

LIEN ENTRE LA CONCENTRATION EN CO₂ DANS LES SALLES DE CLASSE ET L'APPRENTISSAGE DES ENFANTS

POINTS CLÉS

- Les résultats de la littérature publiés depuis 10 ans vont globalement en faveur d'un bénéfice d'une amélioration du renouvellement d'air dans les établissements scolaires sur l'apprentissage des enfants. Néanmoins, seul un faible nombre des études originales sur le sujet a été jugé comme ayant une qualité globalement satisfaisante (N = 4/18), et aucune d'entre elles n'a été jugée applicable au contexte français.
- Les données disponibles ne sont donc pas suffisantes aujourd'hui pour disposer d'une relation concentration-risque permettant d'envisager l'application d'une démarche d'évaluation quantitative d'impact sur la santé (ÉQIS). Néanmoins elles constituent un argument supplémentaire de l'importance de l'amélioration du renouvellement de l'air dans les établissements scolaires.
- Des données supplémentaires restent donc à acquérir et il serait pour cela pertinent de considérer l'ensemble des paramètres d'ambiance intérieure (CO₂ ou taux de renouvellement d'air, confort thermique, luminosité, acoustique, humidité relative).

INTRODUCTION

Depuis de nombreuses années, un renouvellement d'air insuffisant a été documenté dans les salles de classe, conduisant à un risque de qualité de l'air dégradé (1). En France, la Campagne nationale École menée par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur a ainsi permis d'évaluer que 4 écoles sur 10 présentaient un confinement de l'air jugé de élevé à extrême dans au moins une salle de classe (2). Une enquête descriptive sur les pratiques d'aération des écoles avait précédemment mis en évidence que l'un des deux principaux freins à l'ouverture des fenêtres par les enseignants était l'absence du besoin d'aérer du fait de la « bonne » perception de la qualité de l'air intérieur (3). Or, la qualité de l'air des établissements scolaires peut affecter la santé des enfants. De nombreux travaux ont notamment permis de reconnaître le rôle de cette pollution sur la santé respiratoire et

allergique des enfants (4). Plus récemment, la répercussion des facteurs environnementaux scolaires sur les fonctions cognitives et sur l'apprentissage des élèves a été étudiée (5, 6).

Avec l'épidémie de Covid-19, le rôle de l'aération et de la ventilation des salles de classe comme moyen de limiter les transmissions par aérosols a été mis en lumière. La dynamique de cette période a été un véritable accélérateur pour promouvoir un bon renouvellement de l'air dans les salles de classe et plus largement de bonnes conditions d'ambiance intérieure au sein des établissements scolaires. Néanmoins, au-delà des aspects infectieux, l'intérêt de ces gestes pour la santé, le bien-être et la réussite des enfants reste peu connu. Il est par ailleurs encore difficile d'évaluer précisément la portée. Or, de telles informations pourraient permettre de sensibiliser les occupants et gestionnaires de bâtiments sur l'importance

que les bonnes pratiques mises en place pendant la pandémie se poursuivent.

En 2013, l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement, et du travail (Anses) a réalisé une synthèse des études épidémiologiques disponibles sur le lien entre concentration en CO₂, indicateur de renouvellement d'air, et effets sur la santé et la performance. Elle a conclu que les données disponibles n'étaient pas suffisamment robustes et représentatives du contexte français (7). Santé publique France a également identifié les retombées sanitaires de paramètres dits « de confort » dans

les établissements scolaires, notamment les problèmes de renouvellement d'air, sur l'apprentissage des enfants comme l'un des sujets prioritaires en vue du déploiement d'Évaluations quantitatives d'impact sur la santé (ÉQIS) de la pollution de l'air des environnements scolaires sur la santé des enfants (8). Les conclusions de l'étude de pertinence et de faisabilité menée dans ce cadre ont souligné la nécessité d'une analyse approfondie des données disponibles sur le sujet. L'objectif du présent travail est donc de faire un état des lieux des connaissances les plus récentes sur le sujet afin d'évaluer l'opportunité de conduire une ÉQIS.

QUELQUES PRÉCISIONS

Les ÉQIS : des outils d'appui aux politiques publiques reposant sur des données probantes

Les évaluations quantitatives d'impact sur la santé (ÉQIS), initialement proposées par l'Organisation mondiale de la santé, permettent d'estimer l'ampleur du fardeau d'une pollution sur la santé et/ou les bénéfices attendus pour la santé de différents scénarios de réduction des niveaux de pollution au sein d'une population donnée. Elles permettent également d'évaluer les bénéfices potentiels d'une action (intervention) visant à réduire la pollution. Cette démarche fait partie des outils de sensibilisation et d'aide à la décision développés depuis plusieurs années au sein de Santé publique France (9). Avant d'envisager et de conduire une ÉQIS, quelques prérequis sont nécessaires : une relation causale entre l'indicateur sanitaire et l'indicateur environnemental, la disponibilité d'une ou plusieurs relations « concentration-risque » (relations C-R) ou des risques relatifs robustes et adaptés au contexte d'étude et enfin des données sanitaires et environnementales pertinentes pour l'échelle géographique visée. Dans l'objectif de développer ces approches dans le domaine de la pollution de l'air intérieur, et notamment la qualité de l'air dans et autour des établissements scolaires, Santé publique France a mené une étude de pertinence et de faisabilité afin d'identifier les premières ÉQIS à mener sur le sujet (8). Parmi les sujets identifiés comme prioritaires à considérer, l'impact sanitaire de paramètres dits de confort dans les établissements scolaires et notamment

des problèmes de renouvellement d'air sur l'apprentissage des enfants (troubles cognitifs, de la concentration...) a été mis en avant.

Le dioxyde de carbone : polluant ou indicateur de renouvellement d'air ?

Le dioxyde de carbone (CO₂), naturellement présent dans l'atmosphère, peut également être produit et rejeté dans l'air par l'organisme humain lors de la respiration. Sa présence dans l'air intérieur est donc en partie liée à l'occupation humaine et au renouvellement d'air. En raison notamment de la facilité avec laquelle le CO₂ peut être mesuré, cette substance est souvent utilisée comme marqueur d'aération des locaux. Un indice ICONNE, s'appuyant sur des mesures en continu, a notamment été développé en France pour évaluer le confinement de l'air dans les bâtiments (10). Par ailleurs, les concentrations en CO₂ sont utilisées comme indicateur du renouvellement de l'air intérieur voire de qualité de l'air intérieur (QAI). En effet, la présence de cette substance est de fait corrélée à d'autres polluants émis par des sources internes, comme les composés organiques volatils (11). Dans l'interprétation des données sur le lien entre concentration en CO₂ et santé, il convient donc de considérer à la fois le CO₂ en tant que substance chimique mais aussi comme marqueur de QAI. Ainsi, alors que les études expérimentales basées notamment sur une injection de CO₂ permettront d'évaluer l'influence directe de cette substance, il sera plus difficile de distinguer l'origine des effets observés pour les études reposant sur une modification des débits de ventilation ; cette modification jouant aussi un rôle dans les concentrations des autres substances émises par les

sources internes dont les composés organiques volatils. Le terme d'impact de la concentration en CO₂ (et non d'impact du CO₂) sera donc utilisé dans le cadre de ce travail pour couvrir les deux hypothèses.

Apprentissage : un terme complexe regroupant plusieurs notions

L'apprentissage est un terme polysémique et complexe qu'il est difficile de définir précisément puisqu'il n'existe pas une définition unique et consensuelle, mais une diversité qui varie selon les disciplines. Lorsque l'on étudie le lien entre environnement et apprentissage, il est donc nécessaire de bien distinguer :

- l'effet de l'environnement sur les performances cognitives, qui correspondent à la capacité à répondre à des questions ou à résoudre un exercice impliquant une ou plusieurs fonctions cognitives (mémoire, attention, langage, etc.).
- l'effet de l'environnement sur les performances scolaires, qui dépendent des performances cognitives des élèves à l'instant où ils sont exposés à des contenus et des tests scolaires.

Plusieurs types d'évaluation sont de ce fait utilisées dans ce type d'études : 1) des tests cognitifs permettant de jauger la capacité des élèves à réaliser certaines tâches ; 2) des tests scolaires mesurant les effets sur les performances scolaires à court terme et 3) des résultats aux examens permettant de mesurer les effets sur les performances scolaires à long terme. Ces différentes approches seront donc distinguées dans l'analyse des études disponibles sur le lien entre la concentration en CO₂ et l'apprentissage des enfants.

MÉTHODES

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Une revue de la littérature a été effectuée afin d'identifier les études épidémiologiques pertinentes publiées sur le lien entre concentration en CO₂ dans les salles de classe et apprentissage de l'enfant en vue de conclure quant à la disponibilité d'une relation concentration-risque robuste et applicable pour une future ÉQIS. Afin de conduire cette recherche bibliographique, la démarche de recherche et de sélection des articles a été réalisée et adaptée de la méthode PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*) (12). Les requêtes ont été structurées autour de trois notions : 1) la qualité de l'air intérieur, 2) l'apprentissage et 3) le milieu scolaire (Annexe 1). Cette recherche a été effectuée à partir des bases de données bibliographiques Scopus et PubMed. Elle s'est limitée aux références en langue française ou anglaise publiées entre 2013 – date de fin d'inclusion des articles dans le rapport d'expertise collective de l'Anses – et mars 2022. Les références ont été intégrées si elles étudiaient le lien entre les concentrations en CO₂ et/ou les débits de ventilation dans les salles de classe et l'apprentissage des élèves de la maternelle à l'université. La population ciblée correspondait donc aux enfants, adolescents et jeunes adultes jusqu'à 20 ans, scolarisés en établissement d'enseignement entre la maternelle et les premières années d'études supérieures. Les troubles spécifiques de l'apprentissage¹ et les problèmes de comportement n'ont pas été considérés dans cette recherche, ces facteurs renvoyant à des sous-populations spécifiques. Par ailleurs, seules les études basées sur une évaluation objective de l'apprentissage (tests des fonctions cognitives, évaluation de la réussite et la performance scolaire) ont été considérées. Celles basées sur une déclaration de fatigue ou de difficultés de concentration ont notamment été exclues. De plus, les données portant sur le milieu scolaire autre qu'une salle de classe (comme une bibliothèque ou un réfectoire), les crèches ou les laboratoires n'ont pas été retenues.

SÉLECTION ET ANALYSE DES ARTICLES

Un premier tri des articles a été effectué à partir de la lecture des titres et résumés des références en identifiant le(s) motif(s) de leur exclusion pour celles d'entre elles qui étaient concernées. Les articles sélectionnés à l'issue de cette phase ont ensuite été lus intégralement afin d'évaluer leur éligibilité. Une recherche d'articles originaux supplémentaires dans les revues de littératures et méta-analyses incluses a été réalisée *a posteriori*, pour s'assurer que des références pertinentes n'aient pas été omises avec les requêtes de Scopus et PubMed. Cette première phase de sélection a permis d'identifier les articles jugés comme éligibles au regard du sujet. Ces articles, et principalement les revues de la littérature, ont été étudiés afin de dresser un état général des connaissances.

La robustesse des méta-analyses et études originales identifiées a ensuite été évaluée. Pour les méta-analyses, l'évaluation s'est appuyée sur les critères utilisés dans l'échelle de qualité AMSTAR-2 (13). Pour les études de type observationnel, une grille d'analyse a été construite à partir celles préalablement utilisées à Santé publique France (14). Pour les études de type expérimental, une grille spécifique a été construite par analogie de critères issus de grilles d'analyses identifiées au sein d'études toxicologiques, ainsi que de guides de lecture critique d'essais thérapeutiques (15-17). De manière identique pour les deux grilles, les critères ont été définis autour de six catégories : étude, population, indicateur sanitaire, indicateur environnemental, analyses statistiques et biais. Un score pouvant aller de 0 à 2 a été attribué à chaque critère pour les différentes études analysées. Les scores des critères d'une même catégorie ont ensuite été sommés et représentés *via* un code couleur sur la base de trois modalités de robustesse : « qualité non satisfaisante » en rouge, « qualité modérée » en orange, « qualité satisfaisante » en vert (voir Tableau 1). Les articles dont la robustesse a été jugée globalement satisfaisante ont été inclus pour l'analyse de la disponibilité d'une relation concentration-risque en vue d'une première ÉQIS. Cette évaluation globale a été faite par jugement d'experts au regard des scores obtenus pour les différentes catégories.

1. Communément appelés troubles « dys », comprennent les troubles spécifiques des apprentissages avec déficit de lecture (dyslexie), ceux avec déficit de l'expression écrite (dysorthographe), ceux avec déficit du calcul (dyscalculie).

RÉSULTATS & DISCUSSION

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE : QUELLES SONT LES CARACTÉRISTIQUES DES ÉTUDES DISPONIBLES SUR LE SUJET ?

La recherche bibliographique à partir des différentes bases de données a permis d'identifier 895 références hors doublons (Figure 1). Finalement, 23 références ont été jugées éligibles dans l'analyse descriptive, dont près de trois quarts d'articles individuels (69 % (n=16)).

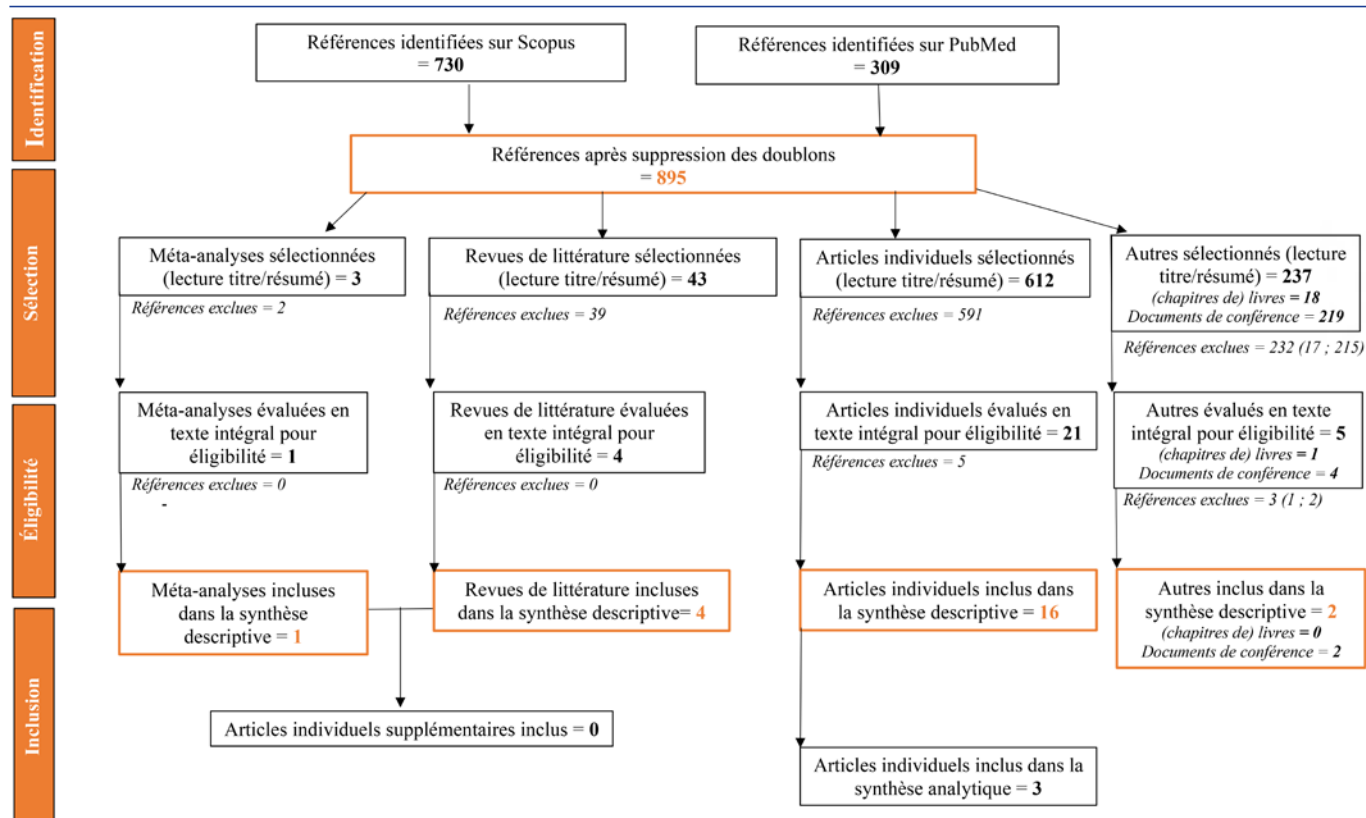
Une méta-analyse récente, publiée en 2020 par Wargocki *et al.* portait précisément sur la problématique visée (18). Basée sur 20 études publiées entre 1996 et 2018, elle avait pour objectif principal de résumer les données existantes concernant les effets de la qualité de l'air dans les écoles sur l'apprentissage et l'absentéisme à court terme des élèves. Les auteurs ont ainsi construit trois relations entre les fractions de changement de performance et une variation de 100 ppm des concentrations moyennes en CO₂ : une première sur les travaux scolaires (notamment la rapidité d'exécution de la tâche et la précision d'exécution de

la tâche) exprimée en pourcentage d'erreurs, une deuxième sur les tests d'aptitudes nationaux, les examens et les autres résultats du contrôle continu, et enfin une dernière sur le taux d'absentéisme journalier. Ces relations étaient construites à partir des données disponibles sur un total de plus de 15000 élèves de moins de 18-19 ans et provenant de plus de 760 écoles élémentaires et secondaires situées en Europe ou aux États-Unis.

Quatre revues publiées après 2020 et traitant des liens entre les paramètres environnementaux intérieurs, le bâti et leurs effets sur la santé ont également été identifiées (19-22). Bien que chacune de ces revues ait inclus des études portant sur le lien entre des concentrations en CO₂ dans les salles de classe et l'apprentissage, leurs objectifs de recherche concernaient un champ plus large et différent pour chacune d'entre elles.

Enfin, 16 articles et 2 documents de conférences ont été identifiés (23-40), dont près des trois quarts publiés avant 2018 (72 %). Certaines de ces études étaient incluses dans les revues et méta-analyses citées précédemment. Leurs caractéristiques sont présentées en Annexe 2. L'analyse descriptive de ces

FIGURE 1 | Démarche de sélection des articles issus de la recherche bibliographique (interprétée et adaptée à partir du diagramme PRISMA)



études a permis par ailleurs de dégager deux grands types d'études :

- Des études observationnelles (N=12) reposant sur des mesures en conditions réelles de la concentration en CO₂ ou du taux de ventilation. Ces études sont le plus souvent construites sur un design inter-individuel (92 %) et basées sur l'évaluation des résultats aux examens (75 %) ; elles s'intéressent donc principalement aux effets des concentrations en CO₂ sur la performance scolaire à long terme ;
- Des études expérimentales (N=6) reposant sur des conditions contrôlées avec modification des débits de ventilation ou injection de CO₂ dans l'air de la salle de classe. La plupart de ces études présentent un design intra-individuel (83) et reposent sur des tests cognitifs (67 %) ; elles s'intéressent donc majoritairement aux effets des concentrations en CO₂ sur les performances cognitives.

À noter par ailleurs que les deux tiers des études proviennent d'Europe (67 %) mais qu'aucune d'entre elles n'a été conduite en France.

ANALYSE DES REVUES JUGÉES ÉLIGIBLES : QUE PEUT-ON DIRE SUR LE LIEN ENTRE LE CO₂ ET L'APPRENTISSAGE ?

L'analyse des revues identifiées permet de faire un bilan des informations disponibles sur le lien entre la concentration en CO₂ et l'apprentissage des enfants.

Ainsi, dans leur revue de 2020, Manca *et al.* ont mené une recherche bibliographique sur quatre groupements de facteurs (bâtiment/architecture, paramètres des environnements intérieurs, aménagement de la classe et fournitures scolaires, environnement extérieur dont espaces verts) pouvant avoir une influence sur les individus au sein des salles de classe des écoles élémentaires et établissements secondaires (21). Toute étude portant sur l'éducation supérieure a été exclue. Au total, Manca *et al.* (2020), ont inclus 68 études parmi lesquelles 22 portaient sur le groupement relatif aux paramètres des environnements intérieurs (luminosité, bruit, température, ventilation) dont 2 sur le CO₂ comme indicateur de renouvellement de l'air. Les 2 études en question sont celles de Mendell *et al.* (2016) et de Petersen *et al.* (2016), recensées parmi les articles individuels inclus dans le cadre du présent travail et qui mettent en avant le fait qu'augmenter le débit de ventilation au sein des salles de classe améliore significativement les scores individuels des enfants sur la performance d'une tâche (34, 35). Les études recueillies par Manca *et al.* ont mis en avant que, combiné au confort thermique, la ventilation aurait un effet positif sur la concentration

et sur le raisonnement à court terme des élèves. Les auteurs de la revue soulignent par ailleurs que les études disponibles ne prennent que peu en compte des variables individuelles comme l'âge, le sexe ou encore les besoins spécifiques des individus. Ce manque limite la compréhension des mécanismes sous-jacents des effets observés des paramètres de l'environnement intérieur sur l'apprentissage.

La revue critique de Du *et al.* porte quant à elle plus spécifiquement sur le lien entre le CO₂ et la performance cognitive, en s'appuyant spécifiquement sur les études expérimentales ; l'objectif étant de mieux comprendre le rôle de ce polluant sur les fonctions cognitives (22). Cette revue s'est appuyée sur 37 études publiées entre 1982 et 2020, dont 9 se sont intéressées à des enfants d'âge scolaire (du primaire au lycée). Les concentrations de CO₂ dans les environnements intérieurs ont été modifiées soit en injectant du CO₂ pur soit en ajustant les débits de ventilation, et l'effet de ces modifications a été évalué par des tests cognitifs objectifs. Alors que les résultats des études faisant varier les concentrations en CO₂ par modification du débit de ventilation sont concordants, seule la moitié des études réalisées avec injection de CO₂ pur présente des résultats significatifs. Par ailleurs, en considérant uniquement les études ayant une qualité jugée suffisante, des résultats significatifs ne sont observés qu'avec la prise de décision pour les études réalisées avec injection de CO₂ pur alors que plusieurs fonctions cognitives semblent être touchées pour les études où les concentrations en CO₂ sont modulées par une modification du débit de ventilation. Ces différences pourraient s'expliquer par l'effet d'autres polluants que le CO₂ dans les études basées sur une modification des débits de ventilation suggérant ainsi que le CO₂ ne serait pas le seul polluant impliqué dans les effets sur l'apprentissage de l'enfant, voire qu'il ne serait pas le principal. Les auteurs soulignent par ailleurs que les mécanismes biologiques sous-jacents à une hausse des concentrations en CO₂, qui expliqueraient la réduction des performances cognitives, restent mal identifiés dans la littérature scientifique actuelle. Deux hypothèses majeures ressortent. La première suggère que l'inhalation de CO₂ pourrait entraîner son accumulation dans le corps et conduire à des réactions physiologiques telles que des niveaux d'éveil et de somnolence plus importants qu'à la normale (41, 42). La seconde explication biologique serait une variation de débit sanguin cérébral ou de pression partielle d'O₂ dans le cerveau qui affecterait ainsi la fonction cérébrale (43, 44). Néanmoins, les explications biologiques apportées ne seraient plausibles que pour des expositions à de hautes concentrations en CO₂, qui ne sont habituellement pas mesurées dans des environnements intérieurs classiques tels que les écoles (>10000 ppm) (22). Seules quelques études ont

présenté des effets physiologiques survenus à la suite d'une exposition à des gammes de concentrations de CO₂ cohérentes avec celles mesurées habituellement dans les environnements scolaires.

Dans la revue systématique de Brink *et al.* (2021), les auteurs ont distingué deux types d'études : celles s'intéressant à la « réussite académique », liée aux performances à court terme et regroupant les études basées sur des tests cognitifs ou scolaires, et celles s'intéressant aux performances scolaires à long terme, basées sur les résultats aux examens sur la durée d'un cours ou sur l'année académique (19). Une association statistiquement significative a été relevée, affichant qu'une augmentation de la concentration en CO₂, représentant une détérioration de la QAI, conduisait à un effet négatif sur l'apprentissage de court terme, avec une importance de l'effet qui varie selon les fonctions cognitives évaluées. Les hautes concentrations en CO₂ (≥ 1800 ppm) ont été associées significativement à des effets plus importants sur des tâches sollicitant la mémoire complexe et orientées que sur des tâches engageant la vigilance et l'attention soutenue. Des résultats très proches ont été observés dans les études analysant l'effet de la température sur l'apprentissage. Ces résultats renvoyaient cependant à des effets sur l'apprentissage à court terme uniquement. Brink *et al.* (2021) ont ainsi mis en avant le manque de preuves disponibles actuellement sur l'apprentissage à long terme, qu'ils expliquent par le manque de tests disponibles pour l'évaluer (19).

La revue systématique de Lowther *et al.* (2021) portait sur l'effet de concentrations en CO₂, jugées comme faibles², sur la santé. Concernant les performances cognitives, les résultats de 25 études ont été reportés dont 11 en milieu scolaire (20). Les auteurs ont ainsi pu mettre en évidence des associations significatives montrant un lien entre des niveaux de CO₂ supérieurs ou égaux à 1000 ppm et une réduction modérée de capacités cognitives. Des associations témoignant d'une diminution des scores aux tests de performances puis des performances cognitives, ressortaient pour des concentrations en CO₂ respectives de 1400 à 1500 ppm et au-delà de 1800 ppm. Les résultats en dessous de 1000 ppm étaient moins concordants. À noter par ailleurs que cinq des études analysées n'identifient pas d'associations statistiquement significatives entre les concentrations en CO₂ (allant de 500 à 5000 ppm) et les performances cognitives ou la performance scolaire des élèves (20). Trois d'entre elles avaient été réalisées en laboratoires. Les auteurs ont émis le postulat que cette différence pouvait être liée en partie au fait que les

facteurs de confusion, dont font partie les paramètres d'ambiance intérieure, sont contrôlés dans les études de laboratoire. Lowther *et al.* (2021) évoquent par ailleurs le manque de représentativité de ces études par rapport à la réalité, en comparaison avec celles réalisées directement en milieu scolaire. Enfin, si les associations allaient majoritairement dans le sens d'une diminution des capacités cognitives lorsque les concentrations en CO₂ augmentent, les auteurs ont souligné que la portée et la significativité de ces résultats pouvaient différer selon les fonctions cognitives étudiées et les tests utilisés pour les mesurer. Le même constat était fait dans la revue de Brink *et al.* (2020) (19).

Au-delà des résultats en faveur de l'effet de la concentration en CO₂ des salles de classe sur l'apprentissage des élèves mis en évidence dans ces études, les auteurs de celles-ci ont également souligné certaines limites et incertitudes. Parmi elles, le manque de recensement et de prise en compte des facteurs de confusion tels que les facteurs socio-économiques a été souligné, ainsi que l'absence d'études sur les effets de la concentration en CO₂ sur l'apprentissage sur le long terme. Les auteurs ont également rapporté la nécessité d'analyser les effets synergiques des paramètres d'ambiance intérieure et ce, que ce soit pour les écoles maternelles ou dans l'éducation supérieure. Des nouvelles données seraient donc à acquérir pour renforcer les connaissances sur le lien entre la concentration en CO₂ et l'apprentissage des enfants. Par ailleurs, les preuves biologiques actuellement disponibles sur l'existence d'un lien entre le CO₂ et l'apprentissage et/ou les performances recouvrent de nombreuses incertitudes et ne permettent pas de prétendre avec assurance à un effet causal. Il serait ainsi nécessaire de mieux comprendre l'impact direct du CO₂ vs. l'impact indirect reflétant plutôt l'effet d'une modification plus globale de la QAI. Enfin, les effets observés devraient également être mis au regard de ceux obtenus *via* d'autres interventions déjà appliquées au sein d'établissements scolaires pour favoriser l'apprentissage des enfants, telles que la réduction des effectifs de classe, pour pouvoir en apprécier l'importance.

ANALYSE DES MÉTA-ANALYSES ET ARTICLES INDIVIDUELS INCLUS : DISPOSE-T-ON D'UNE RELATION CONCENTRATION-RISQUE ROBUSTE ET APPLICABLE AU CONTEXTE FRANÇAIS ?

La disponibilité des relations C-R a ensuite reposé sur l'analyse des méta-analyses et études originales identifiées *via* la recherche bibliographique. Pour cela, au-delà des résultats obtenus, la qualité des études

2. Le seuil utilisé dans cette revue pour qualifier les concentrations de faibles étant de 5000 ppm. À noter que dans la revue de Brink *et al.*, le seuil de 1800 a été utilisé (24) rendant difficile les comparaisons.

a été évaluée afin de déterminer si les relations C-R pouvaient être considérées comme robustes. Leur applicabilité par rapport au contexte de notre travail a ensuite été discutée.

Ainsi, Wargocki *et al.*, dans leur méta-analyse récente, ont évalué qu'une réduction de la concentration de CO₂ de 2100 ppm à 900 ppm améliorerait de 12 % la vitesse de réalisation des tâches scolaires et de 2 % la précision d'exécution de ces tâches (18). Les auteurs ont également estimé qu'une réduction de la concentration de CO₂ de 2400 ppm à 900 ppm améliorerait de 5 % les performances aux tests et examens. Néanmoins, l'analyse de cette méta-analyse a permis de mettre en évidence plusieurs limites. Tout d'abord, les auteurs n'ont pas évalué la qualité des études incluses. Par ailleurs, il existe une forte hétérogénéité entre les études d'un point de vue méthodologique, mais aussi une diversité de définitions et de moyens d'évaluation des indicateurs sanitaires et environnementaux considérés. Or, le choix a été fait par les auteurs de quantifier la relation entre les concentrations de CO₂ et

l'apprentissage des enfants en pourcentage de changement de performance par variation de 100 ppm de la concentration en CO₂. Cette méthode de quantification ne permet pas d'obtenir des tailles d'effets standardisées qui soient comparables entre différents tests et différentes études (45, 46). Ces limites interrogent donc la robustesse des relations concentration-risque obtenues.

En considérant les études prises individuellement, la recherche bibliographique a fait ressortir une littérature peu consistante sur le sujet de l'effet du CO₂ des salles de classe sur l'apprentissage de l'enfant, avec seulement 18 études individuelles recensées depuis 2013, avant même d'avoir estimé leur robustesse. L'évaluation de ces 18 études a mis en évidence des méthodologies ainsi que des indicateurs sanitaires et environnementaux très hétérogènes.

Le Tableau 1 présente une vision globale de la qualité de chacune des catégories pour chacune des 18 études individuelles évaluées.

TABLEAU 1 | Grille d'analyse de qualité des études incluses à la suite de la recherche bibliographique

	Étude	Population	Indicateur sanitaire	Indicateur environnemental	Analyses statistiques Biais	Autres critères
Études observationnelles						
Hutter, H. P. <i>et al.</i> [2013] [30]						
Gaihre, S. <i>et al.</i> [2014] [27]						
Dorizas, P. V. <i>et al.</i> [2015] [26]						
Haverinen-Shaughnessy, U. <i>et al.</i> [2015] [29]						
Koiv, T. A. <i>et al.</i> [2015] [33]						
Barrett, P. <i>et al.</i> [2015] [24]						
Haverinen-Shaughnessy, U. <i>et al.</i> [2015] [28]						
Toftum, J. <i>et al.</i> [2015] [38]						
Toyinbo, O. <i>et al.</i> [2016] [39]						
Mendell, M. J. <i>et al.</i> [2016] [34]						
Singh, P. <i>et al.</i> [2020] [37]						
Kabirikopaei, A. <i>et al.</i> [2021] [32]						
Études expérimentales						
Wargocki, P. <i>et al.</i> [2013] [40]						
Sidorin, D. I. <i>et al.</i> [2015] [36]						
Petersen, S. <i>et al.</i> [2016] [35]						
Bogdanovica, S. <i>et al.</i> [2020] [25]						
Hviid, C. A. <i>et al.</i> [2020] [31]						
Ahmed, R. <i>et al.</i> [2022]						

et al. : et alii, signifiant « et (les) autres » en latin.

Code couleur : **Rouge** : « Qualité non satisfaisante » ; **Orange** : « Qualité modérée » ; **Vert** : « Qualité satisfaisante ».

Considérant les études observationnelles, seules trois ont été considérées comme étant globalement satisfaisantes (28, 32, 34). Ces trois études, menées aux États-Unis sur des échantillons d'environ 3000 à 5000 enfants, sont de type observationnel et présentent un design interindividuel. Leur indicateur sanitaire est défini par la performance scolaire, évaluée à partir de résultats aux examens nationaux ou de fin d'année, tandis que l'indicateur environnemental considéré est le débit de ventilation. La description de ces études et les résultats mis en évidence par les auteurs sont résumés en Annexe 3.

Les associations exposées par ces auteurs montrent en majorité un lien significatif entre une augmentation des débits de ventilation et une augmentation des scores obtenus aux examens. Haverinen-Shaughnessy et Shaughnessy par exemple ont évalué à 0,5 % l'augmentation du score moyen en mathématiques pour chaque augmentation de 1 l/s/personne du débit de ventilation dans la gamme 0,9-7,1 l/s/personne (28). Des résultats similaires ont été observés pour les scores en lecture et sciences. Mendell *et al.* (2016) ont pour leur part observé des associations significatives entre les débits de ventilation et les scores aux examens uniquement pour les examens d'anglais. Pour les mathématiques, les résultats étaient non significatifs lorsque les trois districts étudiés étaient considérés conjointement. Kabirikopaei *et al.* (2021) ont observé des scores aux tests de lecture plus élevés lorsque les débits de ventilation étaient augmentés, et notamment en automne (32). L'association avec les scores en mathématiques était non significative. Néanmoins, il est à noter que Mendell *et al.* (2016) et Haverinen-Shaughnessy et Shaughnessy (2015) étudient des débits de ventilation allant jusqu'à 7,1 l/s par personne, tandis que Kabirikopaei *et al.* (2021) considèrent des rangs de débits de ventilation allant jusqu'à 16 l/s par personne au printemps et jusqu'à 21 l/s par personne en automne (28, 32, 34).

Parmi les études expérimentales, seule l'étude d'Ahmed *et al.* a été jugée globalement satisfaisante (23). Dans cette étude, 499 étudiantes d'une université d'Arabie saoudite ont été exposées à différentes conditions de débit de ventilation et de température. Durant chaque période d'exposition, les étudiantes ont été amenées à réaliser des tests psychologiques visant à évaluer différentes fonctions cognitives. Les résultats ont permis de mettre en évidence des effets significatifs en lien avec la précision d'exécution des tâches et la rapidité d'exécution entre les plus fortes concentrations en CO₂ (1000 et 1800 ppm) par rapport au niveau de référence (600 ppm). À cette étude s'ajoutent celles identifiées dans le cadre du rapport d'expertise collective de l'Anses relatif aux concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et ses effets (7). Cet avis de l'Anses

répondait à une saisine de la Direction générale de la prévention des risques et de la Direction générale de la santé du 1^{er} mars 2012, dont la requête était de fournir des valeurs de concentrations en CO₂ dans l'air intérieur des établissements recevant du public (ERP) qui seraient associées à des effets sur la santé sur la base d'une revue de la littérature. La recherche bibliographique menée sur la période 2000-2012 a permis d'identifier trois études expérimentales portant sur l'effet du CO₂ ou du débit de ventilation des environnements scolaires sur la performance des enfants. Ces trois études, dont deux du même auteur, sont de type expérimentales et mettent en évidence des associations significatives entre le débit de ventilation et le résultat à certains tests pour des niveaux de CO₂ variant de 900 ppm à 1 100 ppm (47-49).

L'analyse réalisée a permis d'identifier des études individuelles présentant une qualité jugée globalement satisfaisante mais leur nombre reste limité. Par ailleurs, l'existence de deux types d'approches bien distinctes (observationnelles vs. expérimentales) et l'hétérogénéité des indicateurs sanitaires sur lesquels reposent les études compliquent l'analyse et la cohérence des résultats obtenus. En termes d'applicabilité, les trois études observationnelles retenues dans le cadre de cette mise à jour des connaissances ont été menées aux États-Unis. Or, il est recommandé dans le cadre des ÉQIS de privilégier les études incluant autant que possible des populations françaises ou européennes (50). Cela est d'autant plus important au regard de notre problématique, que la plupart des écoles aux États-Unis sont équipées de ventilation mécanique, alors que plus de 70 % des écoles françaises ne présentent aucun système de ventilation (2). Plus globalement, les différences entre les États-Unis et la France en termes de systèmes scolaires, rythme et bâtis renforcent la question de l'applicabilité de ces études au contexte français. Concernant les études expérimentales, seule une nouvelle étude jugée comme globalement satisfaisante a été identifiée par rapport à l'analyse de la littérature réalisée dans le cadre du rapport Anses. Cette étude ayant été réalisée en Arabie saoudite, elle ne peut pas non plus être considérée comme applicable au contexte français. Par ailleurs, on peut s'interroger sur la pertinence de dériver des relations concentration-risque d'études en conditions contrôlées pour un croisement avec des mesures en conditions réelles. De ce fait, les conclusions de l'Anses sur le manque de disponibilité d'études épidémiologiques sur l'impact du CO₂ sur l'apprentissage des enfants en milieu scolaire suffisamment robustes et représentatives pour que leurs données soient appliquées au contexte des écoles françaises restent d'actualité.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ces dernières années, plusieurs études ont mis en évidence que l'augmentation des concentrations en CO₂ dans les salles de classe était associée à une diminution des performances cognitives et scolaires des élèves. Ces résultats viennent ainsi s'ajouter aux précédentes études montrant le bénéfice d'un meilleur renouvellement de l'air dans les établissements scolaires sur la santé de l'enfant, notamment l'asthme (8). Ces résultats constituent donc un argument supplémentaire pour convaincre les différents acteurs, dont les enseignants, de l'importance de l'amélioration du renouvellement de l'air dans les établissements scolaires. L'entretien des systèmes de ventilation et les gestes d'aération sont en effet des leviers d'actions importants pour améliorer la qualité de l'air des salles de classe. L'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) propose en ce sens dans le cadre du programme Ecol'air des fiches actions précisant des solutions pratiques pour améliorer la qualité de l'air intérieur (51). Par ailleurs, l'évaluation annuelle des moyens d'aération des bâtiments telle que prévue dans le nouveau dispositif de surveillance de la qualité de l'air dans les établissements recevant du public, et incluant notamment la mesure à lecture directe de la concentration en CO₂ de l'air intérieur, devrait permettre d'améliorer la situation dans les établissements scolaires. Ce travail fait néanmoins ressortir qu'en l'état des connaissances, il semble difficile d'envisager la réalisation de premières ÉQIS sur le lien entre la concentration en CO₂ et l'apprentissage de l'enfant dans le contexte français. En effet, les études disponibles et leur hétérogénéité rendent

difficile l'identification d'une relation C-R robuste et applicable. Par ailleurs, la nature causale de la relation entre CO₂ et apprentissage n'est pas totalement établie. Des incertitudes persistent notamment sur les mécanismes d'action et la part attribuable au CO₂ dans les effets observés.

Afin de pouvoir quantifier l'influence du renouvellement d'air sur l'apprentissage des enfants, il est donc nécessaire d'acquérir des données supplémentaires. Il serait pour cela pertinent de considérer l'ensemble des paramètres d'ambiance intérieure (CO₂ ou taux de renouvellement d'air, confort thermique, luminosité, acoustique, humidité relative) afin d'orienter les pouvoirs publics sur les recommandations d'actions à mener pour améliorer de manière globale la qualité des environnements scolaires. Le confort thermique apparaît comme étant le facteur d'ambiance intérieure le plus étudié, conjointement au CO₂ ou au débit de ventilation (19, 21) et il a été suggéré des effets synergiques entre ces paramètres. Par ailleurs, il a été récemment démontré que certains polluants issus du trafic routier pouvaient également affecter les performances cognitives des individus (52). Ces questions de gestion des conditions d'ambiance intérieure doivent donc être considérées dans leur globalité, en cohérence avec l'environnement proche, afin de proposer des solutions adaptées pour garantir des établissements scolaires favorables à la santé et à l'apprentissage. Cela semble d'autant plus important dans le contexte actuel de changement climatique dans la mesure où l'impact des températures semble être supérieur à celui observé pour la concentration en CO₂, (18, 53).

ANNEXE

ANNEXE 1 | Concepts et mots-clés utilisés pour construire les requêtes

Concept principal	Mots clés (Scopus, PubMed)	Mots clés MeSH (PubMed)
Qualité de l'air intérieur	<i>Ventilat*</i> , <i>CO₂</i> , <i>carbon dioxide</i> , <i>air quality</i> , <i>air pollutant</i> , <i>indoor</i> , <i>classroom</i>	<i>Carbon Dioxide</i> <i>Ventilation</i> <i>Air Pollution</i> , <i>Indoor</i>
Apprentissage	<i>Cognit*</i> , <i>learning</i> , <i>schoolwork</i> , <i>school work</i> , <i>reaction time</i> , <i>attention</i> , <i>memory</i> , <i>accuracy</i> , <i>academic/student/school/children/</i> <i>pupil performance/achievement</i> , <i>psychological test</i> , <i>IQ</i> , <i>standard test</i> , <i>test score</i> , <i>test result</i>	<i>Schools</i> <i>Educational Measurement</i> <i>Psychological tests</i>
Milieu scolaire	<i>Student</i> , <i>school</i> , <i>pupil</i> , <i>college</i> , <i>children</i> , <i>kindergarten</i>	<i>Schools</i>

CO₂: *carbon dioxide*;
IQ: *intelligence quotient*;
MeSH: *medical subject headings*;
*: Toutes fins de mots possibles.

ANNEXE 2 | Grille de lecture de la qualité des études jugées éligibles

2a. Études observationnelles

	Critère de qualité	Notation
Étude	Type d'étude	
	Étude transversale	0
	Étude longitudinale	2
	Échelle géographique de l'étude	
	Locale/Régionale	0
	Nationale	1
	Objectif(s) et/ou hypothèse(s) de recherche clairement exposé(s)	
	Non	0
	Oui mais pas assez détaillé(s) ou clair(s)	1
Oui	2	
	TOTAL	/5
Population	Effectif d'élèves	
	NR ou < 500	0
	500-2 000	1
	> 2 000	2
	Nombre d'écoles	
	L'étude a été réalisée sur une seule école	0
	L'étude a été réalisée sur plusieurs écoles différentes	2
	Caractéristiques des participants à l'étude	
	L'étude ne recense pas les informations principales sur les participants	0
	L'étude recense les informations principales sur les participants (effectif, âge, sexe, niveau scolaire, ...)	1
	L'étude recense les informations principales sur les participants (effectif, âge, sexe, niveau scolaire, ...) et d'autres informations supplémentaires (critères sociodémographiques, spécificités de la population (pathologies, ...))	2
Diversité au sein de l'échantillon		
Les individus/écoles inclus au sein de l'échantillon ne présentent pas ou peu de diversité	0	
Les individus/écoles au sein de l'échantillon couvrent une diversité de profils (différences de catégories sociodémographiques, type d'écoles...)	1	
	TOTAL	/7
Indicateur sanitaire	Méthode d'évaluation (construction de l'indicateur plus ou moins détaillée)	
	Peu détaillée	0
	Bien détaillée (avec moment et durée des tests précisés...)	1
	Répétition de la mesure	
	Ponctuelle	0
	Répétée*	2
	Moyen de mesure de l'apprentissage	
	Tests indépendants (mis en œuvre dans le cadre de l'étude ou contrôle continu)	0
	Tests standardisés (test non spécifique à l'évaluation de l'indicateur sanitaire ou aux fonctions cognitives étudiées mais suivant une procédure systématique avec des questions, conditions d'administrations et procédures de notation prédéterminés pour une population donnée, comme les évaluations nationales) OU Tests validés (tests classiquement utilisés et reconnus pour évaluer l'indicateur sanitaire et les fonctions cognitives étudiées, comme les tests psychologiques)	2
	Nombre d'items/test	
	Non renseigné (si test non standardisé) ou Insuffisant (<10)	0
Suffisant (>=10)	2	
	TOTAL	/7

Indicateur environnemental	Méthode d'évaluation (construction de l'indicateur d'exposition plus ou moins détaillée)	
	Peu détaillée	0
	Bien détaillée (précision du moment, de la durée et des conditions de la mesure)	1
	Données de mesure de l'exposition	
	Non représentatives de l'exposition réelle des élèves	0
	Représentatives de l'exposition réelle des élèves	1
	Pertinence au regard des objectifs d'étude (durée de la mesure d'exposition, prise en considération de la variabilité de l'exposition dans le temps dans les analyses)	
	Prise en compte et justification NR ou insuffisante des choix relatifs à la mesure d'exposition	0
	Prise en compte et justification pertinente des choix relatifs à la mesure d'exposition	2
	Méthode de collecte de données de l'indicateur environnemental	
	Mesures subjectives (tenue d'un journal de bord des enseignants ou personnels scolaires sur les modes de ventilation, ...)	0
	Mesures objectives (à partir de capteurs sur le lieu d'exposition)	2
TOTAL	/6	
Analyses statistiques et biais	Méthode d'analyses de l'association entre indicateur sanitaire et environnemental	
	Différences ou moyennes entre les données d'indicateurs sanitaires selon l'indicateur environnemental sans réalisation de tests statistiques	0
	Corrélation	1
	Association à partir de modèles, avec prise en compte d'autres facteurs	2
	Pour les études avec analyse à partir de modèles : Modèles statistiques	
	Absence de prise en compte de la corrélation au sein des individus (effet aléatoire, autocorrélation spatiale...)	0
	Prise en compte de la corrélation au sein des individus (effet aléatoire, autocorrélation spatiale...)	2
	Facteurs de confusion	
	Les principaux facteurs de confusion/modification connus dans la littérature n'ont pas été pris en compte	0
	Les principaux facteurs de confusion/modification connus dans la littérature ont été pris en compte	2
	Justification de la période d'étude (saison, température...) au regard de l'objectif	
	Période d'étude non renseignée ou non justifiée	0
	Justifiée	2
	Autres facteurs pouvant influencer les résultats aux tests de mesure d'apprentissage (fatigue, baisse de concentration au cours de la journée...)	
	NR ou non pris en compte	0
	Pris en compte	2
	Biais engendrés par le design de l'étude	
Le design inter-individuel de l'étude peut engendrer des biais liés à la diversité des caractéristiques entre les élèves	0	
Le design intra-individuel de l'étude limite les biais liés à la diversité des caractéristiques entre les élèves	1	
TOTAL	/9 (ou /11 si modèles)	
Autres critères pris en compte	Adéquation des résultats aux objectifs de l'étude	
	Les résultats de l'étude ne répondent pas complètement aux objectifs (incluant un risque de surinterprétation)	0
	Les résultats de l'étude répondent complètement aux objectifs	1
	Article revu par les pairs	
	Non	0
	Oui	1
	Impact factor	
< 5	0	
≥ 5	1	
TOTAL	/3	

NR : Non renseigné ;

X : Étude non concernée par la question ;

* : L'échelle de temps de la répétition est différente selon le type de test utilisé pour évaluer l'indicateur sanitaire (tests psychologiques et tâches scolaires répétés sur des intervalles de temps courts vs. résultats d'examens ou d'évaluations nationales répétés à des intervalles de temps longs).

2b. Études expérimentales retenues à partir de la recherche bibliographique

	Critère de qualité	Notation
Étude	Objectif(s) et/ou hypothèse(s) de recherche clairement exposé(s)	
	Non	0
	Oui mais pas assez détaillé(s) ou clair(s)	1
	Oui	2
	Design croisé (permettant de s'affranchir de certains effets [fatigue, localisation de l'école, ...])	
	Non	0
	Oui, mais pas sur tous les facteurs expérimentaux	1
	Oui, sur tous les facteurs expérimentaux	2
	Design en aveugle	
	L'objectif et/ou le type d'exposition n'était à l'aveugle ni pour les participants, ni pour les investigateurs	0
	Simple aveugle	1
	Double aveugle	2
	Randomisation	
	Non	0
	Oui	2
	Méthode d'intervention	
	Peu détaillée	0
	Bien détaillée	2
Représentativité des scénarios d'intervention		
Les scénarios d'intervention ne sont pas représentatifs de l'exposition que pourraient subir les élèves dans les salles de classe françaises	0	
Les scénarios d'intervention sont représentatifs de l'exposition que pourraient subir les élèves dans les salles de classe françaises	1	
TOTAL	/11	
Population	Effectif d'élèves	
	Non renseigné ou < 100	0
	≥ 100	2
	Nombre d'écoles	
	L'étude a été réalisée sur une seule école	0
	L'étude a été réalisée sur plusieurs écoles différentes	2
	Caractéristiques des participants à l'étude	
	L'étude ne recense pas les informations principales sur les participants	0
	L'étude recense les informations principales sur les participants (effectif, âge, sexe, niveau scolaire, ...)	1
	L'étude recense les informations principales sur les participants (effectif, âge, sexe, niveau scolaire, ...) et d'autres informations supplémentaires (critères sociodémographiques, spécificités de la population (pathologies, ...))	2
	Diversité de l'échantillon	
Peu ou pas de diversité des caractéristiques des individus/des écoles au sein de l'échantillon (critères sociodémographiques, types d'écoles...) limitant l'extrapolation des résultats à la population cible (élèves français scolarisés entre la maternelle et les études supérieures)	0	
Diversité des caractéristiques des individus au sein de l'échantillon (critères sociodémographiques, types d'écoles...) favorable à l'extrapolation des résultats à la population cible (élèves français scolarisés entre la maternelle et les études supérieures)	1	
TOTAL	/7	

Indicateur sanitaire	Méthode d'évaluation (construction de l'indicateur plus ou moins détaillée)	
	Peu détaillée	0
	Bien détaillée (avec moment et durée d'exposition précisées...)	1
	Répétition de la mesure	
	Ponctuelle	0
	Répétée*	2
	Moyen de mesure de l'apprentissage	
	Tests indépendants (mis en œuvre dans le cadre de l'étude)	0
	Tests standardisés (test non spécifique à l'évaluation de l'indicateur sanitaire ou aux fonctions cognitives étudiées mais suivant une procédure systématique avec des questions, conditions d'administrations et procédures de notation prédéterminés pour une population donnée, comme les évaluations nationales) OU Tests validés (tests classiquement utilisés et reconnus pour évaluer l'indicateur sanitaire et les fonctions cognitives étudiées, comme les tests psychologiques)	2
	Nombre d'items/test	
	Non renseigné (si test non standardisé) ou insuffisant (< 10)	0
Suffisant (> = 10)	2	
TOTAL	/7	
Indicateur environnemental	Méthode d'évaluation (construction de l'indicateur d'exposition plus ou moins détaillée)	
	Peu détaillée	0
	Bien détaillée (précision du moment, de la durée et des conditions de la mesure)	1
	Pertinence au regard des objectifs d'étude (durée de la mesure d'exposition, prise en considération de la variabilité de l'exposition dans le temps dans les analyses)	
	Prise en compte et justification NR ou insuffisante des choix relatifs à la mesure d'exposition	0
	Prise en compte et justification pertinente des choix relatifs à la mesure d'exposition	2
TOTAL	/3	
Analyses statistiques et biais	Méthode d'analyse de l'association entre indicateur sanitaire et environnemental	
	Différences ou moyennes entre les données d'indicateurs sanitaires selon l'indicateur environnemental sans réalisation de tests statistiques OU Corrélation avec des tests statistiques non adaptés à l'association à évaluer	0
	Corrélation avec des tests statistiques adaptés à l'association à évaluer	2
	Réponse au principe de comparaison (comparaison d'un groupe par rapport à un groupe de référence ou comparaison à un moment T_1 par rapport à un moment initial T_0)	
	Non	0
	Oui	1
	Justification de la période d'étude (saison, température...) au regard de l'objectif	
	Période d'étude NR ou non justifiée	0
	Justifiée	2
	Prise en compte de facteurs pouvant influencer les résultats aux tests de mesure d'apprentissage (fatigue, baisse de concentration au cours de la journée...)	
	NR ou non pris en compte	0
	Pris en compte (phase d'adaptation aux tests d'apprentissage, design spécifique d'étude, ...)	2
	Biais engendrés par le design de l'étude	
	Le design inter-individuel de l'étude peut engendrer des biais liés à la diversité des caractéristiques entre les élèves	0
	Le design intra-individuel de l'étude limite les biais liés à la diversité des caractéristiques entre les élèves	1
Méthode d'évaluation de l'indicateur sanitaire		
L'évaluation de l'indicateur sanitaire diffère entre les différents scénarios d'intervention	0	
L'évaluation de l'indicateur sanitaire est réalisée de la même manière pour les différents scénarios d'intervention	1	
TOTAL	/9	

Autres critères pris en compte	Adéquation des résultats aux objectifs de l'étude	
	Les résultats de l'étude ne répondent pas complètement aux objectifs (incluant un risque de surinterprétation)	0
	Les résultats de l'étude répondent complètement aux objectifs	1
	Article revu par les pairs	
	Oui	1
	Impact factor	
	< 5	0
	≥ 5	1
	TOTAL	/3

NR : Non renseigné ;

X : Étude non concernée par la question ;

* : L'échelle de temps de la répétition est différente selon le type de test utilisé pour évaluer l'indicateur sanitaire (tests psychologiques et tâches scolaires répétés sur des intervalles de temps courts vs. résultats d'examens ou d'évaluations nationales répétés à des intervalles de temps longs).

ANNEXE 3 | Tableau des caractéristiques des études originales jugées éligibles

	N (/18*)	(%)
Milieu d'étude		
Localisation géographique		
Europe	12	(67)
<i>dont Danemark</i>	4	(22)
Hors Europe	6	(33)
<i>dont États-Unis</i>	4	(22)
Type d'école		
Écoles maternelles	2	(11)
Écoles élémentaires	13	(72)
Écoles secondaires	4	(22)
Universités	1	(6)
Autres (écoles de base, NR...)	3	(17)
Méthodologie		
Type d'étude		
Étude expérimentale	6	(33)
<i>dont design croisé</i>	3	(17)
Étude observationnelle	12	(67)
<i>Étude transversale</i>	10	(56)
<i>Étude longitudinale</i>	3	(17)
Design d'étude		
Études intra-individuelles	4	(22)
Études interindividuelles	9	(50)
Études intra-individuelles et interindividuelles	5	(28)
Indicateurs		
Définition de l'apprentissage		
Performance cognitive	10	(56)
Performance scolaire	8	(44)
Outils de mesure de l'apprentissage		
Tests cognitifs	6	(33)
Tests scolaires	3	(17)
Résultats aux examens	9	(50)
<i>Évaluations nationales</i>	6	(33)
<i>Contrôle continu</i>	3	(17)
Définition de l'indicateur environnemental		
Concentration en CO ₂ (ppm)	11	(61)
Débit de ventilation (L/s par personne)	8	(44)
Modes de ventilation (inexistante, naturelle, mécanique)	3	(17)
Évaluation de l'indicateur environnemental		
Moyenne des concentrations en CO ₂	7	(39)
Débit de ventilation estimé à partir des concentrations en CO ₂	6	(33)
Autre (NR, débit d'air (L/s), etc.)	6	(33)
Autres paramètres environnementaux étudiés		
Température/confort thermique	13	(72)
Luminosité	3	(17)
Acoustique	3	(17)
Humidité relative	4	(22)
Poussières (déposées, en suspension)	2	(11)
Particules (PM _{2,5} ; PM ₁₀)	4	(22)
Autres polluants (CO(S)V, O ₃ , NO ₂)	2	(11)
Aucun	3	(17)
Analyses statistiques		
Méthode d'analyse des associations		
Différences (de résultats aux tests selon l'exposition)	3	(17)
Corrélation	6	(33)
Associations à partir de modèles	8	(44)
Autre (moyenne de résultats aux tests selon l'exposition)	1	(6)
Prise en compte de facteurs de confusion/modification		
Pris en compte	10	(56)

CO(S)V : Composés organiques (semi) volatils ;

L/s : Litres par seconde ;

N : effectif d'études ;

NO₂ : Dioxyde d'azote ;

NR : Non renseigné ;

O₃ : ozone ;PM_{2,5} : particules fines ;PM₁₀ : particules grossières ;

* : les totaux par catégories sont parfois supérieurs à n=18 et 100 % car certaines études répondent à plusieurs critères.

ANNEXE 4 | Description des 4 études incluses suite à l'analyse de robustesse

Auteur (date)	Caractéristiques générales	Indicateur sanitaire	Indicateur environnemental	Résultats principaux
Études observationnelles				
Haverinen-Shaughnessy, U. et Shaughnessy, R. J. (2015)	Étude transversale interindividuelle 140 classes de 70 écoles élémentaires 3109 enfants de 10 ans	Résultats à des tests nationaux standardisés (année de l'étude et année précédente)	Débit de ventilation (L/s) estimé à partir des concentrations intérieures en CO ₂ . Mesures de CO ₂ réalisées pendant une semaine sur la période janvier-avril dans chaque salle de classe (fenêtres et portes fermées – système de chauffage, ventilation et/ou air conditionné allumé).	- Sens de l'association : Association significative entre débit de ventilation et scores en mathématiques (+ 0,5 % quand le débit de ventilation \nearrow de 1 l/s par personne). Résultat toujours significatif après ajustement sur les résultats de l'année passée. Coefficient : 6,7 [1.0 ; 12.4] . - Gamme de débit pour laquelle l'association est retrouvée : 0,9 à 7,1 l/s par personne. Résultats similaires pour les moyennes des scores en lecture et en sciences (16.0 [8.9 ; 23.1] et 11.1 [3.0 ; 19.1] respectivement).
Mendell, M. J. et al. (2016)	Étude longitudinale prospective inter-individuelle 150 classes dans 27 écoles issues de 3 districts différents 5046 et 4544 enfants de 8 à 11 ans	Scores aux examens (tests STAR)	Débit de ventilation (L/s) estimé à partir des concentrations extérieures et intérieures en CO ₂ et de la génération de CO ₂ attendue au regard du nombre d'enfants. Prise en compte du débit moyen dans les 30 jours précédant l'examen et du nombre de dépassement d'un débit de référence (4.7 et 7,1 l/s-personne correspondant au débit recommandé pour les salles de classe en fonction des districts d'appartenance). Mesure de la concentration en CO ₂ en temps réel dans chaque classe.	- Sens des associations : → Association significative entre débits de ventilation des 30 derniers jours et scores en anglais . Coefficient (districts étudiés de manière combinée) : 5,95 [1.49 ; 10.42] . → Association non significative pour les mathématiques sauf pour 2/3 districts lorsqu'étudiés séparément. - Rang pour lesquels l'association est retrouvée : 2,7 à 7,1 l/s par personne.
Kabirikopaei, A. et al. (2021)	Étude transversale inter et intra individuelle 220 classes dans 39 écoles élémentaires et secondaires (ventilation mécanique présente dans toutes écoles) 5000 enfants de 8 à 17 ans	Scores aux examens durant l'année scolaire pour 4 degrés différents (+ prise en compte du score obtenu à l'examen final pour ajustement)	Impact des différents systèmes de ventilation. Débit de ventilation estimé à partir des concentrations intérieures en CO ₂ . Mesure de la concentration en CO ₂ pendant 36 heures consécutives durant le printemps, l'automne et l'hiver.	- Sens des associations : → Association significative entre débit de ventilation et scores de mathématiques mais uniquement à l'automne. Coefficient : 0,643 (std 0.257) . → Association <u>négative</u> significative entre débit de ventilation et scores de lecture au printemps mais interaction significative entre le pourcentage d'élèves à statut surdoué dans la classe. Association devient positive avec augmentation du pourcentage d'élèves surdoués dans la classe. - Rang pour lesquels les associations sont retrouvées : → Automne : 1,685 à 21,500 L/s par personne. → Printemps : 1,652 à 16,011 L/s par personne.
Études expérimentales				
Ahmed, R. et al. (2022)	Essai d'intervention en simple aveugle 499 étudiantes de 16 à 23 ans	Résultats à des tests psychologiques (Batterie BARS)	Modification des débits de ventilation pour atteindre différentes concentrations en CO ₂ (600, 1000 et 1800 ppm) ainsi que température intérieure. Exposition à chaque condition testée (N=9) durant cinq semaines.	- Sens des associations : → Effets significatifs pour la précision d'exécution des tâches avec les différents tests réalisés (tâches d'apprentissage et tâches complexes). Interaction observée avec la température. → Résultats similaires pour la rapidité d'exécution .

et al. : et alii ;

L/s : Litre par seconde ;

p : Niveau de signification du test statistique effectué ;

\nearrow : Augmente/augmentation ;

+ : Statistiquement significatif ;

- : Statistiquement non significatif.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Mandin C, Derbez M, Ramalho O, Sivanantham S, Gregoire A, Dassonville C. Renouvellement de l'air insuffisant dans les écoles : un constat établi de longue date. *Bull Epidemiol Hebd.* 2022;19-20:349-53.
- [2] Dassonville C, Gregoire A, Sivanantham S, Achille J, Bertheineau B, Cochet V, *et al.* Qualité de l'air intérieur et contamination des poussières déposées au sol dans les écoles en France. Champs-sur-Marne: Observatoire de la qualité de l'air intérieur; 2019. Contract No.: Rapport référencé CSTB-OQAI/2018-125.
- [3] Guillam MT, Gallien J, Ezannic J, Segala C, Riberon J, Derbez M. Enquête descriptive nationale sur les écoles et les crèches et leurs pratiques d'aération. 2011. Contract No.: Rapport n° ESE/2011-113.
- [4] Annesi-Maesano I, Hulin M, Lavaud F, Raheison C, Kopferschmitt C, de Blay F, *et al.* Poor air quality in classrooms related to asthma and rhinitis in primary schoolchildren of the French 6 Cities Study. *Thorax.* 2012;67(8):682-8.
- [5] Fisk WJ. The ventilation problem in schools: literature review. *Indoor Air.* 2017;27(6):1039-51.
- [6] Mendell MJ, Heath GA. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air.* 2005;15(1):27-52.
- [7] Anses. Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et effets sur la santé. Maisons-Alfort: Anses; 2013.
- [8] Hulin M, Bidondo M, Delezire P, Sivanantham S, Wagner V, Dassonville C, *et al.* Évaluation quantitative d'impact sur la santé (EQIS) de la qualité de l'air dans et autour des établissements scolaires. Évaluation de la pertinence et de la faisabilité et première étude nationale. Saint-Maurice: Santé publique France; 2023.
- [9] Corso M, Lagarrigue R, Medina S, Blanchard M, Host S, Pascal M, *et al.* Pollution atmosphérique. Guide pour la réalisation d'une évaluation quantitative des impacts sur la santé (ÉQIS). ÉQIS avec une exposition mesurée. Santé publique France; 2019.
- [10] Riberon J, Ramalho O, Derbez M, Bertheineau B, Wyart G, Kirchner S, *et al.* Indice de confinement de l'air intérieur : des écoles aux logements. *Pollution Atmospherique.* 2016.
- [11] ASTM. ASTM D6245-12: Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation. Pennsylvania, Etats-Unis: ASTM; 2012.
- [12] Liberati A, Altman DG, Tetzlaff J, Mulrow C, Gotzsche PC, Ioannidis JP, *et al.* The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration. *BMJ.* 2009;339:b2700.
- [13] Pallot A, Rostagno S. AMSTAR-2 : traduction française de l'échelle de qualité méthodologique pour les revues de littérature systématiques. *Kinesither Rev.* 2020;20(219).
- [14] Durou A. Effets à court et long terme de la pollution atmosphérique extérieure sur les troubles neurologiques : opportunité pour la réalisation d'une évaluation quantitative d'impact sanitaire. Saint-Maurice: Santé publique France; 2021.
- [15] Anaes. Guide d'analyse de la littérature et gradation des recommandations. Paris: Anaes; 2000.
- [16] Cucherat M. Guide de lecture critique d'un essai thérapeutique. Thérapeutique M, editor 2006.
- [17] Galna B, Peters A, Murphy AT, Morris ME. Obstacle crossing deficits in older adults: a systematic review. *Gait Posture.* 2009;30(3):270-5.
- [18] Wargocki P, Porras-Salazar JA, Contreras-Espinoza S, Bahnfleth W. The relationships between classroom air quality and children's performance in school. *Building and Environment.* 2020;173.
- [19] Brink HW, Loomans M, Mobach MP, Kort HSM. Classrooms' indoor environmental conditions affecting the academic achievement of students and teachers in higher education: A systematic literature review. *Indoor Air.* 2021;31(2):405-25.
- [20] Lowther SD, Dimitroulopoulou S, Foxall K, Shrubsole C, Cheek E, Gadeberg B, *et al.* Low level carbon dioxide indoors—a pollution indicator or a pollutant? A health-based perspective. *Environments - MDPI.* 2021;8(11).
- [21] Manca S, Cerina V, Tobia V, Sacchi S, Fornara F. The effect of school design on users' responses: A systematic review (2008-2017). *Sustainability [Switzerland].* 2020;12(8).
- [22] Du B, Tandoc MC, Mack ML, Siegel JA. Indoor CO₂ concentrations and cognitive function: A critical review. *Indoor Air.* 2020.
- [23] Ahmed R, Mumovic D, Bagkeris E, Ucci M. Combined effects of ventilation rates and indoor temperatures on cognitive performance of female higher education students in a hot climate. *Indoor Air.* 2022;32(2).
- [24] Barrett P, Davies F, Zhang Y, Barrett L. The impact of classroom design on pupils' learning: Final results of a holistic, multi-level analysis. *Building and Environment.* 2015;89:118-33.
- [25] Bogdanovica S, Zemitis J, Bogdanovics R. The effect of CO₂ concentration on children's well-being during the process of learning. *Energies.* 2020;13(22).
- [26] Dorizas PV, Assimakopoulos MN, Santamouris M. A holistic approach for the assessment of the indoor environmental quality, student productivity, and energy consumption in primary schools. *Environ Monit Assess.* 2015;187(5):259.
- [27] Gaihre S, Semple S, Miller J, Fielding S, Turner S. Classroom carbon dioxide concentration, school attendance, and educational attainment. *J Sch Health.* 2014;84(9):569-74.
- [28] Haverinen-Shaughnessy U, Shaughnessy RJ. Effects of Classroom Ventilation Rate and Temperature on Students' Test Scores. *PLoS One.* 2015;10(8):e0136165.
- [29] Haverinen-Shaughnessy U, Shaughnessy RJ, Cole EC, Toyinbo O, Moschandreas DJ. An assessment of indoor environmental quality in schools and its association with health and performance. *Building and Environment.* 2015;93(P1):35-40.

- [30] Hutter HP, Haluza D, Piegler K, Hohenblum P, Frohlich M, Scharf S, *et al.* Semivolatile compounds in schools and their influence on cognitive performance of children. *Int J Occup Med Environ Health.* 2013;26(4):628-35.
- [31] Hviid CA, Pedersen C, Dabelsteen KH. MF: A field study of the individual and combined effect of ventilation rate and lighting conditions on pupils' performance. *Building and Environment.* 2020;171.
- [32] Kabirikopaei A, Lau J, Nord J, Bovaird J. Identifying the K-12 classrooms' indoor air quality factors that affect student academic performance. *Science of the Total Environment.* 2021;786.
- [33] Koiv TA, Mikola A, Saar A, Silm G. The indoor climate and students' learning performance in schools. *WIT Transactions on Ecology and the Environment.* 2015;199(1):287-94.
- [34] Mendell MJ, Eliseeva EA, Davies MM, Lobscheid A. Do classroom ventilation rates in California elementary schools influence standardized test scores? Results from a prospective study. *Indoor Air.* 2016;26(4):546-57.
- [35] Petersen S, Jensen KL, Pedersen AL, Rasmussen HS. The effect of increased classroom ventilation rate indicated by reduced CO₂ concentration on the performance of schoolwork by children. *Indoor Air.* 2016;26(3):366-79.
- [36] Sidorin DI. Dynamics of carbon dioxide concentrations in the air and its effect on the cognitive ability of school students. *Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics.* 2015;51(8):871-9.
- [37] Singh P, Arora R, Goyal R. Classroom ventilation and its impact on concentration and performance of students: Evidences from air-conditioned and naturally ventilated schools of Delhi. *Lecture Notes in Civil Engineering*2020. p. 125-37.
- [38] Toftum J, Kjeldsen BU, Wargocki P, Menå HR, Hansen EMN, Clausen G. Association between classroom ventilation mode and learning outcome in Danish schools. *Building and Environment.* 2015;92:494-503.
- [39] Toyinbo O, Shaughnessy R, Turunen M, Putus T, Metsämuuronen J, Kurnitski J, *et al.* Building characteristics, indoor environmental quality, and mathematics achievement in Finnish elementary schools. *Building and Environment.* 2016;104:114-21.
- [40] Wargocki P, Wyon DP. Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment.* 2013;59:581-9.
- [41] Kaida K, Takahashi M, Akerstedt T, Nakata A, Otsuka Y, Haratani T, *et al.* Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables. *Clin Neuophysiol.* 2006;117(7):1574-81.
- [42] Zhang X, Wargocki P, Lian Z, Thyregod C. Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance. *Indoor Air.* 2017;27(1):47-64.
- [43] Sliwka U, Krasney J, Simon S, Schmidt P, Noth J. Part one: Effects of sustained low-level elevations of carbon dioxide on cerebral blood flow and autoregulation of the intracerebral arteries in humans. *Aviat Sp Environ Med.* 1998;69(3):299-306.
- [44] Stankovic A, Alexander D, Oman C, Schneiderman J. A review of cognitive and behavioral effects of increased carbon dioxide exposure in humans. *NASA Technical Paper.* 2016.
- [45] Cook C. Clinimetrics Corner: Use of Effect Sizes in Describing Data. *Journal of Manual & Manipulative Therapy.* 2008;16(3):54E-7E.
- [46] Magnusson K. Interpreting Cohen's d effect size: An interactive visualization: *R Psychologist*; 2022 [Available from: <https://rpsychologist.com/cohend/>]
- [47] Twardella D, Matzen W, Lahrz T, Burghardt R, Spegel H, Hendrowarsito L, *et al.* Effect of classroom air quality on students' concentration: results of a cluster-randomized cross-over experimental study. *Indoor Air.* 2012;22(5):378-87.
- [48] Wargocki P, editor *Improving indoor air quality improves the performance of office work and schoolwork*2007.
- [49] Wargocki P, Wyon DP. The effects of moderately raised classroom temperatures and classroom ventilation rate on the performance of schoolwork by children (RP-1257). *HVAC and R Research.* 2007;13(2):193-220.
- [50] Corso M, Lagarrigue R, Medina S. *Pollution atmosphérique. Guide pour la réalisation d'une évaluation quantitative des impacts sur la santé (ÉQIS). ÉQIS avec une exposition mesurée.* Saint-Maurice: Santé publique France; 2019.
- [51] Ademe. *Ecol'air. Les outils pour une bonne gestion de la qualité de l'air dans les écoles.* 2018.
- [52] Zare Sakhvidi MJ, Yang J, Lequy E, Chen J, de Hoogh K, Letellier N, *et al.* Outdoor air pollution exposure and cognitive performance: findings from the enrolment phase of the CONSTANCES cohort. *Lancet Planet Health.* 2022;6(3):e219-e29.
- [53] Wargocki P, Porras-Salazar J, Contreras-Espinoza S. The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment.* 2019;157:197-204.

AUTEURS

Florine Menzri

Santé publique France – Direction santé environnement travail

Franck Ramus

Centre national de la recherche scientifique – Laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistique

Marion Hulin

Santé publique France – Direction santé environnement travail

RELECTEURS

Mathilde Pascal

Santé publique France – Direction santé environnement travail

Patrice Blondeau

Université de La Rochelle – Laboratoire des sciences de l'ingénieur pour l'environnement

REMERCIEMENTS

À Edwige Bertrand (Santé publique France) pour l'aide apportée pour la revue de la littérature

MOTS CLÉS :

ÉQIS

ENFANT

QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR

CO₂

ÉCOLES

APPRENTISSAGE

Citation suggérée : Menzri F, Ramus F, Hulin M.

Lien entre la concentration en CO₂ dans les salles de classe et l'apprentissage des enfants.

Saint-Maurice : Santé publique France, janvier 2024. 20 p.

Disponible à partir de l'URL : www.santepubliquefrance.fr
