles peuvent offrir d'énormes avantages - en termes d'amélioration des résultats scolaires, de bonne santé des élèves et d'avenir d'une population croissante.

Le nouveau paradigme de la ventilation dans les écoles

La ventilation est et restera un moyen de préserver le droit à un air intérieur sain dans les écoles. Les critères applicables aux écoles doivent tenir compte des différents effets sur les occupants des bâtiments et garantir que les systèmes de construction sont conçus pour répondre à leurs besoins et utilisés efficacement. Le changement de paradigme nécessaire devrait concerner de nouvelles exigences de conception, de nouvelles solutions de ventilation et de nouvelles façons de concevoir, d'exploiter et de maintenir des méthodes efficaces sur le plan énergétique et économique. En outre, le coût des conséquences négatives d'une mauvaise ventilation sur la santé, les performances et le bien-être socio-économique doit être au centre de toutes les attentions. Le nouveau paradigme de la ventilation dans les bâtiments scolaires devrait placer chaque occupant du bâtiment (élèves, personnel et autres) au centre de toutes les recommandations et actions.

Rapports dynamiques

Dans le passé, le monde et la compréhension de l'éducation étaient très différents d'aujourd'hui. Les bâtiments scolaires étaient éclairés par le soleil, chauffés par d'énormes fours à huile et à charbon. Les enfants devaient être vus et non entendus. Les écoles étaient conçues pour un plus petit nombre d'élèves, pour l'enseignement de matières uniques et avec moins d'accent sur l'adaptabilité. L'augmentation du nombre d'étudiants et la plus grande variété de matières enseignées signifient que des efforts doivent être faits pour rendre tous les espaces polyvalents et flexibles.

Les systèmes du bâtiment devront être en mesure de s'adapter aux futures modifications du bâtiment - les écoles devront résister à l'épreuve du temps et s'intégrer aux futures modifications du bâtiment, en tenant compte des coûts sur la durée de vie, et pas seulement des coûts d'investissement. Tout sera basé sur la demande et l'occupation - tous les systèmes devront gérer une occupation variable, s'adapter rapidement à divers paramètres et aux exigences spatiales de la demande. Et le fonctionnement de tous les bâtiments scolaires et de tous les systèmes de construction sera basé sur la surveillance, la gestion et la prévisibilité.

Des bâtiments sains, des personnes saines et des enfants sains (Schools for Health).

Éducation au développement durable et au climat

L'éducation est également un élément essentiel de la durabilité de la planète et de la réponse globale au changement climatique. Elle aide les jeunes à comprendre et à aborder l'impact du réchauffement de la planète, encourage les changements d'attitude et de comportement et les aide à s'adapter aux tendances du changement climatique. Il doit exister des moyens efficaces pour les écoles d'enseigner l'éducation au changement climatique afin que les enfants soient mieux préparés à faire face aux futurs défis environnementaux. Tout dépend des connaissances, de l'attitude et du comportement de chacun et pour chacun.

L'éducation change la vie (UNESCO).

Le future de l'éducation et des écoles

L'éducation devient de plus en plus importante dans le monde entier. L'image globale montre les estimations et les projections de la population mondiale totale en fonction du niveau d'éducation. Alors que dans les années 1970, le monde ne comptait qu'environ 700 millions de personnes ayant suivi un enseignement secondaire ou post-secondaire, on prévoit que ce nombre sera dix fois plus important dans les années 2100. En raison de l'augmentation de la population, de l'urbanisation et de la mondialisation croissantes, l'éducation sera florissante, et davantage de ressources seront nécessaires pour l'éducation dans le monde entier. Par conséquent, il faudra également veiller à ce que les environnements intérieurs des écoles soient adéquats pour la santé des enfants et leur capacité d'apprentissage. L'avenir a besoin de bâtiments scolaires sains et intelligents, avec un environnement intérieur propice à l'apprentissage.

Sources

Acoustical Society of America (2010).

ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1 American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools.

Aggio D., Smith L., Fisher A., Hamer M.

(2015). Association of Light Exposure on Physical Activity and Sedentary Time in Young People. *International journal of environmental research and public health* 12.

Angelopoulos C., Cook M., Iddon C.R.,

Porritt S. (2017). Evaluation of thermal comfort in naturally ventilated school classrooms using CFD. Loughborough University.

Annesi-Maesano I., Baiz N., Banerjee S., Rudnai P., Rive S., SINPHONIE Group.

(2013). Indoor air quality and sources in schools and related health effects. *Journal of Toxicology and Environmental Health (Part B)* 16.

Artola I., Rademaekers K., Williams

R., Yearwood J. (2016). Boosting building renovation: What potential and value for Europe? Study by European Parliament.

ASHRAE 55:2020. Thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE Standard.

ASHRAE 62.1:2019. Ventilation for acceptable indoor air quality. ASHRAE Standard.

Aziz K., Ali Z., Nasir Z.A., Colbeck I. (2015).

Assessment of airborne particulate matter (PM_{2.5}) in university classrooms of varying occupancy. *Journal of Animal and Plant Sciences* 25.

Barrett P.S., Zhang Y., Davies F., Barrett

L.C. (2015). *Clever Classrooms: Summary report of the HEAD project.* University of Salford, Manchester.

B.B. 101:2018. Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools. Education and Skills Funding Agency. Retrieved from <https://www.gov.uk/government/publications/building-bulletin-101-ventilation-for-school-buildings>

Bidassey-Manilal S., Wright C.Y., Engelbrecht J.C., Albers P.N., Garland R.M., Matooane M. (2016). Students'

Perceived Heat-Health Symptoms Increased with Warmer Classroom Temperatures. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13.

BPIE. (2011). Europe's building under the microscope: A country-by-country review of the energy performance of buildings. Report by Buildings Performance Institute Europe.

Breesch H., Merema B., Versele A. (2019).

Ventilative cooling in a school building: evaluation of the measured performances. *REHVA Journal* 2.

Brink H.W., Loomans M.G.L.C, Mobach

M.P., Kort H.S.M. (2020). Classrooms' indoor environmental conditions affecting the academic achievement of students and teachers in higher education: A systematic literature review. *Indoor Air* 31.

Building better schools. Velux. Accessed 1/2021. Retrieved from https://neufert-cdn.archdaily.net/uploads/product_file/file/55118/Building_Better_Schools.pdf

Carreiro-Martins P., Viegas J., Papoila A.L.,

Aelenei D., Caires I., Araújo-Martins J., Rosado-Pinto J. (2014). CO₂ concentration in daycare centres is related to wheezing in attending children. *European journal of paediatrics* 173.

Centres for Disease Control and

Prevention. (2013). National Centre for Health Statistics. National Health Interview Survey, 2013. Analysis by the American Lung Association Epidemiology and Statistics Unit using SPSS software.

Centres for Disease Control and

Prevention. (2015). Asthma Stats: Asthma-related missed school days among children age 5-17 years. Retrieved from <https://www.cdc.gov>

Chatzidiakou L., Mumovic D., Summerfield A.J. (2012). What do we know about indoor air quality in school classrooms? A critical review of the literature. *Intelligent Buildings International* 4.

Chatzidiakou L., Mumovic D., Summerfield A.J., Hong S.M., Altamirano-Medina H.

(2014). A Victorian school and a low carbon designed school: comparison of indoor air quality, energy performance, and student health. *Indoor and Built Environment* 23.

- Chatzidiakou L., Mumovic D., Summerfield A. (2015).** Is CO₂ a good proxy for indoor air quality in classrooms? Part 1: The interrelationships between thermal conditions, CO₂ levels, ventilation rates and selected indoor pollutants. *Building Services Engineering Research and Technology*.
- Deoux S. (2010).** Bâtir pour la santé des enfants, Medieco Editions.
- Dorizas P. V., Assimakopoulos M. N., Santamouris M. (2015).** A holistic approach for the assessment of the indoor environmental quality, student productivity, and energy consumption in primary schools. *Environmental Monitoring and Assessment* 187.
- Duarte R., Gomes M.G. (2017).** Classroom ventilation with manual opening of windows: Findings from a two-year-long experimental study of a Portuguese secondary school. *Building Environment* 124.
- EIA. (2018).** Commercial building energy consumption survey. U.S. Energy Information Administration's. Retrieved from <https://www.eia.gov/consumption/commercial/>
- EN 16798:1-2019.** Energy performance of buildings. Ventilation for buildings. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. CEN European Standard.
- Engineering Toolbox. (2003).** Recommended minimum area per person - common values for calculating indoor climate loads. Retrieved from https://www.engineeringtoolbox.com/number-persons-buildings-d_118.html
- Environmental Protection Agency (EPA, 2016).** Volatile organic compounds' impact on indoor air quality. Health effects. Retrieved from https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality#Health_Effects
- Eurostat. Students and teachers in E.U. (2020).** Retrieved from <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20200604-1>
- Fisk W.J. (2017).** The Ventilation Problem in Schools: Literature Review. Berkley Lab.
- Gaihre S., Semple S., Miller J., Fielding S. and Turner S. (2014).** Classroom carbon dioxide concentration, school attendance, and educational attainment. *Journal of School Health* 84.
- Hanover Research. (2011).** School structures that support 21st century learning. Retrieved from https://www.apsva.us/wp-content/uploads/legacy_assets/www/bda59d16b8-School_Structures.pdf
- Haverinen-Shaughnessy U., Moschandreas D.J., Shaughnessy R.J. (2011).** Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor Air* 21.
- Haverinen-Shaughnessy U., Shaughnessy R.. (2015).** Effects of classroom ventilation rate and temperature on students' test scores. *PLoS ONE* 10.
- Jaramillo A.M. (2013).** The link between HVAC type and student achievement. Doctoral dissertation. Virginia Polytechnic University.
- Johansson D. (2010).** Närvaro i byggnader mätningar och uppskattningar. Swegon.
- Lewis D.E., Manninen C.M., Valente D.L., Smith N.A. (2014).** Children's understanding of instructions presented in noise and reverberation. *American Journal of Audiology* 23.
- Klatte M., Bergstrom K., Lachmann T. (2013).** Does noise affect learning? A short review on noise effects on cognitive performance in children. *Frontiers in Psychology* 4.
- Kocak E.D., Sherwin, J.C. (2015).** Time spent outdoors and myopia: establishing an evidence base. *Eye Science* 30.
- Li D., Sullivan C.W. (2016).** Impact of views to school landscapes on recovery from stress and mental fatigue. *Landscape Urban Planning* 148.
- Luongo J.C., Fennelly K.P., Keen J.A., Zhai Z.J., Jones B.W., Miller S.L. (2015).** Role of mechanical ventilation in the airborne transmission of infectious agents in buildings. *Indoor Air*.

Sources

- MacNaughton P., Eitland E., Kloog I., Schwartz J. and Allen J. (2017).** Impact of Particulate Matter Exposure and Surrounding "Greenness" on Chronic Absenteeism in Massachusetts Public Schools. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14.
- Maesano C., Annesi-Maesano I. (2016).** Impact of Lighting on School Performance in European Classrooms. 12th REHVA World Congress CLIMA.
- Mendell M.J., Eliseeva E.A., Davies M.M., Spears M., Lobscheid A., Fisk W.J. and Apte M.G. (2013).** Association of classroom ventilation with reduced illness absence: A prospective study in California elementary schools. *Indoor Air* 23.
- Montez J.K., Hayward M.D. (2014).** Cumulative childhood adversity education, and active life expectancy among U.S. Adults. Springer.
- Mott M.S., Robinson D.H., Williams-Black T., McClelland S.S. (2014).** The supporting effects of high luminous conditions on grade 3 oral reading fluency scores. *Springer Plus* 3.
- NCEE. (2018).** How much time do students spend in schools? Retrieved from <http://ncee.org/wp-content/uploads/2018/02/SchoolYearStatv5.pdf>
- O'Hagan J.B., Khazova M., Price L.L A. (2016).** Low-energy light bulbs, computers, tablets and the blue light hazard. *Eye*.
- OECD. (2018).** Average class size. Retrieved from https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=EDU_CLASS
- Online Etymology Dictionary. (2021).** Accessed 01/2021. Retrieved from <https://www.etymonline.com/word/school>
- Passipedia. (2020).** Passive house schools – Requirements. Retrieved from https://passipedia.org/planning/non-residential_passive_house_buildings/passive_house_schools/passive_house_schools_requirements
- Rigolon A. (2010).** European design types for 21st century schools: An overview. Centre for Effective Learning Environments.
- Roser M., Ortiz-Ospina E. (2016).** Global education. Retrieved from <https://ourworldindata.org/global-education>
- Satish U., Mendell M.J., Shekhar K., Hotchi T., Sullivan D., Streufert S., Fisk W.B.. (2012).** Is CO2 an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO2 Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives* 120.
- Seabi J., Cockcroft K., Goldschagg P., Greyling M. (2015).** A prospective follow-up study of the effects of chronic aircraft noise exposure on learners' reading comprehension in South Africa. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 25.
- Shendell D., Prill R., Fisk J.W., Apte M., Blake D., Faulkner D. (2004).** Associations between classroom CO2 concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air* 145.
- Stansfeld S., Clark C. (2015).** Health effects of noise exposure in children. *Current Environmental Health Reports* 2.
- Sullivan J.R., Osman H., Schafer E.C. (2015).** The Effect of Noise on the Relationship Between Auditory Working Memory and Comprehension in School-Age Children. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 58.
- Uzelac A., Gligoric N., Krco S. (2015).** A comprehensive study of parameters in physical environment that impact students' focus during lecture using Internet of Things. *Computers in Human Behavior* 53.
- Toyinbo O., Matilainen M., Turunen M., Putus T., Shaughnessy R., Haverinen-Shaughnessy U. (2016).** Modelling Associations between Principals' Reported Indoor Environmental Quality and Students' Self-Reported Respiratory Health Outcomes Using GLMM and ZIP Models. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13.
- Trachte S., De Herde A. (2015).** Sustainable refurbishment of school buildings. International Energy Agency.
- Turunen M., Toyinbo O., Putus T., Nevalainen A., Shaughnessy R., Haverinen-Shaughnessy U. (2014).** Indoor environmental quality in school buildings, and the health and well-being of students. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 217.

Wargocki P., Wyon D.P. (2013). Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment* 59.

Wargocki P., Wyon D.P. (2016). Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork. *Building and Environment* 112.

Wargocki P. (2021). What we know and should know about ventilation. *REHVA Journal* 2.

Worldometer. (2021). World demographics. Accessed 01/2021. Retrieved from <https://www.worldometers.info/demographics/world-demographics/>

Younes Ch., Shdid C.A., Bitsuamlak G. (2011). Air infiltration through building envelope: A review. *Journal of Building Physics* 35.

Zhang F., Dear R. (2016). University students' cognitive performance under temperature cycles induced by direct load control events. *Indoor Air*.

Feel good **inside**

