

EVALUATION DE LA PERFORMANCE GLOBALE DES BATIMENTS RENOVES DEPUIS 1 A 3 ANS

MAI 2022



RAPPORT

Rédaction

Mickaël DERBEZ, CSTB, Ingénieur
Youssef NASFANE, CSTB, Statisticien
Rukshala ANTON, CSTB, Ingénieur
Simon BAILHACHE, CSTB, Ingénieur
Arnaud CHALLANSONNEX, CSTB, Ingénieur
Virginie DESVIGNES, CSTB, Statisticienne
Maxime RAYNAUD, CSTB, Ingénieur
Elodie SAID, CSTB, Ingénieur

Coordination

Corinne MANDIN, CSTB, Chef de Division

PARTENAIRES PROFEEL :

Pouvoirs Publics



Porteurs



Financeurs



Filière Bâtiment



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



SOMMAIRE

Rappel des objectifs et livrables du projet	5
1. Description des bâtiments et des occupants	7
1.1. Mise en œuvre du protocole d'évaluation de la performance globale	7
1.2. Descriptif des 18 bâtiments	8
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	16
2.4. Mise en perspective des résultats avec les valeurs de référence de qualité d'air intérieur	18
2.4.1. Préambule	18
3. Perception des occupants et confort d'ambiance	24
3.1. Perception des occupants	24
3.2. Confort thermique	39
3.3. Confort acoustique	41
3.3.1. Bruit d'équipements	41
3.3.2. Isolement de façade	43
4. Consommations d'énergie	46
4.1. Méthodologies d'évaluation de la performance	46
4.1.1. Méthode de niveau 0, à partir des données uniquement annuelles	47
4.1.2. Méthodes de niveau 1 et 2	59
4.1.3. Limites des méthodes proposées	74
4.1.4. Bibliographie / références citées	75
4.2. Indicateur énergie	75
4.2.1. Calcul de l'indicateur énergie	75
4.2.2. Seuils pour un logement	77
4.2.3. Seuils pour un bâtiment tertiaire de bureaux	82
4.2.4. Seuils pour un bâtiment tertiaire d'école	83
4.3. Etat des lieux des données de consommations énergétiques	85
4.3.1. Logements	85
4.3.2. Bureaux	88
4.3.3. Ecoles	89
4.3.4. Difficultés rencontrées dans le recueil de données	89
4.4. Analyses et résultats	90
4.4.1. Analyse suivant la méthode de niveau 0	90
4.4.2. Analyse suivant la méthode de niveau 1 et 2	97



5. Comparaison des résultats avec le parc existant de bâtiments français ou les exigences réglementaires	103
5.1. Préambule	103
5.2. Logements	104
5.3. Bâtiments à usage d'école	108
5.4. Bâtiments à usage de bureau	109
6. Conclusions	115
7. Remerciements	117
8. ANNEXE – outil excel « QSE - Calcul_consommation_énergie_V1.xlsx »	118



RAPPEL DES OBJECTIFS ET LIVRABLES DU PROJET

Dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, la rénovation énergétique du parc des bâtiments du secteur résidentiel et tertiaire est un enjeu majeur. Celle-ci vise en premier lieu à réduire drastiquement les besoins énergétiques mais ne peut se faire au détriment de la santé et du confort des occupants. C'est dans ce contexte que le projet « Qualité Sanitaire et Energétique des rénovations » ou « QSE » a été initié avec les deux objectifs suivants :

- Le **premier objectif** est de **mesurer l'impact effectif des travaux de rénovations** sur la réduction des consommations d'énergie des bâtiments ainsi que sur leur qualité sanitaire et leur confort. Basé sur le suivi expérimental de 114 bâtiments en cours de rénovation ou rénovés depuis 1 à 3 ans, l'étude permettra d'évaluer leur performance globale à l'aide de protocoles de référence utilisant des méthodes et des matériels de mesures éprouvés.
- Le **second objectif** est **d'élaborer une méthode peu onéreuse et simplifiée d'évaluation de la performance globale** en utilisant le potentiel des capteurs communicants. Au préalable, cette méthode sera comparée avec la méthode de référence sur une partie des bâtiments enquêtés.

Les **deux livrables** attendus sont :

- Une **base de données** regroupant l'ensemble des données collectées sur les bâtiments enquêtés et constituant un retour d'expérience unique au niveau international sur un panel significatif de rénovations. Il sera possible de réaliser une analyse croisée Energie/Santé/Confort, ainsi qu'une analyse des gains sanitaires et socioéconomiques permis par la rénovation énergétique. Des modèles de recherche des déterminants pourront être utilisés dans le cas où il sera nécessaire d'identifier des facteurs responsables d'éventuelles contre-performances,
- Un **guide pratique pour l'évaluation de la performance globale** des bâtiments en exploitation rénovés ou devant faire l'objet de travaux de rénovation. Des efforts de simplification de la démarche et de réduction des coûts de leur mise en œuvre seront engagés en s'appuyant notamment sur le potentiel des technologies basées sur les capteurs connectés, particulièrement adaptés à des mesures sur le long terme (jusqu'à plusieurs mois). Cette optimisation technico-économique permettra d'aborder le sujet de la performance de manière globale et de l'insérer dans les pratiques des acteurs du bâtiment lors des phases d'utilisation du bâtiment avant et après travaux.

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



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

technique qu'il peut soumettre au gestionnaire du bâtiment mais également au maître d'œuvre en charge de la réalisation des travaux,

- Pour le **gestionnaire**, des recommandations pratiques et adaptées au terrain pour le suivi de la performance globale seront proposées ainsi qu'un accompagnement pour analyser voire corriger les contre-performances sur la santé et le confort à l'issue des travaux de rénovation,
- Pour l'**occupant**, c'est savoir que les aspects de santé et bien-être ont été pris en compte lors de la rénovation du bâtiment où il habite ou travaille.

La durée de l'étude est de 27 mois avec une **date de fin fixée en décembre 2021 suite au décalage de 6 mois accordé à tous les projets PROFEEL.**

Ce rapport qui fait partie du premier livrable du projet présente l'évaluation de la performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans.



1. DESCRIPTION DES BATIMENTS ET DES OCCUPANTS

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

Sur les 22 bâtiments recrutés, les enquêtes ont été réalisées, à ce jour, sur 18 bâtiments sur la période comprise entre le 25/01/2020 (date de début de la première enquête) au 14/06/2020 (date de début de la dernière enquête). Sur les 4 bâtiments restants, 1 s'est désisté et 3 devraient faire l'objet d'enquêtes d'ici la fin de l'année 2021. Il faut noter que les enquêtes ayant été quasiment toutes réalisées en période de crise sanitaire, les situations d'occupation des bâtiments sont atypiques du fait des différentes périodes de confinement ce qui nécessite d'être vigilant quant à l'interprétation des résultats.

Sur les 18 bâtiments répartis en France (Figure 1), il y a 8 bâtiments à usage d'habitation, 6 bâtiments à usage d'école et 4 à usage de bureau (Tableau 1). Sur les 8 bâtiments à usage d'habitation, 9 logements au total ont été enquêtés : 5 maisons individuelles et 4 logements collectifs répartis dans 3 immeubles collectifs.



Figure 1 - Carte présentant la répartition géographique des bâtiments du panel 2 (logements en violet, écoles en vert et bureaux en jaune)



Tableau 1 – Répartition des enquêtes réalisées par partenaire sur les bâtiments rénovés selon leur typologie (MI : maison individuelle, IC : immeuble collectif)

Bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans				
Partenaires	Bâtiments à usage d'habitation	Bâtiments à usage d'école	Bâtiments à usage de bureau	Total
ATMO Grand-Est			1	1
QUALITAIR Corse	2 (1 MI + 1 IC)			2
CSTB Champs	2 (2 IC)			2
ISPIRA	1 (1MI)	1	2	4
MEDIECO	2 (2MI)		1	3
Nobatek/INEF 4		5		5
TIPEE	1 (1MI)			1
TOTAL	8 (5 MI + 3 IC)	6	4	18

1.2. Descriptif des 18 bâtiments

Les principales caractéristiques des 18 bâtiments enquêtés sont présentées dans le Tableau 2.

Les travaux de rénovation réalisés depuis 1 et 3 ans par rapport à la date d'enquête ont consisté à isoler thermiquement les bâtiments et à la vérification/changement des systèmes.

Au niveau des travaux sur l'enveloppe du bâti, la quasi-totalité ont porté sur la façade : isolation et remplacement des menuiseries extérieures (au minimum 25% des menuiseries). Il faut souligner que l'isolation des planchers et de la toiture sont réalisées dans la moitié des bâtiments. A noter toutefois que l'isolation des toitures a été systématiquement réalisée dans les bâtiments à usage d'école.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Tableau 2 – Caractéristiques principales des 18 bâtiments instrumentés

Typologie de bâtiments	Période de construction	Bâtiment		Travaux de rénovation			Systèmes		
		Principal matériau de construction	Isolation thermique des murs	Date de fin de travaux	Isolation (plancher / menuiserie / façades / comble / toiture)	Vérification / changement des systèmes	Système de chauffage	Système de ventilation	
Bâtiments à usage d'habitation	5 maisons individuelles	Min : 1915 Max : 1992	Béton (2) Pierre dure (1) Parpaing (1) NSP (1)	ITI (1) ITE (2) ITI + ITE (1) NSP (1)	Min : Juin 2016 Max : Avril 2020	Isolation plancher (3/5) Remplacement + de 50 % menuiseries (4/5) Isolation façades (4/5) Isolation des combles (3/5) Isolation de la toiture (2/5)	Chauffage (4/5) Ventilation (5/5) Eau chaude sanitaire (1/5)	Chaudières (3) Convecteurs électriques (2)	VMC simple flux (3) VMC double flux (2)
	4 logements collectifs	Min : 1968 Max : 1973	Parpaing (2) NSP (2)	ITI (1) ITE (2) NSP (1)	Min : Septembre 2019 Max : mars 2020	Isolation plancher (1/4) Remplacement au minimum 25% menuiseries (3/4) Isolation façades (2/4) Isolation de la toiture (2/4)	Chauffage (2/4) ECS (2/4) Ventilation (1/4)	Chaudières (3) Convecteurs électriques (1)	VMC simple flux (4)
Bâtiments à usage d'école*	Maternelle (2) Elémentaire (2) Primaire (2)	Min : 1949 Max : 1976	Parpaing (4) Béton (1)	ITI (2) ITE (1) ITI + ITE (1)	Min : Aout 2019 Max : Aout 2020	Remplacement au minimum 25% menuiseries (3/5) Isolation façades (3/5) Isolation de la toiture (5/5)	Chauffage (2/5) ECS (2/5) Ventilation (5/5)	Chaudières (5/5)	VMC double flux (5) Absence de système (1)
Bâtiments à usage de bureau	Mono-occupant (1) Multi-occupant (3)	Min : 1933 Max : 1973	Parpaing (1) Béton (1) Pierre (1) NSP (1)	ITI (1) ITE (3)	Min : Janvier 2019 Max : Aout 2020	Isolation plancher (2/4) Remplacement de plus de 50% menuiseries (3/4) Isolation façades (3/4) Isolation de la toiture (2/4)	Chauffage (4/4) ECS (4/4) Ventilation (3/4) Climatisation (3/4)	PAC (2) Convecteurs électriques (2)	VMC simple flux (2) VMC double flux (1) Absence de système (1)

* Les données descriptives d'une école sont manquantes suite au refus du gestionnaire de renseigner le questionnaire Ad Hoc.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Au niveau des systèmes, ce sont en priorité les systèmes de chauffage et de ventilation qui sont remplacés/installés quelque soit la typologie de bâtiment. La majorité des bâtiments sont équipés d'un système de chauffage par chaudière fonctionnant au gaz de réseau. Les autres utilisent des PAC ou des convecteurs électriques. Tous les bâtiments sont équipés d'un système de ventilation mécanique contrôlée sauf un bâtiment à usage d'école et un autre à usage de bureau qui ne disposent pas de systèmes de ventilation spécifique. Dans les bâtiments à usage de bureau, les interventions ont également porté sur le système d'ECS et de climatisation



2. QUALITE DE L'AIR INTERIEUR

Les concentrations intérieures du CO₂, indicateur de confinement, des paramètres de pollution chimique et particulaire et mesures des paramètres de confort thermique sont présentés dans le Tableau 3.

2.1. Confinement de l'air

Les concentrations du CO₂ ont été mesurées en continu, toutes les 10 minutes, pendant chaque enquête. Pour les logements, toutes les mesures ont été conservées alors que pour les écoles et les bureaux, 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 : pour toutes périodes dans la chambre dans les logements, en période d'occupation dans les salles de classe pour les écoles et les espaces de bureau pour les bureaux. Il apparaît que les concentrations moyennes sont similaires pour les logements et les écoles (respectivement 826 et 840 ppm) mais inférieures pour les bureaux (687 ppm).

A partir des mesures de concentrations du 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 1000 ppm et 1700 ppm et f_2 = proportion de valeurs de concentrations en CO₂ supérieures à 1700 ppm. L'ICONE varie entre 0 (confinement nul) et 5 (confinement extrême). Les icones intermédiaires sont les suivants : 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 suivantes :

- Mesures réalisées toutes les nuits entre minuit et 5h du matin pour les logements ;
- Mesures réalisées en période d'occupation pour les écoles et les bureaux.

Le calcul de l'ICONE (Figure 2) montre qu'aucune situation de confinement extrême n'est observée (ICONE=5). Les espaces de bureaux et d'écoles se distinguent par rapport aux logements par une fréquence de situation de confinement nul atteignant respectivement 82% et 58% contre 22 %. Les logements présentent un pourcentage plus important de situation de confinement moyen (44% contre 0% pour les écoles et 9% pour les bureaux).



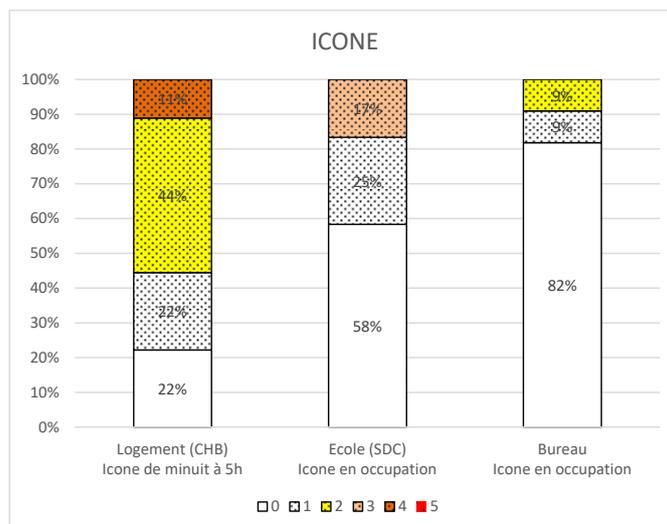


Figure 2 - Fréquence de distribution de l'ICONE selon la typologie de bâtiments

2.2. Pollution chimique et particulaire

Parmi les 15 composés organiques volatils et les 3 aldéhydes recherchés, plus des trois quart présentent des concentrations moyennes inférieures ou égales à $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Il s'agit des BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes), du styrène, du 1,2,4-triméthylbenzène, du 1-méthoxy-2-propanol, du 2-butoxyéthanol, du 2-éthylhexanol, de l'hexane et du bêta-pinène. Cinq composés présentent des concentrations moyennes supérieures à $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Il s'agit de :

- L'hexaldéhyde (26,4), l'alpha-pinene (20,9), le formaldéhyde (18,6), l'acétaldéhyde (14,7) et le limonène (6,9) pour les logements ;
- Le formaldéhyde (10,1), l'hexaldéhyde (10,1), l'acétaldéhyde (6) et l'alpha-pinene (4,8) pour les écoles.

Le formaldéhyde (18,4), l'hexaldéhyde (16,7), l'alpha-pinene (15,1), l'acétaldéhyde (9,1) et le limonène (7,2) pour les bureaux.



Tableau 3 - Concentrations intérieures du CO₂, des paramètres de pollution chimique et particulaire et mesures des paramètres de confort thermique selon la catégorie de bâtiments (s.o. : sans objet, LD = limite de détection)

Paramètres de confinement et de qualité d'air intérieur	Logements (9) Maisons individuelles ou logements collectifs					Salle de classes (18) Bâtiments à usage d'école					Espace de travail (12) Bâtiments à usage de bureaux				
	n	Moyenne (ET)	P25	P50	P75	n	Moyenne (ET)	P25	P50	P75	n	Moyenne (ET)	P25	P50	P75
Moyenne hebdomadaire CO ₂	9	826 (205)	679	763	907	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
Moyenne hebdomadaire CO ₂ (ppm) en période d'occupation	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	12	840 (287)	658	743	873	11	687 (150)	598	637	753
1,2,4-triméthylbenzène (µg/m ³)	8	1,2 (1,1)	0,49	0,66	2,1	15	0,69 (0,71)	<LD	0,55	1,4	9	1,2 (1,6)	0,18	0,25	2,1
1-methoxy-2-propanol (µg/m ³)	5	1,2 (0,91)	0,43	0,91	2,1	10	1,4 (1,3)	0,56	0,91	1,8	8	0,86 (0,51)	0,51	0,67	1,3
2-butoxyéthanol (µg/m ³)	5	0,90 (0,88)	0,37	0,40	1,6	10	3,4 (7,2)	0,15	0,30	1	8	3,2 (3,6)	0,54	1,9	3,9
2-éthylhexanol (ou 2-éthyl-1-hexanol) (µg/m ³)	5	2,8 (3,4)	1,7	1,7	2	10	3,7 (4,4)	1	1,3	5,1	8	2,3 (2,1)	0,86	1,5	2,8
Acétaldéhyde (µg/m ³)	9	14,7 (13,7)	8	9,5	15,1	18	6 (4)	3,9	5,1	5,9	12	9,1 (2,4)	7,3	9,6	10,7



Paramètres de confinement et de qualité d'air intérieur	Logements (9) Maisons individuelles ou logements collectifs					Salle de classes (18) Bâtiments à usage d'école					Espace de travail (12) Bâtiments à usage de bureaux				
	n	Moyenne (ET)	P25	P50	P75	n	Moyenne (ET)	P25	P50	P75	n	Moyenne (ET)	P25	P50	P75
Alpha-pinène (µg/m³)	5	20,9 (15,9)	8,8	17,7	36,1	10	4,8 (4,5)	1,8	2,2	8,7	8	15,1 (15,3)	1,5	8,8	29,2
Béta-pinène (µg/m³)	8	2,3 (4,9)	0,34	0,51	1	15	0,29 (0,24)	0,11	0,21	0,46	9	0,95 (0,80)	0,20	0,96	1,2
Benzène (µg/m³)	8	1,4 (1,8)	0,53	0,76	1,1	15	0,78 (0,40)	0,44	0,67	1,1	9	0,36 (0,20)	0,20	0,27	0,40
Ethylbenzène (µg/m³)	8	1,3 (1,2)	0,53	0,91	1,6	15	0,47 (0,31)	0,22	0,43	0,67	9	1,2 (0,68)	0,65	0,92	1,7
Formaldéhyde (µg/m³)	9	18,6 (9,5)	11,6	15,0	21,4	18	11,8 (7,8)	4,8	12,3	15,4	12	18,4 (12,3)	11,8	13,7	17,8
Hexaldéhyde (µg/m³)	9	26,4 (16,8)	15,2	24,6	32,7	18	10,1 (5,9)	4,9	9,9	14,0	12	16,7 (14,3)	7,5	8,4	22
Hexane (µg/m³)	8	0,24 (0,17)	0,12	0,21	0,39	15	0,28 (0,44)	0,05	0,09	0,17	9	0,27 (0,19)	0,09	0,29	0,32
Limonène (µg/m³)	5	6,9 (8)	2,3	3,7	5,7	10	1,8 (2,3)	0,39	1,2	2,2	8	7,2 (9,7)	0,53	0,61	15,1
m-Xylènes (µg/m³)	8	1,7 (1,9)	0,59	0,98	2,1	15	1,1 (0,87)	0,45	0,88	1,6	9	1,1 (0,76)	0,81	0,82	0,96
o-Xylène (µg/m³)	8	0,83 (0,65)	0,33	0,58	1,3	15	0,87 (1,2)	0,35	0,48	0,85	9	0,52 (0,31)	0,39	0,41	0,48



Paramètres de confinement et de qualité d'air intérieur	Logements (9) Maisons individuelles ou logements collectifs					Salle de classes (18) Bâtiments à usage d'école					Espace de travail (12) Bâtiments à usage de bureaux				
	n	Moyenne (ET)	P25	P50	P75	n	Moyenne (ET)	P25	P50	P75	n	Moyenne (ET)	P25	P50	P75
p-Xylènes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	8	0,58 (0,52)	0,24	0,35	0,80	15	0,39 (0,29)	0,17	0,33	0,57	9	0,42 (0,33)	0,29	0,30	0,33
Styrène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	8	2,1 (2,4)	0,31	1,4	2,6	15	0,31 (0,28)	0,08	0,16	0,58	9	1,6 (0,80)	0,92	1,6	2,6
Toluène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5	1,9 (0,82)	1,2	2,1	2,5	10	1,6 (1,1)	0,65	1,5	2,4	8	2,4 (2)	1,1	1,6	2,7
NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	8	12,7 (7)	7,9	14,6	17,2	15	8,1 (5,9)	3,4	9,7	11,7	9	2,4 (2)	1,8	1,8	4,5
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en période d'occupation	6	18,6 (15,5)	8,8	9,7	30,8	10	11,8 (6,3)	8,8	10,3	12,4	9	10 (3,5)	8,8	9,2	13,3
Radon (Bq/m ³) en période de chauffe	2	96,7 (28,8)	86,6	96,7	106,9	4	25 (3,3)	22,8	24,2	26,4	1	58,3 (so)	58,3	58,3	58,3



Pour le NO₂, les concentrations moyennes sont plus élevées dans les logements et les écoles que les bureaux (respectivement 12,7, 8,1 et 2,4 µg/m³). Pour les PM_{2,5}, les concentrations moyennes sont plus élevées dans les logements que les écoles et les bureaux (respectivement 18,6, 11,8 et 10 µg/m³). Du fait du faible nombre de mesures radon, aucune comparaison entre les différentes typologies n'est faite.

2.3. Signes d'humidité et moisissures

A l'échelle du bâtiment, les occupants des logements et les gestionnaires des bâtiments à usage d'école et de bureau ont été interrogés pour savoir si depuis la fin de travaux de rénovation, ils avaient observé des traces de surface, des infiltrations d'eau ou des dégâts des eaux. Les résultats présentés dans le Tableau 4 indiquent que les infiltrations d'eau sont les plus fréquentes par rapport à la présence de traces ou de dégâts des eaux. A noter qu'aucun logement n'a subi de dégâts des eaux et qu'aucune école ne présente de traces de surface.

Tableau 4. Observation de traces de surface, d'infiltrations d'eau ou de dégâts des eaux dans les bâtiments selon leur typologie (logement, école, bureau) et depuis la fin des travaux de rénovation

Depuis la fin des travaux de rénovation, observation dans les pièces....	Bâtiment à usage de logement	Bâtiments à usage d'école	Bâtiments à usage de bureau
de traces de surface (moisissures, tâches, papier peint décollé, peinture cloquée, enduit dégradé, condensation, salpêtre)	3 parmi 9	aucun	1 parmi 4
d'infiltrations d'eau (remontées capillaires, murs enterrés, gouttières engorgées ou endommagées, couverture ou étanchéité endommagées, murs poreux, joints défectueux)	3 parmi 9	1 parmi 5	2 parmi 4
de dégâts des eaux (rupture de canalisation, incendie, inondation, autre catastrophe naturelle)	aucun	1 parmi 5	1 parmi 4

A l'échelle des pièces de chaque bâtiment, l'enquêteur a réalisé une inspection visuelle de toutes les pièces du logement, de 8 pièces dans les bâtiments à usage d'école (les 3 salles de classes investiguées et 5 autres pièces) et de 8 pièces dans les bâtiments à usage de bureau (les 3 espaces de bureau investigués et 5 autres pièces). En cas de présence de traces visibles, ils devaient en donner une description : traces d'humidité, de condensation, de salpêtre, de moisissure, de basidiomycète, de revêtement de surface dégradé. Les résultats présentés dans le Tableau 5 indiquent la présence de traces dans les 3 bâtiments à usage de logement et 1 à usage de bureau. Aucun bâtiment à usage d'école ne présente de traces. Parmi les traces visibles, on note la présence de traces d'humidité, de condensation, de moisissures et de revêtements de surface dégradés.



Tableau 5. Observation de traces de surface dans les pièces des bâtiments selon leur typologie (logement, école, bureau)

Observation de traces dans les pièces des bâtiments	Bâtiment à usage de logement	Bâtiments à usage d'école	Bâtiments à usage de bureau
Présence de traces visibles dans au moins une des pièces investiguées des bâtiments	3 parmi 9	aucun	1 parmi 4
Type de traces :			
Humidité (présence d'auréoles « sans relief »)		Sans objet	x
Condensation (présence de gouttelettes d'eau éparses)		Sans objet	x
Salpêtre (présence de cristaux blanchâtres ou grisâtres)		Sans objet	
Moisissure (dépôt duveteux ou feutré « en relief »)	2 parmi 3	Sans objet	
Basidiomycète (mérule)		Sans objet	
Revêtement de surface dégradé (papier peint décollé, peinture cloquée, enduit dégradé)	1 parmi 3	Sans objet	x

Parallèlement, l'indice de contamination fongique (ICF), développé par le CSTB a été calculé dans les chambres des logements, les salles de classe et les espaces de bureaux à partir de la détection de COV traceurs dans les prélèvements passifs de l'air. Le résultat du calcul de l'ICF est présenté dans la Figure 3 selon la typologie de bâtiment. Il apparaît que le développement fongique est observé dans 6% des salles de classe, dans 25% des espaces de bureau et dans 33% des logements. A l'échelle du bâtiment, 3 logements sur les 9 enquêtés (33%) présentent une contamination fongique, 1 bâtiment à usage d'école sur les 6 enquêtés (16%) présente au moins une salle de classe contaminée et 1 bâtiment à usage de bureau sur les 4 enquêtés (25%) au moins un espace de bureau contaminé.



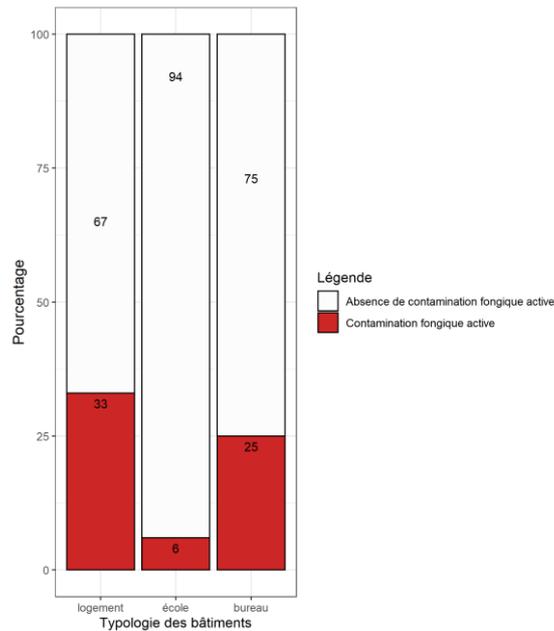


Figure 3 – Résultats de l'indicateur de contamination fongique (ICF) indiquant la présence ou l'absence d'une contamination fongique selon la typologie de bâtiment (logement, école, bureau)

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 (Tableau 6). 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 de 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 la 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 sanitaires, seules celles établies sur une durée d'exposition compatible avec la durée des mesures de l'étude, c'est-à-dire comprise entre 4,5 et 7 jours, sont comparées. Il s'agit des valeurs sanitaires court terme du benzène ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur une période de 1 à 14 jours) et du tétrachloroéthylène ($1380 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur une période de 1 à 14 jours).

Enfin, cette mise en perspective indique le nombre de logements/salles de classe/espaces de travail 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.

Les résultats présentés dans le Tableau 7 montrent qu'aucune valeur sanitaire court et qu'aucune valeur d'action rapide ne sont dépassées. Aucun dépassement n'est observé pour le radon. Un seul dépassement de la valeur de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est observé pour le benzène. Les dépassements des valeurs réglementaires et des valeurs repères sont plus nombreux pour les $\text{PM}_{2,5}$ que pour le formaldéhyde



Tableau 6 – Synthèse des valeurs de référence actuellement en vigueur pour les polluants de l'air intérieur

Polluants	Valeur sanitaire (ANSES)			Valeur de gestion (HCSP)			Valeur réglementaire
	Court terme	Long terme	Intermédiaire	Valeur action rapide	Valeur information	Valeur repère	
Acétaldéhyde	3000 µg/m ³ (1 heure)	160 µg/m ³ (> 1an)					
Benzène	30 µg/m ³ (de 1 à 14 jours)	10 µg/m ³ (> 1 an) 2 µg/m ³ ³¹ 0,2 µg/m ³ ³²	20 µg/m ³ (de 14 jours à 1 an)	10 µg/m ³		5 µg/m ³	2 µg/m ³ (longue durée à compter du 1/01/2016)
Formaldéhyde	100 µg/m ³ (à respecter de manière répétée et continue sur la journée)			100 µg/m ³	50 µg/m ³	30 µg/m ³	10 µg/m ³ (longue durée à compter du 1/01/2015)
Ethylbenzène	22 000 µg/m ³ (24 heures)	1 500 µg/m ³ (> 1an)					
Toluène	20 000 µg/m ³ (24 heures)	20 000 µg/m ³ (> 1 an)					
NO ₂	200 µg/m ³ (1 heure)	20 µg/m ³ (> 1 an)					
PM _{2,5}	15 µg/m ³ (24 heures)	5 µg/m ³		50 µg/m ³		14 µg/m ³ au 1/01/2021	10 µg/m ³ au 1/01/2025
Radon							300 Bq/m ³

¹ vie entière - niveau de risque 10⁻⁵

² vie entière - niveau de risque 10⁻⁶



Tableau 7 – Nombre de dépassements des valeurs de référence actuellement en vigueur pour les polluants de l'air intérieur selon les pièces par typologie de bâtiment (chambre pour Logement, salle de classe pour école, espace de travail pour bureau)

Polluants	Valeur sanitaire (ANSES)			Valeur de gestion (HCSP)			Valeur réglementaire		
	Chambre	Salle de classe	Espace de travail	Chambre	Salle de classe	Espace de travail	Chambre	Salle de classe	Espace de travail
Benzène	Chambre	30 µg/m ³ (de 1 à 14 jours) (court terme)	0	Chambre	10 µg/m ³ (action rapide)	0	Chambre	2 µg/m ³ (longue durée à compter du 1/01/2016)	1 sur 8
			0	Salle de classe		0			
			0	Espace de travail		0			
	Salle de classe		0	Chambre	5 µg/m ³ (repère)	1 sur 8	Salle de classe		0
			0	Salle de classe		0			
			0	Espace de travail		0			
	Espace de travail		0	Chambre	2 µg/m ³ (cible)	1 sur 8	Espace de travail		0
			0	Salle de classe		0			
			0	Espace de travail		0			
Formaldéhyde				Chambre	100 µg/m ³ (action rapide)	0	Chambre	30 µg/m ³ (longue durée à compter du 1/01/2015)	2 sur 9
				Salle de classe		0			
				Espace de travail		0			
				Chambre	50 µg/m ³ (recommandation / information)	0			1 sur 18
				Salle de classe		0			



Polluants	Valeur sanitaire (ANSES)	Valeur de gestion (HCSP)			Valeur réglementaire			
		Espace de travail	30 µg/m ³ (repère)	0	Salle de classe			
		Chambre		2 sur 9				
		Salle de classe		1 sur 18				
		Espace de travail	10 µg/m ³ (cible)	2 sur 12	Espace de travail			2 sur 12
		Chambre		8 sur 9				
		Salle de classe		10 sur 18				
		Espace de travail	10 sur 12					
PM _{2,5}		Chambre	50 µg/m ³ (rapide)	0				
		Salle de classe		0				
		Espace de travail		0				
		Chambre	14 µg/m ³ (repère)	2 sur 6				
		Salle de classe		2 sur 10				
		Espace de travail		2 sur 9				
		Chambre	10 µg/m ³ (cible)	3 sur 6				
		Salle de classe		6 sur 6				
		Espace de travail		3 sur 9				



Polluants	Valeur sanitaire (ANSES)	Valeur de gestion (HCSP)	Valeur réglementaire		
Radon			Chambre	300 Bq/m ³	0
			Salle de classe		0
			Espace de travail		0



3. PERCEPTION DES OCCUPANTS ET CONFORT D'AMBIANCE

3.1. Perception des occupants

Afin de recueillir la perception des occupants par rapport au confort d'ambiance, un questionnaire auto-administré a été renseigné à la fin de chaque enquête par :

- Tous les occupants de 15 ans et plus dans les logements ;
- Les enseignants des salles de classe investiguées (en général, 1 par classe) ;
- Les occupants des espaces de bureau investigués en limitant à 5 dans le cas de bureau open-space.

Pour chaque enquête où plusieurs questionnaires perceptifs ont été renseignés (cas des ménages composés de plusieurs personnes, des salles de classe avec deux enseignants, des espaces de bureau multi-occupés), il a été décidé, pour chaque question posée, de sélectionner le mode c'est-à-dire la modalité de réponse la plus représentée. De ce fait, la perception des occupants est synthétisée et exprimée à l'échelle de chaque enquête.

Au niveau du confort thermique, la perception des occupants est très satisfaisante à tous les points de vue (Tableau 8) et pour les trois typologies de bâtiments. L'ambiance thermique est jugée confortable, acceptable et tout à fait supportable. Les occupants n'ont ni froid, ni chaud et ne souhaitent rien changer à cette situation.

Au niveau du confort visuel, l'ambiance visuelle est perçue comme « lumineuse » pour les trois typologies de bâtiments (Tableau 9). Pour les logements, l'éclairage naturel est confortable et plus important qu'avant les travaux de rénovation. L'utilisation de l'éclairage artificiel pour les activités normales est inchangée en revanche, l'utilisation des protections solaires est plus importante qu'avant les travaux de rénovation. Pour les bâtiments à usage d'école et de bureau, l'éclairage naturel est légèrement inconfortable et les occupants n'ont pas pu quoi répondre aux questions relatives à la quantité de lumière naturelle, à l'utilisation de l'éclairage artificiel et des protections solaires par rapport à la situation avant les travaux de rénovation.



Tableau 8 – Perception du confort thermique des occupants par typologie de bâtiment (Logement, salle de classe pour école, espace de travail pour bureau)

Questions relatives au confort thermique	Modalités de réponses	Bâtiment à usage de logement	Bâtiments à usage d'école	Bâtiments à usage de bureau
Au cours de la semaine passée dans votre logement/salle de classe/bureau, avez-vous eu....	Très froid	0	0	0
	Froid	0	0	0
	Légèrement froid	1	1	1
	Ni froid, ni chaud	4	3	2
	Légèrement Chaud	0	2	1
	Chaud	4	0	0
	Très chaud	0	0	0
	Ne sait pas	0	0	0
Au cours de la semaine passée, comment avez-vous trouvé l'ambiance thermique de votre logement/salle de classe/bureau ?	Confortable	8	5	4
	Légèrement inconfortable	1	1	0
	Inconfortable	0	0	0
	Très Inconfortable	0	0	0
	Extrêmement Inconfortable	0	0	0
	Ne sait pas	0	0	0
Au cours de la semaine passée dans votre logement/salle de classe/bureau, auriez-vous préféré avoir	Beaucoup plus froid	0	0	0
	Plus froid	0	0	0
	Légèrement plus froid	1	0	0
	Ni plus froid ni plus chaud	5	3	3
	Un peu plus chaud	1	2	1
	Plus chaud	0	0	0
	Beaucoup plus chaud	0	0	0
	Ne sait pas	2	1	0
Au cours de la semaine passée, comment avez-vous jugé l'ambiance	Acceptable	9	6	4
	Inacceptable	0	0	0



Questions relatives au confort thermique	Modalités de réponses	Bâtiment à usage de logement	Bâtiments à usage d'école	Bâtiments à usage de bureau
thermique de votre logement/salle de classe/bureau ?	Ne sait pas	0	0	0
Au cours de la semaine passée, comment avez-vous jugé l'environnement thermique de votre logement/salle de classe/bureau ?	Tout à fait supportable	9	5	4
	Un peu difficile à supporter	0	0	0
	Assez difficile à supporter	0	0	0
	Très difficile à supporter	0	0	0
	Insupportable	0	1	0
	Ne sait pas	9	1	0



Tableau 9 – Perception du confort visuel des occupants par typologie de bâtiment (Logement, salle de classe pour école, espace de travail pour bureau) (1)

Questions relatives au confort visuel	Modalités de réponses	Bâtiment à usage de logement	Bâtiments à usage d'école	Bâtiments à usage de bureau
En cette saison, en plein jour et par temps clair, comment jugez-vous l'ambiance visuelle de votre logement/salle de classe/bureau ?	Très sombre	0	0	0
	Sombre	3	1	0
	Lumineuse	6	5	4
	Très lumineuse	0	0	0
	Ne sait pas	0	0	0
En cette saison, en plein jour et par temps clair, comment jugez-vous l'éclairage naturel de votre logement/salle de classe/bureau (sans avoir recours à l'éclairage artificiel) ?	Confortable	7	3	2
	Légèrement inconfortable	2	3	2
	Inconfortable	0	0	0
	Très inconfortable	0	0	0
	Ne sait pas	0	0	0
Depuis la fin des travaux de rénovation et en cette saison, en plein jour et par temps clair, trouvez-vous que la quantité de lumière naturelle entrant dans votre logement/salle de classe/bureau est	Moins importante qu'avant les travaux	1	0	0
	La même	1	2	0
	Plus importante qu'avant les travaux	5	1	0
	Ne sait pas	2	3	4
	Sans objet	0	0	0
Depuis la fin des travaux de rénovation et en cette saison, en plein jour et par temps clair, avez-vous recours à l'éclairage artificiel pour exercer des activités normales au centre des pièces principales ?	Moins souvent qu'avant les travaux	2	0	0
	Situation inchangée	4	4	0
	Plus souvent qu'avant les travaux	1	0	0

Questions relatives au confort visuel	Modalités de réponses	Bâtiment à usage de logement	Bâtiments à usage d'école	Bâtiments à usage de bureau
	Ne sait pas	2	2	4
	Sans objet	0	0	0
Depuis la fin des travaux de rénovation et en cette saison, en plein jour et par temps clair, trouvez-vous que l'utilisation des protections solaires est	Moins souvent qu'avant les travaux	0	0	0
	La même	3	2	0
	Plus importante qu'avant les travaux	4	0	0
	Ne sait pas	2	4	4
	Sans objet	0	0	0

Au niveau du confort olfactif, aucune odeur n'est ressentie dans la majorité des cas pour les trois typologies de bâtiments (Tableau 10).

Tableau 10 – Perception du confort olfactif des occupants par typologie de bâtiment (Logement, salle de classe pour école, espace de travail pour bureau)

Questions relatives au confort olfactif	Modalités de réponses	Bâtiment à usage de logement	Bâtiments à usage d'école	Bâtiments à usage de bureau
En cette saison, globalement et en dehors de vos activités habituelles, sentez-vous des odeurs dans votre logement/salle de classe/bureau ?	Jamais	4	6	3
	Parfois	3	0	1
	Souvent	2	0	0
	Tout le temps	0	0	0
	Ne sait pas	0	0	0

Au niveau du confort acoustique, les résultats sont présentés dans les Tableau 11, Tableau 12 et Tableau 13 respectivement pour les logements, les bâtiments à usage d'école et les bâtiments à usage de bureau. Les questions ont porté sur les bruits provenant de l'extérieur notamment liés au trafic routier, sur les sources de bruit provenant du logement/de la salle de classe/ de l'espace de bureau et les sources de bruit provenant du bâtiment (des autres logements, salles de classe ou espaces de bureau).



- Dans les logements, le ressenti des occupants vis-à-vis des sources de bruit provenant de l'extérieur (circulation) est assez hétérogène : un tiers n'est pas gêné par ces bruits, alors qu'un autre tiers est moyennement gêné et que certains répondants sont même extrêmement gênés. Concernant les autres sources de bruit (intérieurs au logement ou au bâtiment), la majorité des occupants ne sont pas ou peu gênés. Si certains occupants sont moyennement à extrêmement gênés, une partie d'entre eux ne sait pas répondre aux questions formulées ;
- Dans les bâtiments à usage d'école, la majorité des occupants n'est pas ou peu gênée par les sources de bruit provenant de l'extérieur (circulation et élèves/personnel présent à l'extérieur). Pour les sources de bruit provenant des salles de classe, aucune gêne n'est exprimée par rapport aux bruits des équipements de génie climatique alors que les avis sont très divergents pour les cliquetis ou tintement du mobilier (chaises). Par rapport aux sources de bruit provenant des autres locaux appartenant à l'établissement, seul le bruit lié à la parole et à la fermeture des portes dans les escaliers, les coursives, les parties communes est à l'origine de la gêne de la moitié des occupants ;
- Dans les bâtiments à usage de bureau, aucune gêne n'est liée ni aux sources de bruit extérieurs (circulation), ni aux sources de bruit provenant des autres locaux du bâtiment. En revanche, les occupants sont un peu gênés par les équipements de génie climatique et par le comportement des autres personnes présentes dans leur espace de travail.



Tableau 11 – Perception du confort acoustique des occupants des bâtiments à usage de logement

Questions relatives au confort acoustique		Modalités de réponses	Bâtiment à usage de logement
Depuis la fin des travaux de rénovation, êtes vous dérangé(e), perturbé(e) ou gêné(e) par ces sources de bruit provenant de l'extérieur telle que la circulation (voitures, bus, camions, trains ou avions) ; entendus à l'intérieur avec les fenêtres fermées		Pas du tout	3
		Un peu	1
		Moyennement	3
		Très	0
		Extrêmement	2
		Ne sais pas	0
Depuis la fin des travaux de rénovation, êtes vous dérangé(e), perturbé(e) ou gêné(e) par ces sources de bruit provenant de votre logement ?	Cliquetis ou tintement de votre propre mobilier ou de vos équipements légers, par ex. lorsque quelqu'un marche au niveau supérieur	Pas du tout	5
		Un peu	2
		Moyennement	1
		Très	1
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	0
	Equipements de génie climatique dans votre logement ; chaudière, air conditionné, bouches de ventilation, gaines	Pas du tout	5
		Un peu	2
		Moyennement	2
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	0
	Votre propre famille ; entendue dans votre logement avec les portes fermées	Pas du tout	4
		Un peu	2
		Moyennement	2
		Très	1
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	0



Questions relatives au confort acoustique		Modalités de réponses	Bâtiment à usage de logement
Depuis la fin des travaux de rénovation, êtes-vous dérangé(e), perturbé(e) ou gêné(e) par ces sources de bruit provenant des autres logements de votre bâtiment ?	Paroles, TV, consoles de jeux etc. à travers les murs séparatifs des logements sur le même niveau que le vôtre	Pas du tout	3
		Un peu	2
		Moyennement	1
		Très	1
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	1
	Paroles, TV, consoles de jeux etc. à travers les planchers/plafonds séparatifs des logements situés en dessous ou en dessus du votre	Pas du tout	4
		Un peu	2
		Moyennement	0
		Très	1
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	1
	Musique forte (avec basses et percussions) à travers les murs ou planchers séparatifs des logements autour du votre	Pas du tout	3
		Un peu	2
		Moyennement	0
		Très	1
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	2
	Bruits d'impact en provenance des autres logements , par ex. bruits de pas, mobilier que l'on déplace, chutes de jouets, etc. (Pas du tout	5
		Un peu	1
		Moyennement	0
Très		0	
Extrêmement		1	
Ne sais pas		1	
Paroles, fermeture de portes dans les	Pas du tout	3	



Questions relatives au confort acoustique		Modalités de réponses	Bâtiment à usage de logement
	escaliers, coursives, circulations communes, etc	Un peu	1
		Moyennement	1
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	2
	Bruit de pas ou autres sources de bruits d'impact dans les escaliers, coursives, circulations communes, etc	Pas du tout	4
		Un peu	0
		Moyennement	1
		Très	0
		Extrêmement	1
		Ne sais pas	2
	Canalisations d'eau dans les autres logements ; plomberie, utilisation des WC, chasse d'eau	Pas du tout	6
		Un peu	0
		Moyennement	0
		Très	1
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	1
	Equipements divers hors de votre logement ; ascenseur, machine à laver, machinerie de ventilation	Pas du tout	5
		Un peu	1
		Moyennement	1
Très		0	
Extrêmement		0	
Ne sais pas		1	
Locaux non résidentiels ; par ex. garages, boutiques, bureaux, restaurants, laveries, etc. entendus à	Pas du tout	6	
	Un peu	1	



Questions relatives au confort acoustique		Modalités de réponses	Bâtiment à usage de logement
	l'intérieur avec les fenêtres fermées	Moyennement	0
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	1

Tableau 12 – Perception du confort acoustique des occupants des bâtiments à usage d'école

Questions relatives au confort acoustique		Modalités de réponses	Bâtiment à usage d'école
Depuis la fin des travaux de rénovation, êtes-vous dérangé(e), perturbé(e) ou gêné(e) par ces sources de bruit provenant de l'extérieur ?	Circulation (voitures, bus, camions, trains ou avions) ; entendus à l'intérieur avec les fenêtres fermées	Pas du tout	4
		Un peu	1
		Moyennement	0
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	1
	Elèves et personnel de l'établissement présents à l'extérieur (cour de récréation, terrains de sport, etc.) ; entendus à l'intérieur avec les fenêtres fermées	Pas du tout	2
		Un peu	0
		Moyennement	1
		Très	1
		Extrêmement	1
		Ne sais pas	1
Depuis la fin des travaux de rénovation, êtes-vous dérangé(e), perturbé(e) ou gêné(e) par ces sources de bruit provenant de cette	Cliquetis ou tintement du mobilier ou des équipements légers, par ex. lorsque quelqu'un pousse sa chaise	Pas du tout	2
		Un peu	1
		Moyennement	0



Questions relatives au confort acoustique		Modalités de réponses	Bâtiment à usage d'école
salle de classe?		Très	0
		Extrêmement	2
		Ne sais pas	1
	Equipements de génie climatique dans votre salle de classe; chaudière, air conditionné, bouches de ventilation, gaines	Pas du tout	4
		Un peu	0
		Moyennement	0
		Très	1
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	0
Depuis la fin des travaux de rénovation, êtes vous dérangé(e), perturbé(e) ou gêné(e) par ces sources de bruit provenant des autres locaux appartenant à l'établissement (locaux d'enseignement, bureaux, circulations intérieures, sanitaires, espaces de restauration, salles de pratique musicale ou sportive, etc.)?	Paroles, pratique musicale ou sportive, etc. à travers les murs séparatifs des locaux sur le même niveau que le votre	Pas du tout	2
		Un peu	1
		Moyennement	1
		Très	1
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	1
	Paroles, pratique musicale ou sportive, etc. à travers les planchers/plafonds séparatifs des locaux situés en dessous ou en dessus de votre salle de classe	Pas du tout	3
		Un peu	1
		Moyennement	1
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	1
	Musique forte (avec basses et percussions) à travers les murs ou planchers séparatifs des locaux autour de votre salle de classe	Pas du tout	2
		Un peu	1
		Moyennement	1
		Très	0
		Extrêmement	0



Questions relatives au confort acoustique		Modalités de réponses	Bâtiment à usage d'école
		Ne sais pas	2
	Bruits d'impact en provenance des autres locaux , par ex. bruits de pas, mobilier que l'on déplace, chutes d'objets, etc.	Pas du tout	2
		Un peu	1
		Moyennement	1
		Très	1
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	1
		Paroles, fermeture de portes dans les escaliers, coursives, circulations communes, etc	Pas du tout
	Un peu		1
	Moyennement		0
	Très		2
	Extrêmement		0
	Ne sais pas		1
	Bruit de pas ou autres sources de bruits d'impact dans les escaliers, coursives, circulations communes, etc.	Pas du tout	2
		Un peu	2
		Moyennement	1
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	1
	Canalisations d'eau dans les sanitaires et cuisines; plomberie, utilisation des WC, chasse d'eau	Pas du tout	3
		Un peu	1
		Moyennement	1
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	1
	Equipements divers	Pas du tout	4



Questions relatives au confort acoustique		Modalités de réponses	Bâtiment à usage d'école
	hors de votre salle de classe; ascenseur, porte automatique, machinerie de ventilation, chaufferie, gros équipement des cuisines (ex: four, hotte, lave-vaisselle), etc.	Un peu	0
		Moyennement	0
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	1

Tableau 13 – Perception du confort acoustique des occupants des bâtiments à usage de bureau

Questions relatives au confort acoustique		Modalités de réponses	Bâtiment à usage de bureau	
Depuis la fin des travaux de rénovation, êtes vous dérangé(e), perturbé(e) ou gêné(e) par ces sources de bruit provenant de l'extérieur telle que la circulation (voitures, bus, camions, trains ou avions); entendus à l'intérieur avec les fenêtres fermées ?		Pas du tout	4	
		Un peu	0	
		Moyennement	0	
		Très	0	
		Extrêmement	0	
		Ne sais pas	0	
Depuis la fin des travaux de rénovation, êtes vous dérangé(e), perturbé(e) ou gêné(e) par ces sources de bruit provenant de cet espace de travail ?	Cliquetis ou tintement du mobilier ou des équipements légers, par ex. lorsque quelqu'un pousse sa chaise	Pas du tout	4	
		Un peu	0	
		Moyennement	0	
		Très	0	
		Extrêmement	0	
		Ne sais pas	0	
	Equipements de génie climatique dans votre espace de travail ; air conditionné, bouches de ventilation, gaines	Pas du tout	2	
		Un peu	2	
		Moyennement	0	
		Très	0	



Questions relatives au confort acoustique		Modalités de réponses	Bâtiment à usage de bureau
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	0
	Comportement des autres personnes présentes dans votre espace de travail, par ex. collègues, visiteurs extérieurs ; discussions, conversations téléphoniques, utilisation du clavier ou de la souris, mouvements, etc	Pas du tout	1
		Un peu	3
		Moyennement	0
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	0
		Outils de travail et équipements divers présents dans votre espace de travail ; unité centrale d'ordinateur, imprimante/copieur numérique, distributeur de boissons ou de nourriture, ascenseur, etc.	Pas du tout
	Un peu		1
	Moyennement		0
	Très		0
	Extrêmement		0
	Ne sais pas		0
Depuis la fin des travaux de rénovation, êtes-vous dérangé(e), perturbé(e) ou gêné(e) par ces sources de bruit provenant des autres locaux du bâtiment (salle de réunion, salle de convivialité, bureaux, circulations intérieures, sanitaires, espaces de restauration, salles de pratique musicale ou sportive, etc.) ?	Paroles, utilisation des outils de travail, etc. à travers les murs séparatifs des locaux sur le même niveau que le votre	Pas du tout	2
		Un peu	2
		Moyennement	0
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	0
	Paroles, utilisation des outils de travail, etc. à travers les planchers/plafonds séparatifs des locaux situés en dessous ou en dessus de votre espace de travail	Pas du tout	3
		Un peu	0
		Moyennement	1
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	3



Questions relatives au confort acoustique		Modalités de réponses	Bâtiment à usage de bureau
	Musique forte (avec basses et percussions) à travers les murs ou planchers séparatifs des locaux autour de votre espace de travail	Pas du tout	4
		Un peu	0
		Moyennement	0
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	0
	Bruits d'impact en provenance des autres locaux, par ex. bruits de pas, mobilier que l'on déplace, chutes d'objets, etc.	Pas du tout	4
		Un peu	0
		Moyennement	0
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	0
	Paroles, fermeture de portes dans les escaliers, coursives, circulations intérieures, etc	Pas du tout	3
		Un peu	0
		Moyennement	1
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	0
	Bruit de pas ou autres sources de bruits d'impact dans les escaliers, coursives, circulations intérieures, etc.	Pas du tout	3
		Un peu	0
		Moyennement	1
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	0
Canalisations d'eau dans les sanitaires et espaces de restauration ;	Pas du tout	4	
	Un peu	0	



Questions relatives au confort acoustique		Modalités de réponses	Bâtiment à usage de bureau
	plomberie, utilisation des WC, chasse d'eau, etc.	Moyennement	0
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	0
	Equipements divers hors de votre espace de travail ; ascenseur, porte automatique, machinerie de ventilation, laverie, chaufferie, etc..	Pas du tout	4
		Un peu	0
		Moyennement	0
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	0
	Locaux non affectés à votre entreprise ; par ex. garages, boutiques, bureaux, restaurants, laveries, etc. entendus à l'intérieur avec les fenêtres fermées	Pas du tout	4
		Un peu	0
		Moyennement	0
		Très	0
		Extrêmement	0
		Ne sais pas	0

3.2. Confort thermique

Les résultats des mesures de température et d'humidité relative mesurés toutes les 10 minutes dans les différentes pièces des bâtiments ont été moyennés sur la durée de l'enquête. Dans les logements, toutes les mesures ont été sélectionnées quelle que soit la période d'occupation/d'inoccupation alors que pour les écoles et les bureaux, seules les mesures réalisées pendant la période d'occupation ont été prises en compte.

Les résultats présentés dans le Tableau 14 montrent que la température moyenne hebdomadaire oscille entre 21°C (pour les salles de classe) et 24°C (pour les séjours des logements ou les espaces de bureau). Il faut noter que la variation de température est plus importante dans les logements que dans les écoles ou les bureaux. Pour l'humidité relative, la



valeur moyenne hebdomadaire oscille entre 42% (pour les espaces de bureau) et 51% (pour les chambres des logements). Sa variation est plus importante dans les écoles et les bureaux que dans les logements.

Tableau 14 - Mesures des paramètres de confort thermique selon la catégorie de bâtiments

Typologie de bâtiments		Paramètres du confort thermique	Indicateurs statistiques				
			n	Moyenne (ET)	P25	P50	P75
Logements Maisons individuelles ou immeubles collectifs	Chambre	Température hebdomadaire moyenne (°C) toutes périodes	9	22,1 (2,7)	19,7	21,7	24,9
		Humidité relative hebdomadaire moyenne (%) toutes périodes	9	50,9 (3,8)	47,8	49	54,6
	Séjour	Température hebdomadaire moyenne (°C) toutes périodes	8	24,1 (3,6)	20,6	25,1	27,2
		Humidité relative hebdomadaire moyenne (%) toutes périodes	8	44 (7,6)	38,1	44,2	49,7
Salle de classe Bâtiments à usage d'école	à usage	Température hebdomadaire moyenne (°C) en période d'occupation	12	21,1 (0,68)	20,7	21,1	21,4
		Humidité relative hebdomadaire moyenne (%) en période d'occupation	12	43,6 (6,1)	41,4	43,8	48,3
Espace de travail Bâtiments à usage de bureaux		Température hebdomadaire moyenne (°C) en période d'occupation	11	24,4 (1,6)	23,7	25	25,5
		Humidité relative hebdomadaire moyenne (%) en période d'occupation	11	42,1 (6,1)	38,4	39,4	45,5



3.3. Confort acoustique

3.3.1. Bruit d'équipements

Les niveaux sonores des équipements tels que les systèmes de ventilation mécanique contrôlée, de chauffage (chaudière, PAC) et de climatisation ont été mesurés lorsqu'ils étaient présents dans les bâtiments investigués.

Dans les bâtiments à usage de logement, les niveaux de pression acoustique par bandes de fréquence de 4 systèmes VMC, 1 PAC, 1 chaudière et une climatisation (mode chauffage) ont été mesurés. Le niveau de pression acoustique global a été par la suite calculé. Les résultats sont illustrés dans la Figure 4. Il apparaît que pour les équipements mesurés, le niveau de pression acoustique est proche du niveau de bruit de fond dans le local, à l'exception de la chaudière du bâtiment 4 caractérisée par une émission de bruit notable dans les moyennes fréquences. En termes de niveau de pression acoustique global, il est inférieur à 30 dBA pour le climatiseur et la PAC (tous les deux en mode chauffage), compris entre 29 et 33 dBA pour les VMC et égal à 50 dBA pour la chaudière.

Dans les bâtiments à usage d'école, seuls les systèmes de ventilation mécanique contrôlée ont fait l'objet de la mesure des bruits d'équipements. Quatre systèmes VMC de 4 bâtiments à usage d'école ont été mesurés dans 3 salles de classe par bâtiments. Les résultats présentés dans la **Figure 5** indiquent que l'émission du bruit se fait principalement dans les basses fréquences sauf pour les mesures de la pièce 3 des bâtiments 1 et 2 où le bruit est plus important en hautes fréquences. Le niveau de pression acoustique global est en moyenne plus élevé (entre 30 et 38 dBA) que celui mesuré pour les VMC des logements et variable selon les bâtiments (niveau moyen du bâtiment 4 < bâtiment 3 < bâtiment 2 < bâtiment 1), voire les salles de classe d'un même bâtiment (cas des bâtiments 1 et 2). Dans le cas des pièces 3 du bâtiment 1 et 2, il est possible que ces particularités soient liées à une mauvaise mise en œuvre (ex : pincement d'une gaine flexible) ou d'un mauvais réglage de l'installation (débit trop élevé dans les branches desservant la salle de classe).

Dans les bâtiments à usage de bureau, un système de ventilation mécanique contrôlée et un climatiseur (en mode froid et chauffage) ont fait l'objet de la mesure des bruits d'équipements mesuré. Les résultats présentés dans la **Figure 6** indiquent que l'émission du bruit des deux équipements se fait principalement dans les basses fréquences. Le niveau de pression acoustique global est d'environ 27 dBA pour le climatiseur en mode chauffage et 36, en mode refroidissement et en moyenne égal à 42 dBA pour la VMC (niveau plus élevé que ceux mesurés dans les logements et les bâtiments à usage d'école).



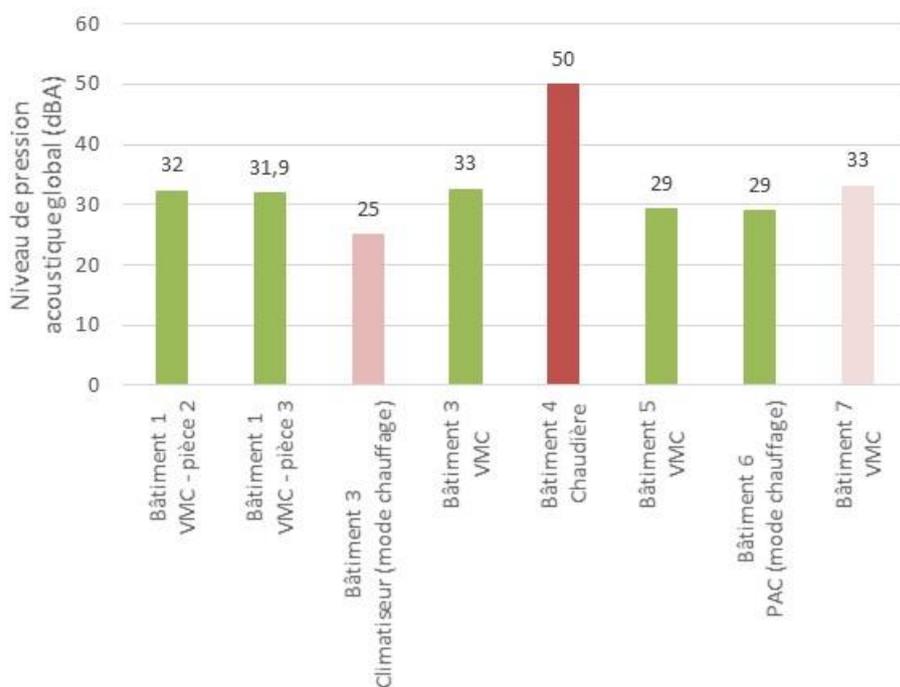
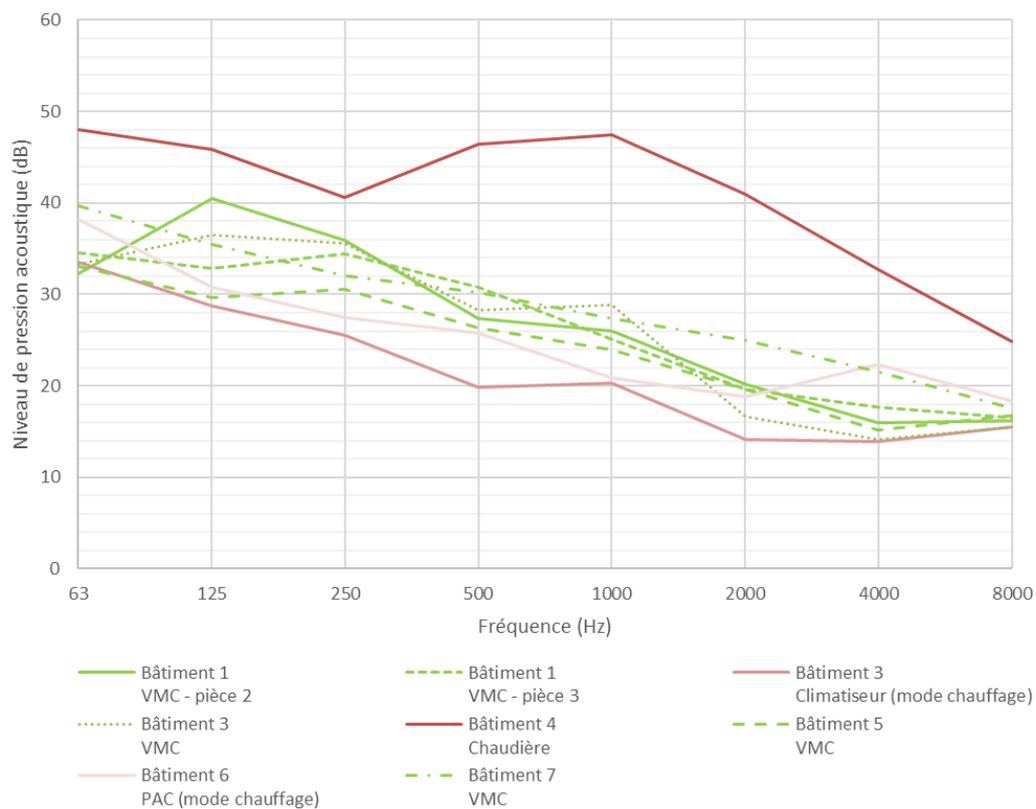


Figure 4 – Niveau de pression acoustique par bande de fréquence (dB) (en haut) et global (dBA) (en bas) des équipements présents dans 6 bâtiments à usage de logements



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

3.3.2. Isolement de façade

L'isolement de façade a été mesuré dans au moins deux pièces du logement (chambre principale et séjour), dans les 3 salles de classe des bâtiments à usage d'école et les 3 espaces de bureau des bâtiments à usage de bureau. Dans ce but, des mesures de niveau de pression acoustique ont été réalisées dans chacune de ces pièces, une fois, avec la fenêtre ouverte et une autre fois avec la fenêtre fermée en utilisant le bruit de la circulation routière comme source de bruit extérieur.

L'exploitation des données de mesure a pu mettre en évidence, pour tous les bâtiments, un rapport signal sur bruit insuffisant, notamment en moyennes et hautes fréquences, ne permettant pas l'évaluation de l'isolement des façades. Ceci explique pourquoi aucun résultat de mesure n'est présenté dans ce rapport.

Cette situation peut être liée à l'éloignement des bâtiments du panel 2 par rapport au trafic routier, ou bien à l'intensité de ce trafic et il conviendra de calculer cet indicateur pour les bâtiments du panel 1.

Quoiqu'il en soit, ces premiers résultats indiquent qu'afin de fiabiliser les mesures, il est nécessaire d'utiliser une source de bruit extérieur artificiel quelle que soit la localisation du bâtiment, ce qui a été intégré dans la méthode simplifiée utilisant une enceinte générant un bruit standardisé.



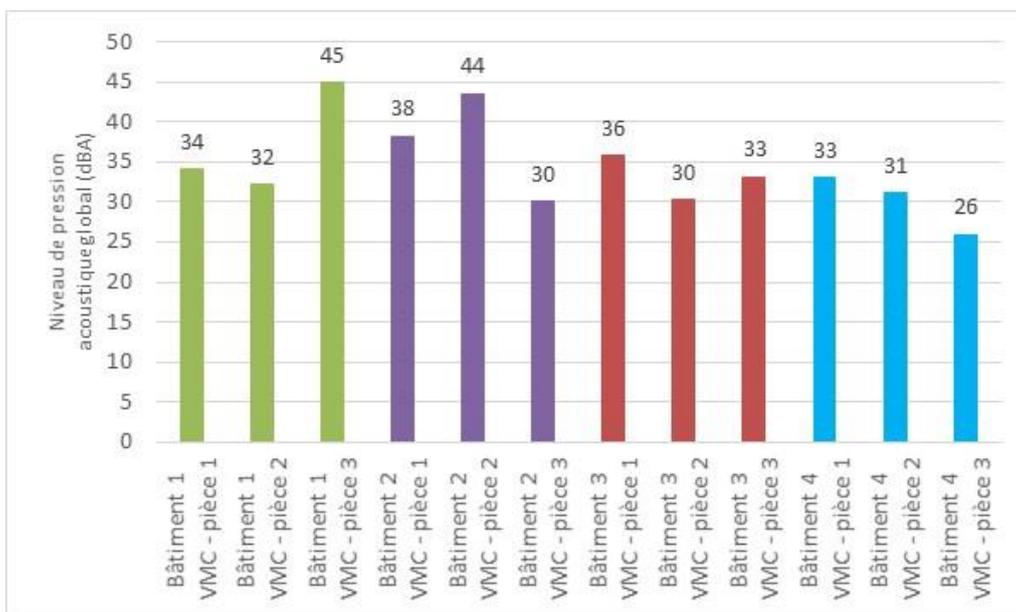
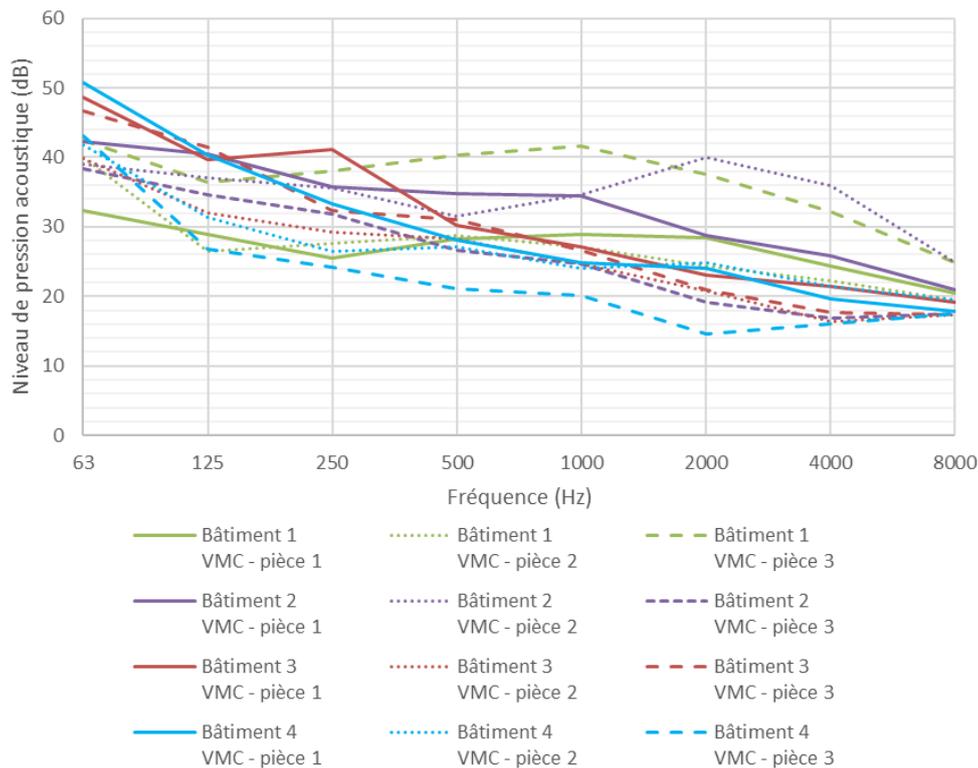


Figure 5 – Niveau de pression acoustique par bande de fréquence (dB) (en haut) et global (dBA) (en bas) des équipements présents dans 4 bâtiments à usage d'école



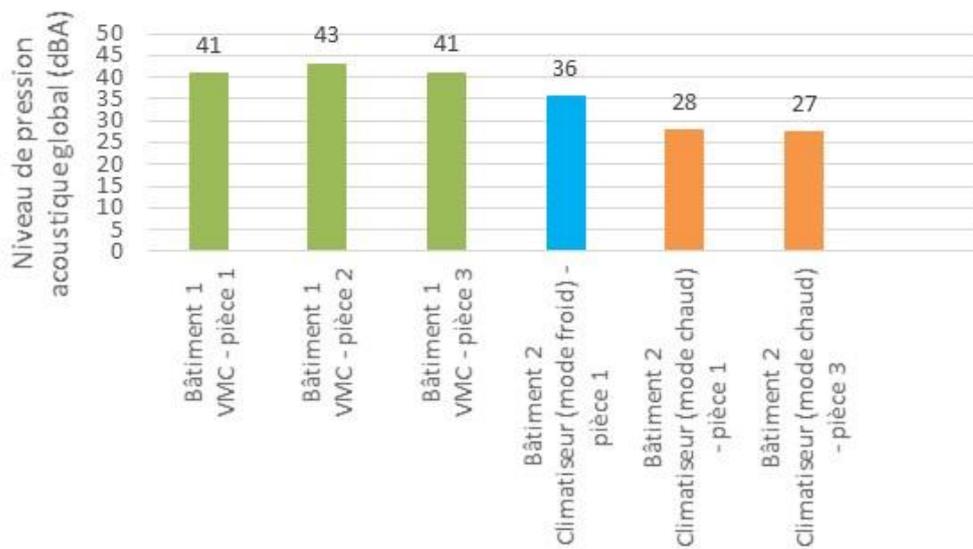
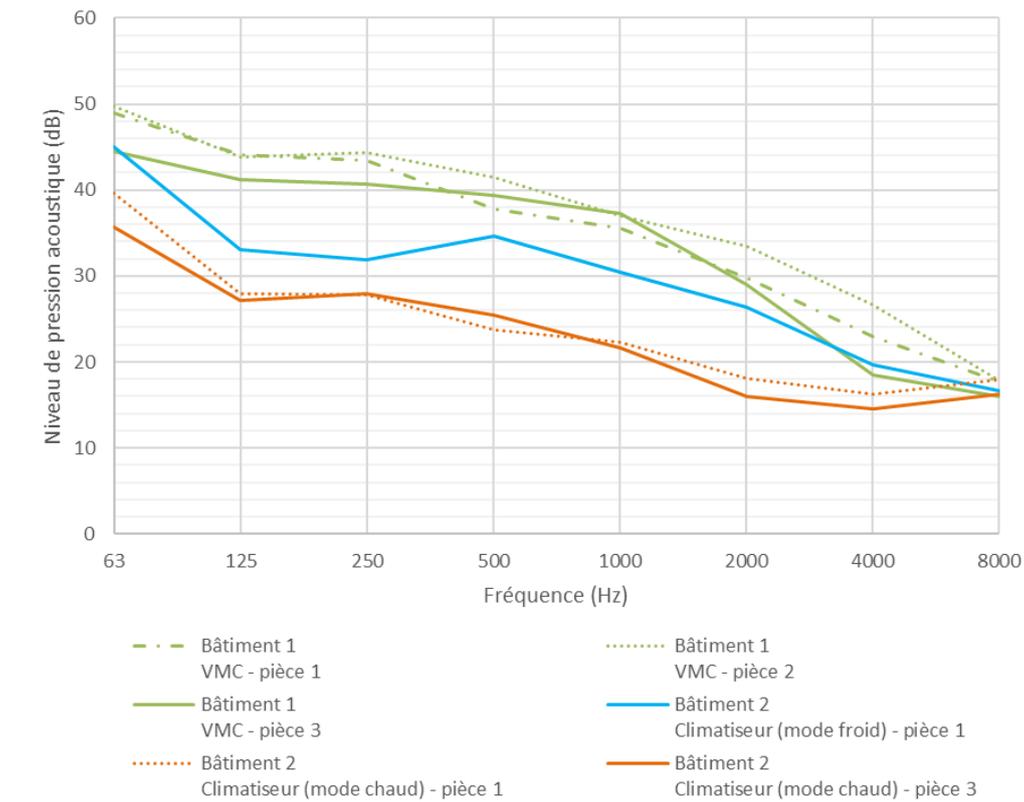


Figure 6 – Niveau de pression acoustique par bande de fréquence (dB) (en haut) et global (dBA) en bas des équipements présents dans 2 bâtiments à usage de bureaux



4. CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE

4.1. Méthodologies d'évaluation de la performance

Le déploiement de la méthode de référence et de la méthode simplifiée ont permis de recueillir des données de consommation énergétique selon différentes granularités. Ainsi, les méthodes proposées pour l'analyse de ces résultats correspondent à plusieurs niveaux de précision, définis ci-dessous. Les résultats obtenus permettant en particulier de calculer l'indicateur énergie associé.

- Méthode de niveau 0 :
 - Cette méthode s'appuie sur l'utilisation de données de consommation annuelles ou semestrielles (issues généralement de factures) ;
 - Un outil Excel a été développé pour appliquer une correction climatique aux données de consommation recueillies, intégrant l'utilisation de ratios CEREN pour déterminer la part chauffage à corriger pour les logements et l'utilisation des ratios de l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire pour déterminer les parts chauffage et refroidissement à corriger pour les bureaux et écoles ;
 - La correction climatique suit la méthode proposée dans le cadre de l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire (via une hypothèse de proportionnalité entre la consommation de chauffage et des degrés-jours de chauffage d'une part et la consommation de refroidissement et des degrés-jours de refroidissement d'autre part) ;
 - Cette méthode est contrainte et limitée par le niveau de données disponibles ;

- Méthode de niveau 1 :
 - Cette méthode s'appuie sur l'utilisation des données de consommations issues de compteurs communicants, au pas de temps fin : 30 minutes (Linky) / journalier (gazpar). Pour les besoins de ce projet, les méthodes sont déclinées au pas de temps mensuel lorsque les données à pas de temps plus fin ne sont pas disponibles ;
 - L'outil utilisé est opensource : CalTrack Methods (référence internationale) permettant la détermination des mois de chauffe/hors chauffe et des consommations mensuelles avec et sans chauffage ;
 - La correction climatique appliquée s'appuie sur une régression linéaire par morceaux avec point de changement ;

- Méthode de niveau 2 :
 - Cette méthode s'appuie sur l'utilisation de données de consommation à pas de temps identique que pour la méthode de niveau 1 ;
 - Elle inclut la prise en compte de la température intérieure et l'ensoleillement en données d'entrée des modèles d'ajustement des consommations recueillies ;
 - Elle permet notamment une comparaison plus fine des consommations des bâtiment avant et après travaux en prenant par exemple en compte l'effet rebond.



La suite de ce rapport présente en détail le contenu et outils d'analyse pour chaque méthode.

4.1.1. Méthode de niveau 0, à partir des données uniquement annuelles

Cette méthode nécessite uniquement **des factures annuelles ou des déclarations de consommation annuelle**.

Un outil Excel (« QSE - Calcul_consommation_énergie_V1.xlsx ») développé pour faciliter sa mise en œuvre est intégrée dans la méthode QSE et présenté en annexe.

4.1.1.1. Cas des logements

Elle **ne peut s'appliquer qu'à des logements ne présentant pas de climatisation**. En effet, nous ne disposons pas de la possibilité d'estimer sur la base de données de consommations au pas de temps annuel la part liée à la climatisation afin de corriger celle-ci du climat. Dans le cadre de cette méthode, il est prévu **uniquement une correction climatique de la part de la consommation liée au chauffage pour la ramener à climat normal**. Les autres usages sont ici supposés indépendants du climat.

L'outil Excel développé fait apparaître un onglet « Résidentiel » permettant de traiter ce type d'usage.

Est à renseigner l'ensemble des informations suivantes sur le logement (le cas échéant, des listes de choix sont proposées dans les différentes cellules de l'onglet) :

- Type de logement : Maison ou Appartement ;
- Période de construction/Période de rénovation globale (si cette dernière période est postérieure à l'année des consommations fournies, renseigner la période de construction) : 1975_et_avant, 1975-1982, 1982-1989, 1990-1998, 1999 et Après ;
- Département ;
- Surface habitable (en m²) ;
- Type de chauffage présent : Individuel ou Collectif.

Est à renseigner l'ensemble des informations suivantes sur les énergies utilisées dans le logement (le cas échéant, des listes de choix sont proposées dans les différentes cellules de l'onglet) :

- Energie principale de chauffage : Electricité, Gaz, Fioul, Bois, Réseau de chaleur, Autre ;
- Energie d'appoint ou secondaire de chauffage : Pas d'appoint/2nde énergie, Electricité, Gaz, Fioul, Bois, Réseau de chaleur, Autre ;
- Energie principale de production d'ecs (eau chaude sanitaire) : Electricité, Gaz, Fioul, Bois, Réseau de chaleur, Autre ;



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

- Energie d'appoint ou secondaire de production d'ecs : Pas d'appoint/2nde énergie, Electricité, Gaz, Fioul, Bois, Réseau de chaleur, Autre ;
- Energie principale de cuisson : Electricité, Gaz, Bois, Autre ;
- Energie d'appoint ou secondaire de cuisson : Pas d'appoint/2nde énergie, Electricité, Gaz, Bois, Autre.

Et à déclarer l'ensemble des consommations annuelles d'énergie du logement (le cas échéant, des listes de choix sont proposées dans les différentes cellules de l'onglet) :

- Pour l'électricité, Mois de début de l'année considérée (entre Janvier et Décembre), Année civile de début de l'année considérée (2015 à 2020), Consommation annuelle en kWh d'énergie finale ;
- Pour le gaz, Mois de début de l'année considérée (entre Janvier et Décembre), Année civile de début de l'année considérée (2015 à 2020), Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCS³ (les kWh présents sur les factures ou obtenus à partir des m³ et des coefficients kWh par m³ présents sur les factures) ;
- Pour le fioul, Année civile de début de l'année considérée (2015 à 2020), Consommation annuelle en litre ;
- Pour bois, Année civile de début de l'année considérée (2015 à 2020), Consommation annuelle de bois bûches en stère, Paiement du bois bûches (Totalemment payés, Partiellemment payés, Totalemment gratuits), Consommation annuelle de granulés/pellets bois en kg, Consommation annuelle de briquettes de bois en kg, Consommation annuelle de plaquettes de bois en kg ;
- Pour le réseau de chaleur, Mois de début de l'année considérée (entre Janvier et Décembre), Année civile de début de l'année considérée (2015 à 2020), Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCI⁴ ;
- Pour une énergie autre, Année civile de début de l'année considérée (2015 à 2020), Consommation annuelle en litre en kWh d'énergie finale PCI.

Détermination du ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal

Les factures annuelles ou déclarations de consommation annuelle des différentes énergies consommées dans le logement sont tout d'abord converties en kWh d'énergie finale PCI. Sont utilisés pour se faire les coefficients de conversion de l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire (Eco Energie Tertiaire, Arrêté du 10 avril 2020 relatif aux obligations d'actions de réduction des consommations d'énergie finale dans des bâtiments à usage tertiaire, 2020).

³ Le pouvoir calorifique supérieure représente la quantité réelle de chaleur qui peut être produite par un combustible dans un processus de combustion plus la chaleur de vaporisation de l'eau récupérable (chaleur latente de la vapeur contenue dans les fumées récupérable par condensation de celles-ci).

⁴ Le pouvoir calorifique inférieur représente la quantité réelle de chaleur qui peut être produite par un combustible dans un processus de combustion, où la chaleur de vaporisation de l'eau n'est pas récupérable.



Tableau 15 : Conversion des unités d'énergie

Energie	kWh _{ef} PCI
1 kWh d'électricité	1
1 kWh _{ef} PCS de gaz naturel issu du réseau	0,9
1 litre de fioul domestique	9,97
1 stère de bois bûches	1680
1 kg de granulés/pellets de bois	4,6
1 kg de briquettes de bois	4,6
1 kg de plaquettes de bois	2,2
1 kWh de réseau de chaleur	1
1 kWh d'une autre énergie	1

Ensuite des vérifications sont effectuées, automatiquement dans l'Excel, d'une part, sur la présence de consommations déclarées pour les énergies déclarées comme utilisées et inversement et d'autre part, sur les périodes de consommation déclarées, il est toléré moins de 6 mois d'écart entre les débuts des différentes périodes. Une fois celles-ci satisfaites (dans la cellule F2 de l'onglet « Résidentiel » de l'outil Excel, il est indiqué un « Ok » en couleur verte si cela est le cas ; pour toute autre situation, il est indiqué le problème en couleur rouge) l'ensemble des consommations annuelles des différentes énergies est sommé pour obtenir la consommation annuelle d'énergie au périmètre tous usages à climat réel en kWh_{ef} du logement : $C_{tous\ usages}^{réel}$

Dans notre cas, c'est toutefois une consommation annuelle d'énergie au périmètre tous usages à climat normal en kWh_{ef} du logement $C_{tous\ usages}^{normal}$ que nous souhaitons obtenir, ce qui nous amène, comme indiqué au-dessus, à corriger du climat la consommation annuelle de chauffage du logement. Dans ce cadre et pour cette méthode, le climat est caractérisé au travers la grandeur de degrés-jours de chauffage DJ_{ch} . Ces derniers sont définis sur une période donnée (année ou saison de chauffage) comme la somme des écarts positifs (i.e. quand la température moyenne d'une journée est inférieure à la température seuil) existants entre les moyennes journalières des températures extérieures de cette période et une température seuil appelée base. Ils s'expriment en °C.jour. Pour le logement, il est couramment employé comme température de base 18°C, cette valeur de 18 °C étant une température de non-chauffage au-dessus de laquelle il est supposé que le chauffage ne fonctionne pas. Ce 18 °C correspond à une température intérieure en période de chauffage entre 19 °C et 20°C, les 1 ou 2 °C supplémentaires étant supposés être apportés par les gains internes (métabolisme des occupants et pertes thermiques des appareils électriques) et par les apports solaires. Toutes choses étant égales par ailleurs, la consommation de chauffage est considérée directement proportionnelle aux degrés-jours de chauffage. Ainsi, la consommation réelle annuelle de chauffage est ajustée à un climat normal par la relation suivante :



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

$$C_{ch}^{normal} = C_{ch}^{réel} * \frac{DJ_{ch,18}^{normal}}{DJ_{ch,18}^{réel}} \text{ (Equation 1)}$$

avec C_{ch}^{normal} , consommation annuelle de chauffage ajustée à un climat normal, en kWh/ef,
 $C_{ch}^{réel}$, consommation annuelle de chauffage à climat réel de l'année donnée, en kWh/ef,
 $DJ_{ch,18}^{normal}$, degrés-jours de chauffage base 18 du climat normal, en °C.jour,
 $DJ_{ch,18}^{réel}$, degrés-jours de chauffage base 18 du climat réel de l'année donnée, en °C.jour.

Comme dans le cas de l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire, les degrés-jours sont définis à l'échelle d'une station météo de référence par département. Sont utilisées les données météo présentes dans l'outil interne CSTB MEREN. Le climat normal est déterminé comme la moyenne des degrés-jours de chauffage entre l'année 2005 (pas de données disponibles avant pour tous les départements) et l'année 2019. Le climat réel est lui déterminé comme la somme des degrés-jours mensuels de chauffage des 12 mois consécutifs à partir du mois de début de l'année de consommation déclarée pour l'énergie indiquée comme énergie principale de chauffage (dans le cas du fioul, du bois ou autre énergie où il n'est demandé qu'une année civile, il est considéré comme mois de début le mois de janvier).

Concernant la détermination de la consommation annuelle de chauffage à climat réel à laquelle appliquer la correction climatique, deux possibilités sont présentes ici :

- Soit les consommations d'énergie liées respectivement au chauffage principal et à l'éventuel chauffage d'appoint/secondaire sont directement déduites des consommations d'énergie déclarées (e.g. chauffage principal au fioul avec du fioul qui n'est utilisé que pour le chauffage + chauffage d'appoint bois avec du bois qui n'est utilisé que pour le chauffage) ;
- Soit les consommations d'énergie liées respectivement au chauffage principal et à l'éventuel chauffage d'appoint/secondaire ne peuvent pas être directement déduites des consommations d'énergie déclarées (e.g. chauffage principal à l'électricité avec une part de la consommation d'électricité déclarée liée à minima à l'électricité spécifique) et dans ce cas, nous utilisons une hypothèse sur la part liée au chauffage (chauffage principal + éventuel chauffage d'appoint/secondaire) dans la consommation annuelle toutes énergies tous usages à climat réel.

Ces hypothèses sur la part liée au chauffage dans la consommation toutes énergie tous usages sont directement tirées des données du CEREN de consommations annuelles, à climat normal, pour le parc français des résidences principales en 2019⁵ (dernière année avant les changements d'usage des logements liés à la crise COVID). Plus spécifiquement, il est défini cette part en fonction du type de logement, du type de chauffage, de l'énergie principale de chauffage, de la présence d'un appoint et de la période de construction/rénovation globale. Ci-dessous les valeurs tirées de la part de chauffage dans la consommation annuelle toutes énergies tous usages dans les différentes configurations de logement.

⁵ Fichier Excel « 20102_2019ApprocheLogementTCDKwh.xlsx ». Ceren (Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie), <https://www.ceren.fr>. Il est un Groupement d'Intérêt Economique (GIE), composé actuellement des gestionnaires de réseau qui assurent le transport et la distribution du gaz et de l'électricité – GRTgaz, GRDF, RTE, Enedis, ainsi que l'Agence de la Transition Écologique (ADEME).



Tableau 16 : Valeurs tirées de la part de chauffage dans la consommation annuelle toutes énergies tous usages dans les différentes configurations de logement

Type de logement	Période de construction / rénovation globale	Type de chauffage	Energie principale de chauffage				
			Bois	Électricité	Fioul	Gaz	Réseau de chaleur
Maison	Avant 1975	Chauffage individuel Sans appoint	0,79	0,58	0,71	0,72	-
	1975 - 1982		0,79	0,5	0,73	0,68	
	1982 – 1989		0,8	0,6	0,68	0,66	
	1990 – 1998		0,73	0,52	0,62	0,65	
	Après 1999		0,61	0,5	0,59	0,64	
Maison	Avant 1975	Chauffage individuel bois	-	0,75	-	-	-
	1975 - 1982		0,73				
	1982 – 1989		0,75				
	1990 – 1998		0,7				
	Après 1999		0,76				
Appartement	Avant 1975	Chauffage individuel Sans appoint	-	0,47	-	0,6	-
	1975 - 1982		0,37		0,58		
	1982 – 1989		0,44		0,57		
	1990 – 1998		0,47		0,56		



Type de logement	Période de construction / rénovation globale	Type de chauffage	Energie principale de chauffage				
			Bois	Électricité	Fioul	Gaz	Réseau de chaleur
	Après 1999			0,42		0,58	
Appartement	Avant 1975	Chauffage collectif Sans appoint	-	-	-	0,69	0,68
	1975 - 1982					0,69	0,58
	1982 – 1989					0,68	0,58
	1990 – 1998					0,7	0,62
	Après 1999					0,67	0,61



Si les configurations considérées ne couvrent pas l'ensemble des possibles, elles couvrent d'après les données du CEREN, 90 % des résidences principales françaises de 2019.

A noter que pour la configuration maison individuelle en chauffage individuel avec chauffage principal électrique et appoint bois, afin de permettre une identification de la consommation électrique liée au chauffage, nécessaire pour la détermination des autres sous-indicateurs, il n'est permis le calcul que dans le cas où la consommation de bois liée à l'appoint peut être directement déterminée des consommations déclarées (bois utilisé que pour le chauffage).

Ainsi la consommation annuelle de chauffage à climat réel et sa part liée à l'énergie principale en cas d'énergie d'appoint peuvent être déterminées selon les formules suivantes :

$$C_{ch}^{réel} = C_{tous\ usages}^{réel} * Part\ chauffage\ CEREN \text{ (Equation 2)}$$

$$C_{ch,pr}^{réel} = C_{ch}^{réel} - C_{ch,appoint}^{réel} \text{ (Equation 3)}$$

avec $C_{ch,pr}^{réel}$, consommation annuelle d'énergie principale de chauffage à climat réel de l'année donnée, en kWh_{ef},

$C_{ch,pr}^{réel}$, consommation annuelle d'énergie d'appoint de chauffage à climat réel de l'année donnée, en kWh_{ef}.

Une fois ces différentes grandeurs déterminées, il peut être déduite la part de la consommation annuelle d'énergie au périmètre tous usages liée aux autres usages que le chauffage ainsi que la part de la consommation annuelle déclarée pour l'énergie principale de chauffage liée aux autres usages que le chauffage :

$$C_{hors\ ch}^{réel} = C_{tous\ usages}^{réel} - C_{ch}^{réel} \text{ (Equation 4)}$$

$$C_{hors\ ch,pr}^{réel} = C_{ch,pr+hors\ ch,pr}^{réel} - C_{ch,pr}^{réel} \text{ (Equation 5)}$$

avec $C_{hors\ ch}^{réel}$, consommation annuelle hors usage chauffage toutes énergies confondues de l'année donnée, en kWh_{ef},

$C_{hors\ ch,pr}^{réel}$, consommation annuelle hors usage chauffage de l'énergie principale de chauffage de l'année donnée, en kWh_{ef},

$C_{ch,pr+hors\ ch,pr}^{réel}$, consommation annuelle tous usages de l'énergie principale de chauffage de l'année donnée, en kWh_{ef}.

Enfin la consommation annuelle d'énergie finale (toutes énergies confondues) au périmètre tous usages à climat normal du logement $C_{tous\ usages}^{normal}$ peut être estimée ainsi que son pendant pour uniquement l'énergie principale de chauffage :

$$C_{tous\ usages}^{normal} = C_{ch}^{normal} + C_{hors\ ch}^{réel} \text{ (Equation 6)}$$

$$C_{ch,pr+hors\ ch,pr}^{normal} = C_{ch,pr}^{normal} + C_{hors\ ch,pr}^{réel} \text{ (Equation 7)}$$

Le ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal, en kWh_{ef}/(m².an), est obtenu en divisant la consommation annuelle d'énergie (tous énergies confondues) au périmètre tous usages à climat normal par la surface habitable du logement. Le résultat est affiché dans la cellule F6 de l'onglet « Résidentiel » de l'outil Excel.



Détermination du ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie primaire au périmètre tous usages à climat normal

Les consommations annuelles d'énergie primaire au périmètre tous usages à climat normal des différentes énergies sont obtenues en convertissant en énergie primaire les consommations annuelles d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal des différentes énergies. Pour se faire, sont employés les coefficients de conversion des énergies finales en énergie primaire du DPE (Arrêté du 31 mars 2021 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments ou parties de bâtiments à usage d'habitation en France métropolitaine et Arrêté du 31 mars 2021 modifiant diverses dispositions relatives au diagnostic de performance énergétique) : 2.3 pour l'électricité et 1 pour toutes les autres énergies.

La consommation annuelle d'énergie primaire au périmètre tous usages à climat normal du logement est obtenue en sommant les consommations annuelles d'énergie primaire au périmètre tous usages à climat normal des différentes énergies. Le ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie primaire au périmètre tous usages à climat normal, en kWh_{ep}/(m².an), est lui déterminé en divisant cette grandeur par la surface habitable du logement. Le résultat est affiché dans la cellule F9 de l'onglet « Résidentiel » de l'outil Excel.

Détermination du ratio surfacique des émissions annuelles de GES au périmètre tous usages à climat normal

Les émissions annuelles de GES au périmètre tous usages à climat normal des différentes énergies sont obtenues en convertissant en émissions de GES les consommations annuelles d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal des différentes énergies. Pour se faire, sont employés les coefficients de conversion des énergies finales en GES (en équivalent CO₂) du DPE (Arrêté du 31 mars 2021 modifiant diverses dispositions relatives au diagnostic de performance énergétique, Arrêté du 12 octobre 2020 modifiant l'arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine).

Tableau 17 : Coefficients de conversion des énergies finales en GES

Energie	kgCO ₂ eq
1 kWh _{ep} d'électricité - chauffage	0,079
1 kWh _{ep} d'électricité – tous usages	0,064
1 kWh _{ep} PCI de gaz naturel issu du réseau	0,227
1 kWh _{ep} PCI de fioul domestique	0,324



Energie	kgCO ₂ eq
1 kWh PCI de bois bûches	0,03
1 kWh PCI de granulés/pellets de bois	0,03
1 kWh PCI de briquettes de bois	0,03
1 kg de plaquettes de bois	0,024
1 kWh de réseau de chaleur	0,092 (moyenne des réseaux de chaleur français)
1 kWh d'une autre énergie	0,272 (valeur du GPL butane et propane)

Les émissions annuelles de GES au périmètre tous usages à climat normal du logement sont obtenues en sommant les émissions annuelles de GES au périmètre tous usages à climat normal des différentes énergies. Le ratio surfacique des émissions annuelles de GES au périmètre tous usages à climat normal, en kgCO₂eq/(m².an), est lui déterminé en divisant cette grandeur par la surface habitable du logement. Le résultat est affiché dans la cellule F12 de l'onglet « Résidentiel » de l'outil Excel.

Détermination du ratio surfacique de la facture énergétique annuelle au périmètre tous usages à climat normal

Les factures énergétiques annuelles au périmètre tous usages à climat normal des différentes énergies sont obtenues en convertissant en €ttc les consommations annuelles d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal des différentes énergies. Pour se faire, sont employés les tarifs des énergies en €ttc (abonnement inclus) du DPE (Arrêté du 31 mars 2021 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments ou parties de bâtiments à usage d'habitation en France métropolitaine).

Tableau 18 : Tarifs des énergies en €ttc (abonnement inclus) du DPE

Energie	€ttc/kWh PCI
Electricité pour une consommation annuelle < 1000 kWh/an	0,36417
Electricité pour 1000 kWh/an ≤ consommation annuelle < 2500 kWh/an	0,21597
Electricité pour 2500 kWh/an ≤ consommation annuelle < 5000 kWh/an	0,18488
Electricité pour 5000 kWh/an ≤ consommation annuelle < 15000 kWh/an	0,16731
Electricité pour 15000 kWh/an ≤ consommation annuelle	0,15989



Energie	€ttc/kWhef PCI
Gaz pour une consommation annuelle < 5009 kWhef PCI/an	0,14421
Gaz pour 5009 kWhef PCI/an ≤ consommation annuelle < 50055 kWhef PCI/an	0,07821
Gaz pour 50055 kWhef PCI/an ≤ consommation annuelle	0,06164
Fioul domestique	0,09142
Bois bûches ou plaquettes	0,03201
Granulés/pellets de bois ou briquettes de bois	0,05991
Réseau de chaleur	0,0787
Autre énergie	0,17166 (moyenne entre GLP butane et propane)

Pour le bois bûches, suivant l'information fournie sur le paiement du bois bûches, il est pris 100% du tarif si totalement payés, 50 % si partiellement payés et 0% du tarif si totalement gratuits.

La facture énergétique annuelle au périmètre tous usages à climat normal du logement est obtenue en sommant les factures énergétiques annuelles au périmètre tous usages à climat normal des différentes énergies. Le ratio surfacique de la facture énergétique annuelle au périmètre tous usages à climat normal, en €ttc/(m².an)., est lui déterminé en divisant cette grandeur par la surface habitable du logement. Le résultat est affiché dans la cellule F15 de l'onglet « Résidentiel » de l'outil Excel.

4.1.1.2. Cas des bureaux

L'outil Excel développé fait apparaître un onglet « Tertiaire - Bureaux » permettant de traiter ce type d'usage.

Est à renseigner l'ensemble des informations suivantes sur le bâtiment (le cas échéant, des listes de choix sont proposées dans les différentes cellules de l'onglet) :

- Département ;
- Altitude du lieu d'implantation ;
- Surface de plancher totale (en m²) ;
- Surface totale chauffée (en m²) ;
- Surface totale refroidie (en m²) ;
- Surface de plancher de bureaux standards (cloisonnés et attribués + salles de réunion intégrées dans la zone, en m²) ;



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

- Surface de plancher de bureaux Open Space (non cloisonnés mais attribués + salles de réunion intégrées dans la zone, en m²) ;
- Surface de plancher de bureaux Flex Office (non cloisonnés et non attribués + salles de réunion intégrées dans la zone, en m²) ;
- Surface de plancher de restauration (en m²) ;
- Surface de plancher de salle et centre d'exploitation informatique (en m²) ;
- Surface de plancher de stationnement (en m²) ;
- Surface de plancher d'usage(s) autre(s) (en m²).

Est à renseigner l'ensemble des informations suivantes sur les énergies utilisées dans le bâtiment (le cas échéant, des listes de choix sont proposées dans les différentes cellules de l'onglet) :

- Idem que pour les énergies utilisées d'un logement (cf. Méthode « niveau 0 » pour un logement) ;
- Energie principale de refroidissement : Pas de refroidissement, Electricité, Gaz, Réseau de froid, Autre ;
- Energie d'appoint ou secondaire de refroidissement : Pas d'appoint/2nde énergie, Electricité, Gaz, Réseau de froid, Autre.

Et à déclarer l'ensemble des consommations annuelles d'énergie du bâtiment (le cas échéant, des listes de choix sont proposées dans les différentes cellules de l'onglet) :

- Idem que pour les consommations annuelles d'énergie d'un logement (cf. Méthode « niveau 0 » pour un logement) ;
- Pour le réseau de froid, Mois de début de l'année considérée (entre Janvier et Décembre), Année civile de début de l'année considérée (2015 à 2020), Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCI.

Détermination du ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal

Il est suivi la même méthode⁶ que pour un logement à quelques différences près. La température de base pour les degrés-jours de chauffage est prise à 16 °C comme dans l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire. La consommation réelle annuelle de refroidissement est ajustée à un climat normal selon la même règle que pour le chauffage (cf. Equation 1) avec des degrés-jours de refroidissement en base 24 °C⁷, comme cela est fait dans l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire. Lorsque les consommations d'énergie liées d'une part au chauffage principal et à l'éventuel chauffage d'appoint/secondaire et d'autre part au refroidissement principal et à l'éventuel refroidissement d'appoint/secondaire ne peuvent pas être directement déduites des consommations d'énergie déclarées (e.g. chauffage principal et refroidissement principal à l'électricité avec une part de la consommation d'électricité déclarée liée à minima à l'électricité spécifique), d'autres hypothèses sur la part liée au chauffage (chauffage principal + éventuel chauffage d'appoint/secondaire) et sur la part

⁶ Comme dans l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire, 1 kWh de réseau de froid est pris égale à 1 kWh PCI.

⁷ Ces derniers sont définis sur une période donnée (année ou saison de refroidissement) comme la somme des écarts positifs (i.e. quand la température moyenne d'une journée est supérieure à la température seuil) existants entre les moyennes journalières des températures extérieures de cette période et une température seuil appelée base (ici 24 °C).



liée au refroidissement (refroidissement principal + éventuel refroidissement d'appoint/secondaire) dans la consommation annuelle toutes énergies tous usages à climat réel sont utilisés.

Les parts liées respectivement au chauffage et au refroidissement dans la consommation annuelle toutes énergies tous usages à climat réel sont directement tirées des règles utilisées dans l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire :

$$C_{ch}^{réel} = 0.03 * S_{ch} * DJ_{ch,16}^{réel} \text{ (Equation 8)}$$

avec $C_{ch}^{réel}$, consommation annuelle de chauffage à climat réel de l'année donnée, en kWhcf,
 S_{ch} , surface chauffée, en m²,
 $DJ_{ch,16}^{réel}$, degrés-jours de chauffage base 16 du climat réel de l'année donnée, en °C.jour.

$$C_{re}^{réel} = 0.05 * S_{re} * DJ_{re,24}^{réel} \text{ (Equation 8)}$$

avec $C_{re}^{réel}$, consommation annuelle de refroidissement à climat réel de l'année donnée, en kWhcf,
 S_{re} , surface refroidie, en m²,
 $DJ_{re,24}^{réel}$, degrés-jours de refroidissement base 24 du climat réel de l'année donnée, en °C.jour.

La consommation annuelle d'énergie finale (toutes énergies confondues) au périmètre tous usages à climat normal du bâtiment $C_{tous usages}^{normal}$ est estimée par la relation suivante :

$$C_{tous usages}^{normal} = C_{ch}^{normal} + C_{re}^{normal} + C_{hors ch+re}^{réel} \text{ (Equation 9)}$$

avec C_{re}^{normal} , consommation annuelle de refroidissement ajustée à un climat normal, en kWhcf,
 $C_{hors ch+re}^{réel}$, consommation annuelle hors usage chauffage et usage refroidissement toutes énergies confondues de l'année donnée, en kWhcf.

Le ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal, en kWhcf/(m².an), est obtenu en divisant la consommation annuelle d'énergie (toutes énergies confondues) au périmètre tous usages à climat normal par la surface totale de plancher du bâtiment. Le résultat est affiché dans la cellule F6 de l'onglet « Tertiaire - bureaux » de l'outil Excel.

A l'instar de l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire, **pour un bâtiment de bureaux, il est défini uniquement des seuils de performance sur cet sous-indicateur ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages** ainsi les 3 autres sous-indicateurs ne sont pas évalués dans cette première version.

4.1.1.3.Cas des écoles

L'outil Excel développé fait apparaître un onglet « Tertiaire - Ecoles » permettant de traiter ce type d'usage.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Est à renseigner l'ensemble des informations suivantes sur le bâtiment (le cas échéant, des listes de choix sont proposés dans les différentes cellules de l'onglet) :

- Département ;
- Altitude du lieu d'implantation ;
- Surface de plancher totale (en m²) ;
- Surface totale chauffée (en m²) ;
- Surface totale refroidie (en m²) ;
- Surface de plancher d'école maternelle (inclus locaux de bureaux, pôle santé, aide social, en m²) ;
- Surface de plancher d'école élémentaire (inclus locaux de bureaux, pôle santé, aide social, en m²) ;
- Surface de plancher de salle multi-activité et périscolaire (en m²) ;
- Surface de plancher d'internat primaire (en m²) ;
- Surface de plancher de restauration (en m²) ;
- Surface de plancher d'usage(s) autre(s) (en m²).

Est à renseigner l'ensemble des informations suivantes sur les énergies utilisées dans le bâtiment (le cas échéant, des listes de choix sont proposés dans les différentes cellules de l'onglet) :

- Idem que pour les énergies utilisées d'un bâtiment tertiaire de bureaux (cf. Méthode « niveau 0 » pour un bâtiment tertiaire de bureaux).

Et à déclarer l'ensemble des consommations annuelles d'énergie du bâtiment (le cas échéant, des listes de choix sont proposés dans les différentes cellules de l'onglet) :

- Idem que pour les consommations annuelles d'énergie d'un bâtiment tertiaire de bureaux (cf. Méthode « niveau 0 » pour un bâtiment tertiaire de bureaux).

Détermination du ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal

La méthode suivie est identique à celle pour un bâtiment tertiaire de bureaux.

A l'instar de l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire, **pour une école, il est défini uniquement des seuils de performance sur cet sous-indicateur ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages** ainsi les 3 autres sous-indicateurs ne sont pas évalués dans cette première version.

4.1.2. Méthodes de niveau 1 et 2

4.1.2.1. Limite de la méthode de niveau 0



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

La méthode de niveau 0 a été présentée précédemment. Cette méthode repose sur l'utilisation de données de consommations annuelles ou semestrielles. Une correction climatique est appliquée à cette consommation énergétique via la méthode suivante :

- Détermination de la part de la consommation due au chauffage ou au refroidissement via des ratios moyens issue des études CEREN pour les logements et des ratios issus de l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire pour les bureaux et écoles ;
- Correction de cette part due au chauffage ou de refroidissement au travers l'utilisation de degrés jours (DJ) de chauffage et/ou de refroidissement.

L'utilisation de cette méthode est contrainte par le peu de données disponibles. Elle présente cependant des faiblesses, et ne peut garantir une modélisation énergétique du bâtiment correcte dans l'ensemble des situations.

Rappelons la formule utilisée pour obtenir la correction climatique :

$$C_{ch}^{normal} = C_{ch}^{réel} * \frac{DJ_{ch,18}^{normal}}{DJ_{ch,18}^{réel}} \text{ (Equation 1)}$$

On constate ici que la correction repose sur une règle de proportionnalité entre les DJ. Cela suppose donc qu'il y ait une relation linéaire entre ces DJ et la consommation énergétique de chauffage ou de refroidissement. Ce n'est en fait pas toujours le cas. Dans [1]⁸, il est ainsi fait mention pour le cas de bâtiments tertiaires d'une température à partir de laquelle le système de refroidissement a atteint le maximum de la puissance qu'il était capable de fournir (voir Figure 7 ci-dessous), la relation entre les deux grandeurs n'est donc plus linéaire. Il est également possible qu'un deuxième point d'inflexion existe en cas de présence de deux systèmes refroidissement, le second s'activant lorsque le premier a atteint sa capacité maximum.

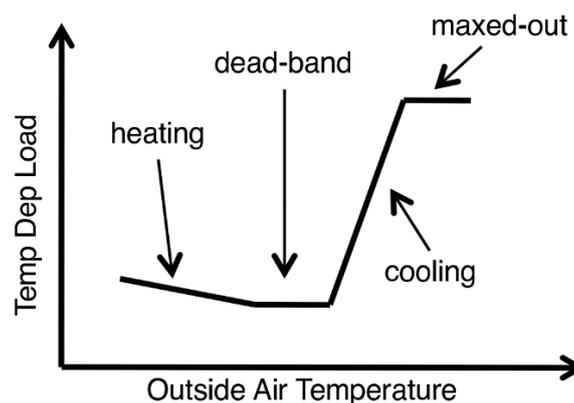


Figure 7: Représentation schématique de la consommation d'énergie en fonction de la température extérieure pour un bâtiment tertiaire (extraite de [1])

⁸ Voir références dans le paragraphe « Bibliographie » en fin de partie 4

Par ailleurs, même si une relation linéaire existe entre consommation énergétique et température extérieure comme cela est visible en Figure 7 pour le chauffage, la correction proposée pour le niveau 0 est dépendante de la température de base utilisée pour le calcul des DJ [2].

Nous allons le vérifier sur un exemple concret, une maison individuelle fonctionnant avec un système de chauffage électrique. La Figure 8 fait apparaître la consommation totale d'énergie électrique journalière en fonction de la température extérieure moyenne du logement.

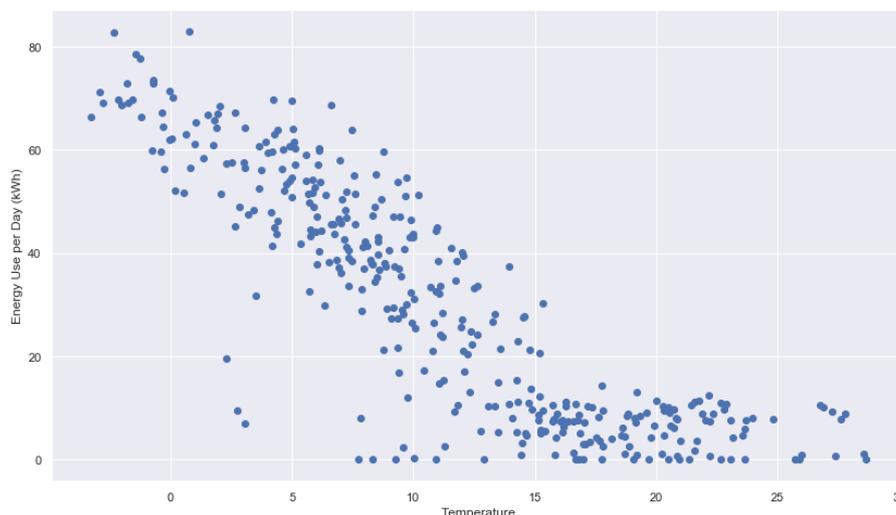


Figure 8: Consommation énergétique en fonction de la température extérieure sur un exemple de maison individuelle

Ce bâtiment ne dispose que d'un chauffage via un plancher chauffant électrique, il n'y a pas de système de refroidissement. La courbe présente donc un comportement similaire à la partie gauche de la Figure 7. On observe en effet une dépendance qui semble linéaire entre la consommation d'électricité et la température extérieure pour les températures inférieures à 15°C environ. Pour les températures supérieures, il ne semble pas y avoir de dépendance entre la température moyenne et la consommation d'énergie.

S'il existe plusieurs méthodes pour calculer les DJ [3], ils correspondent par définition à la différence entre la température extérieure et une température de base correspondant à la consigne de température intérieure estimée corrigée des apports gratuits internes et externes. Dans la méthode de niveau 0, la température de base utilisée varie selon l'activité du bâtiment. Nous allons voir sur deux exemples extrêmes que le choix de cette température peut influencer fortement le résultat.

Sur la Figure 9, une température de base de 10°C a été retenue. On voit apparaître en rouge la régression linéaire entre consommation de gaz et température extérieure. Cette régression semble bien rendre compte du comportement énergétique du bâtiment. Cependant, le choix de cette température de base trop basse ne permet pas de prendre en compte de façon satisfaisante la consommation liée au chauffage. Il apparaît en effet qu'entre 10°C et environ 15°C une importante partie de la consommation énergétique est liée au chauffage. En



choisissant cette température de base, les périodes concernées ne seront pas prises en compte dans la correction climatique engendrant une erreur potentiellement importante.

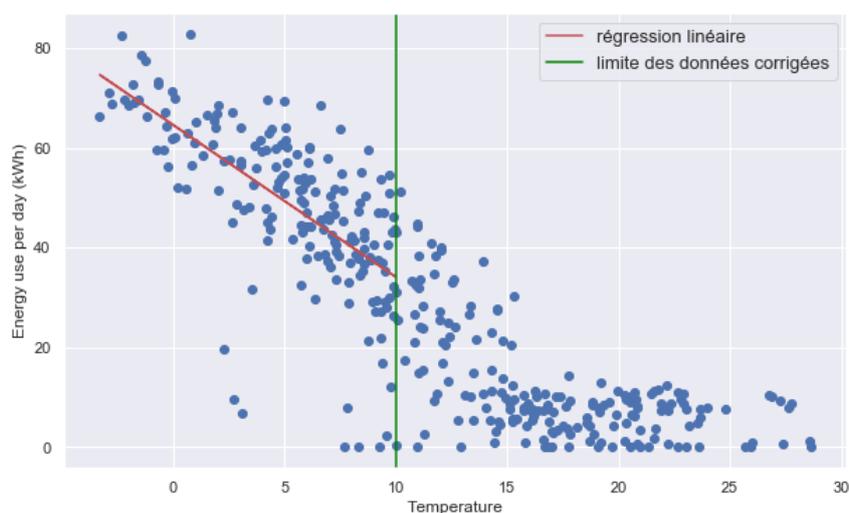


Figure 9: Régression linéaire sur les données de consommation en retenant une température de base de 10°C

Sur la Figure 10, nous avons utilisé une température de base de 20°C. On constate cette fois-ci que la régression semble englober l'ensemble de la consommation du au chauffage mais également une partie de la consommation ayant lieu lorsqu'il n'y a pas de chauffage. En conséquence, la régression traduit de façon erronée le comportement énergétique du bâtiment. Ce qui peut aboutir à des erreurs.

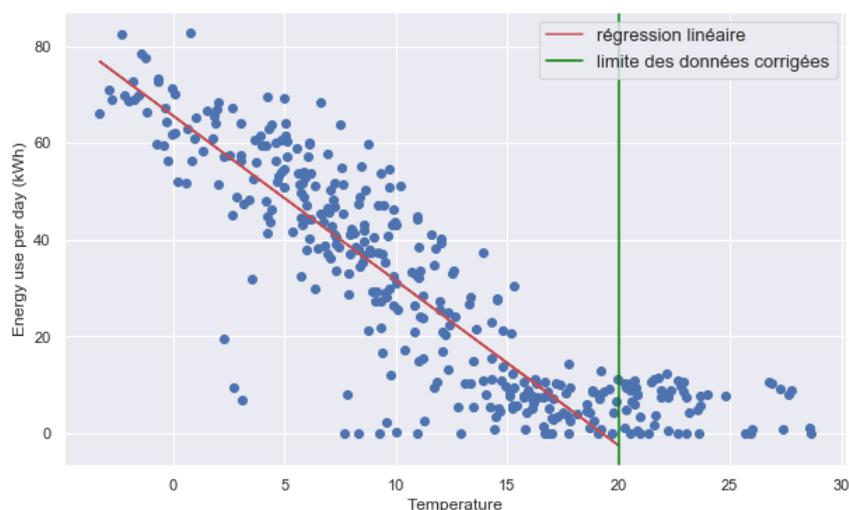


Figure 10: Régression linéaire sur les données de consommation en retenant une température de base de 20°C

On notera que dans le deuxième cas, le fait de travailler uniquement sur la consommation de chauffage limitera cette erreur de régression (le reste des consommations n'apparaissant pas).



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

C'est le cas dans la méthode niveau 0 avec l'utilisation de ratio pour déterminer la part de chauffage. Cependant, la correction prendra en compte une partie trop importante des données climatiques, engendrant également une erreur. Par ailleurs, l'utilisation de ces ratios présente des limites. En effet, il n'est pas garanti que le bâtiment et ses usagers se comporte de la manière qui était anticipé dans ces ratios, basés sur des moyennes.

4.1.2.2. Données de compteurs

Nous avons vu précédemment que la méthode de niveau 0 présentait un certain nombre de limites. L'utilisation de cette méthode et de la modélisation du bâtiment associée est cependant contrainte par le pas de temps de données disponible. Il est en effet difficile de valider le comportement énergétique du bâtiment sur la base d'une facture énergétique annuelle.

En parallèle, le développement rapide de compteurs communicants offre de nouvelles possibilités. En effet, d'ici fin 2021 l'objectif des 35 millions de compteurs électriques Linky posés sur le territoire pourrait être atteint. La pose des 11 millions de compteurs gaz Gazpar devrait quant à elle s'achever en 2022. Ces nouveaux compteurs permettent une remontée des données bien plus régulières, toutes les 30min pour le compteur Linky, toutes les 24 heures pour le compteur Gazpar. L'utilisateur peut alors récupérer ces données via une interface web mise en place par son distributeur d'énergie. Ces distributeurs proposent également des services permettant à un tiers de récupérer ces données moyennant le consentement de l'utilisateur.

La récupération de ces données, obtenues de manière simple et à une fréquence importante, ouvrent de nouvelles perspectives concernant la modélisation énergétique des bâtiments. On parle alors de mesure et vérification (M&V) avancée [4,5]. Dans la suite de ce document, nous étudierons de quelle manière celles-ci peuvent être utilisées. Deux nouveaux niveaux d'analyses seront donc proposés :

- Niveau 1 : Ce niveau d'analyse se base sur l'utilisation de données issue de compteurs communicants et de données météo issues d'une station proche du bâtiment. Les analyses reposent principalement sur des méthodes issues d'un outil opensource (*OpenEEmeter*), l'une des références dans la modélisation statistique énergétique des bâtiments ;
- Niveau 2 : Ce niveau d'analyse se base également sur les données issues de compteurs et des données météo auquel on ajoute une mesure de la température intérieure du bâtiment. Les analyses reposent à la fois sur l'utilisation de l'outil *OpenEEmeter* et sur des méthodes développées au CSTB. A noter que du fait de la non-généralisation de la mesure de température intérieure, la mise en place de ces méthodes est bien plus contraignante techniquement.



4.1.2.3. Niveau 1

Comme expliqué précédemment, l'analyse de niveau 1 repose principalement sur des méthodes issues de l'outil open source *OpenEEmeter*. Nous commencerons donc par présenter cet outil et les méthodes associées avant de voir comment celles-ci pourraient être mise en œuvre dans le cadre de l'analyse de niveau 1.

Outil OpenEEmeter et méthodes Caltrack

L'outil OpenEEmeter est un module python permettant d'utiliser les méthodes Caltrack [6]. Le projet Caltrack a été lancé en 2012 par l'Etat de Californie. Il vise à proposer un ensemble de méthodes de référence qui seront utilisables par les logiciels servant à prédire les économies d'énergie. Un large groupement a participé au développement et à la validation de ces méthodes ainsi qu'à l'outil open source permettant de les utiliser. Cet outil est donc aujourd'hui cité par EVO⁹, l'association visant au développement du protocole IPMVP¹⁰, comme étant l'un des outils open source de référence pour la Mesure et Vérification (M&V) [4].

L'outil permet d'utiliser des méthodes basées sur des données horaires, quotidiennes ou trimestrielles. Nous n'utiliserons cependant pas cette dernière option.

Méthode quotidienne

La méthode quotidienne repose sur l'utilisation de signatures énergétiques avec des modèles à point de changement [7]. La méthode permet d'utiliser des modèles jusqu'à 5 points de changement (voir Figure 11) qui permettent de modéliser la consommation de chauffage, de refroidissement ainsi que les usages non thermosensibles (base).

⁹ Efficiency Valuation Organization

¹⁰ Protocole International de Mesure et Vérification de la Performance énergétique



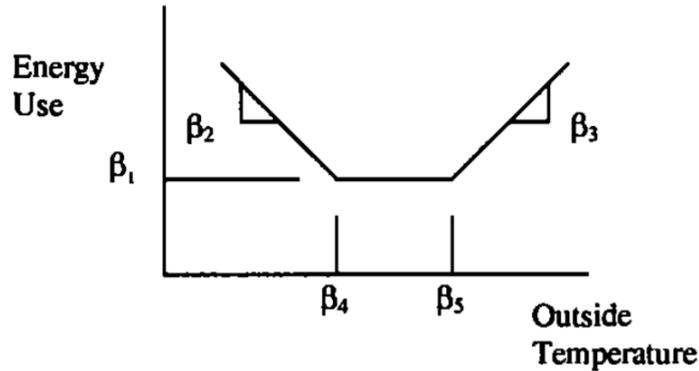


Figure 11: Représentation schématique d'un modèle à 5 points de changement

Le choix du modèle à utiliser se fait automatiquement en réalisant une régression sur les données avec l'ensemble des modèles disponibles. Le modèle finalement sélectionné sera celui ayant le meilleur coefficient de régression R^2 . Ce principe est illustré en Figure 128 sur l'exemple précédemment utilisé. Les données sont au pas de temps journalier. L'ensemble des modèles testés sont visibles, le modèle sélectionné étant représenté en surbrillance. Il s'agit du modèle à point de changement permettant la meilleure modélisation du comportement énergétique du bâtiment.

A partir de cette modélisation, il est possible d'extraire un certain nombre d'informations. En premier lieu, on peut relever la température d'inflexion du modèle. Cette température correspond à la température de base qu'il serait judicieux d'utiliser pour le calcul des DJ. L'utilisation de ces modèles à changement de point est d'ailleurs l'une des méthodes de référence utilisées pour obtenir ces températures de base par catégorie d'utilisation des bâtiments [2]. Dans l'exemple proposée Figure 12, cette température est de 17°C.

Par ailleurs, ce type de modèle permet de déterminer de façon approximative la part de la consommation énergétique due au chauffage, au refroidissement ou aux autres usages. Pour le chauffage, une possibilité serait par exemple de considérer que l'ensemble des jours dont la température moyenne est inférieure au point de changement (β_4) et la consommation supérieure à la moyenne des autres usages (β_1), correspond aux jours de chauffe. En retranchant à ces consommations la consommation moyenne (β_1) on obtient une première approximation.

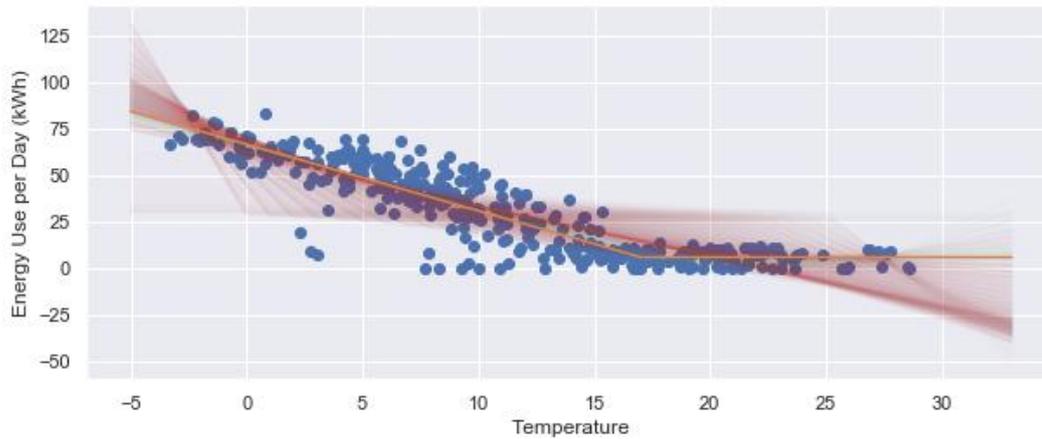


Figure 12: Illustration du procédé de sélection de la meilleure régression

Dans le cas d'un bâtiment rénové, cette modélisation permettra de déterminer les économies d'énergie réalisées après travaux. En effet, une fois le comportement énergétique modélisé, il est possible d'utiliser ce modèle pour réaliser des prédictions de consommations sur un autre climat. Il s'agit du principe utilisé en M&V option C [8] :

- Le bâtiment est modélisé via ses consommations énergétiques avant travaux. On prédit ensuite la consommation énergétique sur le climat après travaux. On compare cette prédiction aux consommations réellement mesurées, la différence représentant les économies d'énergie réalisées. On parle dans cette configuration d'ajustement ante/post (voir Figure 13) ;
- Le bâtiment est modélisé via ses consommations énergétiques après travaux. On prédit ensuite la consommation énergétique sur le climat avant travaux. De la même manière, on compare cette prédiction aux consommations réellement mesurées, pour obtenir les économies d'énergie réalisées. On parle dans cette configuration d'ajustement post/ante.

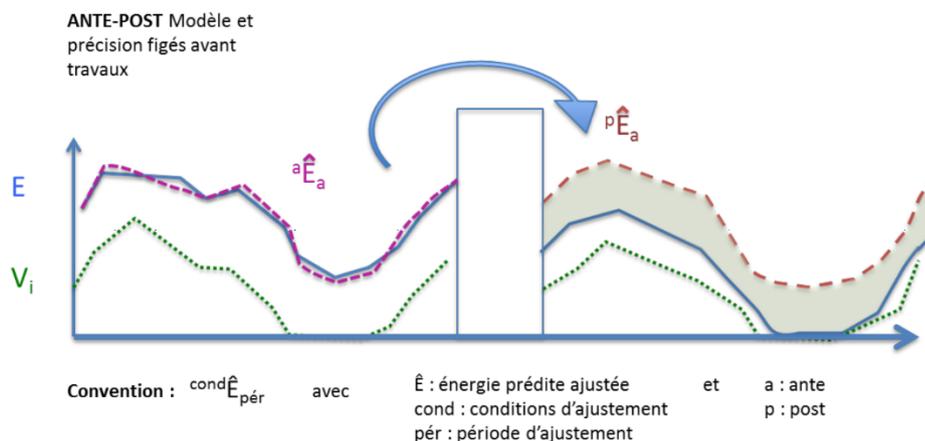


Figure 13: Illustration du principe de mesure et vérification extrait de [9]



Il est généralement recommandé de privilégier un ajustement ante/post [9]. Cependant celui-ci n'est possible que si l'on dispose de suffisamment de données avant travaux pour modéliser correctement le comportement énergétique du bâtiment. Au cas où l'on ne disposerait pas des données des compteurs communicants avant travaux, on privilégiera donc une analyse post/ante où l'on comparera les consommations prédites sur la période avant travaux aux factures disponibles.

Si les données sont suffisantes, on peut également envisager de réaliser une modélisation du bâtiment avant et après travaux. En réalisant une prédiction sur l'un des climats, il sera possible de visualiser les différences de comportement du bâtiment et l'origine des économies d'énergie.

Reprenons l'exemple utilisé précédemment. Une modélisation énergétique a également été réalisée après travaux. La Figure 14 fait apparaître les deux modèles. On visualise bien que le comportement après travaux est moins énergivore, la dépendance de la consommation énergétique à la température étant moins forte. Par ailleurs, la consommation de base hors chauffage a également diminué. En projetant les deux modèles sur le climat après travaux, il est possible de quantifier cette différence. Ainsi, dans ce cas, on estime que les économies d'énergie réalisées sont dues à des économies de chauffage pour 20% et à des économies sur la consommation hors chauffage et refroidissement à 80%.

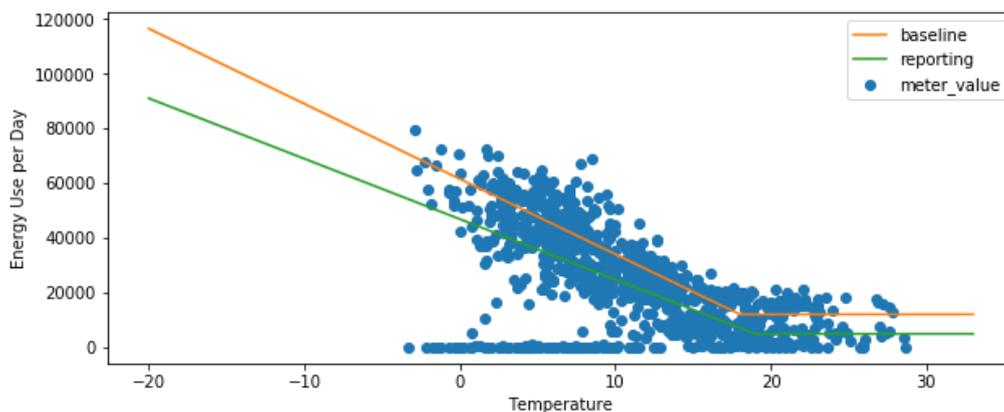


Figure 14: Prédiction des consommations énergétiques sur un climat normalisée pour un modèle entraîné sur les données avant travaux et un modèle entraîné sur les données après travaux

Il est également possible d'effectuer une prédiction de la consommation énergétique sur un climat normalisé afin d'obtenir un indicateur de la consommation énergétique du bâtiment. Ce climat normalisé peut par exemple être obtenue par l'application de la norme EN ISO 15927-



4¹¹ utilisé notamment pour obtenir le climat des différentes zones thermiques de la réglementation thermique. Comme ce qui est proposé pour le niveau 0, un climat de référence par département pourrait être utilisé.

Méthode horaire

La méthode horaire repose sur l'utilisation de modèles TOWT pour *Time Of the Week and Temperature*. Ces modèles ont initialement été développés au *Lawrence Berkeley National Laboratory* [1] pour une application sur des bâtiments tertiaires. Ils ont montré de bonnes performances dans différents bancs de tests [11] et sont finalement devenus l'une des références de la M&V avancée [4]. Ils sont d'ailleurs proposés dans une grande majorité des outils open-source dédiés à cette pratique. Si plusieurs variantes de modèle TOWT existent, le principe de base reste inchangé.

Comme son nom l'indique, le modèle a pour variables d'entrées, la température et l'heure de la semaine, comprise entre 1 pour le lundi à minuit et 168 pour le dimanche à 23h. Pour chacune de ces heures, le modèle va déterminer si le bâtiment est en « mode » haute consommation ou basse consommation en analysant les consommations énergétiques sur la période d'analyse. Pour un centre commercial par exemple, cette analyse devrait clairement faire apparaître que les périodes nocturnes présentent une basse consommation. Sur un logement, le modèle est potentiellement capable de déterminer ainsi les périodes de réduit. Deux modèles de dépendance entre la température extérieure et la consommation énergétique sont alors ajustés : un pour les périodes de haute consommation et un pour les périodes de basse consommation. Ces modèles sont linéaires par morceaux sur des intervalles de température compris entre -10 et 30°C. La Figure 15 montre les états haute consommation (1) et basse consommation (0) identifiés par le modèle sur le mois de janvier dans notre exemple.

¹¹ [EN ISO 15927-4:2005, Hygrothermal performance of buildings – calculation and presentation of climatic data. Part 4: data for assessing the annual energy for heating and cooling, 2005]



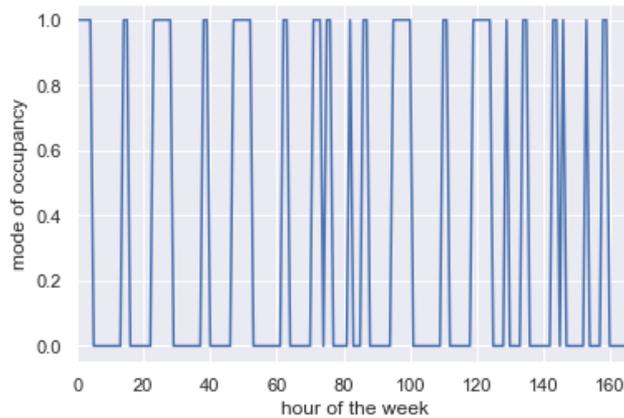


Figure 15 : Mode d'occupation sur un exemple de maison individuelle

La variante utilisée dans OpenEEmeter présente en plus une segmentation par mois. Autrement dit, le processus est répété pour chaque mois de l'année. Cette subtilité vise à une meilleure modélisation des bâtiments résidentiels. Une description plus complète du modèle TOWT utilisé est disponible en [12].

Ces modèles visent à être utilisés de la même manière que ceux des méthodes quotidiennes :

- Ajustement ante/post et post/ante ;
- Prédiction de la consommation sur un climat normalisé.

La principale différence tient dans la qualité de la prédiction effectuée et donc des indicateurs obtenus. Il est attendu que la prédiction des modèles TOWT soit plus juste que celle des modèles à points de changement.

4.1.2.4. Utilisation dans le cadre de l'analyse de niveau 1

Les différentes méthodes exposées précédemment pourront être utilisées dans l'analyse de niveau 1. Le type de méthode utilisé dépendra principalement de la donnée disponible. En particulier, la fréquence de ces données est différente selon le vecteur d'énergie utilisé pour le chauffage (24h pour le gaz, 30min pour l'électricité).

Dans tous les cas, l'analyse nécessite une année de donnée pour pouvoir être réalisée. Dans le cas d'une analyse avant/après travaux, il est donc nécessaire de disposer d'une année complète sur les deux périodes.



Chauffage au gaz

Pour les logements du panel 2 (donnée disponible uniquement après rénovation) :

- Modélisation du logement via la méthode quotidienne ;
- Détermination de la part d'énergie utilisée pour le chauffage et le refroidissement ;
- Prédiction de la consommation énergétique sur un climat normalisé ;
- Correction climatique proposée au niveau 0 en utilisant la température de base identifiée et la part d'énergie utilisée pour le chauffage/refroidissement.

Pour les logements du panel 1 (données disponibles avant et après rénovation) on y ajoutera :

En cas de données issues des compteurs communicants avant travaux :

- Modélisation du logement avant travaux via la méthode quotidienne ;
- Ajustement ante/post ;
- Prédiction de la consommation d'énergie sur la période après travaux afin de déterminer l'origine des économies d'énergie.

Si seule des factures sont disponibles sur la période avant travaux :

- Ajustement post/ante

Chauffage électrique

Pour les logements du panel 2 (donnée disponible uniquement après rénovation) :

- Modélisation du logement via la méthode quotidienne
- Détermination de la part d'énergie utilisé pour le chauffage et le refroidissement
- Correction climatique proposée au niveau 0 en utilisant la température de base identifiée et la part d'énergie utilisée pour le chauffage/refroidissement
- Modélisation du logement via la méthode horaire
- Prédiction de la consommation énergétique sur un climat normalisée en utilisant ce modèle.

Pour les logements du panel 1 (données disponibles avant et après rénovation) on y ajoutera :

En cas de données issue des compteur communicants avant travaux :

- Modélisation du logement avant travaux via la méthode quotidienne
- Prédiction de la consommation d'énergie sur la période après travaux afin de déterminer l'origine des économies d'énergie.
- Modélisation du logement avant travaux via la méthode horaire



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

- Ajustement ante/post en utilisant le modèle issu de la méthode horaire

Si seule des factures sont disponibles sur la période avant travaux :

- Ajustement post/ante en utilisant le modèle issu de la méthode horaire

Si plusieurs vecteurs d'énergie sont utilisés pour le chauffage/refroidissement, l'étude sera réalisée pour chacun de ces vecteurs. On pensera par exemple à un chauffage gaz avec présence de climatisation. Les indicateurs pour ces différents vecteurs seront ensuite additionnés afin d'obtenir un indicateur global. En cas de présence d'un vecteur d'énergie n'étant pas utilisé pour le chauffage et le refroidissement, on déterminera si la consommation de ce vecteur est sensible à la température extérieure. Si oui, une modélisation pourra être réalisée afin d'effectuer les prédictions associées. Sinon, on utilisera la valeur moyenne de consommation à l'année.

Prenons l'exemple d'un des logements de l'étude (logement 1), chauffé au gaz. La figure ci-dessous fait apparaître la consommation d'énergie électrique quotidienne en fonction de la température extérieure sur 6 mois. En ajustant un modèle à point de changement sur ces données selon la méthode décrite précédemment, le meilleur modèle présente un R^2 inférieur à 0.1. Il n'y a donc manifestement pas de corrélation entre la température extérieure et la consommation d'électricité. On choisit donc de représenter la consommation électrique par une constante égale à sa valeur moyenne. Lors de la prédiction de la consommation énergétique sur un climat normalisé, on pourra additionner cette valeur afin d'obtenir une consommation toute énergie.

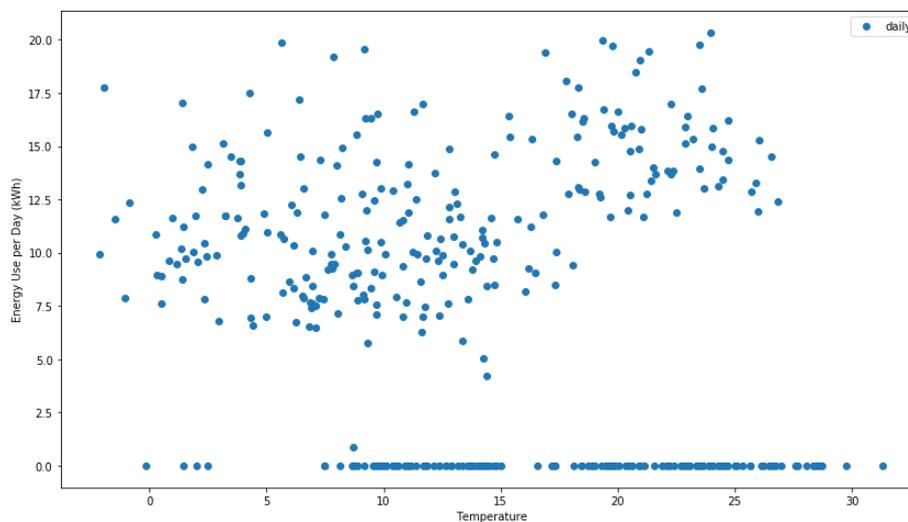


Figure 16: Consommation d'énergie électrique sur un logement de l'étude

4.1.2.5. Niveau 2



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

L'analyse de niveau 2 nécessite en plus des données utilisées pour l'analyse de niveau 1, une mesure de la température intérieure dans le logement. Par ailleurs, des données météo supplémentaires peuvent être utilisées telle que l'ensoleillement. Notons que la mesure de température intérieure est particulièrement intéressante lorsque les données existent avant et après travaux.

Ces méthodes sont issues de travaux menées au CSTB en lien avec la Mesure et Vérification. Ces méthodes ont donc été testées sur un nombre bien plus restreint de logements que celles utilisées pour le niveau 1. Elles reposent là aussi sur une modélisation du bâtiment qui peut être réalisée avec des données issues des compteurs Gazpar (quotidienne) et Linky (toutes les 30min). Il est entendu que des données de fréquence plus importantes permettent une meilleure modélisation. Nous expliquerons par la suite les grands principes de cette modélisation.

4.1.2.6. Modélisation

Dans un premier temps, une analyse des consommations énergétiques sur une période annuelle va permettre de déterminer les périodes de chauffage. Notons que le principe serait identique pour du refroidissement. A partir de cette première analyse, il est possible d'extraire les consommations de chauffage.

Un modèle est ensuite ajusté à cette consommation de chauffage. Ce modèle a pour variables d'entrées :

- La différence de température entre l'intérieure et l'extérieure ;
- L'ensoleillement.

La modélisation réalisée va permettre de prédire la consommation d'énergie dans d'autres conditions d'utilisation du bâtiment. Reprenons l'exemple d'un logement de l'étude (logement 1). Le profil de température intérieure journalier a été étudié sur la période de chauffe. La Figure 17 fait apparaître les distributions de températures sur une journée type.



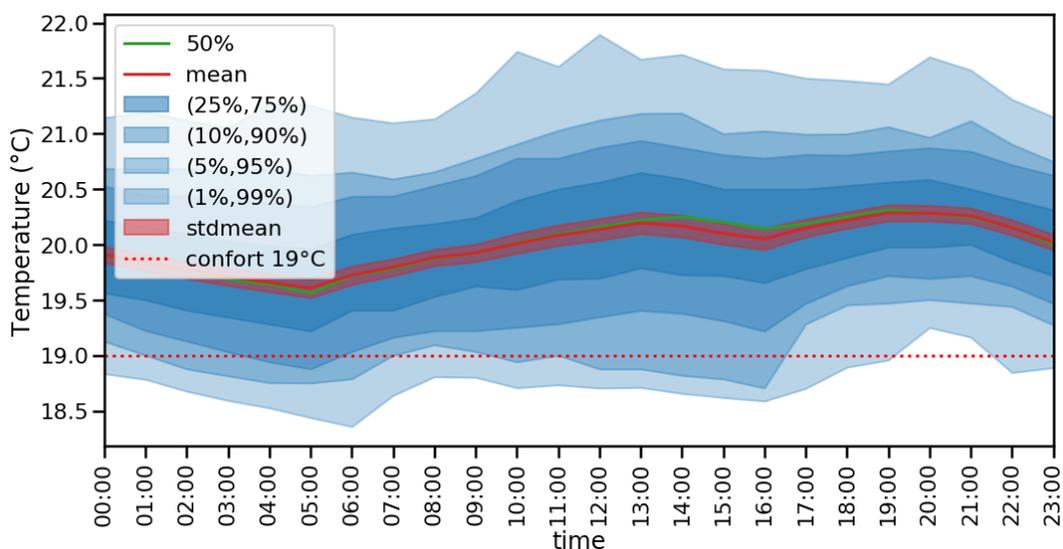


Figure 17: Profil de température intérieure dans le logement 1 de l'étude

On observe une dispersion faible des températures intérieures. Pour chacune des heures observées, 50% des températures sont en effet contenues dans un intervalle inférieur à 1°C. Par ailleurs, le profil de température suit celui de la température extérieure sur la même période (voir Figure 18). Cela laisse donc penser qu'une température de consigne fixe est utilisée.

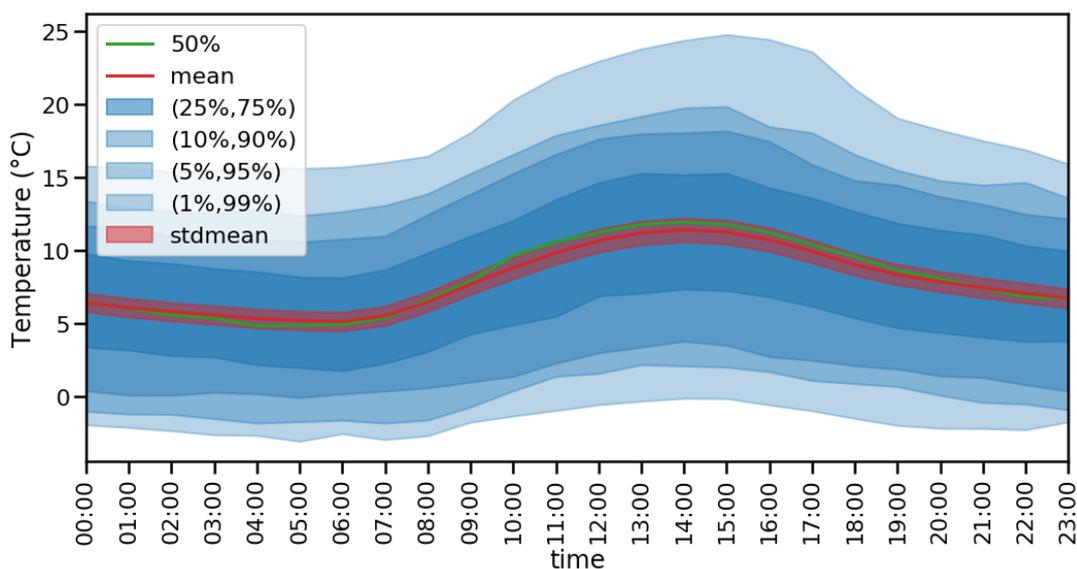


Figure 18: Profil de température extérieure sur le logement 1

Il est dans ces conditions possible de modéliser la consommation énergétique qui aurait lieu en utilisant une température de consigne inférieure. La Figure 19 fait ainsi apparaître, sur un même graphique, la consommation modélisée et la consommation modélisée avec une température intérieure inférieure de 2°C. On observe une diminution conséquente de la consommation, de l'ordre de 25%.



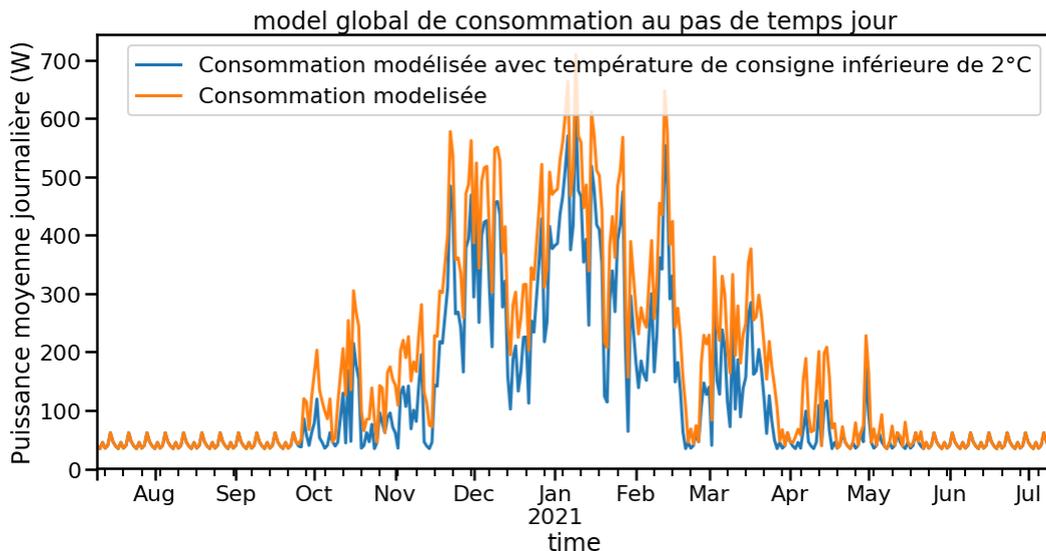


Figure 19: Consommations modélisées avec différentes consignes de température intérieure

Dans le cas d'une rénovation, il est alors possible d'effectuer des ajustements (ante/post ou post/ante) en réalisant la prédiction de consommation pour différentes consignes de température. Cela permet d'évaluer et de corriger un éventuel effet rebond.

Si l'on effectue uniquement une analyse après travaux. Cela permet à la fois :

- De donner une indication sur les économies d'énergie qui seraient réalisées en modifiant le comportement des usagers lors de l'année mesurée (diminuer la consigne de 1°C) ;
- De réaliser la prédiction en prenant un scénario de chauffage normalisé. Par exemple une consigne en température constante de 19°C.

4.1.3. Limites des méthodes proposées

Il faut garder à l'esprit que les méthodes de niveau 1 et 2 présentent également des limites. En effet, dans le cadre de la M&V où elles sont le plus largement employés, un certain nombre de critères encadrent leur utilisation [13]. Par ailleurs, si un certain nombre de travaux ont visé à comparer la capacité prédictive de ces modèles [11], il est difficile d'évaluer à l'avance quel modèle est le plus approprié à une opération. Il est utilisé pour cela des critères statistiques (R^2 , CV(RMSE), NBE, ...) permettant d'évaluer la qualité de la régression (mais pas de la prédiction). Dans le cadre du projet, la performance des différents modèles sera donc à chaque fois explicitée au travers de ces indicateurs.



Par ailleurs, le sujet de l'incertitude relative aux prédictions des modèles n'a pas été abordée dans le cadre de ce projet. Il s'agit là d'une question scientifique ouverte [14]. On admet généralement que pour les modèles à point de changement (utilisés dans les analyses de niveau 1 avec méthodes quotidiennes) et les modèles linéaires (utilisés dans les analyses de niveau 2), il est possible d'établir un intervalle d'incertitude à partir du CV(RMSE) obtenue lors de la régression [13]. Cependant, pour les modèles TOWT (utilisés dans les analyses de niveau 1 avec méthodes quotidiennes) le calcul de l'incertitude est toujours un sujet de recherche.

4.1.4. Bibliographie / références citées

- 1 : Mathieu, J. L., Price, P. N., Kiliccote, S., & Piette, M. A. (2011). Quantifying changes in building electricity use, with application to demand response. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(3), 507–518. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2145010>
- 2 : Meng, Q., & Mourshed, M. (2017). Degree-day based non-domestic building energy analytics and modelling should use building and type specific base temperatures. *Energy and Buildings*, 155, 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.034>
- 3 : Météo France;(2005). *Fiche méthode Degrés Jours*. 3–4.
- 4 : Webster, L., Granderson, J., Fernandes, S., Crow, E., & Earni, S. (2020). IPMVP ' s Snapshot on Advanced Measurement & Verification. *Efficiency Evaluation Organization EVO*, January.
- 5 : Granderson, J., & Fernandes, S. (2017). The state of advanced measurement and verification technology and industry application. *Electricity Journal*, 30(8), 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2017.08.005>
- 6 : <https://www.caltrack.org/>
- 7 : KISSOCK, J. K., HABERL, J. S., & CLARIDGE, D. E. (2002). *Development of a Toolkit for Calculating Linear, Change-point Linear, and Multiple-Linear Inverse Building Energy Analysis Models* (pp. 1–32).
- 8 : Evo-world.org. (2012). *Protocole International de Mesure et de Vérification Energétique*.
- 9 : Fondation Bâtiment Energie. (2014). *Principaux éléments de définition d'un protocole de mesure et vérification*.
- 10 : EN ISO 15927-4
- 11 : Granderson, J., Touzani, S., Custodio, C., Sohn, M. D., Jump, D., & Fernandes, S. (2016). Accuracy of automated measurement and verification (M&V) techniques for energy savings in commercial buildings. *Applied Energy*, 173(April), 296–308. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.049>
- 12 : <https://www.recurve.com/how-it-works/caltrack-hourly-methods>
- 13 : ASHRAE Guideline 14-2014. (2014). Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. *ASHRAE Guideline 14-2014*, 4,
- 14 : Touzani, S., Granderson, J., Jump, D., & Rebello, D. (2019). Evaluation of methods to assess the uncertainty in estimated energy savings. *Energy and Buildings*, 193, 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.041>

4.2. Indicateur énergie

4.2.1. Calcul de l'indicateur énergie

L'indicateur énergie résulte du calcul de 4 sous-indicateurs pour prendre en compte l'ensemble des dimensions associées à la consommation d'énergie d'un bâtiment :

- le ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale¹² au périmètre tous usages (kWh_{ef}/(m².an)) ;

¹² Forme de l'énergie au stade de son utilisation par le consommateur final, c'est notamment l'énergie comptabilisée par un compteur électrique ou gaz au niveau du bâtiment, l'énergie apparaissant sur la facture.



- le ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie primaire¹³ au périmètre tous usages (kWh_{ep}/(m².an)) ;
- le ratio surfacique des émissions annuelles de Gaz à Effet de Serre (GES) au périmètre tous usages (kgCO₂eq/(m².an)) ;
- le ratio surfacique de la facture énergétique annuelle au périmètre tous usages (€ttc/(m².an)).

Les 4 sous-indicateurs sont des ratios surfaciques afin de pouvoir effectuer des comparaisons entre bâtiments et des confrontations à des seuils, l'un des premiers facteurs déterminant de la performance énergétique en absolu d'un bâtiment (i.e. en kWh, en kgCO₂eq ou en €ttc) étant la surface de celui-ci. La surface utilisée dans le cas d'un logement est la surface habitable et dans le cas d'un bâtiment de bureaux ou d'une école il s'agit de la surface de plancher.

Les 4 sous-indicateurs correspondent tous à des performances au périmètre tous usages, comme cela est le cas par exemple pour l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire, car aujourd'hui dans le cadre de la détermination des performances énergétiques mesurées d'un bâtiment, les comptages présents dans la plupart des bâtiments et les méthodes d'exploitation de ceux-ci ne permettent pas avec précision une séparation de la consommation par usage. Des méthodes permettant une telle séparation par usage sont en cours de développement en association avec la diffusion des compteurs communicants sur l'électricité et le gaz dans les bâtiments. Dans le cadre du présent projet, une étude de faisabilité de telles méthodes a été présentée juste au-dessus.

Les 4 sous-indicateurs sont évalués à l'échelle de l'année car au regard de la dépendance de la consommation énergétique des bâtiments notamment de chauffage et de climatisation au climat, il est important d'observer la performance énergétique d'un bâtiment sur l'ensemble d'un cycle de saison.

Toujours au regard de cette dépendance de la consommation énergétique des bâtiments notamment de chauffage et de climatisation au climat, les performances énergétiques d'un bâtiment observées sur une année donnée avec donc un climat donné sont à corriger du climat pour les ramener à un climat dit normal, correspondant à une moyenne des années passées. Dans le cadre de la comparaison des performances entre deux années différentes, la correction climatique peut consister à ramener la performance d'une des deux années au climat de l'autre année ou de ramener les performances des deux années au climat normal. Ainsi il est toujours à préciser dans quel climat les 4 sous-indicateurs évalués sont exprimés.

Précédemment, ont été présentées les différentes méthodes proposées pour évaluer ces sous-indicateurs. Chacun des sous-indicateurs évalués est confronté à 2 seuils de performance pour déterminer si la performance est satisfaisante, moyenne ou insatisfaisante (1^{er} seuil entre satisfaisante et moyenne et 2nd seuil entre moyenne et insatisfaisante). La performance globale sur l'indicateur énergie est déterminée comme la moins bonne des performances sur les sous-indicateurs évalués.

¹³ Forme de l'énergie disponible dans la nature avant toute transformation, e.g. dans le cas de l'électricité, cette forme d'énergie inclut toute l'énergie nécessaire en amont du bâtiment pour produire et acheminer l'électricité (pertes réseau, perte au niveau de la centrale de production, etc.).



Dans l'Excel « QSE - Calcul_consommation_énergie_V1.xlsx », la performance globale sur l'indicateur énergie est indiqué dans la cellule F4 des onglets « Résidentiel », « Tertiaire - Bureaux » et « Tertiaire - Ecole », en couleur verte en cas de performance satisfaisante, en couleur orange en cas de performance moyenne et en couleur rouge en cas de performance insatisfaisante. Les performances des différents sous-indicateurs sont indiquées de la même façon dans la cellule juste en-dessous le résultat de chacun des sous-indicateurs.

Dans la suite, sont présentées les définitions des différents seuils retenus.

4.2.2. Seuils pour un logement

Pour un logement, des seuils sont proposés sur chacun des 4 sous-indicateurs évalués. Ces seuils sont définis pour chacun des sous-indicateurs sur les performances du parc français des résidences principales comme le seuil entre le 1/3 le plus performant du parc et le 1/3 du parc aux performances médianes pour le seuil entre les performances satisfaisante et moyenne et le seuil entre le 1/3 du parc aux performances médianes et le 1/3 le moins performant du parc pour le seuil entre les performances moyenne et insatisfaisante.

Il est utilisé la base représentative du parc résidentiel pour l'année 2012 issue de l'enquête Phébus¹⁴ –volet DPE et les consommations réelles toutes énergies pour l'année 2012 issues du volet CLODE de cette même enquête. L'enquête Phébus est à notre connaissance la seule base fournissant les consommations réelles des logements et des informations permettant de déterminer pour chacun d'entre eux les énergies associées aux différents usages (chauffage, refroidissement, production d'ecs, cuisson).

Après nettoyage (cas aux consommations aberrantes, etc.), il est obtenu une base composée de 2171 logements représentant 24.2 millions de résidences principales (pondération volet DPE de l'enquête Phébus), soit 88 % des 27.7 millions des résidences principales du parc de 2012 (source CEREN¹⁵) et 415.1 TWh de consommation toutes énergies à climat réel soit 89 % des 467.2 TWh de consommation toutes énergies à climat réel des résidences principales du parc en 2012 (source CEREN). A partir de ces chiffres, la base employée est jugée représentative du parc français des résidences principales et de ses consommations énergétiques.

Seuils associés au ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal

En amont de la détermination des seuils, il est évalué le ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal de chacun des 2171 logements présents dans la base. Pour se faire, il est suivi la même méthode que la méthode « niveau 0 » pour un logement, décrite plus haut, à quelques différences près. Les degrés-jours de chauffage utilisés tant pour le climat réel de l'année 2012 que pour le climat normal sont ceux du CEREN à une échelle nationale (2009 °C.J pour l'année 2012 et 1900 °C.J pour

¹⁴ Enquête Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et Usages de l'énergie (Phébus), réalisée d'avril à octobre 2013, sous la responsabilité du Ministère de la Transition écologique, Commissariat général au développement durable, Service des données et études statistiques (SDES). <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-performance-de-lhabitat-equipements-besoins-et-usages-de-lenergie-phebus>

¹⁵ Fichier Excel « 20102_2019ApprocheLogementTCDkwh.xlsx ».



le climat normal). Les hypothèses sur la part liée au chauffage dans la consommation toutes énergies tous usages sont directement tirées des données du CEREN de consommations annuelles, à climat normal, mais pour le parc français des résidences principales en 2012.

Une fois les ratios surfaciques de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal de chacun des 2171 logements de la base calculés, ils sont classés par ordre croissant puis en considérant le poids de chacun des logements dans le parc, les seuils sont déterminés :

- Seuil entre le 1/3 le plus performant du parc et le 1/3 du parc aux performances médianes du parc = **seuil entre les performances satisfaisante et moyenne = 130 kWh_{ef}/(m².an) ;**
- Seuil entre le 1/3 du parc aux performances médianes et le 1/3 le moins performant du parc = **seuil entre les performances moyenne et insatisfaisante = 211 kWh_{ef}/(m².an).**

Seuils associés au ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie primaire au périmètre tous usages à climat normal



Tableau 19 : Hypothèses sur la part liée au chauffage dans la consommation toutes énergies tous usages directement tirées des données du CEREN de consommations annuelles, à climat normal, mais pour le parc français des résidences principales en 2012

Type de logement	de	Période de construction	de	Type de chauffage	Energie principale de chauffage				
					Bois	Electricité	Fioul	Gaz	Réseau de chaleur
Maison	de	Avant 1975	de	Chauffage individuel Sans appoint	0,79	0,56	0,76	0,72	-
		1975 - 1982			0,79	0,51	0,74	0,685	
		1982 – 1989			0,8	0,58	0,7	0,67	
		1990 – 1998			0,74	0,52	0,64	0,65	
		Après 1999			0,63	0,5	0,63	0,64	
Maison	de	Avant 1975	de	Chauffage individuel Appoint bois	-	0,76	-	-	-
		1975 - 1982				0,75			
		1982 – 1989				0,76			
		1990 – 1998				0,72			
		Après 1999				0,74			
Appartement	de	Avant 1975	de	Chauffage individuel Sans appoint	-	0,48		0,62	-
		1975 - 1982				0,4		0,61	
		1982 – 1989				0,45		0,6	
		1990 – 1998				0,48		0,6	



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Type de logement	de Période de construction	de Type de chauffage	Energie principale de chauffage					
			Bois	Electricité	Fioul	Gaz	Réseau de chaleur	
	Après 1999			0,42			0,6	
Appartement	Avant 1975	Chauffage collectif Sans appoint					0,72	0,69
	1975 - 1982						0,7	0,6
	1982 – 1989						,07	0,63
	1990 – 1998						0,72	0,62
	Après 1999						0,69	0,62



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

En amont de la détermination des seuils, il est évalué le ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie primaire au périmètre tous usages à climat normal de chacun des 2171 logements présents dans la base. Pour se faire, il est suivi la même méthode que la méthode « niveau 0 » pour un logement, décrite plus haut.

Une fois les ratios surfaciques de la consommation annuelle d'énergie primaire au périmètre tous usages à climat normal de chacun des 2171 logements de la base calculés, ils sont classés par ordre croissant puis en considérant le poids de chacun des logements dans le parc, les seuils sont déterminés :

- Seuil entre le 1/3 le plus performant du parc et le 1/3 du parc aux performances médianes du parc = **seuil entre les performances satisfaisante et moyenne = 205 kWhep/(m².an)** ;
- Seuil entre le 1/3 du parc aux performances médianes et le 1/3 le moins performant du parc = **seuil entre les performances moyenne et insatisfaisante = 292 kWhep/(m².an)**.

Seuils associés au ratio surfacique des émissions annuelles de GES au périmètre tous usages à climat normal

En amont de la détermination des seuils, il est évalué le ratio surfacique des émissions annuelles de GES au périmètre tous usages à climat normal de chacun des 2171 logements présents dans la base. Pour se faire, il est suivi la même méthode que la méthode « niveau 0 » pour un logement, décrite plus haut.

Une fois les ratios surfaciques des émissions annuelles de GES au périmètre tous usages à climat normal de chacun des 2171 logements de la base calculés, ils sont classés par ordre croissant puis en considérant le poids de chacun des logements dans le parc, les seuils sont déterminés :

- Seuil entre le 1/3 le plus performant du parc et le 1/3 du parc aux performances médianes du parc = **seuil entre les performances satisfaisante et moyenne = 11.6 kgCO₂eq/(m².an)** ;
- Seuil entre le 1/3 du parc aux performances médianes et le 1/3 le moins performant du parc = **seuil entre les performances moyenne et insatisfaisante = 33.6 kgCO₂eq/(m².an)**.

Seuils associés au ratio surfacique de la facture énergétique annuelle au périmètre tous usages à climat normal

En amont de la détermination des seuils, il est évalué le ratio surfacique de la facture énergétique annuelle au périmètre tous usages à climat normal de chacun des 2171 logements présents dans la base. Pour se faire, il est suivi la même méthode que la méthode « niveau 0 » pour un logement, décrite plus haut.

Une fois les ratios surfaciques de la facture énergétique annuelle au périmètre tous usages à climat normal de chacun des 2171 logements de la base calculés, ils sont classés par ordre



croissant puis en considérant le poids de chacun des logements dans le parc, les seuils sont déterminés :

- Seuil entre le 1/3 le plus performant du parc et le 1/3 du parc aux performances médianes du parc = **seuil entre les performances satisfaisante et moyenne = 15.5 €ttc/(m².an)** ;
- Seuil entre le 1/3 du parc aux performances médianes et le 1/3 le moins performant du parc = **seuil entre les performances moyenne et insatisfaisante = 22.2 €ttc/(m².an)**.

4.2.3. Seuils pour un bâtiment tertiaire de bureaux

A l'instar de l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire, **pour un bâtiment tertiaire de bureaux, il est défini uniquement des seuils de performance sur le sous-indicateur ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages**. N'existant pas à ce jour, à notre connaissance, de base représentative du parc français des bâtiments tertiaires de bureaux et ses consommations d'énergie comme pour les logements, les seuils sont définis de la façon suivante :

- Exigence en absolu sur le ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages pour 2030 définis pour des bâtiments de bureaux selon l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire pour le seuil entre les performances satisfaisante et moyenne ;
- Moyenne du ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal pour le parc français de bureaux en 2019 selon les données CEREN¹⁶ pour le seuil entre les performances moyenne et insatisfaisante.

L'exigence en absolu sur le ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages pour 2030 définis pour des bâtiments de bureaux dans l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire se présente comme la somme d'une composante sur les consommations liées à l'ambiance thermique générale et à la ventilation des locaux (CVC) et d'une composante sur les consommations liées à des usages spécifiques liés au process de l'activité concernée (USE). A ce jour, dans l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire, des valeurs de ces composantes sont définies uniquement pour des bureaux standards, des bureaux en open space et des bureaux en flex office. Pour la composante USE, il est utilisé les valeurs USE étalon, en l'absence à notre portée des informations pour obtenir un USE modulé (amplitude horaire annuelle, surface plancher par poste de travail et taux d'occupation) :

- 50 kWhcf/(m².an) pour des bureaux standards ;
- 60 kWhcf/(m².an) pour des bureaux open space ;
- 70 kWhcf/(m².an) pour des bureaux flex office.

Pour la composante CVC, elle est définie, de manière identique quel que soit le type de bureaux, en fonction de la zone climatique (celle-ci est déterminée automatiquement dans l'outil Excel à partir du département et de l'altitude du lieu d'implantation).

¹⁶ Fichier Excel « Étude 20240 - suivi du parc et des consommations d'énergie en 2019 - tableaux détaillés_F.xlsx »



Tableau 20 : Définition de la composante CVC en fonction de la zone climatique et de l'altitude

Altitude	Zone climatique							
	H1a	Hb	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3
< 400m	57	66	62	57	50	56	63	10
400m à 800m	68	77	71		61	64	66	44
800m à 1200m		90	81			75	68	54
1200m à 1600m		125	115			109	99	84
> 1600m			133			117	107	92

Dans le cas d'un bâtiment de bureaux présentant plusieurs types de bureaux, l'exigence pour l'ensemble du bâtiment est calculée au prorata des surfaces de plancher associées aux différents types de bureaux.

La composante CVC de l'exigence en absolu selon l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire dépendant du lieu d'implantation du bâtiment, **le seuil de performance entre les performances satisfaisante et moyenne sur le ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages est défini pour les bâtiments de bureaux au cas par cas** (calcul automatisé dans l'outil Excel).

Pour **le seuil entre les performances moyenne et insatisfaisante**, la moyenne du ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal pour le parc français de bureaux en 2019 selon les données CEREN est **de 253 kWh_{ef}/(m².an)**.

4.2.4. Seuils pour un bâtiment tertiaire d'école

A l'instar de l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire, **pour un bâtiment tertiaire d'école, il est défini uniquement des seuils de performance sur le sous-indicateur ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages**. N'existant pas à ce jour, à notre connaissance, de base représentative du parc français des bâtiments tertiaires d'école et ses consommations d'énergie comme pour les logements, les seuils sont définis de la façon suivante :

- Exigence en absolu sur le ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages pour 2030 définis pour des bâtiments d'école selon l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire pour le seuil entre les performances satisfaisante et moyenne ;
- Moyenne du ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal pour le parc français des bâtiments d'enseignement (plus large que les écoles mais pas plus fin à disposition à ce jour) en



2019 selon les données CEREN¹⁷ pour le seuil entre les performances moyenne et insatisfaisante.

L'exigence en absolu sur le ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages pour 2030 définis pour des bâtiments d'école dans l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire se présente, à l'instar des bâtiments de bureaux, comme la somme d'une composante sur les consommations liées à l'ambiance thermique générale et à la ventilation des locaux (CVC) et d'une composante sur les consommations liées à des usages spécifiques liés au process de l'activité concernée (USE). A ce jour, dans l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire, des valeurs de ces composantes sont définies pour une école maternelle, une école élémentaire, un espace multi-activité & périscolaire et un internat primaire. Pour la composante USE, il est utilisé les valeurs USE étalon, en l'absence à notre portée des informations pour obtenir un USE modulé (durée supplémentaire d'ouverture en période de chauffe par rapport à l'étalon) :

- 15 kWh_{ef}/(m².an) pour une école maternelle ;
- 20 kWh_{ef}/(m².an) pour une école élémentaire ;
- 15 kWh_{ef}/(m².an) pour un espace multi-activité & périscolaire ;
- 20 kWh_{ef}/(m².an) pour un internat primaire.

Pour la composante CVC, elle est définie, de manière identique quel que soit le type d'espace, en fonction de la zone climatique (celle-ci est déterminée automatiquement dans l'outil Excel à partir de du département) et de l'altitude du lieu d'implantation.

Tableau 21 Définition de la composante CVC en fonction de la zone climatique et de l'altitude

Altitude	Zone climatique							
	H1a	Hb	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3
< 400m	70	79	72	69	60	64	66	44
400m à 800m	88	96	87		77	79	76	54
800m à 1200m		115	104			96	87	69
1200m à 1600m		161	148			140	128	109
> 1600m			159			152	138	119

Dans le cas d'un bâtiment d'école présentant plusieurs types d'espace, l'exigence pour l'ensemble du bâtiment est calculée au prorata des surfaces de plancher associées aux différents types d'espace.

La composante CVC de l'exigence en absolu selon l'obligation réglementaire Eco Energie Tertiaire dépendant du lieu d'implantation du bâtiment, le **seuil de performance entre les performances satisfaisante et moyenne sur le ratio surfacique de la consommation**

¹⁷ Fichier Excel « Étude 20240 - suivi du parc et des consommations d'énergie en 2019 - tableaux détaillés_F.xlsx »



annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages est défini pour les bâtiments d'école au cas par cas (calcul automatisé dans l'outil Excel).

Pour le **seuil entre les performances moyenne et insatisfaisante**, la moyenne du ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal pour le parc français des bâtiments d'enseignement en 2019 selon les données CEREN est **de 133 kWh_{ef}/(m².an)**.

Il est à noter qu'en cas de seuil entre les performances satisfaisante et moyenne supérieure au seuil entre les performances moyenne et insatisfaisante, il n'est pas indiqué de performance pour le bâtiment d'école.

4.3. Etat des lieux des données de consommations énergétiques

4.3.1. Logements

Le panel 2 de l'étude QSE comprend 5 maisons individuelles et 4 logements collectifs.

Le Tableau 22 présente la liste des logements du panel 2, des énergies utilisées et des données de consommations énergétiques disponibles.

L'instrumentation énergie a été réalisée sur l'ensemble des logements, exceptée sur les logements 2 et 5 : le compteur gaz du logement 2 ne permettant pas l'installation d'un capteur de comptage sans remplacement du compteur (pas d'émetteur à impulsion présent), et l'occupant du logement 5 ne souhaitant pas l'instrumentation de son logement.

Pour rappel, l'instrumentation énergie a consisté à l'installation de plusieurs capteurs :

- Capteur optique sur compteur électrique général du logement ;
- Capteur à impulsion sur le compteur gaz général du logement (le cas échéant) ;
- Capteurs de température et humidité : salon et chambre principale du logement ;
- Sous-comptage électrique : pose de pinces ampèremétriques dans le tableau divisionnaire du logement (selon besoin, en cas de présence de système thermodynamique par exemple).

Etant donné les difficultés de recrutement, certaines instrumentations ont été réalisées de manière tardive, ne permettant pas d'acquérir des données sur une temporalité suffisante à l'analyse à ce jour. Les logements disposant de données sur des périodes inférieures à 6 mois ou hors période de chauffe ne feront donc pas l'objet d'une analyse dans ce rapport. Les logements dont l'analyse des données d'instrumentation sera effectuée dans les parties suivantes du rapport sont indiqués en vert : logements n°1, 3 et 4.



Tableau 22 : Evaluation des consommations d'énergie des logements

N°	Type	Description des travaux							Date de fin de travaux	Type de chauffage	Disponibilités des données			Analyse réalisée (niveau de méthode)		
		ITE	Menuiserie	Plancher	Toiture/co	Chauffage	Ventilation	Climatisati			Mesure-Instrumentation (mois de données)	Compteurs communicants ¹⁸	Factures	0	1	2
1	MI	X	X	X		X			01/2020	Chaudière gaz + poêle bois	14 (hors bois)	Elec : 30min//1an Gaz : non récupérées	Pas de factures	-	OUI	OUI
2	MI	X			X	X	X		08/2016	Chaudière gaz	-	-	Elec/gaz: annuel/ 1 an	OUI	-	-
3	MI		X		X	X	X	X	12/2018	PAC réversible + ballon élec ECS	10	Elec : 30min/10mois	Elec : trimensuel /1 année incomplète	-	Dégradé	Dégradé
4	MI	X	X		X	X	X	X	10/2019	PAC + plancher chauffant + ECS ballon thermodynamique	10	-	Elec : 6 mois après travaux	-	Dégradé	Dégradé

¹⁸ pas de temps des données / période après travaux



N°	Type	Description des travaux							Date de fin de travaux	Type de chauffage	Disponibilités des données			Analyse réalisée (niveau de méthode)			
		ITE	Menuiserie	Plancher	Toiture/co	Chauffage	Ventilation	Climatisati			Mesure-Instrumentation (mois de données)	Compteurs communicants ¹⁸	Factures	0	1	2	
5	MI	X	X	X				X		04/2020	Chaudière gaz	-	Elec : mensuel/1 an Gaz : -	Elec : mensuel/1 an Gaz : mensuel /1an incomplet	-	-	-
6	LC	X	X	X	X	X	X			12/2019	Chauffage collectif	3 + installation collective	Elec : mensuel/2 ans Gaz : non récupérées	Pas de factures	-	-	-
7	LC	X	X			X	X			02/2019	Convecteurs électriques + ballon elec ECS	3	Non récupérées	Elec : mensuel/1 an	OU	-	-
8	LC	X	X	X		X				12/2018	Chaudière gaz	7 (hors chauffe)	-	Pas de factures	-	-	-
9	LC	X	X	X		X				12/2018	Chaudière gaz	7 (hors chauffe)	-	Incomplet après travaux	-	-	-

MI : Maisons individuelle ; LC : logement collectif



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Les données de compteurs communicants électriques Linky ont été recueillies pour 4 logements, sur 5 logements en disposant. Ce recueil impliquait la signature d'un accord de transmission de données ENEDIS par l'occupant pour le recueil de données mensuelles, et l'intervention d'activation de la sortie télé-information client du compteur via une demande en ligne sur le compte fournisseur de l'occupant pour le recueil des données au pas de temps fin (30 minutes).

Les données de compteurs communicants Gazpar n'ont pas pu être recueillies pour le seul logement en disposant, car cela nécessitait la signature d'un accord de consentement et une intervention en ligne de la part de l'occupant qui n'a pas été réalisée par l'occupant concerné.

4.3.2. Bureaux

Le panel 2 contient 4 bureaux. Le Tableau 23 présente la liste des bureaux du panel 2, des énergies utilisées et des données de consommations énergétiques disponibles.

Tableau 23 : Evaluation des consommations d'énergie des bureaux

° N	Description des travaux								Date de fin de travaux	Type de chauffage	Disponibilités des données	Analyse réalisée
	ITE	Menuiserie	Plancher	Toiture/co	Chauffage	Ventilation	ENR	Climatisati				
1	X	X	X	X	X	X	X	X	Sept 2019	CTA thermodynamique + gainables	Pas de factures	NON
2	X	X			X				Nov 2018	Pompe à chaleur	Données incomplètes	NON
3		X		X	X				Déc 2016	Pompe à chaleur	Données incomplètes	NON
4	X	X		X	X	X			Sept 2019	Chaudière gaz condensation	Données incomplètes	NON



4.3.3. Ecoles

Le panel 2 contient 6 écoles. Le tableau suivant présente la liste des écoles du panel 2, des énergies utilisées et des données de consommations énergétiques disponibles.

Tableau 24 : Evaluation des consommations d'énergie des écoles

° N	Description des travaux								Date de fin de travaux	Type de chauffage	Disponibilités des données	Analyse réalisée
	ITE	Menuiserie	Plancher	Toiture/co	Chauffage	Ventilation	ENR	Climatisati				
1	X	X			X				Janvier 2020	Chaudière gaz	Pas d'année complète après travaux	NON
2				X	X	X			Aout 2019	Chaudière gaz	OUI	OUI
3				X	X	X			Aout 2019	Chaudière gaz	OUI	OUI
4	X	X		X	X	X			Sept 2019	Chaudière gaz	OUI	OUI
5	X	X			X	X	X		Janvier 2020	Chaudière gaz	Pas d'année complète après travaux	NON
6	X	X		X					Aout 2018	Chaudière gaz	OUI	OUI

4.3.4. Difficultés rencontrées dans le recueil de données

De façon générale, le recueil des données énergie a été mis en difficulté par plusieurs éléments :

- Difficulté de recrutement, impliquant un décalage dans le temps de l'instrumentation des bâtiments et des données de mesure sur une période non suffisante à l'analyse ;
- Retards dans la réalisation de travaux et des instrumentations, notamment liés au COVID ;
- Difficulté à réaliser l'instrumentation :
 - Compteurs non instrumentables (compteur gaz sans émetteur à impulsion)
 - Présence d'énergie difficilement mesurable selon le protocole mis en place (bois ou fioul notamment) ;



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

- Réticences des occupants quant à la pose de certains appareils ;
- Déplacement ou pertes de capteurs par les occupants ;
- Peu de disponibilités des occupants en cas de problèmes de maintenance sur les capteurs ;
- Difficulté de recueil des données de compteurs communicants :
 - Difficulté à recueillir le numéro du point de livraison à transmettre pour récupérer les données associées (nécessite le recueil des factures) ;
 - Nécessité d'intervention de l'occupant pour activer l'historisation des données à pas de temps fin (intervention du client sur l'espace personnel fournisseur d'énergie) ;
- Difficultés dans le recueil des factures :
 - Recueil de facture sur des périodes non suffisantes, ou incluant les travaux ;
 - Factures partielles ou uniquement sur estimation ;
 - Pas de transmission des informations malgré de nombreuses relances des partenaires.

Un constat général a été effectué par les partenaires sur l'importante quantité d'informations à recueillir qui ont abouti parfois à submerger et effrayer les occupants, nuisant ainsi à la réalisation exhaustive des demandes.

4.4. Analyses et résultats

4.4.1. Analyse suivant la méthode de niveau 0

Logement 2

A renseigner	
Informations sur le logement	
Type de logement	Maison
Période de construction/Période de rénovation globale	1999 et Après
Département	69
Surface habitable (en m ²)	85
Type de chauffage présent	Individuel
Information sur les énergies utilisées	
Pas de logement avec de la climatisation	
Energie principale de chauffage	Gaz
Energie d'appoint/secondaire de chauffage	Pas d'appoint/2nde énergie
Energie principale de production d'ecs	Gaz
Energie d'appoint/secondaire de production d'ecs	Pas d'appoint/2nde énergie
Energie principale de cuisson	Gaz
Energie secondaire de cuisson	Electricité
Déclaration des consommations annuelles d'énergie	
Electricité	
Mois de début de l'année considérée	Juin
Année civile de début de l'année considérée	2017
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale	2603
Gaz	
Mois de début de l'année considérée	Juin
Année civile de début de l'année considérée	2017
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCS	12653



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Les travaux ont été finalisés en juin 2016 : isolation des murs extérieurs, isolation des combles, pose d'une VMC, remplacement de la chaudière existante par une chaudière gaz à condensation double usage avec production d'eau chaude sanitaire instantanée.

Résultats après travaux du calcul de l'indicateur énergie :

Résultats		
Qualification de la réalisation du calcul	Ok	
Qualification de la performance énergétique globale	Moyenne	
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale au périmètre tous usages (kWh _{ep} /(m ² .an))		165
Qualification de la performance en énergie finale	Moyenne	
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie primaire au périmètre tous usages (kWh _{ep} /(m ² .an))		205
Qualification de la performance en énergie primaire	Satisfaisante	
Ratio surfacique d'émissions annuelles de GES au périmètre tous usages (kgCO ₂ eq/(m ² .an))		32,5
Qualification de la performance en GES	Moyenne	
Ratio surfacique de facture énergétique annuelle au périmètre tous usages (€ttc/(m ² .an))		16,2
Qualification de la performance en €	Moyenne	



Logement 7

Informations sur le logement	
Type de logement	Appartement
Période de construction/Période de rénovation globale	1999 et Après
Département	93
Surface habitable (en m²)	77
Type de chauffage présent	Individuel
Information sur les énergies utilisées	
Energie principale de chauffage	Electricité
Energie d'appoint/secondaire de chauffage	Pas d'appoint/2nde énergie
Energie principale de production d'ecs	Electricité
Energie d'appoint/secondaire de production d'ecs	Pas d'appoint/2nde énergie
Energie principale de cuisson	Electricité
Energie secondaire de cuisson	Pas de 2nde énergie
Déclaration des consommations annuelles d'énergie	
Electricité	
Mois de début de l'année considérée	Juillet
Année civile de début de l'année considérée	2020
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale	7873
Gaz	
Mois de début de l'année considérée	
Année civile de début de l'année considérée	
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCS	
Fioul	
Année civile considérée	
Consommation annuelle en litre	
Bois	
Année civile considérée	
Consommation annuelle de bois bûches en stère	
Paieement du bois bûches	
Consommation annuelle de granulés/pellets bois en kg	
Consommation annuelle de briquettes de bois en kg	
Consommation annuelle de plaquettes de bois en kg	
Réseau de chaleur	
Mois de début de l'année considérée	
Année civile de début de l'année considérée	
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCI	
Autre	
Année civile considérée	
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCI	

Les travaux de ce logement ont été finalisés début 2019. Ils ont concerné l'isolation des murs extérieurs, le remplacement des menuiseries, la réfection de la ventilation et le remplacement des convecteurs assurant le chauffage.

Résultats après travaux du calcul de l'indicateur énergie :

Résultats	
Qualification de la réalisation du calcul	Ok
Qualification de la performance énergétique globale	Moyenne
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale au périmètre tous usages (kWh/m².an)	105
Qualification de la performance en énergie finale	Satisfaisante
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie primaire au périmètre tous usages (kWh/m².an)	241
Qualification de la performance en énergie primaire	Moyenne
Ratio surfacique d'émissions annuelles de GES au périmètre tous usages (kgCO ₂ eq/(m².an))	7,4
Qualification de la performance en GES	Satisfaisante
Ratio surfacique de facture énergétique annuelle au périmètre tous usages (€/m².an)	17,5
Qualification de la performance en €	Moyenne



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Ecoles 2 et 3

Ces 2 écoles forment un même groupe scolaire. Les factures fournies le sont à l'échelle du groupe scolaire ainsi les deux écoles sont évaluées ensemble.

Informations sur le bâtiment	
Département	64
Altitude du lieu d'implantation	< 400 m
Surface de plancher totale (en m ²)	2456
Surface totale chauffée (en m ²)	2440
Surface totale refroidie (en m ²)	0
Surface de plancher d'école maternelle (inclus locaux de bureaux, pôle santé, aide social, en m ²)	921
Surface de plancher d'école élémentaire (inclus locaux de bureaux, pôle santé, aide social, en m ²)	1535
Surface de plancher de salle multi-activité et périscolaire (en m ²)	
Surface de plancher d'internat primaire (en m ²)	
Surface de plancher de restauration (en m ²)	
Surface de plancher d'usage(s) autre(s) (en m ²)	
Information sur les énergies utilisées	
Energie principale de chauffage	Gaz
Energie d'appoint/secondaire de chauffage	Electricité
Energie principale de refroidissement	Pas de refroidissement
Energie d'appoint/secondaire de refroidissement	
Energie principale de production d'ecs	Electricité
Energie d'appoint/secondaire de production d'ecs	Pas d'appoint/2nde énergie
Energie principale de cuisson	Electricité
Energie secondaire de cuisson	
Déclaration des consommations annuelles d'énergie	
Electricité	
Mois de début de l'année considérée	Novembre
Année civile de début de l'année considérée	2019
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale	45453
Gaz	
Mois de début de l'année considérée	Novembre
Année civile de début de l'année considérée	2019
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCS	273893

N'ayant pas les informations pour identifier dans la surface totale, celle liée à l'école maternelle et celle liée à l'école élémentaire, il a été supposé que la part liée à l'école maternelle représente 3/8 (3 niveaux scolaires sur les 8 présents dans le groupe scolaire) et celle liée à l'école élémentaire 5/8 (5 niveaux scolaire sur les 8).

Par ailleurs, nous avons l'information qu'une cantine est présente dans le groupe scolaire mais ne connaissons pas sa surface.

Les travaux ont été finalisés en août 2019 : renforcement de l'isolation des plafonds, mise en œuvre de 2 CTA double flux avec batterie électrique sur l'ensemble des salles de classes.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Résultats après travaux du calcul de l'indicateur énergie :

Résultats	
Qualification de la réalisation du calcul	Ok
Qualification de la performance énergétique globale	Moyenne
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale au périmètre tous usages (kWh _{ef} /(m ² .an))	124
Qualification de la performance en énergie finale	Moyenne

Attention, la période de consommation exploitée comporte suite à la crise de la COVID 19 plusieurs mois avec un usage inhabituel de l'école ainsi le résultat obtenu ici est à prendre avec beaucoup de précaution.

Ecole 4

Informations sur le bâtiment	
Département	31
Altitude du lieu d'implantation	< 400 m
Surface de plancher totale (en m ²)	3736
Surface totale chauffée (en m ²)	3736
Surface totale refroidie (en m ²)	0
Surface de plancher d'école maternelle (inclus locaux de bureaux, pôle santé, aide social, en m ²)	
Surface de plancher d'école élémentaire (inclus locaux de bureaux, pôle santé, aide social, en m ²)	3736
Surface de plancher de salle multi-activité et périscolaire (en m ²)	
Surface de plancher d'internat primaire (en m ²)	
Surface de plancher de restauration (en m ²)	
Surface de plancher d'usage(s) autre(s) (en m ²)	
Information sur les énergies utilisées	
Energie principale de chauffage	Gaz
Energie d'appoint/secondaire de chauffage	Electricité
Energie principale de refroidissement	Pas de refroidissement
Energie d'appoint/secondaire de refroidissement	
Energie principale de production d'ecs	Gaz
Energie d'appoint/secondaire de production d'ecs	Pas d'appoint/2nde énergie
Energie principale de cuisson	Pas de cuisson
Energie secondaire de cuisson	
Déclaration des consommations annuelles d'énergie	
Electricité	
Mois de début de l'année considérée	Octobre
Année civile de début de l'année considérée	2019
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale	11927
Gaz	
Mois de début de l'année considérée	Octobre
Année civile de début de l'année considérée	2019
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCS	137834

Par ailleurs, nous avons l'information qu'une cantine est présente dans le groupe scolaire mais ne connaissons pas sa surface.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Les travaux ont été finalisés en septembre 2019 : isolation thermique par l'extérieur des murs extérieurs, isolation de la toiture terrasse, remplacement des menuiseries, remplacement de la chaudière existante, mise en place d'une ventilation double flux.

Résultats après travaux du calcul de l'indicateur énergie :

Résultats		
Qualification de la réalisation du calcul	Ok	
Qualification de la performance énergétique globale	Satisfaisante	
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale au périmètre tous usages (kWh _{ef} /(m ² .an))		45
Qualification de la performance en énergie finale	Satisfaisante	

Attention, la période de consommation exploitée comporte suite à la crise de la COVID 19 plusieurs mois avec un usage inhabituel de l'école ainsi le résultat obtenu ici est à prendre avec beaucoup de précaution.



Ecole 6

A renseigner		
Informations sur le bâtiment		
Département		33
Altitude du lieu d'implantation	< 400 m	
Surface de plancher totale (en m²)		1000
Surface totale chauffée (en m²)		1000
Surface totale refroidie (en m²)		0
Surface de plancher d'école maternelle (inclus locaux de bureaux, pôle santé, aide social, en m²)		1000
Surface de plancher d'école primaire (inclus locaux de bureaux, pôle santé, aide social, en m²)		0
Surface de plancher de salle multi-activité et périscolaire (en m²)		0
Surface de plancher d'internat primaire (en m²)		0
Surface de plancher de restauration (en m²)		0
Surface de plancher d'usage(s) autre(s) (en m²)		0
Information sur les énergies utilisées		
Energie principale de chauffage	Gaz	
Energie d'appoint/secondaire de chauffage	Pas d'appoint/2nde énergie	
Energie principale de refroidissement	Pas de refroidissement	
Energie d'appoint/secondaire de refroidissement	Pas d'appoint/2nde énergie	
Energie principale de production d'ecs	Electricité	
Energie d'appoint/secondaire de production d'ecs	Pas d'appoint/2nde énergie	
Energie principale de cuisson	Pas de cuisson	
Energie secondaire de cuisson	Pas de 2nde énergie	
Déclaration des consommations annuelles d'énergie		
Electricité		
Mois de début de l'année considérée	Janvier	
Année civile de début de l'année considérée		2019
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale		31555
Gaz		
Mois de début de l'année considérée	Janvier	
Année civile de début de l'année considérée		2019
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCS		47465
Fioul		
Année civile considérée		
Consommation annuelle en litres		
Bois		
Année civile considérée		
Consommation annuelle de bois bûches en stère		
Paielement du bois bûches		
Consommation annuelle de granulés/pellets bois en kg		
Consommation annuelle de briquettes de bois en kg		
Consommation annuelle de plaquettes de bois en kg		

Par ailleurs, nous avons l'information qu'une cantine est présente dans le groupe scolaire mais ne connaissons pas sa surface

Les travaux ont été finalisés en août 2018 : rénovation et extension de l'école maternelle avec travaux sur charpente bois, couverture étanchéités et menuiseries extérieures.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Résultats après travaux du calcul de l'indicateur énergie :

Résultats	
Qualification de la réalisation du calcul	Ok
Qualification de la performance énergétique globale	Satisfaisante
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale au périmètre tous usages (kWh/m ² /an)	76
Qualification de la performance en énergie finale	Satisfaisante

4.4.2. Analyse suivant la méthode de niveau 1 et 2

Logement 1 – analyse de niveau 1

Le logement 1 est une maison individuelle d'une surface habitable de 135 m², située dans le département du Rhône (69) et rénovée en janvier 2020 (fin des travaux). Ces travaux ont concerné aussi bien l'enveloppe avec l'installation d'une isolation par l'extérieure et un changement des menuiseries, que les systèmes avec l'installation d'une chaudière à condensation, d'un poêle à bois ainsi que d'une ventilation double flux. La maison est équipée de compteurs communicants Gazpar et Linky. Les données Linky ont été récupérées, mais les données Gazpar n'ont pas pu l'être. La maison a également été équipée d'un compteur gaz et d'un compteur électrique supplémentaire permettant d'accéder aux données de consommation à pas de temps fin. Par ailleurs, la maison a été équipée de deux capteurs de température, disposés dans le séjour et la chambre principale. L'instrumentation disponible permet donc de réaliser l'analyse de niveau 1 et de niveau 2.

Analyse des consommations électriques

Sur ce bâtiment, l'énergie électrique n'est a priori pas liée à un usage thermosensible. Nous allons cependant le vérifier en effectuant une modélisation. Les données de consommation énergétique ne sont en revanche disponibles que de décembre 2020 à septembre 2021.

Comme cela était montré en figure 12 précédemment, le graphique fait apparaître les consommations d'électricité quotidienne en fonction de la température moyenne. On n'observe pas de corrélation entre ces deux grandeurs ce qui est confirmé lorsqu'on effectue une régression utilisant un modèle à changement de point. En effet, le meilleur modèle obtenu possède un coefficient de régression très faible (inférieur à 0.1). On retient donc la valeur moyenne de la consommation d'électricité qui est de 7.12 kWh par jour soit une consommation annuelle de 2599 kWh.

Analyse des consommations de gaz

L'énergie principale de chauffage étant le gaz, la donnée de consommation est normalement disponible à une fréquence quotidienne. C'est donc la méthode quotidienne qui sera appliquée. Un facteur de conversion énergétique de 11.05 kWh/m³ a été utilisé.

La période d'analyse s'étend sur une période d'une année du 10/07/2020 au 09/07/2021. Sur cette période, aucune donnée manquante n'a été observée.



La figure ci-dessous représente la consommation d'énergie en fonction de la température extérieure moyenne. Une régression utilisant un modèle à changement de point a été réalisée sur ces données. Avec des coefficients statistiques R^2 et CV(RMSE) respectivement de 0.63 et 0.69, la régression est assez moyenne. Cela peut potentiellement s'expliquer par l'utilisation du poêle à bois en tant que chauffage d'appoint. La température de base identifiée est de 14°C. Là encore, cela semble confirmer l'utilisation du poêle à bois comme chauffage d'appoint.

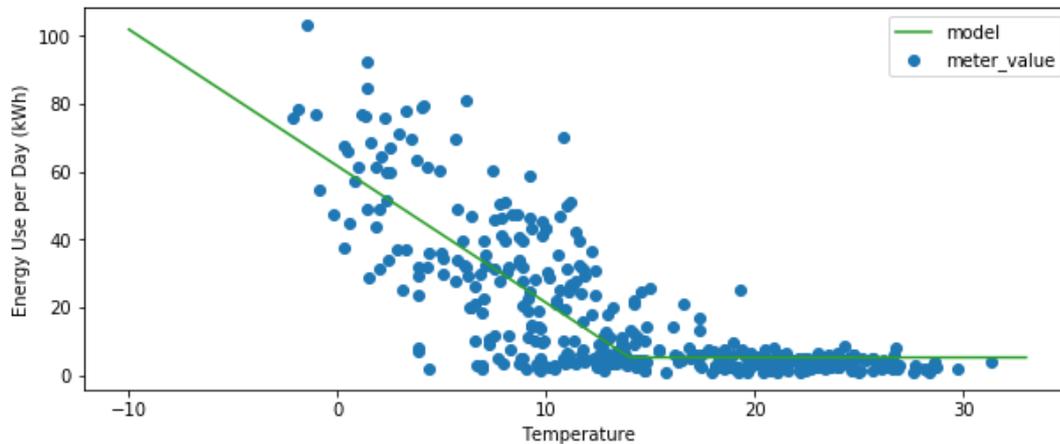


Figure 20: Meilleure régression obtenue sur les données de consommation quotidiennes en fonction de la température extérieure sur le logement 1

Cette modélisation permet d'estimer l'origine des consommations de gaz. On estime ainsi que 72% de cette consommation a pour origine le chauffage, les 28% restant étant dédiés aux autres usages.

Le modèle obtenu peut également être utilisé pour prédire la consommation d'énergie sur une année type.

En utilisant un climat type obtenu selon les principes de la norme 15927 sur les années 2005 à 2015, la consommation énergétique est de 7223 kWh. En y ajoutant la consommation d'électricité moyenne, on obtient donc une consommation normalisée de 9822 kWh.

Il est également possible d'utiliser une correction linéaire basée sur les DJU de chauffage moyen obtenus entre 2005 et 2019 avec une température de base de 14°C. Cette température de base est identifiée via la modélisation précédemment réalisée. On obtient dans ce cas une consommation énergétique normalisée de 7320 kWh

Analyse des consommations de bois

La consommation de bois est estimée sur déclaration de l'occupant. L'occupant du logement 1 déclarant consommer 0,6 stères de bois sur l'année de mesure, on en déduit une consommation annuelle de bois de $0,6 \cdot 1680 \text{ kWh}_{\text{fPCI}} = 1008 \text{ kWh}_{\text{fPCI}}$ de bois. En normalisant sur le climat, on obtient une consommation de 1050 kWh_{fPCI} de bois.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

En y ajoutant la consommation de gaz et d'électricité, on obtient donc une **consommation normalisée de 10 970 kWh, soit 82 kWh_{ef}/m²/an.**

Logement 1 – analyse de niveau 2

Une première étape sur l'analyse de niveau 2 est de réaliser une régression multilinéaire sur les données de consommations de gaz. Les entrées du modèle sont la température extérieure et l'ensoleillement horizontal. Le modèle obtenu permet de prédire la consommation d'énergie sur une année type issue de l'application de la norme EN-15927. On notera que la qualité de la régression est meilleure que celle proposée dans l'analyse de niveau 1 avec des coefficients statistiques R^2 et CV(RMSE) respectivement de 0.74 et 0.58. La consommation de gaz normalisée obtenue est de 7496 kWh. La prise en compte de la consommation électrique est la même que pour l'analyse de niveau 1. La consommation d'énergie totale normalisée est donc de 10094 kWh.

Une seconde étape consiste à réaliser une régression multilinéaire sur les données de consommation de gaz. Les entrées du modèle sont cette fois l'écart de température entre l'intérieure et l'extérieure ainsi que l'ensoleillement horizontal. La qualité de la régression est sensiblement identique à ce qui avait été obtenu précédemment. Par la suite, comme cela a été montré précédemment, on analyse le profil de température quotidienne dans le logement durant la période de chauffe. On constate qu'il semble s'agir d'une consigne fixe à 20°C.

- Il est alors possible de :
- Evaluer les économies d'énergie qui auraient eu lieu l'année de mesure si la consigne de température avait été de 1°C inférieure. On estime celles-ci à 650 kWh.
- De réaliser une prédiction de la consommation énergétique sur une année type en considérant une température de consigne de 19°C. On obtient alors une consommation de gaz normalisée de 6918 kWh. La consommation totale normalisée hors bois est alors de 9516 kWh. En y ajoutant les consommations de bois, **on obtient une consommation totale normalisée de 10 566 kWh, soit 79 kWh_{ef}/m²/an.**

A noter que la configuration d'un logement chauffé au gaz avec appoint bois n'étant pas couverte par l'outil de calcul des indicateurs énergie (ratio CEREN non disponibles), le tableau de résultats n'est pas présenté pour ce bâtiment.



Logement 3

Le logement 3 est une maison individuelle d'une surface habitable de 225 m², située dans les bouches du Rhône (13). Les travaux de rénovation ont été achevés en décembre 2018. Ces travaux ont concerné aussi bien l'enveloppe avec l'isolation des combles et le remplacement des menuiseries que les systèmes avec l'installation d'une pompe à chaleur réversible et l'installation d'une VMC. Les données de consommation électrique sont disponibles depuis le 24 novembre 2020. N'ayant pas accès à une année complète de consommation, il n'est en théorie pas possible d'appliquer les méthodes de niveau 1 et 2. Il est néanmoins possible, comme pour le bâtiment précédent, de proposer une analyse dégradée, se basant sur les méthodes quotidiennes de l'analyse de niveau 1. En effet, la période couverte par les mesures représente a priori une très large partie des usages des systèmes du bâtiment, celle-ci couvrant une large gamme de température. Il faudra cependant garder à l'esprit que les résultats de cette analyse restent sujets à cautions, les critères d'applicabilité de la méthode n'étant pas remplie.

La figure suivante représente la consommation d'énergie en fonction de la température extérieure moyenne. Une régression utilisant un modèle à changement de point a été réalisée sur ces données. Avec des coefficients statistiques R² et CV(RMSE) respectivement de 0.70 et 0.29, la régression d'un niveau acceptable.

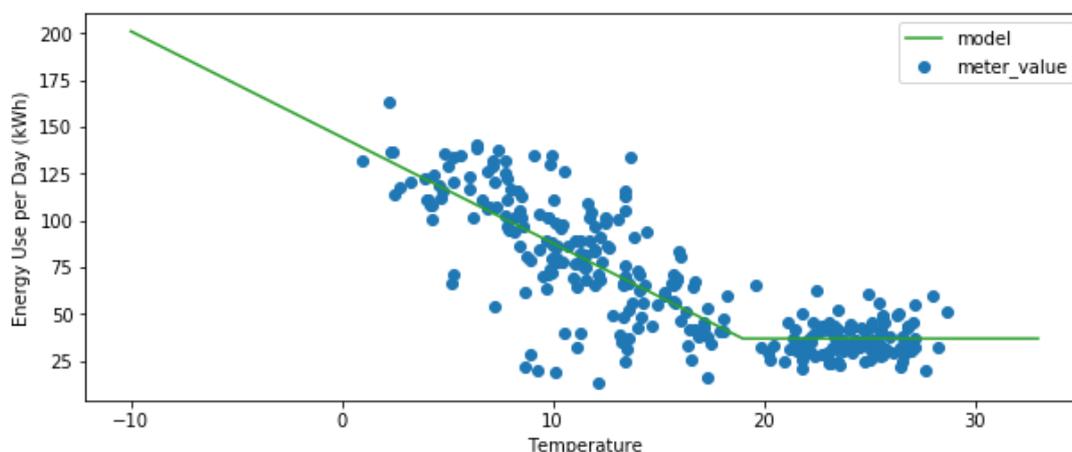


Figure 21: Meilleure régression obtenue sur les données de consommation quotidiennes en fonction de la température extérieure sur le logement 3

La modélisation permet d'estimer que 44% de la consommation d'énergie est liée au chauffage et 56% aux autres usages. Ces estimations ne sont données qu'à titre indicatif car on ne dispose pas d'une année complète. La température de base identifiée est de 19°C. On notera que l'utilisation de ce modèle n'a pas permis d'identifier une consommation d'énergie liée au refroidissement malgré la présence d'un système de climatisation.



Le modèle obtenu peut également être utilisé pour prédire la consommation d'énergie sur une année type. Là encore, il n'est pas possible de réaliser la correction basée sur les DJU car on ne dispose pas de l'année complète. Ainsi, en utilisant un climat type obtenue selon les principes de la norme 15927 sur les années 2005 à 2015, la consommation énergétique annuelle normalisée est de **24140 kWh**. En se basant sur ce dernier résultat, il est possible de comparer la performance énergétique du bâtiment aux seuils définis précédemment.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Qualification de la performance énergétique globale	Moyenne
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale au périmètre tous usages (kWh _{ef} /(m ² .an))	107
Qualification de la performance en énergie finale	Satisfaisante
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie primaire au périmètre tous usages (kWh _{ep} /(m ² .an))	247
Qualification de la performance en énergie primaire	Moyenne
Ratio surfacique d'émissions annuelles de GES au périmètre tous usages (kgCO ₂ eq/(m ² .an))	7.4
Qualification de la performance en GES	Satisfaisante
Ratio surfacique de facture énergétique annuelle au périmètre tous usages (€ttc/(m ² .an))	17.2
Qualification de la performance en €	Moyenne

Figure 22: Qualification énergétique du logement 3

Logement 4

Le logement 4 est une maison individuelle d'une surface habitable de 110 m², située en Haute Corse (2A). Les travaux de rénovation ont été achevés en octobre 2019. Ces travaux ont concerné aussi bien l'enveloppe avec l'isolation des murs et des combles et le remplacement des menuiseries que les systèmes avec l'installation d'une PAC air/eau la mise en place d'un chauffe-eau thermodynamique et l'installation d'une VMC. On notera également la présence d'un système de climatisation. Les données de consommation électrique sont disponibles depuis le 23 novembre 2020. N'ayant pas accès à une année complète de consommation, il n'est en théorie pas possible d'appliquer les méthodes de niveau 1 et 2. Il est néanmoins possible de proposer une analyse dégradée, se basant sur les méthodes quotidiennes de l'analyse de niveau 1. En effet, la période couverte par les mesures représente a priori une très large partie des usages des systèmes du bâtiment, celle-ci couvrant une large gamme de température. Il faudra cependant garder à l'esprit que les résultats de cette analyse restent sujets à cautions, les critères d'applicabilité de la méthode n'étant pas remplie.

La figure suivante représente la consommation d'énergie en fonction de la température extérieure moyenne. Une régression utilisant un modèle à changement de point a été réalisée sur ces données. Avec des coefficients statistiques R² et CV(RMSE) respectivement de 0.85 et 0.23, la régression est de bon niveau.



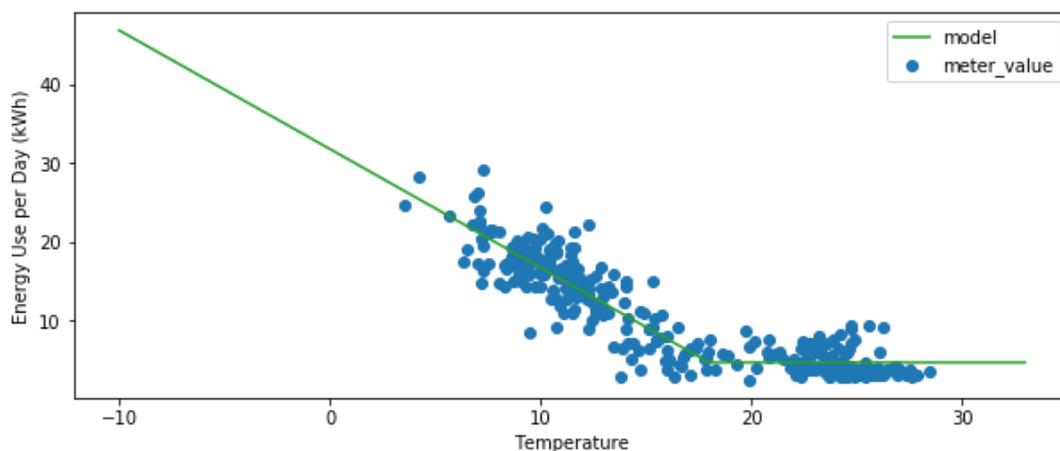


Figure 23: Meilleure régression obtenue sur les données de consommation quotidiennes en fonction de la température extérieure sur le logement 4

La modélisation permet d'estimer que 56% de la consommation d'énergie est lié au chauffage et 44% aux autre usages. Ces estimations ne sont données qu'à titre indicatif car on ne dispose pas d'une année complète. La température de base identifiée est de 18°C. On notera que l'utilisation de ce modèle n'a pas permis d'identifier une consommation d'énergie liée au refroidissement malgré la présence d'un système de climatisation.

Le modèle obtenu peut également être utilisé pour prédire la consommation d'énergie sur une année type. Il n'est en revanche pas possible de réaliser la correction basée sur les DJU car on ne dispose pas de l'année complète. Ainsi, en utilisant un climat type obtenue selon les principes de la norme 15927 sur les années 2005 à 2015, la consommation énergétique annuelle normalisée est de **3595 kWh**. En se basant sur ce dernier résultat, il est possible de comparer la performance énergétique du bâtiment aux seuils définis précédemment.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Qualification de la performance énergétique globale	Satisfaisante
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale au périmètre tous usages (kWh _{ef} /(m ² .an))	33
Qualification de la performance en énergie finale	Satisfaisante
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie primaire au périmètre tous usages (kWh _{ep} /(m ² .an))	75
Qualification de la performance en énergie primaire	Satisfaisante
Ratio surfacique d'émissions annuelles de GES au périmètre tous usages (kgCO ₂ eq/(m ² .an))	3.3
Qualification de la performance en GES	Satisfaisante
Ratio surfacique de facture énergétique annuelle au périmètre tous usages (€ttc/(m ² .an))	6.0
Qualification de la performance en €	Satisfaisante

Figure 24: Qualification énergétique du logement 4



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

5. COMPARAISON DES RESULTATS AVEC LE PARC EXISTANT DE BATIMENTS FRANÇAIS OU LES EXIGENCES REGLEMENTAIRES

5.1. Préambule

Les résultats des mesures du confinement, des paramètres de température et d'humidité relative et des indicateurs de qualité de l'air intérieur obtenus dans cette étude ont été comparés respectivement aux mesures réalisées dans le parc existant de :

- logements français issues de la campagne nationale « Logements » ou CNL1 de l'OQAI sur la période 2003-2005 ;
- du parc existant d'écoles maternelle et élémentaires françaises issues de la campagne nationale « Ecole » ou CNE de l'OQAI sur la période 2013-2017,
- avec ceux du parc existant de bureaux français mesurés issues de la campagne nationale « Bureau » ou CNB de l'OQAI sur la période 2013-2017.

Du fait du déséquilibre des effectifs, aucun test statistique n'a pu être utilisé pour comparer les séries de données entre elles. Il a été décidé d'utiliser une autre approche consistant à comparer les intervalles de confiances des valeurs moyennes de concentrations des paramètres citées ci-dessus calculées pour cette étude et celles du parc existant. Dans le cas d'un paramètre, si l'intervalle de confiance calculé pour cette étude recouvre en totalité ou en partie celui de l'étude du parc existant, aucune différence n'est suspectée. Dans le cas contraire où les intervalles de confiance sont bien distincts, une différence entre les résultats de l'étude et celle du parc existant est suspectée.

Au niveau du bruits des équipements et en l'absence de réglementation pour les bâtiments rénovés, les résultats ont été comparés aux seuils réglementaires des bâtiments neufs pour les logements et les écoles. Il faut toutefois avoir à l'esprit que les résultats des mesures ne sont pas strictement comparables à ce seuil puisqu'aucune correction liée à la durée de réverbération du local n'a été appliquée. Pour les bureaux, aucune comparaison n'a été réalisée en l'absence de réglementation pour les bâtiments neufs.

Au niveau de la consommation d'énergie, les résultats ont été comparés respectivement aux performances du parc de logements français global (enquête Phébus) pour les logements et aux exigences du dispositif Eco Energie Tertiaire et les performances moyennes du parc de bâtiments d'enseignement français pour les bâtiments à usage d'école. En l'absence de données pour les bâtiments à usage de bureau, aucune comparaison n'a été réalisée.



5.2. Logements

La comparaison des niveaux moyens du CO₂, de température, d'humidité relative et de qualité de l'air intérieur des 9 logements de l'étude avec ceux du parc existant de logements français mesurés dans le cadre de la campagne nationale « Logements » ou CNL1 de l'OQAI sur la période 2003-2005 est présentée dans le Tableau 25.

Il apparaît qu'aucune différence suspectée pour 3 COV (benzène, 2-butoxyéthanol, styrène) et pour les 3 aldéhydes (acétaldéhyde, formaldéhyde, hexaldéhyde). Des différences sont en revanche suspectées pour tous les autres paramètres :

- Valeurs de cette étude à priori supérieures à celles du parc existant (intervalles de confiance des valeurs de cette étude supérieures à ceux de la CNL1) pour la température dans la chambre et le séjour, l'humidité relative dans la chambre et le radon dans le séjour
- Valeurs de cette étude à priori inférieures à celles du parc existant (intervalles de confiance des valeurs de cette étude inférieures à ceux de la CNL1) pour l'humidité relative dans le séjour, les PM2.5, et 6 COV (1,2,4-triméthylbenzène, 1-méthoxy-2-propanol, Ethylbenzène, m+p Xylène, o-Xylène, Toluène).

Au niveau du confinement de l'air déterminé par la valeur de l'ICONE (Figure 25), il apparaît, dans cette étude par rapport au parc existant, une proportion plus importante de cas de confinement moyen (44% versus 18%) et aucun cas de confinement extrême.

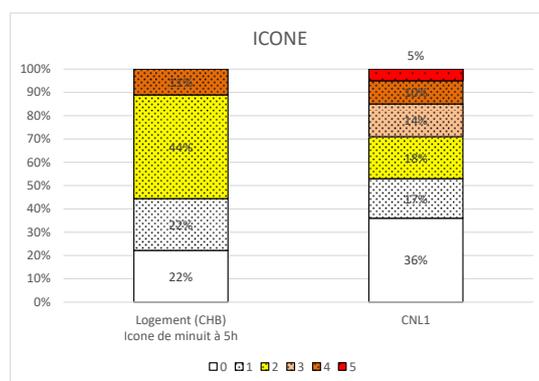


Figure 25 – Comparaison de la fréquence de distribution de l'ICONE pour les logements entre cette étude et le parc existant de logements français (CNL1) sur la période 2003-2005

Au niveau de la présence d'une contamination fongique, le pourcentage de bâtiments contaminés dans cette étude est similaire à celui du parc existant (33% versus 37%).



Tableau 25 – Comparaison des niveaux moyens du confinement, de température, d’humidité relative et de qualité de l’air intérieur des 9 logements de l’étude (mesurés dans la chambre principale sauf si indication contraire) avec ceux du parc existant de logements français mesurés dans le cadre de la campagne nationale « Logements » ou CNL1 de l’OQAI sur la période 2003-2005

Paramètres de confinement, de température, d’humidité relative et de qualité d’air intérieur	Valeur moyenne et intervalle de confiance des 9 logements rénovés de cette étude (QSE)	Valeur moyenne et intervalle de confiance du parc existant de logements français (24 672 135 logements) selon la CNL1	Interprétation de la différence des niveaux des paramètres mesurés dans QSE et CNL1*
CO ₂ moyenne hebdomadaire (toutes périodes) (ppm)	826 [819 – 839]	831 [796,8 – 864,5]	-
Température hebdomadaire moyenne (°C) toutes périodes	22,1 [22,1 – 22,2]	21,0 [20,7 – 21,3]	Différence suspectée
Humidité relative hebdomadaire moyenne (%) toutes périodes	50,9 [50,9 – 51,1]	48,9 [48,0 – 49,7]	Différence suspectée
Température hebdomadaire moyenne (°C) toutes périodes (Séjour)	24,1 [24,04 – 24,19]	21 [20,9 – 21,4]	Différence suspectée
Humidité relative hebdomadaire moyenne (%) toutes périodes (Séjour)	44 [43,8 - 44,2]	48 [47,7 - 49,9]	Différence suspectée
1,2,4-triméthylbenzène (µg/m ³)	1,18 [0,46 – 1,71]	6,8 [5,8 – 7,8]	Différence suspectée
1-methoxy-2-propanol (µg/m ³)	1,2 [0,49 – 1,78]	4,6 [1,78 – 7,43]	Différence suspectée
2-butoxyéthanol (µg/m ³)	0,90 [0,28 – 1,65]	2,8 [1,20 – 4,59]	-
Acétaldéhyde (µg/m ³)	14,7 [8,10 – 23,38]	13,8 [12,78 – 14,72]	-
Benzène (µg/m ³)	1,4 [0,54 – 2,61]	2,8 [2,02 – 3,48]	-



Paramètres de confinement, de température, d'humidité relative et de qualité d'air intérieur	Valeur moyenne et intervalle de confiance des 9 logements rénovés de cette étude (QSE)	Valeur moyenne et intervalle de confiance du parc existant de logements français (24 672 135 logements) selon la CNL1	Interprétation de la différence des niveaux des paramètres mesurés dans QSE et CNL1*
Ethylbenzène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,3 [0,63 – 2,14]	3,9 [3,21 – 4,69]	Différence suspectée
Formaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	18,6 [12,53 – 26,58]	22,8 [21,51 - 24,22]	-
Hexaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	26,4 [16,63 – 39,13]	20,0 [17,13 – 21,89]	-
m+p Xylène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,3 [1,01 – 3,75]	11,0 [9,23 – 12,84]	Différence suspectée
o-Xylène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,83 [0,48 – 1,33]	4,2 [3,5 – 4,9]	Différence suspectée
Styrène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,1 [0,74 – 3,50]	1,3 [1,03 – 1,50]	-
Toluène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,9 [1,23 – 2,49]	22,7 [19,40 – 26,14]	Différence suspectée
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en période d'occupation (séjour)	18,6 [8,5 – 28,9]	37,2 [29,9 – 44,6]	Différence suspectée
Radon (Bq/m^3) en période de chauffe (séjour)	96,7 [76,4 – 117,1]	[46,6 – 77,9]	Différence suspectée

*Pas de test statistique possible du fait des déséquilibres des effectifs des deux études / interprétation basée sur le recouvrement total ou en partie des intervalles de confiance de la moyenne / « - » : pas de différence suspectée



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Au niveau du bruit des équipements, il apparaît que les exigences réglementaires des bâtiments neufs sont le plus souvent dépassées pour les systèmes VMC alors qu'elles sont respectées le plus souvent pour les autres équipements (Tableau 26). Les niveaux sonores restent toutefois proches des seuils réglementaires (1 à 3 dB d'écart). Rappelons par ailleurs que la réglementation acoustique prévoit une tolérance de 3 dB par rapport à ces seuils.

Tableau 26 – Comparaison des niveaux de bruit moyens des équipements par rapport à l'exigence réglementaire des bâtiments neufs pour les 5 systèmes VMC et les 3 équipements autres caractérisés dans les 6 logements de cette étude

Niveau de bruit d'équipements (n : nombre de mesures)	Valeur moyenne pour les logements rénovés de l'étude QSE (échantillon de 6 logements avec données)	Exigence réglementaire pour les bâtiments neufs (cas des pièces principales)	Nombre de cas respectant l'exigence réglementaire
VMC (n=5)	32 dB(A)	≤ 30 dB(A)	1 parmi 5
Autres équipements (n=3): PAC (n=1), chaudière (n=1), climatisation (n=1)	35 dB(A)	≤ 35 dB(A)	2 parmi 3

Au niveau des consommations d'énergie (Tableau 27), la valeur moyenne obtenue pour 5 logements de cette étude se situe en dessous du seuil de 130 kWh_{ef}/(m².an) correspondant au 1/3 le plus performant du parc et au 1/3 du parc aux performances médianes.

Tableau 27 – Comparaison des niveaux de consommations énergétiques totales des logements du panel 2 de l'étude QSE aux seuils de performance définis selon les performances du parc de logements français global

Performance énergétique	Valeur moyenne pour les logements rénovés de l'étude QSE (échantillon de 5 logements avec données)	Seuils de comparaison au parc de logements français	Commentaires
Ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal	99 kWh_{ef}/m².an	Entre le 1/3 le plus performant du parc et le 1/3 du parc aux performances médianes : 130 kWh_{ef}/(m².an) Entre le 1/3 du parc aux performances médianes et le 1/3 le moins performant du parc : 211 kWh_{ef}/(m².an)	Performance moyenne des logements de l'étude QSE satisfaisante par rapport aux performances du parc de logements français



5.3. Bâtiments à usage d'école

Au niveau du confinement de l'air déterminé par la valeur de l'ICONE (Figure 26), il apparaît, dans cette étude par rapport au parc existant, une proportion plus importante de cas de confinement nul et faible (83% versus 17%) et aucun cas de confinement très élevé ou extrême.

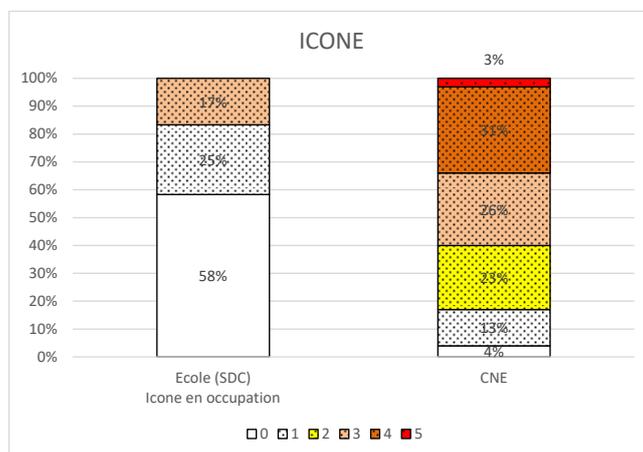


Figure 26 – Comparaison de la fréquence de distribution de l'ICONE pour les écoles entre cette étude et le parc existant d'écoles maternelles et élémentaires françaises (CNE) sur la période 2013-2017

Au niveau de la présence d'une contamination fongique, le pourcentage de bâtiments d'écoles contaminé dans cette étude est similaire à celui du parc existant (16% versus 15%).

Au niveau du bruit des équipements (Tableau 28), seuls les systèmes de ventilation mécanique contrôlée ont été caractérisés. Il apparaît que le seuil réglementaire pour les bâtiments neufs est globalement respecté pour 9 des 12 mesures réalisées.

Tableau 28 – Comparaison des niveaux de bruit moyens des équipements par rapport à l'exigence réglementaire des bâtiments neufs pour les 4 systèmes VMC caractérisés dans les 4 logements de cette étude

Niveau de bruit d'équipements (n=nombre de mesures)	Valeur moyenne pour les logements rénovés de l'étude QSE (échantillon de 6 logements avec données)	Exigence réglementaire pour les bâtiments neufs	Nombre de cas respectant l'exigence réglementaire
VMC (n=12)	34 dB(A)	≤ 38 dB(A)	9 parmi 12

Au niveau des consommations d'énergie (Tableau 29), la valeur moyenne obtenue pour 4 bâtiments à usage d'école de cette étude se situe en dessous du seuil correspondant aux performances moyennes à satisfaisantes du parc de bâtiments d'enseignement français.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Tableau 29 – Comparaison des niveaux de consommations énergétiques totales des écoles du panel 2 de l'étude QSE aux seuils de performance définis selon les exigences du dispositif Eco Energie Tertiaire et les performances moyennes du parc de bâtiments d'enseignement français

Performance énergétique	Valeur moyenne pour les écoles rénovées de l'étude QSE (échantillon de 4 écoles avec données)	Seuils de comparaison	Commentaires
Ratio surfacique de la consommation annuelle d'énergie finale au périmètre tous usages à climat normal	82 kWh _{ef} /m ² /an	Seuil pour des performances moyennes à satisfaisantes dépendant de l'emplacement géographique et de la typologie d'école : 3/4 écoles de l'échantillon analysé présentent des performances satisfaisantes Seuil définis pour des performances insatisfaisantes à moyennes : 133 kWh_{ef}/(m².an)	Performance moyenne des écoles de l'étude QSE satisfaisante par rapport aux performances du parc de bâtiments d'enseignement français.

La comparaison des niveaux moyens du CO₂, de température, d'humidité relative et de qualité de l'air intérieur des 6 écoles de l'étude (mesurés dans 3 salles de classe par école) avec ceux du parc existant d'écoles maternelle et élémentaires françaises mesurés dans le cadre de la campagne nationale « Ecole » ou CNE de l'OQAI sur la période 2013-2017 est présentée dans le Tableau 30.

Il apparait qu'aucune différence suspectée pour l'humidité relative, 3 COV (Hexane, o-Xylène, styrène) et pour les 2 aldéhydes (acétaldéhyde, hexaldéhyde). Des différences sont en revanche suspectées pour tous les autres paramètres pour lesquelles les valeurs de cette étude sont a priori inférieures à celles du parc existant (intervalles de confiance des valeurs de cette étude inférieures à ceux de la CNE). Cela concerne le CO₂, la température, 4 COV (alpha-pinène, benzène, éthylbenzène, toluène), le Formaldéhyde, le NO₂ et les PM_{2.5}.

5.4. Bâtiments à usage de bureau

La comparaison des niveaux moyens du CO₂, de température, d'humidité relative et de qualité de l'air intérieur des 4 immeubles de bureaux de l'étude (mesurés dans 3 espaces de bureau par immeuble) avec ceux du parc existant de bureaux français mesurés dans le cadre de la campagne nationale « Bureau » ou CNB de l'OQAI sur la période 2013-2017 est présentée dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** A la différence des logements et des écoles,



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

l'approche utilisée a été adaptée en l'absence des intervalles de confiance de la campagne CNB. L'interprétation a été basée sur l'inclusion de la moyenne CNB dans les intervalles de confiance des valeurs de cette étude.

Il apparaît qu'aucune différence suspectée pour la température, l'humidité relative, 2 COV (2-butoxyéthanol, styrène) et pour 2 aldéhydes (acétaldéhyde, formaldéhyde). Des différences sont en revanche suspectées pour tous les autres paramètres :

- Valeurs de cette étude à priori supérieures à celles du parc existant (moyenne CNB inférieures à la borne inférieure de l'intervalle de confiance de cette étude) pour l'alpha-pinène et l'héxaldéhyde ;
- Valeurs de cette étude à priori inférieures à celles du parc existant (moyenne CNB supérieures à la borne supérieure de l'intervalle de confiance de cette étude) pour le CO₂ et 7 COV (2-éthylhexanol, benzène, éthylbenzène, limonène, m+p Xylène, o-Xylène, toluène).



Tableau 30 – Comparaison des niveaux moyens de confinement, de température, d’humidité relative et de qualité de l’air intérieur des salles de classe des 6 écoles de l’étude avec ceux du parc existant d’écoles maternelle et élémentaires françaises mesurés dans le cadre de la campagne nationale « Ecole » ou CNE de l’OQAI sur la période 2013-2017

Paramètres de confinement, de température, d’humidité relative et de qualité d’air intérieur	Valeur moyenne et intervalle de confiance des salles de classes des 6 écoles rénovées de cette étude (QSE)	Valeur moyenne et intervalle de confiance du parc existant d’écoles françaises (67 300 écoles) selon la CNE	Interprétation de la différence des niveaux des paramètres mesurés dans QSE et CNE*
CO ₂ moyenne hebdomadaire en période d’occupation (ppm)	840 [717 – 963]	1402 [1362 – 1435]	Différence suspectée
Température hebdomadaire moyenne en période d’occupation (°C)	21,1 [20,7 – 21,5]	23,4 [23,3 – 23,5]	Différence suspectée
Humidité relative hebdomadaire moyenne en période d’occupation (%)	43,6 [40,7 – 46,1]	43,5 [42,6 – 44,2]	-
Acétaldéhyde (µg/m ³)	6 [4,56 – 8,0]	5,8 [5,3 – 6,3]	-
Alpha-pinène (µg/m ³)	4,8 [2,83– 7.63]	32,9 [26,4 – 39,3]	Différence suspectée
Benzène (µg/m ³)	0,78 [0,58 – 0,97]	1,4 [1,2 – 1,6]	Différence suspectée
Ethylbenzène (µg/m ³)	0,47 [0,34 – 0,59]	1,3 [1,0 -1,7]	Différence suspectée
Formaldéhyde (µg/m ³)	11,8 [8,83 – 15,02]	21,5[19,9 – 22,7]	Différence suspectée
Hexaldéhyde (µg/m ³)	10,1 [7,26 – 13,00]	13,7 [10,2 – 17,1]	-
Hexane (µg/m ³)	0,28 [0,11 – 0,52]	3,1 [0,4 -5,9]	-
o-Xylène (µg/m ³)	0,87 [0,49 – 1,56]	1,6 [1,2 – 1,9]	-



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Paramètres de confinement, de température, d'humidité relative et de qualité d'air intérieur	Valeur moyenne et intervalle de confiance des salles de classes des 6 écoles rénovées de cette étude (QSE)	Valeur moyenne et intervalle de confiance du parc existant d'écoles françaises (67 300 écoles) selon la CNE	Interprétation de la différence des niveaux des paramètres mesurés dans QSE et CNE*
Styrène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,31 [0,16 – 0,45]	0,9 [0,7 – 1,1]	-
Toluène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,6 [1,01 – 2,21]	6,1 [4,0 – 8,2]	Différence suspectée
NO2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	8,1 [5,02 – 10,69]	8,5 [4,0 – 12,9]	-
PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en période d'occupation	11,8 [9,05 – 15,73]	20,1 [18,9 – 21,4]	Différence suspectée

**Pas de test statistique possible du fait des déséquilibres des effectifs des deux études / interprétation basée sur le recouvrement total ou en partie des intervalles de confiance de la moyenne / « - » : pas de différence suspectée.*



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Tableau 31 – Comparaison des niveaux moyens de confinement, de température, d’humidité relative et de qualité de l’air intérieur des espaces de travail des 4 immeubles de bureaux de l’étude avec ceux du parc existant de bureaux français mesurés dans le cadre de la campagne nationale « Bureau » ou CNB de l’OQAI sur la période 2013-2017

Paramètres de confinement, de température, d’humidité relative et de qualité d’air intérieur	Valeur moyenne et intervalle de confiance des espaces de travail des 4 bureaux rénovés de cette étude (QSE)	Valeur moyenne du parc existant de bureaux français selon la CNB	Interprétation de la différence des niveaux des paramètres mesurés dans QSE et CNB*
CO ₂ moyenne hebdomadaire en période d’occupation (ppm)	687 [614 – 774]	777	Différence suspectée
Température hebdomadaire moyenne en période d’occupation (°C)	24,4 [23,5 – 25,3]	24,3	-
Humidité relative hebdomadaire moyenne en période d’occupation (%)	42,1 [39,5 – 45,4]	41,8	-
2-butoxyéthanol (µg/m ³)	3,2 [0,8 – 5,9]	5,3	-
2-éthylhexanol (ou 2-éthyl-1-hexanol) (µg/m ³)	2,3 [1,2 – 4,0]	8,4	Différence suspectée
Acétaldéhyde (µg/m ³)	9,1 [7,8 – 10,1]	5,9	-
Alpha-pinène (µg/m ³)	15,1 [5,6 – 23,8]	4,4	Différence suspectée
Benzène (µg/m ³)	0,36 [0,24,0,47]	2,0	Différence suspectée
Ethylbenzène (µg/m ³)	1,2 [0,9 – 1,6]	3,5	Différence suspectée
Formaldéhyde (µg/m ³)	18,4 [12,3 – 24,4]	15,1	-
Hexaldéhyde (µg/m ³)	16,7 [11,0 – 23,7]	4,7	Différence suspectée
Limonène (µg/m ³)	7,2 [0,5 – 12,9]	17,2	Différence suspectée



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Paramètres de confinement, de température, d'humidité relative et de qualité d'air intérieur	Valeur moyenne et intervalle de confiance des espaces de travail des 4 bureaux rénovés de cette étude (QSE)	Valeur moyenne du parc existant de bureaux français selon la CNB	Interprétation de la différence des niveaux des paramètres mesurés dans QSE et CNB*
m+p-Xylènes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,5 [0,3 -1,9]	8,4	Différence suspectée
o-Xylène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,52 [0,4 – 0,7]	3,1	Différence suspectée
Styrène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,6 [1,2 – 2,1]	1,2	-
Toluène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,4 [1,3 – 3,5]	9,6	Différence suspectée



6. CONCLUSIONS

Ce rapport présente l'évaluation de la performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans et investigués dans le cadre de l'étude « Qualité Sanitaire et Energétique des rénovations » ou QSE. Ces **18 bâtiments répartis en France** se composent de 8 bâtiments à usage d'habitation (5 maisons individuelles et 4 logements collectifs répartis dans 3 immeubles collectifs), 6 bâtiments à usage d'école et 4 à usage de bureau. La majorité a fait l'objet de travaux au niveau de l'enveloppe du bâti (isolation de façades et remplacement des menuiseries) et de la vérification/changement des systèmes de chauffage et de ventilation.

Les bâtiments ont été enquêtés du 18 juin 2020 au 1^{er} septembre 2021 à l'exception du premier bâtiment enquêté le 25 janvier 2020. Ainsi, la quasi-totalité des enquêtes a été réalisée pendant la pandémie mondiale du COVID19 où se sont succédées trois périodes de confinement du 17 mars au 11 mai 2020, du 30 octobre au 15 décembre 2020 et du 3 avril au 3 mai 2021. De ce fait, les mesures réalisées pendant cette période intègrent les changements d'occupation (occupation atypique des logements, occupation alternée des écoles et des bureaux), d'aération/ventilation (aération plus fréquente, changement des scénarii de ventilation) et d'activités de nettoyage (renforcement du nettoyage).

Au niveau du **confinement de l'air**, il apparaît que 90% des bâtiments enquêtés et quelle que soit leur typologie présente un confinement nul à moyen. A noter toutefois que les espaces de bureaux et d'écoles se distinguent par rapport aux logements par une fréquence de situation de confinement nul atteignant respectivement 82% et 58% contre 22 %. En ce qui concerne les **indicateurs de pollution chimique**, les composés présentant des concentrations moyennes les plus fortes pour les trois typologies de bâtiment sont les 3 aldéhydes (formaldéhyde, hexaldéhyde, acétaldéhyde) et l'alpha-pinène. A noter que pour les logements et les bâtiments à usage de bureau figure également le limonène. Pour le **NO₂**, les concentrations moyennes sont plus élevées dans les logements et les écoles que les bureaux (respectivement 12,7, 8,1 et 2,4 µg/m³). Pour les **PM_{2.5}**, les concentrations moyennes sont plus élevées dans les logements que les écoles et les bureaux (respectivement 18,6, 11,8 et 10 µg/m³). Enfin le **développement fongique** est observé, à l'échelle du bâtiment, dans 3 logements sur les 9 enquêtés (33%), 1 bâtiment à usage d'école sur les 6 enquêtés (16%) et 1 bâtiment à usage de bureau sur les 4 enquêtés (25%). La **mise en perspective des résultats** a été réalisée avec les valeurs de référence de qualité d'air intérieur disponibles à ce jour pour le benzène, le formaldéhyde, les PM_{2.5} et le radon. Au niveau des valeurs réglementaires, aucun dépassement n'est observé pour le radon (300 Bq/m³) et la quasi-totalité des mesures de benzène et de formaldéhyde sont en dessous des seuils (respectivement 2 µg/m³ et 30 µg/m³). Au niveau des PM_{2.5}, la valeur de gestion rapide (50 µg/m³) n'est jamais dépassée alors que la valeur repère (14 µg/m³) l'est pour moins d'un tiers des mesures.

Au niveau du **confort d'ambiance**, il n'y a **aucune gêne olfactive** et la perception des occupants au **confort thermique est très satisfaisante** à tous les points de vue et pour les trois typologies de bâtiments. L'ambiance thermique est jugée confortable, acceptable et tout à fait supportable. Les occupants n'ont ni froid, ni chaud et ne souhaitent rien changer à cette



situation. Les mesures de température réalisées pendant la semaine d'enquête montrent en effet des valeurs moyennes hebdomadaires égales respectivement à 21°C (pour les salles de classe), 22°C pour les chambres des logements et 24°C (pour les séjours des logements ou les espaces de bureau). **Au niveau du confort visuel**, l'ambiance visuelle est perçue comme « lumineuse » pour les trois typologies de bâtiments. Les occupants des logements trouvent l'éclairage naturel confortable et plus important qu'avant les travaux de rénovation. L'utilisation de l'éclairage artificiel pour leurs activités normales reste inchangée alors que l'utilisation des protections solaires est plus importante qu'avant les travaux de rénovation. Pour les bâtiments à usage d'école et de bureau, l'éclairage naturel est légèrement inconfortable et les occupants n'ont pas voulu s'exprimer sur les autres points (quantité de lumière naturelle, utilisation de l'éclairage artificiel et des protections solaires par rapport à la situation avant les travaux de rénovation). Au niveau du **confort acoustique**, les bruits de la circulation automobile gênent la moitié des occupants des logements mais aucun occupant des bâtiments à usage d'école ou de bureau. Dans les logements, environ la moitié des occupants est gênée par les bruits en provenance du logements. Une plus faible proportion est également gênée par les bruits provenant des parties communes, ainsi que par les bruits d'impacts ou d'équipements provenant des autres logements. La moitié des occupants des salles de classe est gênée par les bruits des chaises dans la salle de classe et par des bruits provenant des autres locaux appartenant à l'établissement (discussions et bruit liée à la fermeture des portes). Les occupants des bureaux sont un peu gênés par les équipements de génie climatique et par le comportement des autres personnes présentes dans leur espace de travail. La mesure des bruits d'équipements notamment de VMC a effectivement montré des niveaux moyens de pression acoustique globale plus élevées dans les bureaux (42 dBA) que dans les écoles (34 dBA) ou les logements (entre 32 dBA).

Par rapport à la situation du parc de bâtiments français, le **niveau de confinement** déterminé par la valeur de l'ICONE à partir des mesures de CO₂ dans les logements et les bâtiments à usage d'école de cette étude est moins élevé que dans le parc existant possiblement du fait de la présence quasi-systématique des systèmes VMC. Au niveau de la **qualité de l'air intérieur**, les mesures réalisées dans cette étude pour la plupart des indicateurs semblent être similaires voir inférieures à celles des parcs existants. Des valeurs supérieures sont toutefois observées pour la température, l'humidité relative, le radon pour les logements et pour l'alpha-pinène et l'héxaldéhyde pour les bâtiments à usage de bureau. A noter qu'aucune valeur supérieure n'est observée pour les bâtiments à usage d'école. Au niveau de la **présence d'une contamination fongique**, les mêmes pourcentages de bâtiments contaminés sont observés pour cette étude comparativement aux parcs existants (33% versus 37% pour les logements et 16% versus 15% pour les bâtiments à usage d'école). **Au niveau des consommations d'énergie** et malgré les difficultés rencontrées lors du recueil des données, la valeur moyenne obtenue pour 5 logements se situe en dessous du seuil de 130 kWh_{ef}/(m².an) correspondant au 1/3 le plus performant du parc et au 1/3 du parc aux performances médianes et celle pour 4 bâtiments à usage d'école en dessous du seuil correspondant aux performances moyennes à satisfaisantes du parc de bâtiments d'enseignement français.



7. 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 ;
- A la société PEOPLEVOX en charge de l'élaboration de la plateforme de collecte de données en ligne ;
- Aux partenaires en charge du recrutement des bâtiments et/ou de la réalisation des enquêtes : ATMO Grand-Est, AUE Corse, CSTB Champs sur Marne, ISPIRA, MEDIECO, Nobatek/INEF 4, QUALITAIR Corse, TIPEE et GREEN SOLUCE ;
- Aux laboratoires d'analyse des prélèvements : Laboratoire POLLEM du CSTB de Saint Martin d'Hères en charges 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 Parisien de Santé Environnementale (SPSE) de la ville de Paris en charge de l'analyse des prélèvements NO₂ et le laboratoire DOSIRAD pour l'analyse des prélèvements radon.



8. ANNEXE — OUTIL EXCEL « QSE - CALCUL_CONSOMMATION_ENERGIE_V1.XLSX »

Onglet « Résidentiel »

A renseigner
Informations sur le logement
Type de logement
Période de construction/Période de rénovation globale
Département
Surface habitable (en m ²)
Type de chauffage présent
Information sur les énergies utilisées
Energie principale de chauffage
Energie d'appoint/secondaire de chauffage
Energie principale de production d'ecs
Energie d'appoint/secondaire de production d'ecs
Energie principale de cuisson
Energie secondaire de cuisson
Déclaration des consommations annuelles d'énergie
Electricité
Mois de début de l'année considérée
Année civile de début de l'année considérée
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale
Gaz
Mois de début de l'année considérée
Année civile de début de l'année considérée
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCS
Fioul
Année civile considérée
Consommation annuelle en litre
Bois
Année civile considérée
Consommation annuelle de bois bûches en stère
Paiement du bois bûches
Consommation annuelle de granulés/pellets bois en kg
Consommation annuelle de briquettes de bois en kg
Consommation annuelle de plaquettes de bois en kg
Réseau de chaleur
Mois de début de l'année considérée
Année civile de début de l'année considérée
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCI
Autre
Année civile considérée
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCI

Résultats	Manque informations sur le logement	Electricité
Qualification de la réalisation du calcul		
Qualification de la performance énergétique globale		Non évaluée
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale au périmètre tous usages (kWh/m ²)		
Qualification de la performance en énergie finale		
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie primaire au périmètre tous usages (kWh/m ²)		
Qualification de la performance en énergie primaire		
Ratio surfacique d'émissions annuelles de GES au périmètre tous usages (kgCO ₂ eq/m ² .an)		
Qualification de la performance en GES		
Ratio surfacique de facture énergétique annuelle au périmètre tous usages (t/m ² .an)		
Qualification de la performance en I		



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Onglet « Tertiaire – Bureau »

A renseigner

Informations sur le bâtiment
 Département
 Altitude du lieu d'implantation
 Surface de plancher totale (en m²)
 Surface totale chauffée (en m²)
 Surface totale refroidie (en m²)
 Surface de plancher de bureaux standards (cloisonés et attribués + salles de réunion intégrées dans la zone, en m²)
 Surface de plancher de bureaux Open Space (non cloisonés mais attribués + salles de réunion intégrées dans la zone, en m²)
 Surface de plancher de bureaux Flex Office (non cloisonés et non attribués + salles de réunion intégrées dans la zone, en m²)
 Surface de plancher de restauration (en m²)
 Surface de plancher de salle et centre d'exploitation informatique (en m²)
 Surface de plancher de stationnement (en m²)
 Surface de plancher d'usage(s) autre(s) (en m²)

Information sur les énergies utilisées
 Energie principale de chauffage
 Energie d'appoint/secondaire de chauffage
 Energie principale de refroidissement
 Energie d'appoint/secondaire de refroidissement
 Energie principale de production d'ecs
 Energie d'appoint/secondaire de production d'ecs
 Energie principale de cuisson
 Energie secondaire de cuisson

Déclaration des consommations annuelles d'énergie
 Electricité
 Mois de début de l'année considérée
 Année civile de début de l'année considérée
 Consommation annuelle en k/vh d'énergie finale

Gaz
 Mois de début de l'année considérée
 Année civile de début de l'année considérée
 Consommation annuelle en k/vh d'énergie finale PCS

Fioul
 Année civile considérée
 Consommation annuelle en litres

Bois
 Année civile considérée
 Consommation annuelle de bois bûches en stère
 Paiement du bois bûches
 Consommation annuelle de granulés/pellets bois en kg
 Consommation annuelle de briquettes de bois en kg
 Consommation annuelle de plaquettes de bois en kg

Réseau de chaleur
 Mois de début de l'année considérée
 Année civile de début de l'année considérée
 Consommation annuelle en k/vh d'énergie finale PCI

Réseau de froid
 Mois de début de l'année considérée
 Année civile de début de l'année considérée
 Consommation annuelle en k/vh d'énergie finale PCI

Autre
 Année civile considérée
 Consommation annuelle en k/vh d'énergie finale PCI

Résultats

Qualification de la réalisation du calcul	Manque informations sur le bâtiment	Electricité
Qualification de la performance énergétique globale	Non évaluée	
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale au périmètre tous usages (k/vh)		
Qualification de la performance en énergie finale		



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans

Onglet « Tertiaire – Ecole »

A renseigner	Résultats
<p>Informations sur le bâtiment Département Altitude du lieu d'implantation Surface de plancher totale (en m²) Surface totale chauffée (en m²) Surface totale refroidie (en m²) Surface de plancher d'école maternelle (inclus locaux de bureaux, pôle santé, aide social, en m²) Surface de plancher d'école primaire (inclus locaux de bureaux, pôle santé, aide social, en m²) Surface de plancher de salle multi-activité et périscolaire (en m²) Surface de plancher d'internat primaire (en m²) Surface de plancher de restauration (en m²) Surface de plancher d'usage(s) autre(s) (en m²)</p> <p>Information sur les énergies utilisées Energie principale de chauffage Energie d'appoint/secondaire de chauffage Energie principale de refroidissement Energie d'appoint/secondaire de refroidissement Energie principale de production d'ecs Energie d'appoint/secondaire de production d'ecs Energie principale de cuisson Energie secondaire de cuisson</p> <p>Déclaration des consommations annuelles d'énergie Electricité Mois de début de l'année considérée Année civile de début de l'année considérée Consommation annuelle en kWh d'énergie finale</p> <p>Gaz Mois de début de l'année considérée Année civile de début de l'année considérée Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCS</p> <p>Fioul Année civile considérée Consommation annuelle en litres</p> <p>Bois Année civile considérée Consommation annuelle de bois bûches en stère Paiement du bois bûches Consommation annuelle de granulés/pellets bois en kg Consommation annuelle de briquettes de bois en kg Consommation annuelle de plaquettes de bois en kg</p> <p>Réseau de chaleur Mois de début de l'année considérée Année civile de début de l'année considérée Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCI</p> <p>Réseau de froid Mois de début de l'année considérée Année civile de début de l'année considérée Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCI</p> <p>Autre Année civile considérée Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCI</p>	<p>Qualification de la réalisation du calcul</p> <p>Qualification de la performance énergétique globale</p> <p>Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale au périmètre tous usages (k/w)</p> <p>Qualification de la performance en énergie finale</p> <p>Manque informations sur le bâtiment</p> <p>Electricité</p> <p>Non évaluée</p>



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livable : performance globale des bâtiments rénovés depuis 1 à 3 ans