

# IMPACT DE LA RENOVATION ENERGETIQUE SUR L'EVALUATION DE LA PERFORMANCE GLOBALE DES LOGEMENTS

JUIN 2022



RAPPORT

## Rédaction

**Mickaël DERBEZ**, CSTB, Ingénieur  
**Virginie DESVIGNES**, CSTB, Statisticienne  
**Rukshala ANTON**, CSTB, Ingénieur  
**Simon BAILHACHE**, CSTB, Ingénieur  
**Arnaud CHALLANSONNEX**, CSTB, Ingénieur  
**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

<b>Rappel des objectifs et livrables du projet</b>	<b>4</b>
<b>1. Description des bâtiments et des occupants</b>	<b>6</b>
1.1. Répartition des bâtiments recrutés par partenaire	6
1.2. Mise en œuvre du protocole d'évaluation de la performance globale	7
1.3. Sélection d'un échantillon de 21 bâtiments d'habitation	8
1.4. Description des 29 logements	10
<b>2. Qualité de l'environnement intérieur</b>	<b>13</b>
2.1. Préambule	13
2.2. Pollution chimique et particulaire	13
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
2.4.2. Résultats	19
<b>3. Consommations d'énergie</b>	<b>21</b>
3.1. Méthodologies d'évaluation de la performance	21
3.2. Etat des lieux des données de consommations énergétiques des logements	21
3.2.1. Sélection des logements retenus pour l'analyse	21
3.2.2. Difficultés rencontrées	23
3.3. Analyse et résultats	24
3.3.1. Logement 21	24
3.3.2. Logements 48, 49 et 51	28
<b>4. Conclusions</b>	<b>30</b>
<b>5. Remerciements</b>	<b>31</b>



# RAPPEL DES OBJECTIFS ET LIVRABLES DU PROJET

L'objectif du projet est double :

- 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 investigués.

Les **deux livrables** attendus sont :

- Une **base de données** regroupant l'ensemble des données collectées sur les bâtiments investigués 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 technique qu'il peut soumettre au gestionnaire du bâtiment ;



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

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

- 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.

Ce rapport présente l'impact des travaux de rénovations énergétiques sur l'évaluation de la performance globale des bâtiments. Ces bâtiments sont ceux pour lesquels les travaux de rénovation énergétique ont eu lieu pendant le projet permettant ainsi d'évaluer leur performance globale à deux reprises : avant et après les travaux (dit panel 1). Pour mémoire, la méthode de référence utilisée pour évaluer la performance globale n'est pas reprise dans ce rapport car elle a été détaillée dans le livrable suivant : QSE\_LivrableT2.1\_20191001. La méthode de calcul des consommations d'énergie ainsi que l'outil excel développé à cet effet sont présentés dans le livrable suivant : QSE\_Panel2\_Versionfinale.



# 1. DESCRIPTION DES BATIMENTS ET DES OCCUPANTS

## 1.1. Répartition des bâtiments recrutés par partenaire

Les 55 bâtiments recrutés se composent de 38 bâtiments d'habitation (12 immeubles collectifs et 26 maisons individuelles), de 11 bâtiments à usage d'écoles et 6 à usage de bureau (Tableau 1 et Figure 1). Pour les bâtiments d'habitation, un total de 56 logements a été recruté car parmi ces derniers se trouvent 30 logements situés dans les 12 immeubles collectifs.

Tableau 1 – Répartition par partenaire des bâtiments recrutés et faisant l'objet de rénovation au cours de l'étude selon leur typologie (MI : maison individuelle, IC : immeuble collectif)

Partenaires	Recrutements des bâtiments faisant l'objet de rénovation au cours de l'étude			Total
	Bâtiments à usage d'habitation	Bâtiments à usage d'école	Bâtiments à usage de bureau	
ATMO Grand-Est	6 (4 MI + 2 IC)	3	1	<b>10</b>
QUALITAIR Corse	7 (4 MI + 3 IC)	0	0	<b>7</b>
CSTB Champs	4 (2 MI + 2 IC)	0	0	<b>4</b>
ISPIRA	4 (3 MI + 1 IC)	1	4	<b>9</b>
MEDIECO	6 (5 MI + 1 IC)	3	1	<b>10</b>
Nobatek/INEF 4	1 (1 IC)	2	0	<b>3</b>
TIPEE	10 (8 MI + 2 IC)	2	0	<b>12</b>
<b>TOTAL</b>	<b>38 (26 MI + 12 IC)</b>	<b>11</b>	<b>6</b>	<b>55</b>



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

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





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

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

Sur ces 55 bâtiments, 35 ont pu faire l'objet de deux enquêtes avant le 31 décembre 2021 : l'une avant les travaux de rénovation et l'autre après les travaux de rénovation (Tableau 2). Cela représente 43 logements (18 maisons individuelles et 25 logements situés dans 12 immeubles collectifs), 4 bâtiments à usage d'école et 1 bâtiment à usage de bureau.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

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

Tableau 2 – Répartition des bâtiments enquêtés par partenaire avant le 31 décembre 2021 selon leur typologie (MI : maison individuelle, IC : immeuble collectif)

Bâtiments ayant fait l'objet des enquêtes « avant » et « après » les travaux de rénovations au 31 décembre 2021				
Partenaires	Bâtiments à usage d'habitation	Bâtiments à usage d'école	Bâtiments à usage de bureau	Total
ATMO Grand-Est	2 MI + 2 IC	1	0	5
QUALITAIR Corse	3 IC	0	0	3
CSTB Champs	2 MI + 2 IC	0	0	4
ISPIRA	1 MI + 1 IC	0	0	2
MEDIECO	5 MI + 1 IC	1	1	8
Nobatek/INEF 4	1 IC	2	0	3
TIPEE	8 MI + 2 IC	0	0	10
<b>TOTAL</b>	<b>30 (18 MI + 12 IC)</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>35</b>

Au final, 20 bâtiments n'ont pas fait l'objet de l'enquête « après » les travaux de rénovation (8 maisons individuelles, 7 bâtiments à usage d'écoles, 5 bâtiments à usage de bureaux) pour deux raisons principales :

- Abandon du projet de travaux de rénovations énergétiques ;
- Décalage du planning des travaux en 2022 voire plus tard (en attente des devis des artisans, changement du planning d'intervention, problème d'approvisionnement en matériaux, par exemple).

### 1.3. Sélection d'un échantillon de 21 bâtiments d'habitation

L'étude de l'impact des travaux de rénovations sur la performance globale des bâtiments a été réalisée sur les bâtiments dont les données d'enquêtes (avant et après les travaux) ont été transmises en base de données en date du 8 décembre 2021 afin de pouvoir valider et exploiter les données d'ici la fin du projet.

Sur les 35 bâtiments ayant fait l'objet de deux enquêtes avant le 31 décembre 2021, les données étaient disponibles pour 22 bâtiments (13 maisons individuelles, 8 immeubles collectifs où ont été enquêtés 16 logements et 1 bâtiment à usage de bureaux). Au total, 29 logements ont été enquêtés. Du fait de la prédominance des bâtiments d'habitation et dans un



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

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



souci de clarté, il a été décidé d'écarter le bâtiment à usage de bureau de ce rapport et **de se focaliser dans ce rapport sur les résultats de 21 bâtiments à usage d'habitation** (Tableau 3).

*Tableau 3 – Répartition des bâtiments d'habitation enquêtés par partenaire pris en compte dans ce rapport*

Partenaires	Bâtiments d'habitation ayant fait l'objet des enquêtes « avant » et « après » les travaux de rénovations pris en compte dans ce rapport		
	Maisons individuelles	Immeubles collectifs	Nombre total de logements
ATMO Grand-Est	2	2	6
QUALITAIR Corse	0	3	8
CSTB Champs	1	0	1
ISPIRA	1	1	2
MEDIECO	4	0	4
TIPEE	5	2	8
<b>TOTAL</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>29</b>

Pour les bâtiments à usage d'école et de bureau, l'exploitation des données sera réalisée dans le cadre de la suite de QSE (QUARTET). Elle intégrera les données des bâtiments :

- enquêtés à deux reprises (avant et après les travaux) avant le 31 décembre 2021 (4 bâtiments à usage d'école et 1 bâtiments à usage de bureau) ;
- dont les enquêtes « après » travaux seront réalisés en 2022. A ce jour et selon les informations recueillies en fin d'année 2021, cela concernerait au maximum 7 bâtiments à usage d'école et 5 bâtiments à usage de bureau.

Elle intégrera également les données des enquêtes de 14 nouveaux bâtiments à usage d'école et 19 bâtiments à usage de bureau à recruter début 2022 et à enquêter à deux reprises avant la fin de l'année 2024.

Il est prévu de livrer, en fin d'année 2024, un rapport complet sur l'exploitation des données de tous les bâtiments à usage d'habitation, d'école et de bureau ayant fait l'objet de deux enquêtes (AV et AP rénovation).



## 1.4. Description des 29 logements

Les périodes d'enquête de ces 29 logements s'étalent du mois de novembre 2019 au mois de juin 2021 pour la phase « avant les travaux » et du mois d'octobre 2020 au mois de novembre 2021 pour la phase « après les travaux ».

Les principales caractéristiques des logements avant les travaux de rénovation sont présentées dans le Tableau 4. Les 29 logements se répartissent à peu près équitablement entre maisons individuelles (13) et logements collectifs (16). Ils ont été construits il y a plus de quarante ans pour la majorité, en béton plein ou en parpaing. Au niveau de l'isolation thermique, plus de la moitié des logements possède une isolation des murs et des combles/toitures mais pratiquement aucun n'est isolé à l'interface avec le sol. Au niveau des systèmes, la plupart est équipé d'un chauffage central (chaudière ou réseau de chaleur) avec une production d'eau chaude sanitaire associée. La moitié est ventilé mécaniquement principalement en simple flux, un quart est ventilé naturellement (ventilation naturelle par grilles d'aération hautes et basses ou ventilation par conduits naturels avec ou sans assistance mécanique) et le dernier quart ne dispose pas de système spécifique de ventilation.

La période des travaux de rénovation a été conséquente car elle s'étale de novembre 2019 à octobre 2021 (Tableau 5). Les premiers logements ont achevé leur rénovation en mars 2020 et les derniers en juillet 2021.

Du point de vue de l'enveloppe des bâtiments, la quasi-totalité des logements a remplacé l'intégralité de leurs menuiseries extérieures et isolé l'intégralité de leurs façades extérieures. Un quart des logements a isolé leur toiture et leur plancher bas.

Du point de vue des systèmes, la ventilation a fait l'objet de travaux pour la quasi-totalité des logements qui sont aujourd'hui ventilés mécaniquement principalement par une VMC simple flux.

La moitié des logements a rénové/modifié son système de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire



Tableau 4 – Caractéristiques principales des 29 logements AVANT les travaux de rénovation

Typologie de logements	Bâtiment					Systèmes			
	Période de Construction	Principal matériau de construction	Isolation thermique des murs	Isolation thermique des planchers bas	Isolation thermique des combles/de la toiture	Système de chauffage	Système de production d'eau chaude sanitaire	Système de ventilation	
Bâtiments à usage d'habitation	13 maisons individuelles (9 isolées et 4 accolées)	Min : 1800 Max : 1979 NSP (3)	Béton (18) Pierre dure ou tendre (5) Parpaing (4) Brique (2)	Pas d'isolation (17) Isolation par l'intérieur (11) Isolation par l'extérieur (1)	Pas d'isolation (23) Oui (2) NSP (4)	Oui (19) Pas d'isolation (9) NSP (1)	Chauffage central (26) Chauffage individuel (3)	Chaudière (16) Ballon électrique (6) Autre équipement (4) Réseau chaleur (2) Chauffe eau thermodynamique (1)	VMC simple flux (14) Aucun dispositif de ventilation (7) Ventilation par conduits naturels (4) VMC double flux (2) Ventilation naturelle (1) Moteurs de ventilation dans quelques pièces (1)
	16 logements collectifs						Chaudières (22) Réseau de chaleur (4) Convecteurs électriques/panneaux rayonnant électriques (2) Pas de chauffage (1)		

Entre parenthèse figure le nombre de logements, NSP = « ne sais pas »



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

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

Tableau 5 – Description des travaux réalisés et des modifications apportées aux systèmes des 29 logements suite à leur rénovation

Travaux de rénovation		Vérification / changement des systèmes				
Date de début et de fin des travaux		Remplacement des menuiseries et/ou rénovation/isolation de l'enveloppe (plancher / façades / comble / toiture)		Chauffage	Production d'eau chaude sanitaire	Ventilation
Début	Min : novembre 2019 Max : juillet 2021	Remplacement des menuiseries extérieures (22) : plus de 50% des menuiseries (21/22) Isolation des murs (20) : plus de 50% des façades extérieures (20/20) Rénovation/isolation de la toiture (6) : isolation en partie ou totalité (4/6) Isolation du plancher bas (5)	Remplacement ou installation d'un nouveau système (14) Calorifugeage de tout ou partie de l'installation (1) Equilibrage de l'ensemble du réseau de chauffage (1)	Chauffage central (25) Chauffage individuel (4)	Oui (16)	Oui (22)
Fin	Min : mars 2020 Max : octobre 2021			Chaudières (21) Réseau de chaleur (3) Convecteurs électriques/panneaux rayonnants électriques (2) Réseau aéraulique (1) PAC (1) Pas de chauffage (1)	Chaudière (15) Ballon électrique (5) Panneaux solaires (1) Réseau chaleur (4) Chauffe eau thermodynamique (3) Autre équipement (1)	VMC simple flux (24) VMC double flux (2) Ventilation mécanique répartie (2) Aucun dispositif de ventilation (1)

Entre parenthèse figure le nombre de logements, NSP = « ne sais pas »



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

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

## 2. QUALITE DE L'ENVIRONNEMENT INTERIEUR

### 2.1. Préambule

Les résultats des mesures relatives à l'évaluation de la qualité de l'environnement intérieur intègrent la mesure des paramètres de :

- qualité d'air intérieur : concentrations du CO<sub>2</sub>, indicateur de confinement, des paramètres de pollution chimique (aldéhydes, composés organiques volatils, dioxyde d'azote), particulaire (radon et mesure gravimétrique des PM<sub>2.5</sub>) et diagnostic moisissures ;
- confort thermique (température et humidité relative) ;
- confort acoustique (mesure de l'isolement de façade et des bruits d'équipements).

En complément des mesures précédentes, le recueil de la perception du confort d'ambiance par les occupants est réalisé.

Dans le cadre de ce rapport, **seuls les résultats de mesures des aldéhydes, du radon, des PM<sub>2.5</sub> et du diagnostic moisissures** sont présentés (Tableau 6). Il est prévu de livrer en fin d'année 2023, un rapport présentant l'exploitation intégrale des données mesurées sur les bâtiments à usage d'habitation.

Les résultats de mesure ont été comparés avec les 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 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 confiance 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.

### 2.2. Pollution chimique et particulaire

Au niveau de la validité des résultats de mesure, il apparaît des différences importantes entre les paramètres pris en compte. Alors que la totalité des mesures aldéhydes est valide, des prélèvements ont été invalidés pour les PM<sub>2.5</sub> (30 sur 85 soit 35%) et pour le radon (5 sur 30 soit 17%). Les raisons sont les suivantes :



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

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

- $PM_{2.5}$  : non-respect de la programmation des plages de fonctionnement de la pompe, du débit, du volume ou de la durée de prélèvement, coupure de courant ou débranchement de la pompe par les occupants du fait de la gêne causée par le fonctionnement de la pompe, problème de pesée des filtres lié à une panne du système de climatisation du laboratoire d'analyse ;
- Radon : non-respect de la période de mesure (uniquement chauffe), détecteur dégradé, date de fermeture introuvable, résultats inférieurs aux seuils de détection induisant une suspicion sur l'ouverture réel du détecteur.

Parmi les résultats valides, tous les résultats de mesures aldéhydes ont été pris en compte car il existait bien une mesure « avant » et « après » les travaux. Ceci n'a pas été le cas pour les résultats de mesures  $PM_{2.5}$  et radon pour lesquels l'absence de valeurs disponibles ou valides dans l'une des deux phases a limité le nombre d'observations. Sur les 55 prélèvements  $PM_{2.5}$  valides, 24 sont exploitables (12 « avant » et 12 « après ») soit 44%. Sur les 25 prélèvements Radon valides, 10 sont exploitables (5 « avant » et 5 « après ») soit 40%.

Il apparait que les intervalles de confiance des concentrations des trois aldéhydes et des  $PM_{2.5}$  sont similaires pour les deux phases (« avant » et « après ») mais également à ceux du parc de logements français. Pour le radon, les intervalles de confiance des mesures « avant » sont supérieurs à ceux d'« après ». En revanche, ils sont supérieurs à ceux du parc de logements français sans qu'aucune explication évidente puisse être émise à ce jour. Il faut toutefois relativiser ce résultat obtenu pour un très faible nombre de logements (5).





Tableau 6 - Concentrations intérieures des aldéhydes, des PM<sub>2,5</sub> et du radon dans les 29 logements avant et après rénovation et comparaison avec l'état du parc de logements français selon la campagne nationale logement de l'OQAI

Paramètres de qualité d'air intérieur	AVANT les travaux de rénovation					APRES les travaux de rénovation					Parc existant de logements français (24 672 135 logements) selon la CNL1
	n	min	Moyenne géométrique (IC)	P50	max	n	min	Moyenne géométrique (IC)	P50	max	Moyenne géométrique (IC)
Formaldéhyde (µg/m <sup>3</sup> )	28	7,6	17,3 [13,9 ; 20,8]	17,7	53,4	28	6,5	15,2 [11,9 ; 18,5]	15,5	48,4	19,4 [13,9 ; 27,2]
Acétaldéhyde (µg/m <sup>3</sup> )	28	3,4	10 [6,2 ; 13,9]	10,6	55,2	28	2,7	8 [4,8 ; 11,2]	8,8	25,7	11,6 [8,21 ; 16,3]
Hexaldéhyde (µg/m <sup>3</sup> )	28	3,4	15 [11,1 ; 18,9]	15,2	47,5	28	2,5	12,4 [8,8 ; 16,1]	13,1	40,2	14,4 [9,82 ; 21,0]
PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) en période d'occupation	12	5,1	14,3 [10,2 ; 18,3]	14,5	78,3	12	6,6	12,8 [9,2 ; 16,4]	10,4	52,4	24,8 [15,7 ; 39,2]
Radon (Bq/m <sup>3</sup> ) en période de chauffe	5	104,2	157,7 [154,8 ; 160,6]	167,3	235,9	5	46,7	104 [100,7 ; 107,3]	127,8	167,4	35,7 [25 ; 51,1]



## 2.3. Signes d'humidité et moisissures

Les occupants ont été interrogés pour savoir s'ils avaient observé des traces de surface, des infiltrations d'eau ou des dégâts des eaux dans les logements. Ces questions ayant été posées avant puis après les travaux de rénovation, il est possible de comparer la situation. Les résultats présentés dans le Tableau 7 indiquent qu'après les travaux de rénovation, aucun dégât des eaux n'a été observé et que la présence de traces de surface a diminué (passant de 46% avant les travaux à 27% après). En revanche, les problèmes d'infiltrations d'eau semblent toujours présents même s'ils sont observés un peu moins fréquemment (29% contre 23%).

Tableau 7. Observation de traces de surface, d'infiltrations d'eau ou de dégâts des eaux dans les logements

Observation dans les pièces des logements ...	Avant les travaux	Après les travaux
<b>de traces de surface</b> (moisissures, tâches, papier peint décollé, peinture cloquée, enduit dégradé, condensation, salpêtre)	46%	27%
<b>d'infiltrations d'eau</b> (remontées capillaires, murs enterrés, gouttières engorgées ou endommagées, couverture ou étanchéité endommagées, murs poreux, joints défectueux)	29%	23%
<b>de dégâts des eaux</b> (rupture de canalisation, incendie, inondation, autre catastrophe naturelle)	11%	0%

Parallèlement, l'indice de contamination fongique (ICF), développé par le CSTB, a été calculé dans les chambres des logements à partir de la détection de COV traceurs dans les prélèvements passifs de l'air. Les résultats du calcul de l'ICF présentés dans la Figure 2 indiquent que le développement fongique est observé quasiment dans les mêmes proportions de logements quelle que soit la phase de rénovation (38% avant et 35% après). Plus d'un tiers des logements sont contaminés.

L'observation de la dynamique de contamination fongique de chaque logement, basée sur le résultat du calcul de l'ICF de l'enquête AV travaux et de l'enquête AP travaux, est présentée sur la Figure 3. Il apparaît que pour 64% des logements, les travaux de rénovation n'ont pas eu d'impact sur la contamination fongique (40% ne sont pas contaminés et 24% le sont toujours). En revanche pour 36% des logements restants, la contamination a disparu pour 24% des logements et est apparu pour 12% des logements.



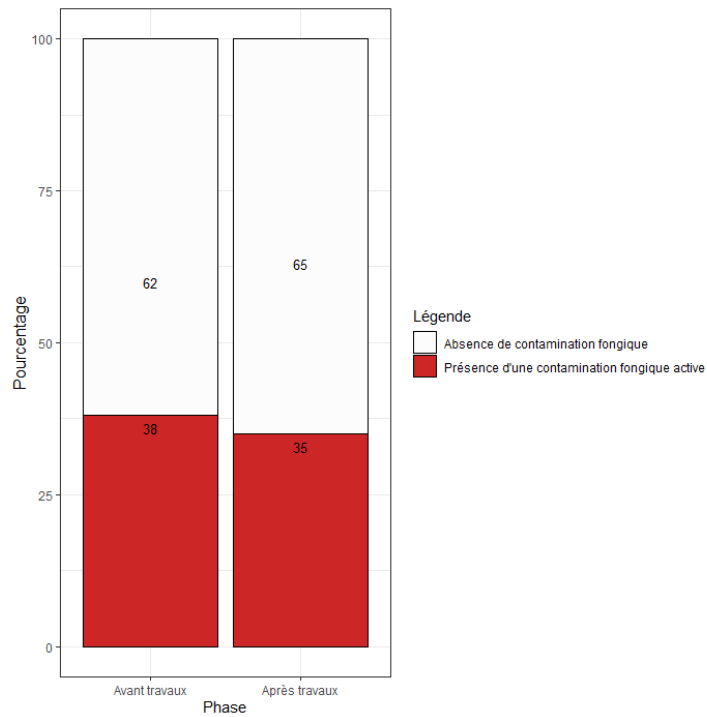


Figure 2 – Résultats de l'indicateur de contamination fongique (ICF) indiquant la présence ou l'absence d'une contamination fongique dans les logements

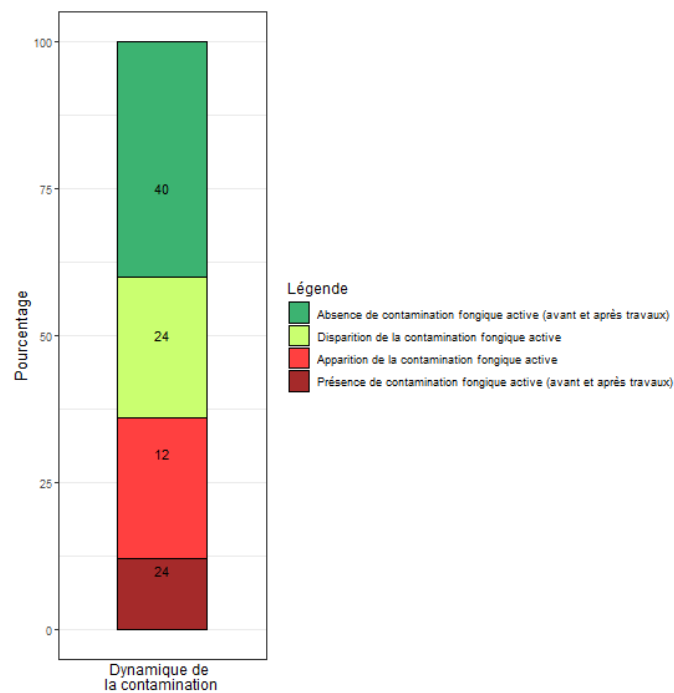


Figure 3 – Dynamique de la contamination fongique (ICF) de chaque logement selon les deux enquêtes

## 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 8). Il existe trois types de valeurs :

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

Parmi ces valeurs 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 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.

## 2.4.2. Résultats

Les résultats présentés dans le Tableau 9 montrent qu'il n'y a aucun dépassement pour le radon. Les dépassements des valeurs réglementaires et des valeurs repères sont plus nombreux pour les PM<sub>2.5</sub> que pour le formaldéhyde mais il faut observer qu'ils sont en général moins nombreux après travaux qu'avant les travaux.

Pour le formaldéhyde, la valeur réglementaire est dépassée dans 14% des logements Avant Travaux contre 7% Après Travaux. La même observation est faite pour les valeurs de gestion (7% versus 0% pour le seuil de 50 µg/m<sup>3</sup>, 14% versus 7% pour le seuil de 30 µg/m<sup>3</sup>, 82% versus 75% pour le seuil de 10 µg/m<sup>3</sup>).

Pour les PM<sub>2.5</sub>, la valeur sanitaire de 15 µg/m<sup>3</sup> est dépassée dans 42% des logements Avant Travaux contre 25% Après Travaux. La même observation est faite pour les valeurs de gestion (58% versus 33% pour le seuil de 14 µg/m<sup>3</sup>, 75% versus 50% pour le seuil de 10 µg/m<sup>3</sup>). En revanche, le pourcentage de dépassement de la valeur sanitaire de 5 µg/m<sup>3</sup> et de la valeur de gestion de 50 µg/m<sup>3</sup> est identique.

Tableau 8 – 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	Valeur action rapide	Valeur informati on/recom mandatio	Valeur repère	Valeur cible	
Formaldéhyde	100 µg/m <sup>3</sup> <sub>a</sub>		100 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>	30 µg/m <sup>3</sup>	10 µg/m <sup>3</sup>	30 µg/m <sup>3</sup> <sup>b</sup>
PM <sub>2.5</sub>	15 µg/m <sup>3</sup> <sub>c</sub>	5 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>		14 µg/m <sup>3</sup> au 1/01/2021	10 µg/m <sup>3</sup> au 1/01/2025	
Radon							300 Bq/m <sup>3</sup>

a : à respecter de manière répétée et continue sur la journée ; b : longue durée à compter du 1/01/2015) ; c : sur 24 heures



Tableau 9 – Nombre de dépassements des valeurs de référence actuellement en vigueur pour les polluants de l'air intérieur des 29 logements

Polluants	Période	Valeur sanitaire (ANSES)		Valeur de gestion (HCSP)		Valeur réglementaire
Formaldéhyde	Avant travaux	0%		100 µg/m <sup>3</sup>	0 %	14,3 %
				50 µg/m <sup>3</sup>	7,14 %	
				30 µg/m <sup>3</sup>	14,3 %	
				10 µg/m <sup>3</sup>	82,1 %	
	Après travaux	0%		100 µg/m <sup>3</sup>	0 %	7,14 %
				50 µg/m <sup>3</sup>	0 %	
				30 µg/m <sup>3</sup>	7,14 %	
				10 µg/m <sup>3</sup>	75 %	
PM <sub>2,5</sub>	Avant travaux	15 µg/m <sup>3</sup>	41,7 %	50 µg/m <sup>3</sup>	8,33 %	-
		5 µg/m <sup>3</sup>	100 %	14 µg/m <sup>3</sup>	58,3 %	
				10 µg/m <sup>3</sup>	75 %	
	Après travaux	15 µg/m <sup>3</sup>	25 %	50 µg/m <sup>3</sup>	8,33 %	-
		5 µg/m <sup>3</sup>	100 %	14 µg/m <sup>3</sup>	33,3 %	
				10 µg/m <sup>3</sup>	50 %	
Radon	Avant travaux	-		-		0 %
	Après travaux	-		-		0 %





## 3. CONSOMMATIONS D'ENERGIE

### 3.1. 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 et permettent en particulier de calculer l'indicateur énergie associé. Les méthodes de calcul des consommations d'énergie ainsi que l'outil excel développé à cet effet ont été présentés dans le livrable suivant : QSE\_Panel2\_Versionfinale et ne sont pas repris ici.

### 3.2. Etat des lieux des données de consommations énergétiques des logements

#### 3.2.1. Sélection des logements retenus pour l'analyse

L'évaluation de la performance énergétique réelle des logements nécessite l'analyse de données de consommations sur a minima un an complet avant travaux et un an complet après travaux. La crise sanitaire ayant entraîné un décalage de planning pour les travaux réalisés sur de nombreux logements, voire un report complet ou abandon des travaux, les données de consommation sont incomplètes après travaux pour de nombreux logements de l'étude, rendant difficile l'évaluation de la performance énergétique (travaux terminés il y a moins d'un an). Parmi les logements enquêtés, seuls 8 logements (13, 18, 21, 23, 44, 48, 49 et 51) ont été sélectionnés pour l'analyse des consommations d'énergie avant et après travaux (Tableau 10). Toutefois et du fait des données manquantes après les travaux, l'analyse a été réalisée sur 4 logements (21, 48, 49 et 51).

*Tableau 10 : Liste des logements et des données de consommations énergétiques disponibles pour l'analyse des consommations d'énergie*

N° logement	Typologie	Date de début de travaux	Date de fin de travaux	Disponibilités des données	Analyse réalisée
13	MI	22/08/2020	05/2020	Pas de données de factures après travaux	NON
18	LC	01/04/2020	30/04/2020	Factures avant travaux électricité Pas de données de factures après travaux	NON



N° logement	Typologie	Date de début de travaux	Date de fin de travaux	Disponibilités des données	Analyse réalisée
21	MI	15/05/2020	20/12/2020	Factures avant travaux électricité et gaz Données d'instrumentation pour le gaz et données Linky pour l'électricité après travaux	OUI, niveau 1 et 2
23	MI	01/02/2020	01/07/2020	Factures avant travaux électricité et gaz Pas de données de factures après travaux	NON
44	MI	01/11/2020	01/12/2020	Données factures avant travaux électricité Pas de données de factures après travaux	NON
48	LC	01/12/2016	01/02/2019	Pas de données de factures d'électricité	PARTIELLE
49	LC	01/12/2016	01/02/2019	Pas de données de factures d'électricité	PARTIELLE
51	LC	01/05/2018	01/05/2019	Pas de données de factures d'électricité	PARTIELLE

MI : maison individuelle ; LC : logement collectif

Le recueil des données complètes de consommation après travaux a abouti pour le logement 21: factures d'électricité et gaz avant travaux, données Linky après travaux et données issues de l'instrumentation in situ du logement. L'analyse de niveau 1 (méthode basée sur l'utilisation de données issues de compteurs communicants et de données météorologiques issues d'une station proche du bâtiment) et 2 (méthode de niveau 1 avec en plus la mesure de la température intérieure du bâtiment) est donc réalisée sur ce logement. Pour les logements 48, 49 et 51, des données de consommations ont été recueillies pour le poste chauffage uniquement. Une analyse partielle de cette consommation sera donc proposée au niveau 0 (méthode basée sur les factures annuelles ou des déclarations de consommation annuelle).



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

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

Pour les autres logements, les factures n'ont pas été transmises par les occupants après travaux, l'analyse ne sera pas effectuée.

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

- 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.

### 3.2.2. Difficultés rencontrées

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

- Retards dans la réalisation de travaux et des instrumentations, notamment liés au COVID ;
- Difficulté de recrutement, impliquant un décalage dans le temps de l'instrumentation des bâtiments et des données de mesure sur une période non suffisante pour l'analyse ;
- Difficultés dans le recueil des factures, surtout après travaux :
  - 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, notamment celles intervenant après travaux.



## 3.3. Analyse et résultats

### 3.3.1. Logement 21

Le logement 21 est une maison individuelle d'une surface habitable de 105 m<sup>2</sup> (92 m<sup>2</sup> avant travaux), située dans le département de la Savoie (73) et rénovée de mai à décembre 2020. 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 le changement de la chaudière pour un modèle plus performant.

La maison est équipée d'un compteur communicant Linky, les données mensuelles de consommations électriques ont donc pu être récoltées. La maison est chauffée au gaz, elle a été équipée d'un compteur gaz supplémentaire permettant d'accéder aux données de consommation associées. Par ailleurs, la maison a été équipée de deux capteurs de température, disposés dans le séjour et la chambre des parents. Cette instrumentation a permis de récolter des données sur une période d'avril à décembre 2021. Une analyse de ces données utilisant les méthodes de niveau 0, 1 et 2 est proposée ci-dessous, à titre d'exemple. La période de disponibilité des données étant inférieure à un an, les conditions d'application des méthodes ne sont pas respectées, les résultats seront donc à prendre avec précaution.

#### Analyse de niveau 0 : situation avant travaux

Les données de factures avant travaux (données obtenues de mai 2019 à mai 2020), présentent les consommations totales suivantes : 2 251 kWh/an d'électricité et 19 899 kWh/an de gaz. L'utilisation de l'outil Excel développé permet de calculer la performance de la maison avant travaux, les résultats sont présentés ci-dessous :

A renseigner		
<b>Informations sur le logement</b>		
Type de logement	Maison	
Période de construction/Période de rénovation globale	1975_et_avant	
Département		73
Surface habitable (en m <sup>2</sup> )		92
Type de chauffage présent	Individuel	
<b>Information sur les énergies utilisées</b>		
Energie principale de chauffage	Gaz	
Energie d'appoint/secondaire de chauffage		
Energie principale de production d'ecs	Gaz	
Energie d'appoint/secondaire de production d'ecs		
Energie principale de cuisson	Electricité	
Energie secondaire de cuisson	Gaz	
<b>Déclaration des consommations annuelles d'énergie</b>		
Electricité		
Mois de début de l'année considérée	Mai	
Année civile de début de l'année considérée		2019
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale		2251
Gaz		
Mois de début de l'année considérée	Mai	
Année civile de début de l'année considérée		2019
Consommation annuelle en kWh d'énergie finale PCS		19899



Résultats	
Qualification de la réalisation du calcul	Ok
<b>Qualification de la performance énergétique globale</b>	<b>Insatisfaisante</b>
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale au périmètre tous usages (kWh <sub>ef</sub> /(m <sup>2</sup> .an))	239
Qualification de la performance en énergie finale	Insatisfaisante
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie primaire au périmètre tous usages (kWh <sub>ep</sub> /(m <sup>2</sup> .a))	271
Qualification de la performance en énergie primaire	Moyenne
Ratio surfacique d'émissions annuelles de GES au périmètre tous usages (kgCO <sub>2</sub> eq/(m <sup>2</sup> .an))	50,3
Qualification de la performance en GES	Insatisfaisante
Ratio surfacique de facture énergétique annuelle au périmètre tous usages (€ttc/(m <sup>2</sup> .an))	22,1
Qualification de la performance en €	Moyenne

## Analyse de niveau 1

### Analyse des consommations électriques

Sur ce bâtiment, l'énergie électrique n'est *a priori* pas liée à un usage thermosensible. Les données de consommations électriques après travaux n'étant disponibles que sur une courte durée comportant les périodes de vacances scolaires estivales et sur un pas de temps mensuel, il n'a pas été possible de vérifier cette absence de sensibilité. Cette hypothèse sera tout de même considérée comme valide et cette consommation sera définie comme constante. La valeur moyenne de la consommation électrique est alors de 6.43 kWh en moyenne par jour soit 2347 kWh par an.

### 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 10.93 kWh/m<sup>3</sup> a été utilisé. La période d'analyse après travaux s'étend du 08/04/2021 au 06/12/2021. Sur cette période, aucune donnée manquante n'a été observée.

La figure ci-dessous (Figure 4) 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<sup>2</sup> et CV(RMSE) respectivement de 0.76 et 0.54, la régression est assez moyenne. Cela peut potentiellement s'expliquer par la courte période d'analyse qui ne comprend pas une période de chauffe complète. La température de base identifiée est de 14°C ce qui est faible, indiquant possiblement de bonnes performances énergétiques.



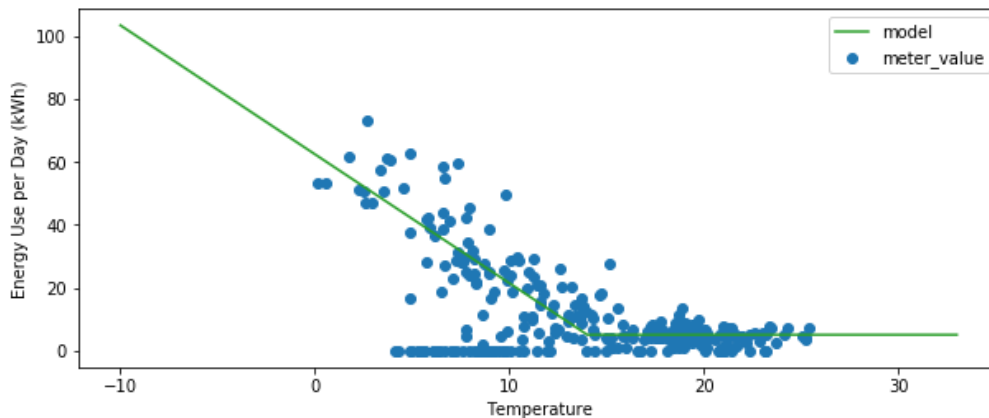


Figure 4: Meilleure régression obtenue sur les données de consommations quotidiennes en fonction de la température extérieure sur le logement 21

Cette modélisation permet d'estimer l'origine des consommations de gaz sur la période de mesure. On estime ainsi que 64% de cette consommation a pour origine le chauffage, les 36% restant étant dédiés aux autres usages (eau chaude sanitaire). Attention, sur une période de mesure annuelle, ces proportions auraient probablement été différentes.

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 EN-15927 sur les années 2005 à 2015, la consommation énergétique est de 10 483 kWh. En y ajoutant la consommation d'électricité moyenne, on obtient donc une consommation normalisée de 12 830 kWh.

Il est également possible d'utiliser une correction linéaire basée sur les DJU de chauffage moyen obtenue 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 8 901 kWh. En y ajoutant la consommation d'électricité moyenne, on obtient donc une consommation normalisée de 11 248 kWh.

Des données de consommations électriques et de gaz sont également disponibles sous forme de factures sur une période avant travaux s'étendant de mai 2019 à mai 2020. Il est donc possible de réaliser un ajustement ante/post en réalisant une prédiction des consommations énergétiques sur la période avant travaux via le modèle entraîné sur la période après travaux. La consommation de gaz prédite sur cette période est alors de 7 284 kWh. La consommation de gaz réellement enregistrée sur cette période étant de 19 899 kWh, on estime que les travaux réalisés permettent une économie d'énergie en gaz de 63%. La consommation d'électricité prédite est de 2 347 kWh naturellement proche des 2 251 kWh réellement mesurés puisque l'électricité n'est pas liée à un usage thermosensible.





La consommation d'énergie totale prédite sur cette période est donc de 9 631 kWh à comparer à la consommation totale mesurée qui est de 22 150 kWh. **Les travaux ont donc permis de réaliser une économie d'énergie totale de 56%.**

## 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 avec pour entrées du modèle : la température extérieure et l'ensoleillement global 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 légèrement meilleure que celle proposée dans l'analyse de niveau 1 avec des coefficients statistiques  $R^2$  et CV(RMSE) respectivement de 0.79 et 0.51. La consommation de gaz normalisée obtenue est de 9 983 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 12 330 kWh.

Une seconde étape consiste à réaliser une régression multilinéaire sur les données de consommation de gaz avec pour entrées du modèle cette fois : l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur ainsi que l'ensoleillement global horizontal. La qualité de la régression est à nouveau légèrement meilleure que ce qui avait été obtenu précédemment ( $R^2$  et CV(RMSE) respectivement de 0.80 et 0.49). Il est alors possible 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 9 938 kWh. La consommation totale normalisée est alors de 11 937 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, l'amélioration de la performance de la maison après travaux est effective :

Qualification de la performance énergétique globale		Moyenne
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie finale au périmètre tous usages (kWh <sub>ef</sub> /(m <sup>2</sup> .an))		117
Qualification de la performance en énergie finale		Satisfaisante
Ratio surfacique de consommation annuelle à climat normal d'énergie primaire au périmètre tous usages (kWh <sub>ep</sub> /(m <sup>2</sup> .an))		146
Qualification de la performance en énergie primaire		Satisfaisante
Ratio surfacique d'émissions annuelles de GES au périmètre tous usages (kgCO <sub>2</sub> eq/(m <sup>2</sup> .an))		22.9
Qualification de la performance en GES		Moyenne
Ratio surfacique de facture énergétique annuelle au périmètre tous usages (€tc/(m <sup>2</sup> .an))		12.2
Qualification de la performance en €		Satisfaisante

Figure 5: Qualification énergétique du logement 21 basée sur les seuils de la méthode V0

Grace à une mesure ponctuelle de température effectuée avant la réalisation des travaux, la température de consigne à cette période a été estimée autour de 18.5°C. On constate donc



un effet rebond à la suite des travaux car la température de consigne se situe alors plutôt autour de 20°C.

Afin d'estimer les économies d'énergie réalisées, il est possible de faire un ajustement post/ante. On utilisera alors le modèle entraîné sur les données après travaux et ayant pour entrées l'écart de température intérieur/extérieur et l'ensoleillement global horizontal. Afin de se rapprocher au mieux des conditions d'utilisation du bâtiment avant travaux, on utilisera alors la température de consigne mesurée.

La prédiction de consommation énergétique de gaz avant travaux est dans ces conditions de 6 507 kWh. La consommation mesurée sur cette période étant de 19 899 kWh, on estime donc une économie d'énergie de 67%. La consommation d'énergie totale prédite sur cette période est alors de 8 854 kWh, à comparer à la consommation totale mesurée qui est de 22 150 kWh. **Les travaux ont donc permis de réaliser une économie d'énergie totale de 60%.**

### 3.3.2. Logements 48, 49 et 51

Les logements 48, 49 et 51 sont des logements collectifs situés à La Rochelle, respectivement T2 (44m<sup>2</sup>), T4 (72m<sup>2</sup>) et T5 (89m<sup>2</sup>). Les logements 48 et 49 sont situés dans la même résidence et le logement 51 est situé dans une autre résidence. Ces bâtiments sont chauffés par un réseau de chaleur collectif assurant le chauffage et l'eau chaude sanitaire (uniquement après travaux) des logements.

Les données de consommation liées au réseau de chaleur ont été transmises avant et après travaux, elles permettent de faire une analyse partielle de la consommation sur le poste chauffage des logements. En effet, les données de consommations liées à la production d'eau chaude sanitaire avant travaux (ballons individuels) et liées aux usages électriques des logements n'ont pas été transmises, ce qui ne permet pas de faire l'analyse complète de leur performance énergétique.

#### Logements 48 et 49 :

Le suivi de consommation transmis présente des consommations de chauffage avant travaux en moyenne à 1 212 MWh pour l'ensemble de la sous-station (desservant 14 231 m<sup>2</sup> de logements), soit 85 kWh/m<sup>2</sup>/an. Les logements 48 et 49, en considérant l'hypothèse que tous les logements ont le même usage du chauffage, présentent donc une consommation de chauffage respectivement de 3 740 kWh/an et 6 120 kWh/an.

Après travaux, cette consommation passe à 786 MWh, soit 55 kWh/m<sup>2</sup>/an et respectivement 2420 kWh/an et 3 960 kWh/an pour les logements 48 et 49.



En normalisant ces consommations, la réduction des consommations de chauffage apparaît d'environ 32 % après travaux, en considérant tous les autres paramètres (usage notamment) comme constants, avant et après travaux.

#### Logement 51 :

Le suivi de consommation transmis présente des consommations de chauffage avant travaux en moyenne à 132 MWh pour l'ensemble du bâtiment (représentant 928 m<sup>2</sup> de logements), soit 142 kWh/m<sup>2</sup>/an. Le logement 51, en considérant que tous les logements ont le même usage du chauffage, présentent donc une consommation de chauffage de 12 638 kWh/an.

Après travaux, cette consommation de chauffage représente 76 MWh, soit 82 kWh/m<sup>2</sup>/an et donc 7 298 kWh/an pour le logement 51.

En normalisant ces consommations, la réduction des consommations de chauffage apparaît d'environ 39 % après travaux, en considérant tous les autres paramètres (usage notamment) comme constant avant et après travaux.

Les travaux ont donc permis de réaliser des économies d'énergie sur le poste chauffage. Il est cependant à noter que ces conclusions sont à considérer avec vigilance étant donné les hypothèses notamment d'usage utilisées.



## 4. CONCLUSIONS

Ce rapport présente l'évaluation partielle de la performance globale des bâtiments pour lesquels les travaux de rénovation énergétique ont eu lieu pendant le projet permettant ainsi d'évaluer leur performance globale à deux reprises : avant et après les travaux. Pour mémoire, les résultats des mesures de l'indicateur de confinement ( $\text{CO}_2$ ), des composés organiques volatils, du dioxyde d'azote, des paramètres du confort thermique et acoustique ainsi que de la perception des occupants ne sont pas présentés dans ce rapport.

Les bâtiments retenus pour ce rapport sont 21 bâtiments à usage d'habitation représentant 29 logements (13 maisons individuelles et 16 logements collectifs). Ils ont été rénovés sur une large période s'étalant de novembre 2019 à octobre 2021. La quasi-totalité des logements a remplacé l'intégralité de leurs menuiseries extérieures et isolé l'intégralité de leurs façades extérieures et est équipé d'un système de VMC principalement à simple flux. La moitié des logements a rénové/modifié son système de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire.

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).

A partir des données exploitées, l'impact de travaux de rénovation sur la performance globale des bâtiments à usage d'habitation a pu être étudié. Concernant la qualité de l'environnement intérieur, il apparaît qu'il n'y a pas d'impact sur les niveaux de concentrations des trois aldéhydes et des  $\text{PM}_{2.5}$  ainsi que sur la proportion de logement présentant une contamination fongique active. Il semble que les problèmes d'humidité (présence de traces de surface, dégâts des eaux) ont diminué suite aux travaux à des proportions très variables : de moitié pour les traces de surface et totalement pour les dégâts des eaux. En revanche, les concentrations en radon semblent avoir augmenté suite aux travaux mais il faut relativiser ce résultat obtenu pour un très faible nombre de logements (5) et sur des niveaux de concentrations inférieures au seuil réglementaire de  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Comparativement aux valeurs de référence de qualité d'air intérieur, il apparaît que les dépassements sont en général moins nombreux après travaux qu'avant les travaux. Concernant l'évaluation des consommations d'énergie et selon les résultats obtenus sur 5 logements, les travaux de rénovations énergétiques ont permis de réduire entre 32% et 60% les consommations d'énergie selon les logements.



## 5. 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 Grenoble en charge des analyses des prélèvements ALD et COV, Laboratoire Central de la Préfecture de Police (LCPP) en charge de l'analyse des prélèvements PMM, au Service Parisien de Santé Environnementale (SPSE) de la ville de Paris en charge de l'analyse des prélèvements NO<sub>2</sub> et le laboratoire DOSIRAD pour l'analyse des prélèvements radon.

