

IMPACT DE LA RENOVATION ENERGETIQUE SUR L'EVALUATION DE LA PERFORMANCE GLOBALE DES BATIMENTS A USAGE D'ECOLE ET DE BUREAU

Mars 2026



Rédaction

Mickaël DERBEZ, CSTB, Ingénieur
Pierre BONNET, CSTB, Ingénieur
Hugo COULANDREAU, CSTB, Ingénieur
Sharmila THANGARAJAH, CSTB, Technicienne
Doriane ROUSSELLE, CSTB, Technicienne
Ingrid SCHNEIDER, CSTB, Technicienne
Saad QRIOUET, CSTB, Statisticien

Référence : SAM-AQA-2026-052

Pouvoirs Publics



Porteurs



Financeurs



Filière Bâtiments



PROFEEL, un programme financé par le dispositif
des certificats d'économie d'énergie (CEE)



SOMMAIRE

Rappel des objectifs et livrables du projet QUARTET	4
1. Description des bâtiments à usage d'école et de bureau	6
1.1. Préambule	6
1.2. Sélection et répartition de l'échantillon composé de 23 bâtiments	6
1.3. Mise en œuvre du protocole d'évaluation de la performance globale	7
1.4. Description des 23 bâtiments à usage d'école et de bureau	7
2. Qualité de l'air intérieur	11
2.1. Confinement de l'air	11
2.2. Pollution chimique et particulaire	12
2.3. Signes d'humidité et moisissures	18
2.4. Mise en perspective des résultats avec les valeurs de référence de qualité d'air intérieur	20
2.4.1. Préambule	20
2.4.2. Résultats	22
3. Confort thermique	25
3.1. Préambule	25
3.2. Confort thermique	25
4. Consommations d'énergie	27
4.1. Etat des lieux des données de consommations énergétiques des bâtiments	27
4.1.1. Sélection des bâtiments retenus pour l'analyse	27
4.1.2. Difficultés rencontrées	27
4.2. Calcul du ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale	28
4.2.1. Méthodologies d'évaluation de la performance	28
4.2.2. Résultats	28
5. Conclusions	30
6. Remerciements	31



RAPPEL DES OBJECTIFS ET LIVRABLES DU PROJET QUARTET

Le projet QUARTET (2022-2025) s'inscrit dans la continuité du projet « Qualité Sanitaire et Energétique des rénovations » (ou QSE) réalisé sur la période 2019-2021. L'objectif du projet QUARTET est double :

- Le **premier objectif** est de **poursuivre l'évaluation de l'impact effectif des travaux de rénovations énergétiques** sur la réduction des consommations d'énergie des bâtiments, ainsi que sur la qualité de l'air intérieur et sur le confort d'ambiance. Pour rappel, des bâtiments à usage d'habitation, d'école et de bureau ont été recrutés et des suivis expérimentaux ont été réalisés afin d'évaluer la performance globale de ces bâtiments à l'aide de protocoles de référence utilisant des méthodes et des matériels de mesures éprouvés. Deux panels de bâtiments ont ainsi été évalués : un panel composé de 18 bâtiments¹ à usage d'habitation, d'école et de bureau rénovés depuis 1 à 3 ans et évalués « après » rénovation énergétique, et un panel composé de 29 logements², de 13 bâtiments à usage d'école et de 10 bâtiments à usage de bureau évalués « avant » puis « après » rénovation énergétique ;
- Le **second objectif** est de créer un centre de ressources dédié à la méthode d'évaluation simplifiée de la performance globale, dite « méthode QSE »³, et d'accompagner la filière dans son déploiement.

Les **deux principaux livrables** attendus sont :

- Un **rapport d'évaluation de l'impact de la rénovation énergétique** sur les bâtiments à usage d'école et de bureau et la **mise à disposition de la base de données** regroupant l'ensemble des données collectées sur les bâtiments investigués ;
- Un **centre de ressources dédié à la méthode QSE** (<https://www.qse-renovation.fr>) permettant de s'informer sur la méthode, de suivre ses évolutions et de s'autoformer à l'aide de plus d'une quarantaine de tutoriels vidéo. Il met à disposition l'intégralité des documents d'enquête pour déployer la méthode afin d'évaluer la performance globale des bâtiments enquêtés. Le centre permet enfin de générer un rapport de résultats et de comparer la situation de son bâtiment avec d'autres bâtiments de même typologie.

Ces travaux et résultats bénéficieront à tous les acteurs de la vie du bâtiment rénové :

- Pour le **maître d'ouvrage** : ce programme permettra une meilleure compréhension des enjeux sanitaires liés à la rénovation énergétique des bâtiments et offrira un référentiel technique qu'il pourra soumettre au gestionnaire du bâtiment ;
- Pour le **gestionnaire** : des recommandations pratiques et adaptées au terrain seront proposées pour le suivi de la performance globale, ainsi qu'un accompagnement pour analyser voire corriger les contre-performances sur la santé et le confort à l'issue des travaux de rénovation ;

¹ <https://www.proreno.fr/documents/evaluation-de-la-performance-globale-des-batiments-renoves-depuis-1-a-3-ans-1>

² <https://www.proreno.fr/documents/impact-de-la-renovation-energetique-sur-levaluation-de-la-performance-globale-des-logements>

³ <https://www.proreno.fr/documents/methode-qse-guide-methodologique>



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

- Pour l'**occupant** : la garantie que les aspects de santé et de bien-être ont bien été pris en compte lors de la rénovation du bâtiment dans lequel il habite ou travaille.

Ce rapport présente l'impact des travaux de rénovation énergétique sur l'évaluation de la performance globale des 23 bâtiments à usage d'école et de bureau. Ces bâtiments sont ceux pour lesquels les travaux de rénovation énergétique ont eu lieu pendant le projet permettant ainsi d'évaluer leur performance globale à deux reprises : avant et après les travaux.



1. DESCRIPTION DES BATIMENTS A USAGE D'ECOLE ET DE BUREAU

1.1. Préambule

Au total, 38 bâtiments ont été recrutés : 21 bâtiments à usage d'école (écoles maternelle, élémentaire ou primaire) et 17 bâtiments à usage de bureau.

Alors que toutes les enquêtes avant les travaux de rénovation énergétique ont été réalisées, seulement une partie de celles après les travaux ont été réalisées. Cela s'explique par l'abandon des travaux ou par le décalage de la date de ces derniers rendant impossible la réalisation des enquêtes au vu du calendrier du projet.

Au final, sur les 38 bâtiments recrutés :

- 23 bâtiments (13 à usage d'école et 10 à usage de bureau) ont été enquêtés « avant » et « après » la réalisation des travaux énergétiques ;
- 15 bâtiments (8 à usage d'école et 7 à usage de bureau) ont été enquêtés uniquement « avant » la réalisation des travaux énergétiques.

1.2. Sélection et répartition de l'échantillon composé de 23 bâtiments

Souhaitant comparer la situation des bâtiments « avant » et « après » les travaux de rénovation énergétique, seules les données des 23 bâtiments ont été considérées (celles des 15 autres bâtiments ayant été écartées).

Les 23 bâtiments recrutés et enquêtés « avant » et « après » la réalisation des travaux énergétiques (13 bâtiments à usage d'école et de 10 bâtiments de bureau) sont situés dans 3 régions où sont localisés les partenaires chargés des enquêtes : Grand Est, Auvergne Rhône Alpes (AURA) et Provence Alpes Côte d'Azur (PACA). (Figure 1).

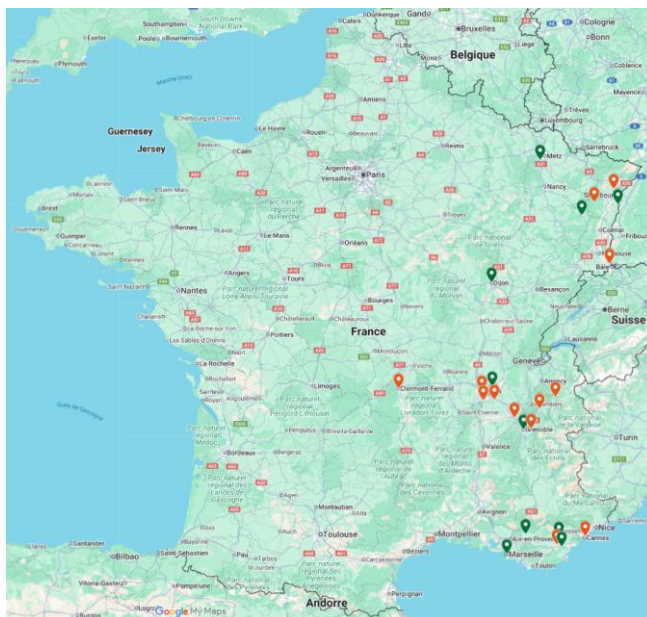


Figure 1 - Carte présentant la répartition géographique des bâtiments recrutés (bureaux en vert et écoles en orange)



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

1.3. Mise en œuvre du protocole d'évaluation de la performance globale

Les 23 bâtiments ont été enquêtés par un des trois partenaires du projet (ATMO Grand-Est, ISPIRA ou MEDIECO) (Tableau 1), chaque bâtiment étant à la charge d'un seul partenaire.

Les enquêtes se sont déroulées sur une longue période :

- Entre le 9 mars 2020⁴ et le 8 avril 2024 pour les enquêtes « avant » travaux ;
- Entre le 27 juin 2022 et le 7 avril 2025 pour les enquêtes « après » travaux.

Tableau 1 – Répartition des bâtiments enquêtés par partenaire selon leur typologie

Partenaires (Région)	Bâtiments ayant fait l'objet des enquêtes « avant » et « après » les travaux de rénovations		
	Bâtiments à usage d'école	Bâtiments à usage de bureau	Total
ATMO Grand-Est (Grand Est)	3	3	6
ISPIRA (PACA)	2	4	6
MEDIECO (AURA)	8	3	11
TOTAL	13	10	23

1.4. Description des 23 bâtiments à usage d'école et de bureau

Les principales caractéristiques des bâtiments à usage d'école ou de bureau, avant les travaux de rénovation, sont présentées dans le Tableau 2. Il s'agit de bâtiments construits sur une échelle de temps très importante comprise entre plus de 100 ans pour les plus anciens à une vingtaine d'années pour les plus récents. Ils sont majoritairement construits en béton plein, en parpaing ou en pierre. La moitié des bâtiments ne présente pas d'isolation des murs et des planchers bas, alors que l'isolation des combles est plus fréquente dans les écoles que dans les bureaux. Au niveau des systèmes, la plupart sont équipés d'un chauffage central (chaudière ou réseau de chaleur) avec une production d'eau chaude sanitaire par ballon électrique. Les bâtiments à usage d'école ne disposent pas de système spécifique de ventilation (l'aération se faisant par l'ouverture des fenêtres) alors que la moitié des bâtiments à usage de bureau sont ventilés par un système de ventilation mécanique contrôlé (VMC).

Les gestes de rénovation énergétique des bâtiments à usage d'école ou de bureau sont présentés dans le Tableau 3. Les enquêtes après les travaux de rénovation ont été faites la plupart du temps « depuis moins d'un an » pour les bâtiments à usage d'école, et aussi bien « depuis moins d'un an » que « depuis 1 à 3 ans » pour les bâtiments à usage de bureau. Du point de vue de l'enveloppe des bâtiments, les principaux gestes de rénovation ont consisté au remplacement de l'intégralité des menuiseries extérieures par des menuiseries en double vitrage et à l'isolation des murs, mais également, et dans une moindre mesure, à l'isolation de la toiture, du plancher haut et du plancher bas. Du point de vue des systèmes, des

⁴ Il faut rappeler que quelques bâtiments à usage d'école et de bureau ont été enquêtés « avant » les travaux au cours du projet QSE et que les enquêtes « après » travaux ont eu lieu dans le cadre du projet QUARTET.



changements au niveau du chauffage et de la ventilation sont intervenus dans la majorité des bâtiments. Dans les bâtiments à usage d'école, des chaudières ont été plus fréquemment installées alors que dans les bâtiments à usage de bureau, les PAC l'ont plus été. Au niveau des systèmes de ventilation, 7 bâtiments à usage d'école ont été équipés d'un système VMC (5 sur les 13 enquêtés sont toujours sans système spécifique de ventilation) et 2 bâtiments à usage de bureau ont été équipés d'un système VMC (2 sur les 10 enquêtés sont toujours sans système spécifique de ventilation).



Tableau 2 – Caractéristiques principales des 13 bâtiments à usage d'école et des 10 bâtiments à usage de bureau AVANT les travaux de rénovation (entre parenthèse figure le nombre de bâtiments ; NSP : « ne sais pas »)

Typologie de bâtiments		Bâtiment				Systèmes			
		Période de Construction	Principal matériau de construction	Isolation thermique des murs	Isolation thermique des planchers bas	Isolation thermique des combles/de la toiture	Système de chauffage	Système de production d'eau chaude sanitaire	Système de ventilation
Bâtiments à usage d'école	5 écoles maternelles	Min : 1903 Max : 1991	Béton (7) Pierre dure (2) Béton cellulaire (1) Ossat. mét (1) Brique (1) NSP (1)	Pas d'isolation (8) Isolation par l'intérieur (3) Isolation par l'extérieur (1) Isolation ossature (1)	Pas d'isolation (7) Oui (4) NSP (2)	Oui (9) Pas d'isolation (2) NSP (2)	Chauffage central (12) Chauffage individuel (1)	Ballon électrique (12) Réseau chaleur (1)	Aucun dispositif de ventilation (12)
	5 écoles élémentaires						Chaudières (9) Réseau de chaleur (2) Autre (1) NSP (1)		Ventilation partielle (incomplète ou peu fonctionnelle) de la salle de classe et ventilation des sanitaires par un système d'extraction (1)
	3 écoles primaires								
Bâtiments à usage de bureau	7 mono-occupés	Min : 1860 Max : 2005	Béton (5) Pierre dure (2) Parpaing (2) Ossat. mét (1)	Pas d'isolation (5) Isolation par l'intérieur (4) Ne sait pas (1)	Pas d'isolation (5) Oui (2) NSP (3)	Pas d'isolation (4) Oui (3) NSP (3)	Chauffage central (8) Chauffage individuel (2)	Ballon électrique (8) Chaudière (1) Autre (1)	Aucun dispositif de ventilation (4) Ventilation naturelle (1) VMC simple flux (2) VMC double flux (3)
	3 multi-occupés						Chaudières (6) Réseau de chaleur (1) NSP (2) PAC (1)		



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : Impact de la rénovation sur la performance globale des écoles et des bureaux 9

Tableau 3 – Description des travaux réalisés sur l’enveloppe des bâtiments et des modifications apportées aux systèmes des 13 bâtiments à usage d’école et des 10 bâtiments à usage de bureau suite à leur rénovation (entre parenthèse figure le nombre de bâtiments ; NSP : « ne sais pas », NR : « non renseigné »)

Typologie de bâtiments	Travaux de rénovation		Vérification / changement des systèmes			
	Date de fin des travaux	Remplacement des menuiseries et/ou rénovation/isolation de l’enveloppe (plancher / façades / comble / toiture)	Chauffage	Production d’eau chaude sanitaire	Ventilation	
Bâtiments à usage d’école	Depuis moins d’1 an (8)	Isolation des murs (9) : ITI (2), ITE (7), isolation de plus de 50% des façades extérieures (7) Remplacement des menuiseries extérieures (10) : plus de 50% des menuiseries (10), double vitrage (10) Rénovation/isolation de la toiture (7) : rénovation avec isolation de plus de 50% des surfaces déperditives (5) Isolation du plancher haut (6) Isolation du plancher bas (4)	Remplacement ou installation d’un nouveau système (5) avec d’autres actions (calorifugeage, robinets thermostatiques, etc.)	Oui (5) Non (6) NR (2)	Oui (2) Non (9) NR (2)	Oui (7) Non (5) NR (1)
	Depuis 1 à 3 ans (4)			Chaudières (4) PAC (1)	Ballon électrique (1) Chauffe-eau thermodynamique (1)	VMC simple flux (2) VMC double flux (5)
Bâtiments à usage de bureau	Depuis moins d’1 an (4)	Isolation des murs (5) : ITI (2), ITE (2), isolation de plus de 50% des façades extérieures (5) Remplacement des menuiseries extérieures (6) : plus de 50% des menuiseries (5), double vitrage (6) Rénovation/isolation de la toiture (3) : rénovation avec isolation de plus de 50% des surfaces déperditives (2) Isolation du plancher haut (2) Isolation du plancher bas (1)	Remplacement ou installation d’un nouveau système (6) avec d’autres actions (calorifugeage, robinets thermostatiques, etc.)	Oui (9) NR (1)	Oui (2) Non (7) NR (1)	Oui (2) Non (7) NR (1)
	Depuis 1 à 3 ans (5)		Calorifugeage et amélioration du dispositif de régulation (1)	PAC (5) NR (4)	Ballon électrique (1) Chaudière (1)	VMC double flux (2)
	NR (1)		Remplacement des émetteurs de chaleur, amélioration du dispositif de régulation et équilibrage (1) Amélioration du dispositif de régulation et équilibrage (1)			



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : Impact de la rénovation sur la performance globale des écoles et des bureaux 10

2. QUALITE DE L'AIR INTERIEUR

Les concentrations intérieures en CO₂, indicateur de confinement, des paramètres de pollution chimique et particulaire et les mesures des paramètres de confort thermique sont présentées dans le Tableau 4 pour les bâtiments à usage d'école et le Tableau 5 pour les bâtiments à usage de bureau. A noter que pour l'activité volumique du radon, les indicateurs statistiques des mesures réalisées sont présentés, mais aucune comparaison n'a été réalisée du fait du nombre limité d'observations (5 mesures « avant travaux » *versus* 2 mesures « après travaux » pour les bâtiments à usage d'école, et 5 mesures « avant travaux » *versus* 1 mesure « après travaux » pour les bâtiments à usage de bureau).

2.1. Confinement de l'air

Les concentrations en CO₂ ont été mesurées en continu, toutes les 10 minutes, pendant chaque enquête. Seules les concentrations mesurées en période d'occupation (hors absence des occupants, hors pause déjeuner, hors nuit et week-end) ont été conservées.

Les moyennes hebdomadaires des concentrations ont été calculées à partir de ces données pour chaque pièce de mesure en période d'occupation (salles de classe pour les écoles et espaces de bureau pour les bâtiments tertiaires). Il apparaît que les concentrations hebdomadaires médianes des écoles sont supérieures à celles des bureaux. Pour les bâtiments à usage d'école, elles sont plus élevées « avant travaux » qu'« après travaux », alors qu'elles sont similaires pour les bâtiments à usage de bureau, (différence de la médiane des concentrations hebdomadaires respectivement de 126 ppm contre 37 ppm). Comparativement aux médianes des concentrations hebdomadaires mesurées dans le cadre de la campagne nationale écoles (CNE) et de la campagne nationale bureaux (CNB) de l'OQAI, les concentrations médianes de notre échantillon sont plus faibles quelle que soit la phase de travaux (« avant » ou « après » les travaux).

A partir des mesures de concentrations en CO₂, l'indice de confinement de l'air (ICONE) a été calculé selon la formule suivante : $ICONE = 8,3 * \log(1 + f_1 + 3 * f_2)$ avec f_1 = proportion de valeurs de concentrations en CO₂ comprises entre 800 ppm et 1500 ppm et f_2 = proportion de valeurs de concentrations en CO₂ supérieures à 1500 ppm. L'ICONE varie entre 0 (confinement nul) et 5 (confinement extrême). Les valeurs ICONE intermédiaires sont les suivantes : 1 (confinement faible), 2 (confinement moyen), 3 (confinement élevé), 4 (confinement très élevé). Les données prises en compte pour le calcul de l'ICONE sont les mesures réalisées uniquement en période d'occupation.

Le calcul de l'ICONE (Figure 2) montre qu'aucune situation de confinement extrême (ICONE=5) n'est observée. Comme pour les moyennes hebdomadaires des concentrations en situation d'occupation, les bâtiments à usage de bureau sont moins confinés que les bâtiments à usage d'école : environ 80% d'entre eux présentent une situation de confinement nul à faible, contre près de 50% « avant travaux » et 70% « après travaux » pour les bâtiments à usage d'école. Pour les bâtiments à usage de bureau, la proportion présentant un confinement nul augmente « après travaux » (celle des bâtiments présentant un confinement faible augmente et celle des bâtiments présentant un confinement moyen et élevé stagne). Pour les bâtiments à usage d'école, la proportion de bâtiments présentant un confinement nul et faible augmente « après travaux » et celle des bâtiments présentant un confinement moyen à élevé diminue. A noter l'absence de bâtiments présentant un confinement très élevé « après travaux ».



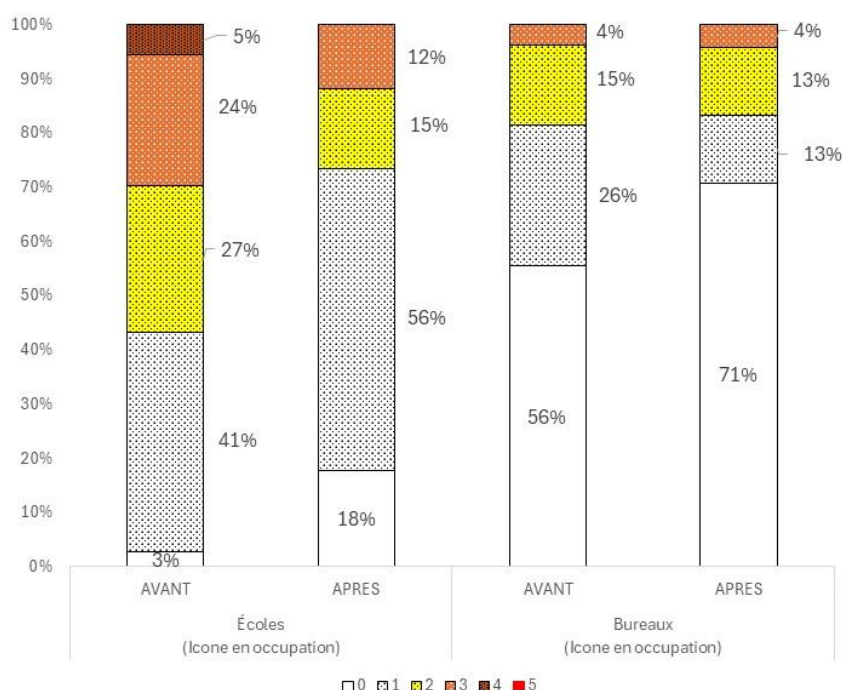


Figure 2 - Fréquence de distribution de l'ICONE selon la typologie de bâtiments

2.2. Pollution chimique et particulaire

Les concentrations des indicateurs de pollution sont mesurées depuis le lundi matin jusqu'au vendredi en fin d'après-midi, hormis pour le radon mesuré en continu sur une durée d'exposition de 2 mois minimum en période de chauffe.

Excepté pour le radon, les concentrations sont :

- Intégrées dans le temps pour le NO₂, les 15 composés organiques volatils et les 3 aldéhydes recherchés ;
- Déterminées uniquement en période d'occupation, *via* une programmation du système de prélèvement, pour la concentration massique des PM_{2.5}.

Dans les bâtiments à usage d'école, plus des trois quarts des composés organiques volatils présentent des concentrations médianes inférieures ou égales à 1 µg/m³. Il s'agit des BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes), du styrène, du 1,2,4-triméthylbenzène, du limonène, de l'hexane et du bêta-pinène. Quatre composés présentent des concentrations médianes comprises entre 1 et 5 µg/m³ (2-éthylhexanol, alpha-pinène, 2-butoxyéthanol, 1-methoxy-2-propanol). Enfin, cinq composés présentent des concentrations médianes supérieures à 5 µg/m³ : il s'agit de 3 aldéhydes, du NO₂ et des PM_{2.5}.

La comparaison des concentrations mesurées « après travaux » par rapport à celles mesurées « avant travaux » dans les bâtiments à usage d'école montre :

- Une diminution de la concentration médiane de l'ordre de 30% pour le limonène, le NO₂ et le 2-butoxyéthanol, de 20% pour les PM_{2.5} et le benzène, de 10% pour le 1-methoxy-2-propanol et le 1,2,4-triméthylbenzène, et de moins de 10% pour l'acétaldéhyde, le toluène et l'hexane ;



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

- Une augmentation de la concentration médiane de l'ordre de 20% pour le formaldéhyde, de 30% pour l'alpha-pinène et le 2-éthylhexanol, de 40% pour l'hexaldéhyde, de 80 % pour le m-xylène et le styrène, et de plus de 100% pour le o-xylène, le p-xylène, le bêta-pinène et l'éthylbenzène.

Comparativement aux médianes mesurées dans le cadre de la campagne nationale écoles (CNE) de l'OQAI, les concentrations médianes de notre échantillon sont quasi-systématiquement inférieures, sauf pour le formaldéhyde et l'hexaldéhyde où elles sont proches et pour l'acétaldéhyde et le NO₂ où elles sont supérieures.

Dans les bâtiments à usage de bureau, plus des trois quarts des composés organiques volatils présentent des concentrations médianes inférieures ou égales à 1 µg/m³. Il s'agit des BEX (benzène, éthylbenzène, xylènes), du styrène, du 1,2,4-triméthylbenzène, du 2-butoxyéthanol, de l'hexane et du bêta-pinène. Six composés présentent des concentrations médianes comprises entre 1 et 5 µg/m³ (2-éthylhexanol, 1-méthoxy-2-propanol, toluène, alpha-pinène, hexaldéhyde, limonène). Enfin, cinq composés présentent des concentrations médianes supérieures à 5 µg/m³ : il s'agit de 2 aldéhydes (acétaldéhyde et formaldéhyde), du NO₂ et des PM_{2.5}.

La comparaison des concentrations mesurées « après travaux » par rapport à celles mesurées « avant travaux » dans les bâtiments à usage de bureau montre :

- Une diminution de la concentration médiane de l'ordre de 30% pour m-xylène, de 20% pour l'acétaldéhyde, et de 5% pour les PM_{2.5} et le 2-butoxyéthanol,
- Une augmentation de la concentration médiane de l'ordre 5% pour le o-xylène et le formaldéhyde, de 10% pour le benzène, l'hexane et le 1,2,4-triméthylbenzène, de 20% pour l'éthylbenzène et le limonène, de 30 % pour le NO₂, de 40% pour l'alpha-pinène et le styrène, de 50% pour le 1-méthoxy-2-propanol et le p-xylène, de 60 % pour le 2-éthylhexanol, de 70 % pour le toluène, et de plus de 80 % pour l'hexaldéhyde et le bêta-pinène.

Comparativement aux médianes mesurées dans le cadre de la campagne nationale bureaux (CNB) de l'OQAI, les concentrations médianes de notre échantillon sont quasi-systématiquement inférieures, sauf pour le benzène et l'éthylbenzène où elles sont proches et pour l'acétaldéhyde, l'hexaldéhyde, l'alpha-pinène et le limonène où elles sont supérieures.

La comparaison des deux typologies de bâtiments montre que suite aux travaux, les concentrations médianes diminuent pour 3 composés (acétaldéhyde, 2-butoxyéthanol et PM_{2.5}) et augmentent pour 10 composés (formaldéhyde, hexaldéhyde, o-,m-,p-xylènes, éthylbenzène, styrène, 2-éthylhexanol, l'alpha et le bêta-pinène). Il apparaît également que le nombre de composés dont la concentration médiane augmente « après travaux » est plus important pour les bâtiments à usage de bureau que ceux à usage d'école (16 *versus* 10).



Tableau 4 - Concentrations intérieures des aldéhydes, des PM_{2,5} et du radon dans les 13 bâtiments à usage d'école avant et après rénovation et comparaison avec l'état du parc d'école françaises selon la campagne nationale école (CNE) de l'OQAI (n : nombre de prélèvements, min : valeur minimale, max : valeur maximale, LD : limite de détection, LQ : limite de quantification, NA : non applicable)

Paramètres de qualité d'air intérieur	AVANT les travaux de rénovation					APRES les travaux de rénovation					Parc existant d'écoles françaises (67 300 écoles) selon la CNE
	n	min	Moyenne Arithmétique (écart-type)	Médiane (P50)	max	n	min	Moyenne arithmétique (écart-type)	Médiane (P50)	max	
Moyenne hebdomadaire CO ₂ (ppm) en période d'occupation	37	575	950 (253)	882	1721	34	511	805 (189)	756	1223	1 368
1,2,4-triméthylbenzène (µg/m ³)	32	< 0,01	0,87 (1,93)	0,11	8,78	37	0,01	0,18 (0,18)	0,10	0,77	Non mesuré
1-methoxy-2-propanol (µg/m ³)	21	0,02	8,18 (13,78)	3,36	63,96	34	1,25	3,64 (2,4)	2,98	11,82	Non mesuré
2-butoxyéthanol (µg/m ³)	26	0,02	5,08 (5,52)	3,21	17,51	30	0,16	12,48 (30,69)	2,30	133,00	Non mesuré
2-éthylhexanol (ou 2-éthyl-1-hexanol) (µg/m ³)	31	0,01	2,19 (1,68)	1,69	6,66	37	0,04	3,9 (4,46)	2,26	19,34	Non mesuré
Acétaldéhyde (µg/m ³)	31	2,43	7,35 (3,14)	6,73	13,86	38	1,01	6,93 (4,06)	6,17	17,55	5,1
Alpha-pinène (µg/m ³)	32	< 0,01	4,39 (5,74)	2,85	31,38	37	0,30	13,54 (16,78)	3,72	61,17	14,8
Béta-pinène (µg/m ³)	31	0,01	0,43 (0,33)	0,36	1,18	36	0,03	2,51 (4,77)	0,78	27,01	Non mesuré
Benzène (µg/m ³)	32	0,08	0,79 (0,73)	0,44	2,84	37	0,09	0,58 (0,53)	0,35	2,23	1,2
Ethylbenzène (µg/m ³)	32	< 0,01	0,43 (0,41)	0,29	1,80	37	0,15	1,45 (1,98)	0,74	8,37	0,9



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : Impact de la rénovation sur la performance globale des écoles et des bureaux 14

Paramètres de qualité d'air intérieur	AVANT les travaux de rénovation					APRES les travaux de rénovation					Parc existant d'écoles françaises (67 300 écoles) selon la CNE
	n	min	Moyenne Arithmétique (écart-type)	Médiane (P50)	max	n	min	Moyenne arithmétique (écart-type)	Médiane (P50)	max	
Formaldéhyde (µg/m³)	31	5,30	20,24 (11,59)	15,97	50,32	38	4,69	22,2 (13,92)	19,42	55,78	19,3
Hexaldéhyde (µg/m³)	31	2,84	11,48 (7,4)	10,44	38,59	38	3,82	27,87 (34,39)	14,19	160,03	11,8
Hexane (µg/m³)	30	0,02	0,61 (0,69)	0,43	2,87	31	0,11	0,49 (0,38)	0,40	1,59	< 2,6 (LD)
Limonène (µg/m³)	30	0,01	2,14 (3,12)	0,95	11,65	34	0,03	2,14 (4,06)	0,64	21,01	7
m-Xylènes (µg/m³)	32	0,01	0,45 (0,26)	0,45	0,90	37	0,10	2,45 (5,16)	0,79	20,89	2
p-Xylènes (µg/m³)	30	< 0,01	0,3 (0,18)	0,18	0,90	35	0,10	2,45 (5,16)	0,38	4,88	0,9
o-Xylène (µg/m³)	32	< 0,01	0,3 (0,18)	0,27	0,78	37	0,08	1,58 (2,47)	0,54	10,03	0,7
Styrène (µg/m³)	32	< 0,01	0,19 (0,11)	0,17	0,44	37	0,04	0,47 (0,61)	0,30	3,26	3,7
Toluène (µg/m³)	32	0,03	1,84 (1,9)	1,27	8,27	37	0,59	1,51 (0,84)	1,17	3,69	< 2 (LD)
NO ₂ (µg/m³)	23	2,11	9,58 (6,24)	8,08	23,74	36	0,06	6,14 (4,46)	5,63	15,66	18,1
PM _{2.5} (µg/m³) en période d'occupation	17	7,07	14,05 (5,32)	12,82	25,80	34	2,07	10,47 (4,65)	9,97	18,54	Non mesuré
Radon (Bq/m³) en période de chauffe	5	97,64	277,86 (192,59)	220,15	534,93	2	49,5	52,39 (4,08)	52,39	55,28	



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : Impact de la rénovation sur la performance globale des écoles et des bureaux 15

Tableau 5 - Concentrations intérieures des aldéhydes, des PM_{2,5} et du radon dans les 10 bâtiments à usage de bureau avant et après rénovation et comparaison avec l'échantillon de bureau enquêtés dans la cadre de la campagne nationale bureau (CNB) de l'OQAI (n : nombre de prélèvements, min : valeur minimale, max : valeur maximale, LD : limite de détection, LQ : limite de quantification, NA : non applicable)

Paramètres de qualité d'air intérieur	AVANT les travaux de rénovation					APRES les travaux de rénovation					Echantillon des 129 bureaux enquêtés dans le cadre de la CNB
	n	min	Moyenne arithmétique (écart-type)	Médiane (P50)	max	n	min	Moyenne arithmétique (écart-type)	Médiane (P50)	max	
Moyenne hebdomadaire CO ₂ (ppm) en période d'occupation	27	425	676 (172)	652	1062	24	439	652 (177)	615	1166	731
1,2,4-triméthylbenzène (µg/m ³)	20	< 0,01	0,34 (0,35)	0,18	1,15	27	0,04	0,34 (0,39)	0,20	1,48	Non mesuré
1-methoxy-2-propanol (µg/m ³)	21	0,15	2,62 (3,13)	1,36	9,15	27	0,01	4,14 (5,97)	2,05	28,89	Non mesuré
2-butoxyéthanol (µg/m ³)	22	0,08	1,93 (2,61)	1,07	9,65	26	0,05	2,22 (3,77)	1,03	18,13	1,7
2-éthylhexanol (ou 2-éthyl-1-hexanol) (µg/m ³)	22	0,07	3,08 (5,39)	1,34	25,02	27	0,03	3,44 (4,86)	2,19	21,63	4,1
Acétaldéhyde (µg/m ³)	23	0,63	9,67 (6,94)	7,17	27,73	26	2,36	7,72 (4,95)	5,84	16,55	5,3
Alpha-pinène (µg/m ³)	23	0,67	5,02 (5,37)	2,95	22,72	27	0,89	7,88 (8,92)	4,09	42,07	1,2
Béta-pinène (µg/m ³)	23	0,06	0,49 (0,44)	0,40	1,80	27	0,03	1,13 (1,12)	0,87	5,22	Non mesuré
Benzène (µg/m ³)	23	0,31	1,22 (0,63)	1,10	2,76	27	0,31	1,63 (1,62)	1,20	8,41	1,2



Paramètres de qualité d'air intérieur	AVANT les travaux de rénovation					APRES les travaux de rénovation					Echantillon des 129 bureaux enquêtés dans le cadre de la CNB
	n	min	Moyenne arithmétique (écart-type)	Médiane (P50)	max	n	min	Moyenne arithmétique (écart-type)	Médiane (P50)	max	
Ethylbenzène (µg/m³)	23	0,11	0,96 (0,46)	0,91	1,75	27	0,43	1,26 (0,81)	1,07	3,57	1,2
Formaldéhyde (µg/m³)	23	3,18	10,88 (9,7)	8,35	52,64	27	0,12	17,93 (34,01)	8,75	184,92	13,6
Hexaldéhyde (µg/m³)	23	0,58	9,03 (13,3)	4,41	51,74	25	1,77	11,11 (9,77)	8,26	48,67	2,9
Hexane (µg/m³)	19	0,18	1,01 (0,95)	0,73	4,07	27	0,23	1,02 (0,96)	0,81	4,71	Non mesuré
Limonène (µg/m³)	22	0,56	5,74 (5,13)	4,85	17,61	26	0,58	6,4 (7,23)	6,02	37,55	2,9
m-Xylènes (µg/m³)	23	0,22	1,03 (0,41)	1,08	1,96	27	0,34	1,41 (1,35)	0,80	5,19	3,7
p-Xylènes (µg/m³)	23	0,09	0,61 (0,36)	0,70	1,77	27	0,29	1,26 (1,26)	0,73	4,16	
o-Xylène (µg/m³)	23	0,05	0,84 (0,48)	0,52	1,28	27	0,34	1,13 (0,99)	0,80	5,19	1,4
Styrène (µg/m³)	23	0,10	0,93 (1,04)	0,52	3,44	27	0,14	0,96 (0,83)	0,75	3,92	< 1 (LQ)
Toluène (µg/m³)	22	0,69	2,26 (1,66)	1,58	7,76	27	0,67	3,16 (2,06)	2,73	10,76	4,0
NO ₂ (µg/m³)	14	1,86	14,25 (13,16)	8,95	36,79	23	1,92	13,01 (9,97)	11,53	28,15	Non mesuré
PM _{2,5} (µg/m³) en période d'occupation	18	4,27	11,89 (10,31)	7,43	45,06	24	0,21	6,98 (2,83)	7,12	12,55	Non mesuré
Radon (Bq/m³) en période de chauffe	5	36,63	99,24 (47,91)	98,90	170,41	1	132,81	132,81 (NA)	132,81	132,81	Non mesuré



2.3. Signes d'humidité et moisissures

Les gestionnaires ont été interrogés pour savoir s'ils avaient observé des traces de surface, des infiltrations d'eau ou des dégâts des eaux dans les bâtiments. Ces questions ayant été posées avant puis après les travaux de rénovation, il est possible de comparer la situation. Les résultats présentés dans le Tableau 6 indiquent qu'après les travaux de rénovation, la proportion des traces de surface a diminué et que la présence de cas d'infiltration d'eau n'a pas changé. La proportion des cas de dégâts des eaux a doublé dans les bâtiments à usage d'école alors qu'elle a été divisée par deux pour les bâtiments à usage de bureau.

Tableau 6. Observation de traces de surface, d'infiltrations d'eau ou de dégâts des eaux dans les logements

Observation dans les pièces des	Bâtiments à usage d'école		Bâtiments à usage de bureau	
	Avant les travaux	Après les travaux	Avant les travaux	Après les travaux
Traces de surface (moisissures, tâches, papier peint décollé, peinture cloquée, enduit dégradé, condensation, salpêtre)	23%	0%	30%	11%
Infiltrations d'eau (remontées capillaires, murs enterrés, gouttières engorgées ou endommagées, couverture ou étanchéité endommagées, murs poreux, joints défectueux)	31%	25%	30%	33%
Dégâts des eaux (rupture de canalisation, incendie, inondation, autre catastrophe naturelle)	8%	17%	20%	11%

Parallèlement, l'indice de contamination fongique (ICF), développé par le CSTB, a été calculé dans les salles de classe et espaces de bureau sélectionnés dans chaque bâtiment. Les résultats sont exprimés à l'échelle du bâtiment. Un bâtiment est considéré comme :

- « Contaminé » lorsque la présence d'une contamination fongique active est observée dans une des pièces instrumentées ;
- « Non contaminé » lorsque l'absence de contamination fongique active est observée dans toutes les pièces instrumentées.

La Figure 3 indique que le développement fongique est observé dans les deux typologies de bâtiment dans une plus forte proportion après la phase de rénovation. Le pourcentage de bâtiments à usage d'école « contaminés » passe de 23% avant travaux à 46% après, tandis que celui des bâtiments à usage de bureau augmente de 40 à 50%. En d'autres termes, un bâtiment rénové sur deux présente un développement fongique actif.



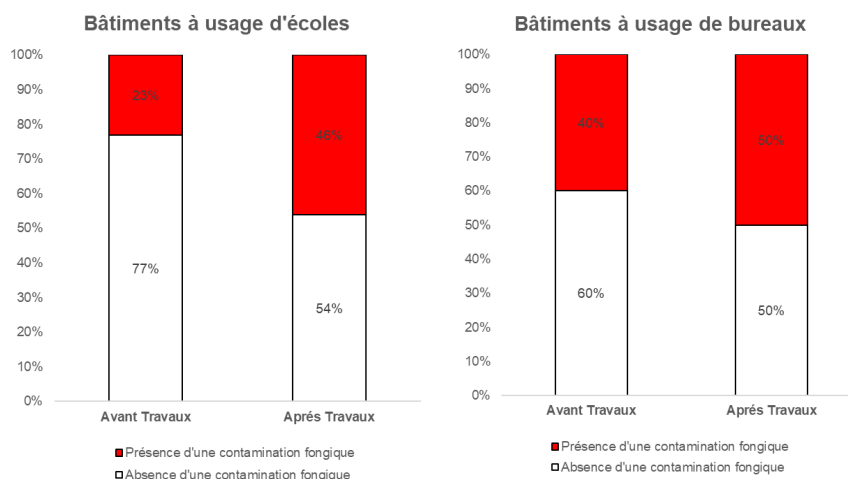


Figure 3– Résultats de l'indice de contamination fongique (ICF) indiquant la présence ou l'absence d'une contamination fongique dans les bâtiments à usage d'école ou de bureau

L'observation de la dynamique de contamination fongique de chaque bâtiment, basée sur le résultat du calcul de l'ICF de l'enquête « avant travaux » et de l'enquête « après travaux », est présentée sur la Figure 4.

Pour la moitié des bâtiments à usage d'école (46%) et de bureau (50%), il apparaît que les travaux de rénovation n'ont pas eu d'impact sur la contamination fongique (pour les écoles, 38% n'ont jamais été contaminées et 8% le sont toujours, et pour les bureaux, 30% n'ont jamais été contaminés et 20% le sont toujours).

En revanche, pour l'autre moitié des bâtiments, la contamination a disparu pour 15% des écoles et 20% des bureaux, et est apparue pour 38% des écoles et 30% des bureaux. Il apparaît que le pourcentage d'apparition de développement fongique est plus élevé que celui de disparition pour les deux typologies de bâtiment.

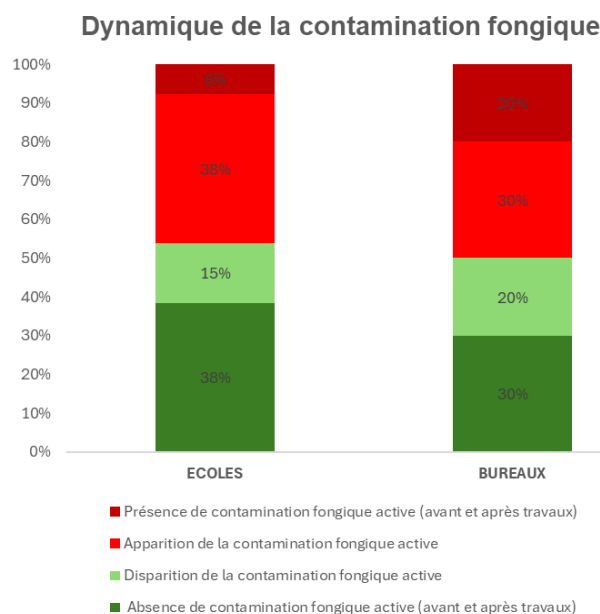


Figure 4 – Dynamique de la contamination fongique (ICF) dans les bâtiments à usage d'école ou de bureau



2.4. Mise en perspective des résultats avec les valeurs de référence de qualité d'air intérieur

2.4.1. Préambule

Les résultats de l'étude ont été mis en perspective avec les valeurs de référence de qualité d'air intérieur disponibles à ce jour. Il existe trois types de valeurs :

- Les valeurs dites « réglementaires », publiées par décret et les seules à devoir être respectées : pour le benzène et le formaldéhyde, dans les établissements recevant du public et pour le radon, dans les établissements d'enseignement y compris les bâtiments d'internat, les établissements sanitaires et sociaux disposant d'une capacité d'hébergement, les établissements thermaux et les établissements pénitentiaires. Bien que ces valeurs réglementaires ne s'appliquent pas aux bâtiments d'habitation ou de bureau, il est jugé intéressant de comparer les résultats avec ces valeurs. Enfin, en toute logique, il aurait fallu réaliser une campagne de mesures en période de chauffe et une autre en période hors chauffe pour calculer une concentration moyenne et comparer avec ces valeurs réglementaires. Toutefois, la comparaison des résultats de l'une ou l'autre de ces campagnes étant possible, cette mise en perspective a été réalisée ;
- Les valeurs dites « de gestion » du Haut Conseil de Santé Publique (HCSP) prenant en compte les critères sanitaires tout en les mettant en perspective avec les concentrations techniquement atteignables actuellement. Du fait de la nature des valeurs de gestion incitant à l'action en vue de tendre au respect à terme des valeurs sanitaires de l'ANSES, la comparaison est effectuée *de facto* ;
- Les valeurs dites « sanitaires » de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) établies sur des critères sanitaires visant à protéger la santé de l'ensemble de la population, y compris les plus sensibles. Plusieurs valeurs guides sont établies pour des durées d'exposition différentes :
 - « Court terme » si l'effet critique apparaît après une courte durée d'exposition (15 mn, 1 ou 2 heures...),
 - « Long terme » si l'effet critique apparaît suite à une exposition continue et/ou répétée à long terme (plusieurs mois ou années, jusqu'à 40 ou 70 ans qui correspond à une exposition « vie entière ») ;
 - « Intermédiaire » si l'effet critique apparaît après des temps d'exposition situés entre ces deux termes, en général pour une durée de l'ordre d'une semaine à un mois.

Parmi ces valeurs de référence, seules celles établies sur une durée d'exposition compatible avec la durée des mesures de l'étude sont comparées (Tableau 7).

Enfin, cette mise en perspective indique le nombre de mesures de l'échantillon dépassant les valeurs de référence d'air intérieur. Elle ne se substitue pas à une évaluation quantitative des risques sanitaires pour les occupants de ces lieux de vie. Seule une telle évaluation permettrait de conclure à un risque sanitaire potentiel. Elle nécessiterait alors la prise en compte des temps passés dans ces lieux, qui n'est pas l'objet du présent travail. La mise en perspective par rapport aux valeurs de référence permet de mettre en avant des substances dont les concentrations dans l'air de certains lieux de vie peuvent mériter une évaluation plus approfondie des expositions et des risques associés.



Tableau 7 – Sélection des valeurs de référence actuellement en vigueur pour les polluants de l'air intérieur auxquelles les mesures obtenues dans cette étude vont être comparées

Polluants	Valeur sanitaire (ANSES / OMS)		Valeur action rapide	Valeur de gestion (HCSP)			Valeur réglementaire
	Court terme	Long terme		Valeur repère	Valeur cible	Valeur de gestion provisoire	
Acétaldéhyde				160 µg/m³ estimée en mesures réalisées sur 4 à 7 jours			
Benzène	30 µg/m³ sur 1 à 14 jours			6 µg/m³			
Ethylbenzène	22 000 µg/m³ sur 24 heures						
Formaldéhyde						30 µg/m³ mesures sur une période de 4,5 à 7 jours	
NO ₂	Valeur recommandée par OMS de 25 µg/m ₃ sur 24 heures						
PM _{2,5}	En l'absence de VGAI proposée par l'ANSES, utilisation des seuils de l'OMS : 15 µg/m³ sur 24 h	En l'absence de VGAI proposée par l'ANSES, utilisation des seuils de l'OMS : 10 µg/m ₃	50 µg/m³		50 µg/m³ en moyenne annuelle		
Radon							300 Bq/m³
Toluène	20 000 µg/m³						



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : Impact de la rénovation sur la performance globale des écoles et des bureaux 21

2.4.2. Résultats

Les résultats présentés dans le Tableau 8 et le Tableau 9 indiquent le pourcentage ainsi que le nombre de mesures dépassant les valeurs de référence prises en compte respectivement pour les bâtiments à usage d'école et de bureau.

Pour les bâtiments à usage d'école, les polluants concernés par un dépassement, classés par ordre décroissant de la proportion des mesures présentant ce dépassement, sont les suivants :

- PM_{2.5} avec un dépassement du seuil de 10 µg/m³ pour 88% des mesures « avant travaux » et 50% « après travaux », et un dépassement du seuil de 15 µg/m³ pour 35% des mesures « avant travaux » et 24% « après travaux » ;
- Formaldéhyde avec un dépassement du seuil de 30 µg/m³ pour 19% des mesures « avant travaux » et 26% « après travaux » ;
- Radon avec deux mesures sur les cinq réalisées « avant travaux » dépassant le seuil de 300 Bq/m³.

Pour les bâtiments à usage de bureau, les polluants concernés par un dépassement, classés par ordre décroissant de la proportion des mesures présentant ce dépassement, sont les suivants :

- NO₂ avec un dépassement du seuil de 25 µg/m³ pour 22% des mesures « avant travaux » et 27% « après travaux » ;
- PM_{2.5} avec un dépassement du seuil de 10 µg/m³ pour 39% des mesures « avant travaux » et 13% « après travaux », et un dépassement du seuil de 15 µg/m³ pour 17% des mesures uniquement « avant travaux » ;
- Formaldéhyde avec un dépassement du seuil de 30 µg/m³ sur les 23 mesures réalisées « avant travaux » et un dépassement sur les 27 mesures réalisées « après travaux » ;
- Benzène avec un dépassement du seuil de 6 µg/m³ sur les 27 mesures réalisées « après travaux ».

Pour les deux typologies de bâtiments :

- Il y a systématiquement un dépassement :
 - o Des valeurs du seuil de 10 µg/m³ et de 15 µg/m³ pour les PM_{2.5}, avec un pourcentage de dépassement plus élevé dans les écoles que dans les bureaux, aussi bien « avant travaux » qu'« après travaux » ;
 - o Des valeurs du seuil de 30 µg/m³ pour le formaldéhyde, avec un pourcentage de dépassement plus élevé dans les écoles que dans les bureaux, aussi bien « avant travaux » qu'« après travaux » ;
- Il y a très ponctuellement un dépassement du benzène dans les bureaux (1 mesure sur 27 réalisées « après travaux ») et du radon dans les écoles (2 mesures sur les 5 réalisées « avant travaux ») ;
- Il n'y a aucun dépassement pour l'acétaldéhyde (160 µg/m³), l'éthylbenzène (22 000 µg/m³) et le toluène (20 000 µg/m³), pour le seuil de 30 µg/m³ pour le benzène et celui de 50 µg/m³ pour les PM_{2.5}.

A noter qu'un dépassement du seuil de 25 µg/m³ pour le NO₂ est observé exclusivement pour les bâtiments à usage de bureau, mais pas pour les bâtiments à usage d'école.



Tableau 8 – Pourcentage et nombre de dépassements des valeurs de référence actuellement en vigueur pour les polluants de l'air intérieur des 13 bâtiments à usage d'école

Polluants	Période	Valeur sanitaire (ANSES / OMS)		Valeur de gestion (HCSP)		Valeur réglementaire		
Acétaldéhyde	Avant travaux	Sans objet		160 µg/m³	0% (0/31)	Sans objet		
	Après travaux				0% (0/38)			
Benzène	Avant travaux	30 µg/m³	0% (0/32)	6 µg/m³	0% (0/32)	Sans objet		
	Après travaux		0% (0/37)		0% (0/37)			
Ethylbenzène	Avant travaux	22 000 µg/m³	0% (0/32)	Sans objet		Sans objet		
	Après travaux		0% (0/37)					
Formaldéhyde	Avant travaux	Sans objet		30 µg/m³	19% (6/31)	Sans objet		
	Après travaux				26% (10/38)			
NO ₂	Avant travaux	25 µg/m³	0% (0/24)	Sans objet		Sans objet		
	Après travaux		0% (0/38)					
PM _{2,5}	Avant travaux	10 µg/m³	88% (15/17)	50 µg/m³	0% (0/17)	Sans objet		
		15 µg/m³	35% (6/17)					
	Après travaux	10 µg/m³	50% (17/34)	50 µg/m³	0% (0/34)			
		15 µg/m³	24% (8/34)					
Radon	Avant travaux	Sans objet		Sans objet		300 Bq/m³	40% (2/5)	
	Après travaux						0% (0/2)	
Toluène	Avant travaux	20 000 µg/m³	0% (0/32)	Sans objet		Sans objet		
	Après travaux		0% (0/37)					



Tableau 9 – Pourcentage et nombre de dépassements des valeurs de référence actuellement en vigueur pour les polluants de l'air intérieur des 10 bâtiments à usage de bureau

Polluants	Période	Valeur sanitaire (ANSES / OMS)		Valeur de gestion (HCSP)		Valeur réglementaire	
Acétaldéhyde	Avant travaux	Sans objet		160 µg/m³	0% (0/23)	Sans objet	
	Après travaux				0% (0/26)		
Benzène	Avant travaux	30 µg/m³	0% (0/23)	6 µg/m³	0% (0/23)	Sans objet	
	Après travaux		0% (0/27)		4% (1/27)		
Ethylbenzène	Avant travaux	22 000 µg/m³	0% (0/23)	Sans objet		Sans objet	
	Après travaux		0% (0/27)				
Formaldéhyde	Avant travaux	Sans objet		30 µg/m³	4% (1/23)	Sans objet	
	Après travaux				4% (1/27)		
NO ₂	Avant travaux	25 µg/m³	22% (4/18)	Sans objet		Sans objet	
	Après travaux		27% (7/26)				
PM _{2,5}	Avant travaux	10 µg/m³	39% (7/18)	50 µg/m³	0% (0/18)	Sans objet	
		15 µg/m³	17% (3/18)				
	Après travaux	10 µg/m³	13% (3/24)	50 µg/m³	0% (0/24)		
		15 µg/m³	0% (0/24)				
Radon	Avant travaux	Sans objet		Sans objet		300 Bq/m³	0% (0/5)
	Après travaux						0% (0/1)
Toluène	Avant travaux	20 000 µg/m³	0% (0/22)	Sans objet		Sans objet	
	Après travaux		0% (0/27)				



3. CONFORT THERMIQUE

3.1. Préambule

L'évaluation du confort d'ambiance des salles de classe et des espaces de bureaux, réalisée à chaque enquête, couvre les dimensions thermique, acoustique, visuel et sensoriel. Un questionnaire perceptif, à destination des enseignants des salles de classe et des occupants des espaces de bureaux instrumentés, a été complété lors de chaque enquête. En parallèle, des mesures en continu de la température et de l'humidité relative de l'air, ainsi que des mesures ponctuelles d'isolement de façade et de bruits d'équipements ont été réalisées.

Les questionnaires perceptifs n'ayant pour l'heure pas été exploités, et du fait de l'invalidité des mesures ponctuelles d'isolement de façade et du nombre limité de celles de bruits d'équipement, seule l'évaluation du confort thermique au regard des mesures de températures et d'humidité relative est présentée dans la suite de ce rapport.

3.2. Confort thermique

Les mesures de température et d'humidité relative ont été réalisées en continu, toutes les 10 minutes, pendant chaque enquête. Seules les données mesurées en période d'occupation (hors absence des occupants, hors pause déjeuner, hors nuit et week-end) ont été conservées.

Les moyennes hebdomadaires des mesures de température et d'humidité relative ont été calculées à partir de ces données, pour chaque pièce de mesure, en période d'occupation : dans les salles de classe pour les écoles et dans les espaces de bureaux pour les bâtiments tertiaires.

Les résultats présentés dans le Tableau 10 montrent que la température moyenne hebdomadaire est semblable et proche de 23°C pour les deux typologies de bâtiments, aussi bien « avant » que « après » travaux. L'humidité relative moyenne hebdomadaire est proche de 50% dans les bâtiments à usage d'école et de 40% dans les bâtiments à usage de bureau, aussi bien « avant » que « après » travaux.



Tableau 10 - Mesures des paramètres de confort thermique selon la catégorie de bâtiments

Typologie de bâtiments	Paramètres du confort thermique	AVANT les travaux de rénovation					APRES les travaux de rénovation				
		n	min	Moyenne Arithmétique (écart-type)	P50	max	n	min	Moyenne Arithmétique (écart-type)	P50	max
Salle de classe Bâtiments à usage d' école	Température hebdomadaire moyenne (°C) en période d'occupation	37	18,5	23,0 (2,6)	23,0	27,2	34	19,5	22,8 (2,1)	21,9	27,6
	Humidité relative hebdomadaire moyenne (%) en période d'occupation	37	32	49 (7)	52	61	34	32	51 (10)	53	67
Espace de travail Bâtiments à usage de bureau	Température hebdomadaire moyenne (°C) en période d'occupation	27	18,0	23,2 (3,2)	22,4	29,3	24	19,4	22,8 (2,3)	22,4	26,5
	Humidité relative hebdomadaire moyenne (%) en période d'occupation	27	25	37 (8)	35	51	24	29	43 (10)	41	60



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : Impact de la rénovation sur la performance globale des écoles et des bureaux 26

4. CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE

4.1. Etat des lieux des données de consommations énergétiques des bâtiments

4.1.1. Sélection des bâtiments retenus pour l'analyse

L'évaluation de la performance énergétique réelle des bâtiments nécessite l'analyse de données de consommations sur *a minima* un an complet « avant travaux » et un an complet « après travaux ».

Sur les 23 bâtiments enquêtés, seuls 3 bâtiments (1 bâtiment à usage d'école et 2 à usage de bureau) ont fourni leurs consommations d'énergie sur les deux phases d'enquête. Par conséquent, il n'a pas été possible d'évaluer l'impact des travaux de rénovation sur la consommation d'énergie à l'échelle de chaque bâtiment, mais seulement à l'échelle de chaque échantillon (enquêtes réalisées dans les bâtiments à usage d'école « avant travaux » *versus* « après travaux », et enquêtes réalisées dans les bâtiments à usage de bureau « avant travaux » *versus* « après travaux »).

Sur les 46 enquêtes réalisées dans les 23 bâtiments ciblés, le calcul du ratio surfacique de consommation annuelle, à climat normal, d'énergie finale au périmètre « tous usages » a été possible pour près de la moitié des enquêtes (46%) (Tableau 11).

Tableau 11 : Disponibilités des données de consommations énergétiques pour l'analyse des consommations d'énergie

Calcul du ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale au périmètre tous usages (kWh _{ef} /(m ² ,an))	Nombre total d'enquêtes	Nombre d'enquêtes de bâtiments à usage d'école	Nombre d'enquêtes de bâtiments à usage de bureau
Calcul possible	21 (46%)	14	7
Calcul impossible	25 (54%)	12	13

4.1.2. Difficultés rencontrées

Pour l'autre moitié des enquêtes (Tableau 12), des difficultés ont été rencontrées lors de la collecte des données de consommations d'énergie. Les raisons classées par ordre décroissante d'importance sont les suivantes :

- Dans environ un cas sur deux, aucune facture n'a été transmise malgré de très nombreuses relances ou bien elles sont manquantes pour au moins une énergie utilisée ;
- Dans un cas sur quatre, la période de collecte des factures est insuffisante, car inférieure à un an ;
- Dans les autres cas, les consommations transmises sont trop faibles ou incertaines pour être considérées comme valides, ou bien les factures sont mutualisées avec d'autres bâtiments ayant des usages différents, sans possibilité de sous-comptage (par exemple, comme le cas d'un établissement scolaire composé de bâtiments de salle de classe, d'une cantine et d'un gymnase et ne disposant pas de sous-comptage par bâtiment).



Tableau 12 : Difficultés rencontrées et raisons de l'impossibilité de calcul du ratio surfacique de consommations annuelles à climat normale d'énergie finale classées par ordre décroissante d'importance

Raisons de l'impossibilité de calcul du ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale	Nombre total d'enquêtes	Nombre d'enquêtes de bâtiments à usage d'école	Nombre d'enquêtes de bâtiments à usage de bureau
Absences de factures	12 (48%)	5	7
Moins d'un an de factures	6 (24%)	5	1
Données de consommations douteuses	4 (16%)	1	3
Multi-usages et absence de sous-compteurs spécifiques au bâtiment	3 (12%)	1	2

4.2. Calcul du ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale

4.2.1. Méthodologies d'évaluation de la performance

Le calcul du ratio surfacique de consommation annuelle, à climat normal, d'énergie finale au périmètre « tous usages » (kWh_{ef}/(m².an)) a été réalisé par la méthode simplifiée utilisée pour le calcul de l'indice Energie de l'indicateur de performance globale de la méthode QSE⁵.

4.2.2. Résultats

Les résultats de calcul du ratio surfacique de consommation annuelle, à climat normal, d'énergie finale au périmètre « tous usages » (kWh_{ef}/(m².an)) sont présentés dans le Tableau 13.

Il apparaît qu'« avant travaux », la valeur médiane du ratio surfacique et les plages comprises entre les valeurs extrêmes (min et max) sont plus importantes pour les bâtiments à usage de bureau que pour ceux à usage d'école. « Après travaux », c'est la tendance inverse qui est observée : la valeur médiane du ratio surfacique et les plages de valeurs sont plus importantes pour les bâtiments à usage d'école que pour les bâtiments à usage de bureau.

Une réduction de la médiane du ratio surfacique est clairement observée « après travaux », comparativement à « avant travaux », pour les deux typologies de bâtiments. Elle est de 33% pour les bâtiments à usage d'école et de 72% pour les bâtiments à usage de bureau.

⁵ <https://www.qse-renovation.fr/fr-fr/methode-qse/mode-d-emploi-et-collecte-de-donnees/energie>



Tableau 13 : Ratio surfacique de consommation annuelle, à climat normal, d'énergie finale au périmètre « tous usages » (kWh_{ef}/(m².an)) calculé par les bâtiments à usage d'école et de bureau avant et après rénovation à partir des données disponibles

Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale au périmètre tous usages (kWh _{ef} /(m ² .an))	AVANT les travaux de rénovation					APRES les travaux de rénovation				
	n	min	Moyenne (ET)	Médiane	Max	n	min	Moyenne (ET)	Médiane	Max
Bâtiments à usage d'école	10	86	150 (71)	133	328	4	56	96 (46)	89	150
Bâtiments à usage de bureau	5	86	260 (281)	164	755	2	32	46 (19)	46	59



5. CONCLUSIONS

Ce rapport présente l'évaluation de la performance globale des bâtiments à usage d'école et de bureau pour lesquels les travaux de rénovation énergétique ont eu lieu pendant le projet, permettant ainsi d'évaluer leur performance globale à deux reprises : avant et après les travaux.

Les 23 bâtiments retenus pour ce rapport comprennent 13 bâtiments à usage d'école et 10 bâtiments à usage de bureau. Ces bâtiments, relativement anciens, n'étaient pas complètement isolés et n'étaient pas équipés d'un système spécifique de ventilation. Cela concernait en particulier les bâtiments à usage d'école, dont la ventilation reposait principalement sur l'aération par ouverture des fenêtres. Les gestes de rénovation énergétique ont consisté, dans la majorité des cas, au remplacement des menuiseries extérieures, à l'isolation des parois (notamment des murs), au remplacement du système de chauffage et à l'installation de systèmes de VMC.

A partir des données exploitées, l'impact des travaux de rénovation sur la performance globale de ces bâtiments a pu être étudié.

Concernant l'évaluation des consommations d'énergie, les travaux de rénovation énergétique ont permis de réduire de 33% les consommations d'énergie des bâtiments à usage d'école et de 72% celles des bâtiments à usage de bureau.

Concernant le confinement de l'air, l'installation de systèmes de VMC dans les bâtiments a permis de réduire les moyennes hebdomadaires de concentrations en CO₂ en période d'occupation et d'augmenter la fréquence des situations où le confinement de l'air est nul ou faible. Cette situation est plus marquée dans les bâtiments à usage d'école, dont la plupart ne disposait pas de système spécifique avant les travaux.

Concernant la qualité de l'air intérieur, et hormis pour le radon pour lequel le nombre de mesures est trop limité, les niveaux des polluants chimiques et particuliers (PM_{2.5}) sont variables, mais des tendances sont communes pour les deux typologies de bâtiments. Suite à la réalisation des travaux, les concentrations médianes des PM_{2.5}, de l'acétaldéhyde et du 2-butoxyéthanol diminuent, alors que celles de 2 aldéhydes (formaldéhyde, hexaldéhyde), des terpènes (alpha et bêta-pinène), des xylènes (o-,m-,p-), de l'éthylbenzène, du styrène et du 2-éthylhexanol augmentent. Comparativement aux valeurs de référence existantes, il y a fréquemment des dépassements des seuils de 10 µg/m³ et de 15 µg/m³ pour les PM_{2.5}, et du seuil de 30 µg/m³ pour le formaldéhyde. A noter le dépassement ponctuel du seuil de 25 µg/m³ pour le NO₂ dans les bâtiments à usage de bureau. Un développement fongique actif est observé dans les deux typologies de bâtiment, dans une plus forte proportion après la phase de rénovation. Au final, un bâtiment rénové sur deux présente un développement fongique actif.

Concernant le confort thermique, les températures et humidités relatives moyennes hebdomadaires sont proches pour les deux typologies de bâtiments, aussi bien « avant » qu'« après » travaux.



6. REMERCIEMENTS

L'équipe projet souhaite adresser tous ses remerciements à toutes les personnes ayant pris part à l'étude :

- Aux différents experts du CSTB pour l'élaboration des protocoles d'enquêtes ;
- Aux partenaires en charge du recrutement des bâtiments et/ou de la réalisation des enquêtes : ATMO Grand-Est, ISPIRA et MEDIECO ;
- Aux occupants des pièces investiguées et aux gestionnaires des bâtiments enquêtés pour leur participation à l'étude ;
- Aux laboratoires d'analyse des prélèvements : Laboratoire POLLEM du CSTB Grenoble en charge des analyses des prélèvements ALD et COV, Laboratoire Central de la Préfecture de Police (LCPP) en charge de l'analyse des prélèvements PMM, au Service des Laboratoires de Santé Environnementale (SLSE) de la ville de Paris en charge de l'analyse des prélèvements NO₂ et le laboratoire ALGADE pour l'analyse des prélèvements radon.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations