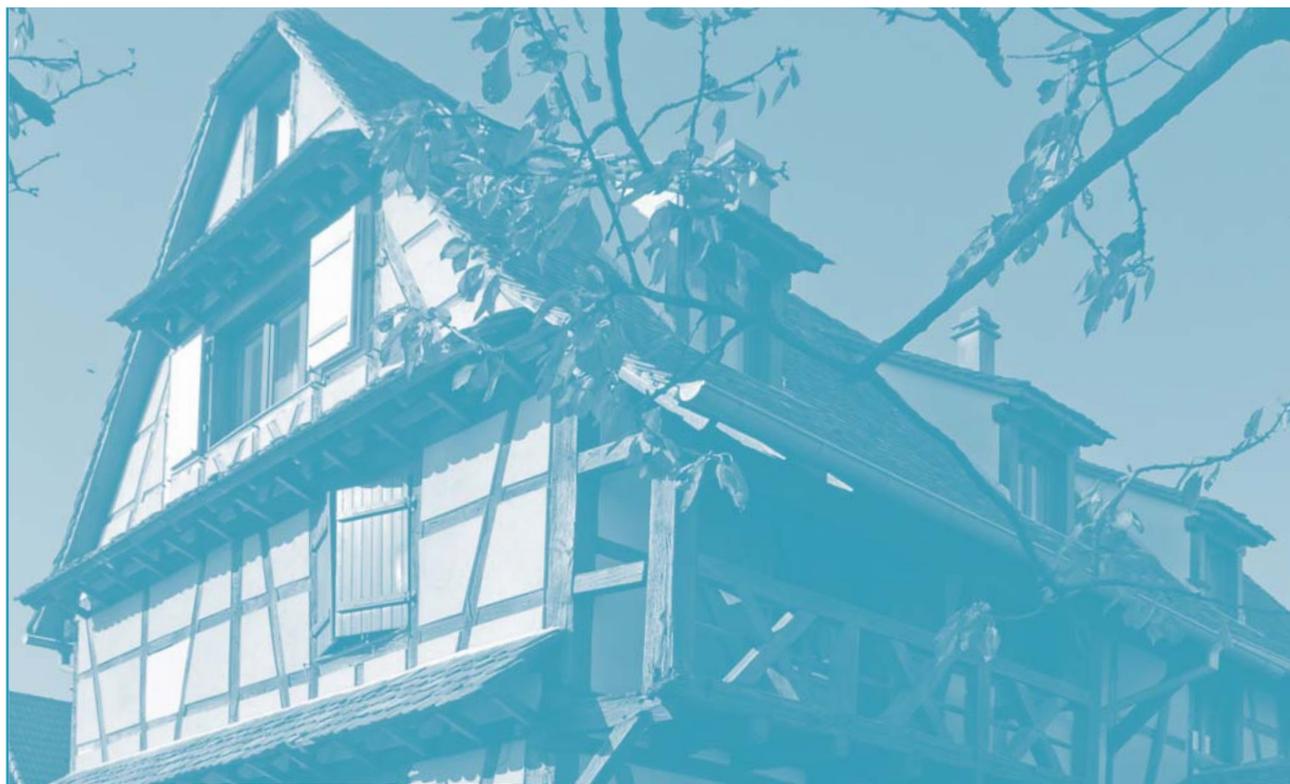


500 maisons rénovées basse consommation

*Enseignements opérationnels des programmes
« Je rénove BBC » en Alsace*



Fascicule B : la performance de l'enveloppe



Fascicule B - juin 2017



Afin de simplifier la conception des opérations, dans une démarche de massification, le programme « Je rénove BBC » (JRBBBC) a privilégié le travail sur l'enveloppe thermique au moyen de l'isolation et de l'étanchéité à l'air. En effet, un bâtiment qui tend vers le facteur 4 doit être un bâti sobre en énergie avant de disposer de systèmes efficaces.

Ainsi, EDF/ES et la Région Alsace ont défini un référentiel technique qui simplifie la démarche de conception des maîtres d'œuvre via des prescriptions générales sur la performance de l'enveloppe et, comme pour le programme « 50 chantiers pionniers », un objectif d'étanchéité à l'air correspondant à $Q_{v4_psurf} = 0,8 \text{ m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$. Ce dernier objectif, particulièrement exigeant pour la rénovation, a fait l'objet d'un accompagnement des professionnels par le biais de la formation et de la sensibilisation in situ.

Dans ce fascicule, les performances des enveloppes sont observées via un échantillon des coefficients U_{bat} obtenus (coefficient de déperdition thermique moyen de l'enveloppe), des matériaux et des résistances thermiques mises en œuvre. Un bilan sur l'objectif d'étanchéité à l'air est ensuite réalisé. Pour finir, les résultats d'un suivi instrumenté d'une maison en pans de bois sont analysés pour étudier les transferts d'humidité et leurs risques associés au sein des parois.

Ce fascicule comportant un vocabulaire spécifique, un glossaire comprenant notamment l'ensemble des grandeurs et abréviations utilisées est disponible en annexe.

SOMMAIRE

ISOLATION THERMIQUE DE L'ENVELOPPE ET MATÉRIAUX MIS EN ŒUVRE	3
Coefficient de déperdition U_{bat} des opérations	3
Types de mises en œuvre, matériaux et occurrences	3
ÉTANCHÉITÉ À L'AIR DES ENVELOPPES RÉNOVÉES	10
Valeurs d'étanchéité à l'air obtenues après travaux	10
Analyse des valeurs d'étanchéité à l'air obtenues	11
FOCUS SUR LES TRANSFERTS D'HUMIDITÉ DANS L'ENVELOPPE	13
Résultat de l'instrumentation d'un mur en pans de bois après isolation par l'intérieur	14
Résultats de la modélisation d'un mur en pans de bois après isolation par l'intérieur	16
Conclusions issues des mesures et des simulations hygrothermiques effectuées	18
ANNEXE A : DÉFINITIONS DES GRANDEURS UTILISÉES	20
ANNEXE B : PROPRIÉTÉS HYGRIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS	22
ANNEXE C : HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION	23



ISOLATION THERMIQUE DE L'ENVELOPPE ET MATÉRIAUX MIS EN ŒUVRE

Coefficient de déperdition $U_{bât}$ des opérations

L'observation des valeurs $U_{bât}$ (= coefficient de déperdition thermique moyenne de l'enveloppe) avant et après travaux, exprimée en $W/(m^2.K)$, permet de mesurer le saut de performance de l'enveloppe thermique du bâtiment. Le cahier des charges des rapports d'étude thermique n'a cependant pas spécifié la présence de cette valeur

dans tous les documents retournés aux programmes. Nous avons pu recueillir des valeurs sur un échantillon de 34 opérations.

Sur l'échantillon considéré, le saut de performance du bâti au cours des travaux est important, avec une réduction de quasiment 75 % du $U_{bât}$ moyen. Cette observation illustre la forte réduction des besoins de chauffage réalisée au moyen des travaux.

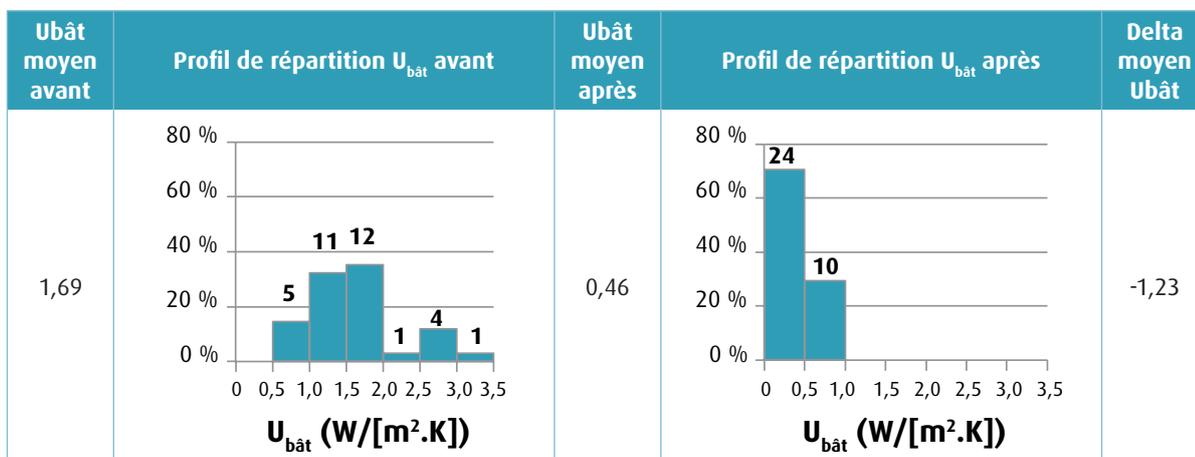


Figure 1 : Évolution des valeurs $U_{bât}$ avant et après travaux (34 opérations).

Types de mises en œuvre, matériaux et occurrences

L'analyse des informations figurant sur les factures permet d'observer les solutions mises en œuvre, leurs occurrences et les niveaux de résistance thermique associés. Une sélection des opérations présentant des informations fiables a été réalisée lot par lot. Ainsi, la taille des échantillons analysés est variable d'un lot à l'autre (305 en isolation des murs extérieurs, 295 en isolation des toitures, 282 en isolation des planchers bas et 276 en menuiseries). Ces données ont été mises en forme afin de dégager les tendances constatées sur les programmes.

Les graphiques suivants répertorient par occurrences les différentes mises en œuvre (ITI : isolation thermique par l'intérieur/ITE : isolation thermique par l'extérieur) et les matériaux associés. Par lot, l'échantillon d'occurrence peut être supérieur au nombre d'opérations étudiées, car plusieurs mises en œuvre sont possibles par opération (ex : ITI et ITE sur la même opération, plusieurs ITE de plusieurs natures, etc.). Par la suite, par matériau et par mise en œuvre, les moyennes des résistances thermiques installées sont données avec, sous forme d'une barre d'erreur, leur intervalle de confiance à 95 %¹ en prenant l'hypothèse que la distribution statistique des résistances thermiques au sein des échantillons analysés se rapproche d'une distribution normale.

¹ 95 % de chances de contenir dans l'intervalle en question la « vraie » moyenne, celle sur la population totale dont l'échantillon étudié n'est qu'une partie issue d'un sondage aléatoire.

Ainsi, il est possible d'avoir un aperçu de l'incertitude associée à la valeur donnée, incertitude qui donne une image de la plus ou moins grande dispersion des résistances thermiques mises en œuvre.

■ Isolation des murs

Sur les opérations référencées, 93 % ont connu des travaux d'isolation des murs selon la répartition suivante :

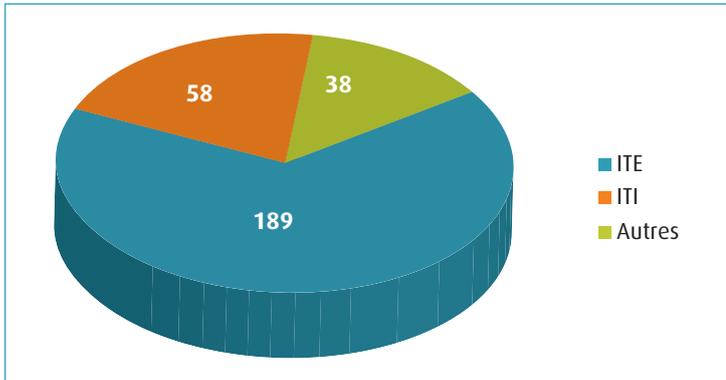


Figure 2 : Distribution des mises en œuvre d'isolation des murs (285 opérations).

L'isolation par l'extérieur est la technique la plus mise en œuvre par opération (66 %), loin devant la mise en œuvre par l'intérieur (21 %). Le regroupement « Autres » agglomère des opérations ayant fait l'objet de plusieurs mises en œuvre (isolation entre montants ou des soubassements).

Sur les opérations ayant fait l'objet de travaux d'isolation des murs extérieurs, 331 occurrences de mises en œuvre portant sur l'ITI et l'ITE sont référencées.

Mises en œuvre	Occurrences	R moyens ([m ² .K]/W)	Écart-types ([m ² .K]/W)	Coefficient de variation (écart-type/moyenne)
ITI	87	4,0	1,1	24,4 %
ITE	244	4,5	1,4	35,0 %

Parmi les 331 occurrences, il y a 74 % d'ITE et 26 % d'ITI. L'ITE est ainsi dominante, avec une résistance thermique moyenne légèrement plus importante (4,5 m².K/W) que pour l'ITI (4,0 m².K/W). Les deux mises en œuvre ont une valeur moyenne de résistance thermique supérieure à l'exigence 3,7 (m².K/W) du CITE 2016 pour des murs de façade ou en pignon.

Par la suite, les occurrences sont affichées par mise en œuvre et par matériau².

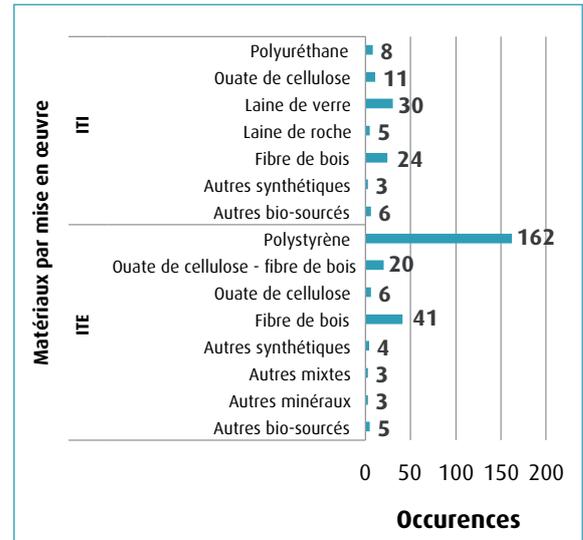


Figure 3 : Occurrences des matériaux en isolation des murs extérieurs (331 occurrences).

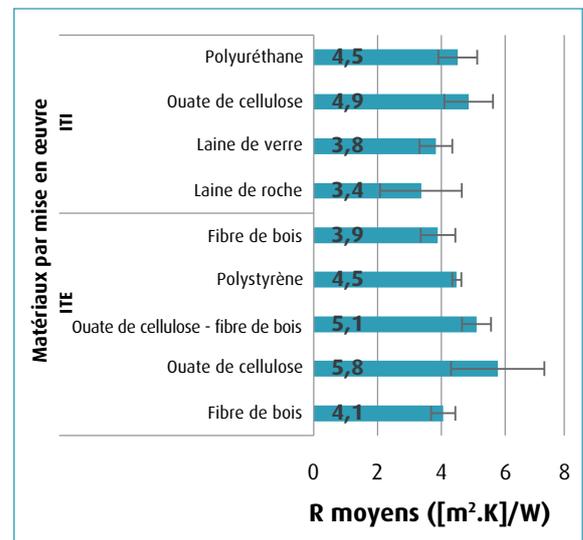


Figure 4 : Résistances thermiques moyennes des matériaux en isolation des murs extérieurs (307 occurrences).

L'ITE est préférentiellement mise en œuvre via l'utilisation du polystyrène, qui est prédominant (66 %), suivi par des matériaux bio-sourcés comme les fibres de bois (17 %) et le complexe ouate de cellulose-fibre de bois (8 %).

Parmi les matériaux mis en œuvre en ITI, la laine de verre (35 %) est la plus employée et est suivie de près par la fibre de bois (28 %) et la ouate de cellulose (13 %). Les isolants bio-sourcés représentent une part importante de l'ITI.

² Les matériaux récurrents (nombre d'occurrences supérieur à 5) sont présentés avec leurs résistances thermiques moyennes et les écarts-types constatés. Les matériaux peu récurrents sont regroupés selon qu'ils sont bio-sourcés, synthétiques, minéraux ou mixtes s'il s'agit d'un assemblage de différentes natures.

■ Isolation des toitures

L'isolation des toitures est divisée en trois catégories :

- isolation des rampants par l'intérieur (entre et sous chevrons) ;
- isolation des rampants par l'extérieur (entre et sur chevrons) ;
- isolation du plancher haut (sur ou sous face de plancher haut).

Sur les opérations référencées, 93 % ont connu des travaux d'isolation de la toiture. Ces mises en travaux se répartissent de la manière suivante :

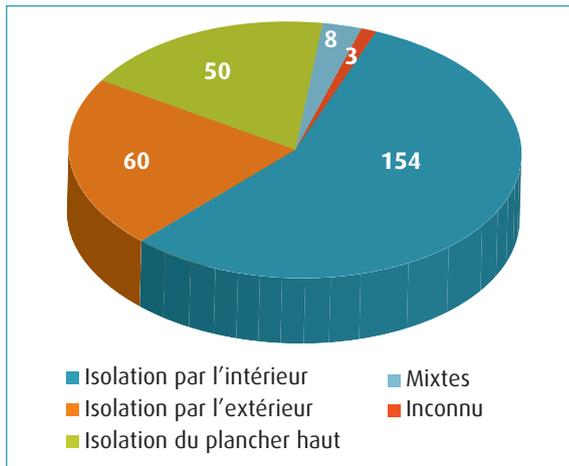


Figure 5 : Répartition des mises en œuvre d'isolation des toitures, planchers hauts ou toitures-terrasses (275 opérations).

L'isolation intégrale de la charpente par l'intérieur, entre chevrons, sous chevrons ou en faux plafond sous faitière représente 56 % des opérations et domine l'isolation par l'extérieur, entre et sur chevrons (22 %). Ce dernier taux demeure non négligeable. Une part également non négligeable d'opération connaît des mises en œuvre mixtes témoignant de l'adaptation de ces dernières au bâti ou au projet client.

Sur les opérations ayant fait l'objet d'isolation des toitures, 282 occurrences de mises en œuvre ont été répertoriées et se regroupent ainsi :

Mises en œuvre	Occurrences	R moyens ([m ² .K]/W)	Écart-types ([m ² .K]/W)	Coefficient de variation (écart-type/moyenne)
Isolation par l'intérieur	158	7,2	1,7	23,6 %
Isolation par l'extérieur	65	7,3	1,5	20,5 %
Isolation du plancher haut	59	7,4	1,8	24,3 %

³ Les matériaux récurrents (plus de 5 occurrences) sont présentés avec leurs résistances thermiques moyennes et les écarts-types constatés. Les matériaux peu récurrents sont regroupés selon qu'ils sont bio-sourcés, synthétiques, minéraux ou mixtes s'il s'agit d'un assemblage divers.

Devant le faible nombre d'occurrences (14) d'isolation de toitures-terrasses, ces dernières ne sont pas développées par la suite. Néanmoins, nous pouvons noter qu'elles sont généralement isolées en polyuréthane (57,1 %), avec une résistance thermique moyenne de 5,3 ([m².K]/W).

À titre de comparaison, les valeurs de résistances thermiques exigées par le crédit d'impôt pour la transition énergétique (CITE) de 2016 pour l'isolation des rampants de toitures, planchers de combles perdus, toitures-terrasses sont de respectivement 6, 7 et 4,5 ([m².K]/W). Les niveaux d'isolation mis en œuvre sont donc légèrement supérieurs à ces exigences.

Par la suite, les occurrences des différentes mises en œuvre sont affichées par matériau³.

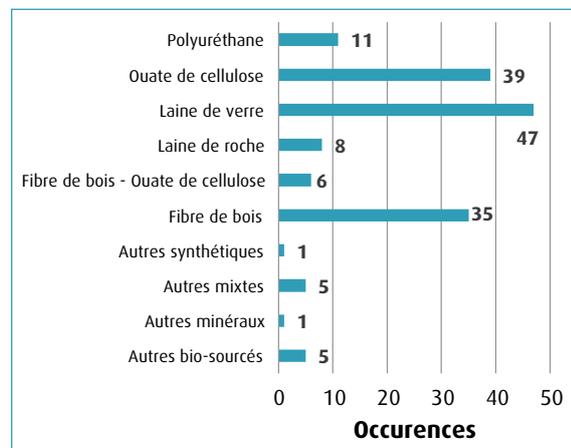


Figure 6 : Occurrences des matériaux en isolation de la toiture par l'intérieur (158 occurrences).

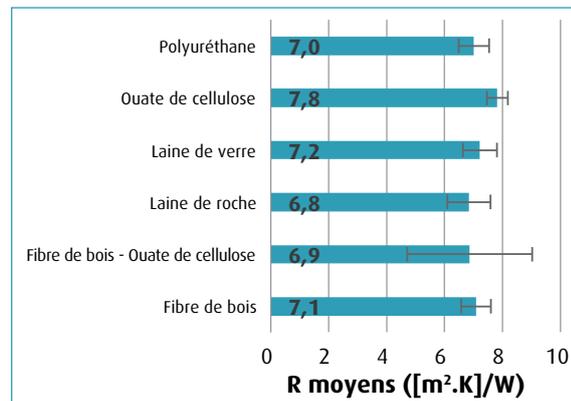


Figure 7 : Résistances thermiques moyennes des matériaux en isolation de la toiture par l'intérieur (146 occurrences).

L'isolation par l'intérieur des toitures entre et sous chevrons (158 occurrences) a principalement été mise en œuvre avec de la laine de verre (30 %), de la ouate de cellulose (25 %) et de la fibre de bois (22 %). Plus ponctuellement, il est possible de constater l'utilisation de polyuréthane (7 %), de laine de roche (5 %) et du complexe fibre de bois - ouate de cellulose (4 %).

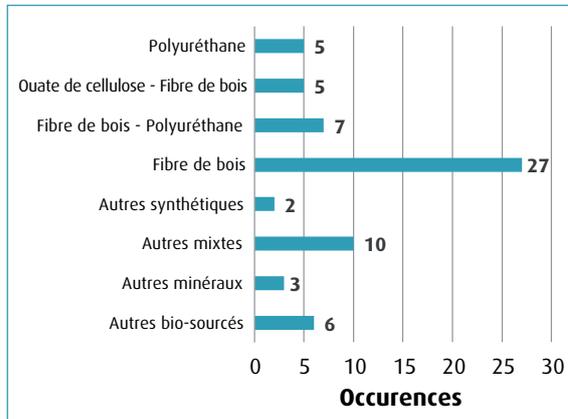


Figure 8 : Occurrences des matériaux en isolation de la toiture par l'extérieur (65 occurrences).

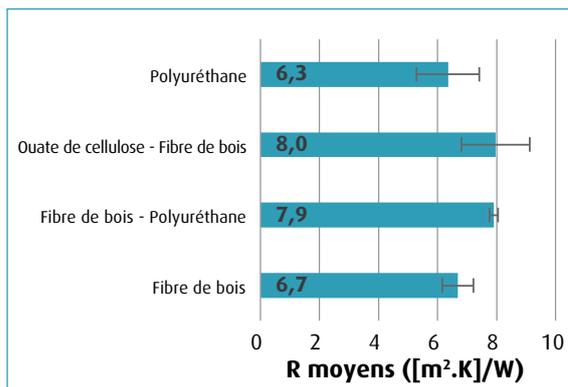


Figure 9 : Résistance thermique moyenne par matériaux en isolation par l'extérieur (44 occurrences).

La mise en œuvre d'une isolation de la toiture par l'extérieur (65 occurrences) par le procédé dit « sarking » sur chevrons se fait le plus souvent en complément d'un remplissage de l'espace entre chevrons. Pour ce type de mise en œuvre, le matériau dominant est la fibre de bois (laine de

bois entre chevrons et fibre de bois rigide sur chevrons) dans 42 % des cas référencés. Viennent ensuite les complexes fibre de bois-polyuréthane (11 %) et les complexes fibre de bois-ouate de cellulose (8 %) ainsi que le polyuréthane (8 %).

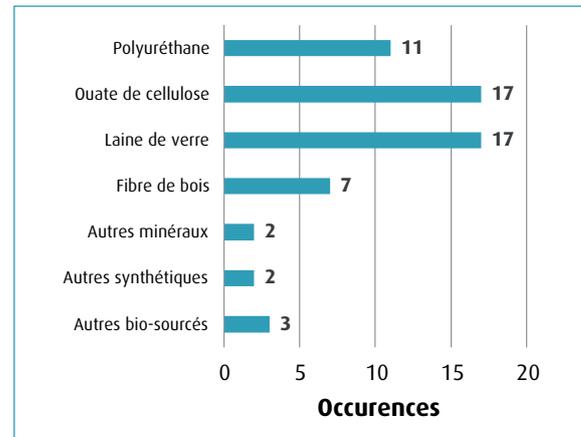


Figure 10 : Occurrences des matériaux en isolation du plancher haut (59 occurrences).

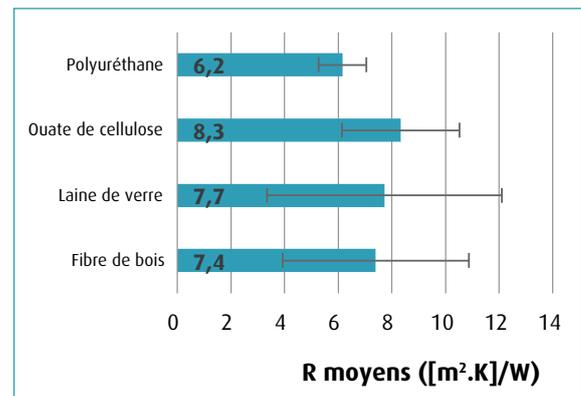


Figure 11 : Résistance thermique moyenne des matériaux en isolation du plancher haut (52 occurrences).

L'isolation des planchers hauts s'est principalement traduite par la mise en œuvre de ouate de cellulose (29 %) et de laine de verre (29 %). Ces deux matériaux sont suivis par le polyuréthane (19 %) et la fibre de bois (12 %). Cette mise en œuvre permettant de faire varier très facilement l'épaisseur d'isolation connaît des intervalles de confiance à 95 % très importants notamment pour la laine de verre, la ouate de cellulose et la fibre de bois.

■ Isolation des planchers bas

Sur les opérations référencées, 83 % ont connu des travaux d'isolation du plancher bas, selon la répartition suivante :

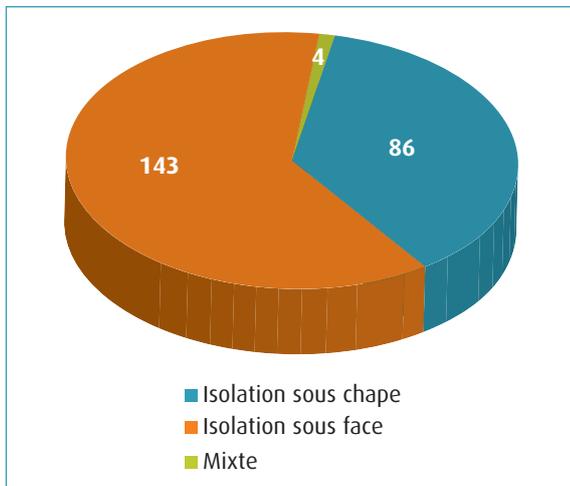


Figure 12 : Distribution des mises en œuvre d'isolation des planchers bas (233 opérations).

Sur les opérations ayant connu des travaux d'isolation des planchers bas, 245 occurrences ont été référencées et se regroupent ainsi :

Mises en œuvre	Occurrences	R moyens ([m ² .K]/W)	Écart-types ([m ² .K]/W)	Coefficient de variation (écart-type/moyenne)
Sous chape	89	3,5	1,0	29,6 %
Sous face	156	3,6	1,3	36,1 %

Parmi ces 245 occurrences, il y a 36 % d'isolation sous chape et 64 % d'isolation en sous-face. En cohérence avec les caractéristiques de la rénovation, l'isolation en sous-face est dominante, avec une résistance thermique moyenne similaire à la mise en œuvre sous chape. Les deux mises en œuvre ont un coefficient de résistance thermique supérieur à la valeur de 3,0 (m².K/W) du CITE 2016 pour les planchers bas sur sous-sol, sur vide sanitaire ou sur passage ouvert.

Par la suite, les occurrences sont affichées par mise en œuvre et par matériau⁴.

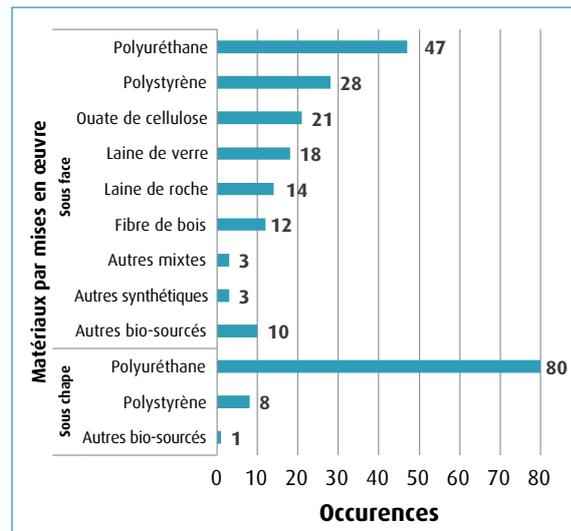


Figure 13 : Occurrences des matériaux en isolation des planchers bas (245 occurrences).

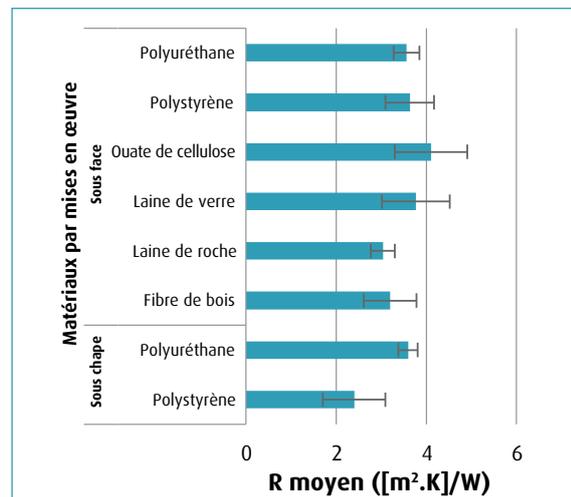


Figure 14 : Résistances thermiques moyennes des matériaux en isolation des planchers bas (228 occurrences).

Les planchers bas sont isolés en sous-face de plancher dans 64 % des cas. Les matériaux les plus utilisés sont les matériaux synthétiques comme le polyuréthane (30 %) et le polystyrène (18 %), suivis par les isolants minéraux (21 %), la ouate de cellulose (14 %) et la fibre de bois (8 %). L'isolation sous chape est majoritairement réalisée avec du polyuréthane (90 %).

⁴ Les matériaux récurrents (plus de 5 occurrences) sont présentés avec leurs résistances thermiques moyennes et les écarts-types constatés. Les matériaux peu récurrents sont regroupés selon qu'ils sont bio-sourcés, synthétiques, minéraux ou mixtes s'il s'agit d'un assemblage de différentes natures.

Observation générale sur l'isolation des parois opaques :

Lors du passage en revue des matériaux mis en œuvre, il a été possible de constater une part importante de matériaux bio-sourcés dont l'intérêt peut s'expliquer selon deux facteurs.

Le premier facteur est d'ordre financier grâce à la mise en place de subventions incitant à l'utilisation de cette famille de matériaux généralement coûteux. Une autre caractéristique réside dans les propriétés hygrothermiques de ces matériaux (perméance, hygroscopicité, déphasage thermique) qui peuvent être adaptées à certaines parois.

■ Les menuiseries

Les menuiseries ont également connu un grand nombre de changements, améliorant la performance thermique de l'enveloppe, l'étanchéité à l'air et le confort des occupants. Ce sont ainsi 81 % des opérations considérées qui ont connu un changement de menuiseries (hors porte d'entrée et de service). Il est également à noter un fort taux de changement de portes d'entrée et/ou de service (62 %), notamment pour des problématiques d'étanchéité à l'air.

Par opération, les dispersions des types de vitrages constatés avant travaux et mis en œuvre après travaux sont présentées sur les figures ci-dessous.

Avant travaux, les logements sont équipés principalement de double vitrage (43 %) et de simple vitrage (23 %). Après rénovation, la mise en œuvre de double vitrage est majoritaire (63 %), avec des couplages entre double et triple vitrage (7 %). Le triple vitrage connaît également une percée importante avec 11 % de mise en œuvre après travaux. Le simple vitrage disparaît totalement. Il est possible de constater que le nombre d'opérations avec changement de vitrages dépasse largement le nombre de cas initiaux ayant totalement ou partiellement du simple vitrage. Une partie des travaux a donc consisté à remplacer du double vitrage ancien.

Par la suite, les distributions des types de châssis sont présentées par occurrence. Une opération pouvant avoir plusieurs menuiseries de différents types, l'échantillon est plus important que le nombre d'opérations référencées précédemment.

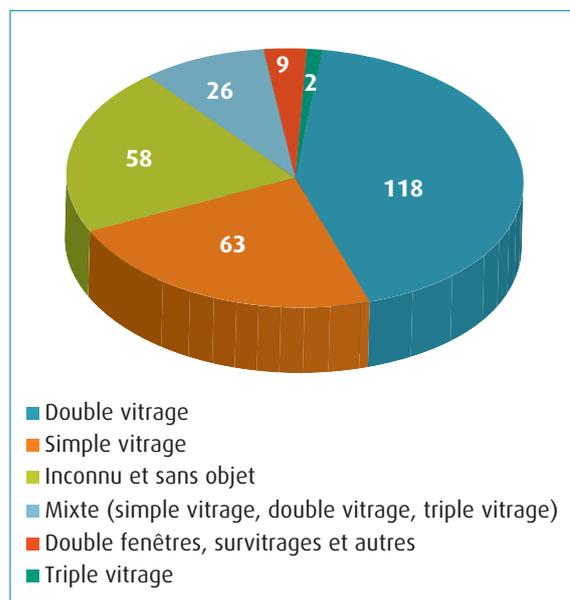


Figure 15 : Répartition des différents types de vitrages avant travaux (276 opérations).

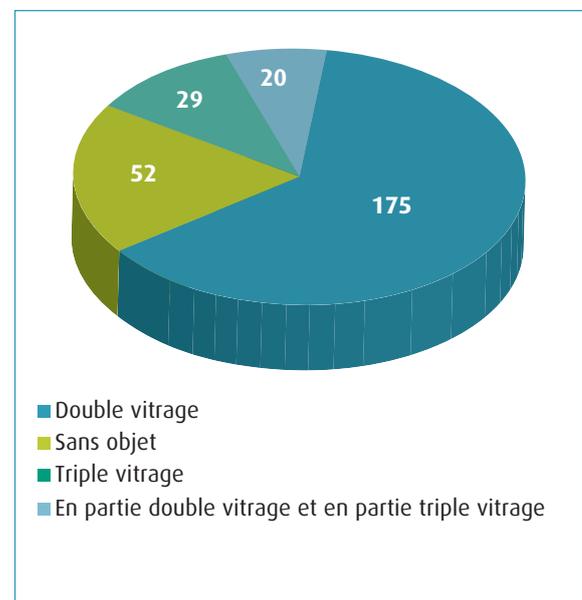


Figure 16 : Répartition des différents types de vitrages mis en œuvre après travaux (276 opérations).

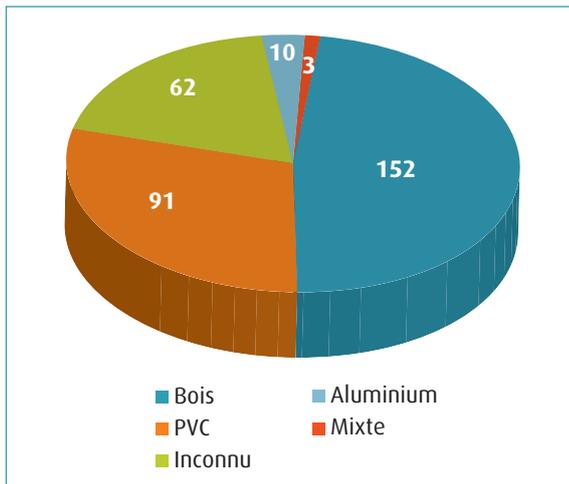


Figure 17 : Distribution des types de châssis sur les occurrences de menuiseries avant travaux (318 occurrences).

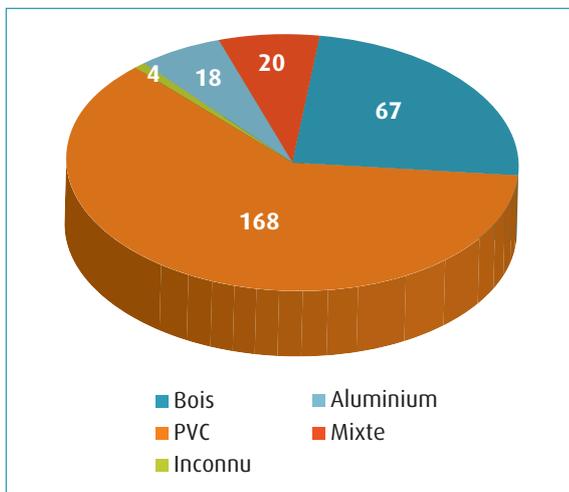


Figure 18 : Distribution des types de châssis sur les occurrences de menuiseries mises en œuvre après travaux (277 occurrences).

Il est à noter que les menuiseries bois, initialement dominantes (48 %), connaissent un fort recul dans les mises en œuvre après travaux (24 %). Cette évolution, mise au regard de l'évolution du simple vitrage, permet de constater la disparition des menuiseries simple vitrage bois. Le remplacement de ces menuiseries se fait en grande partie par des châssis PVC qui observent une forte augmentation de 29 % à 61 %. Ce remplacement par une autre nature de châssis peut s'expliquer par un coût d'investissement plus faible pour les menuiseries PVC. Les mises en œuvre de menuiseries mixtes (Bois-Alu et PVC-Alu) connaissent une part notable (7 %).

La performance thermique des vitrages installés est observée dans les dispersions suivantes.

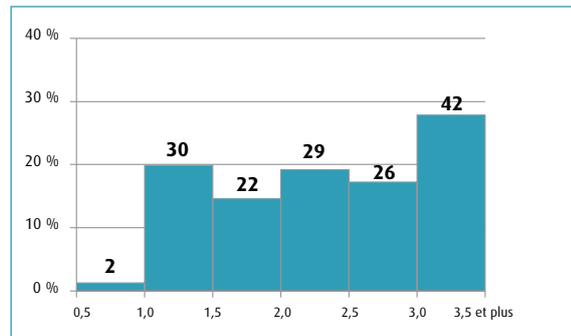


Figure 19 : Distribution des Uw des différents types de vitrages répertoriés avant travaux (151 occurrences).

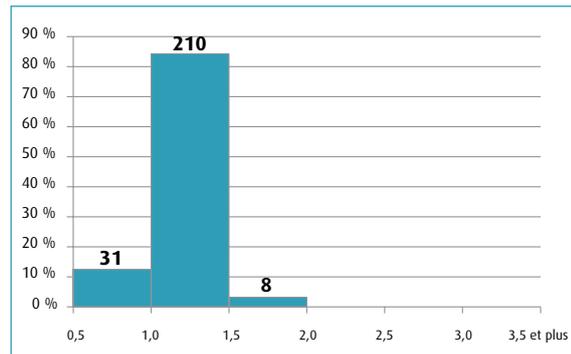


Figure 20 : Distribution des Uw des différents types de vitrages mis en œuvre après travaux (249 occurrences).

Avant travaux, environ 80 % des vitrages ont une valeur U_w supérieure à 1,5 (W/[m².K]). La quasi-globalité (97,6 %) des menuiseries mises en œuvre ont, quant à elles, une valeur U_w inférieure à 1,5 (W/[m².K]).

Mises en œuvre	Occurrences	Uw moyen (W/[m².K])	Écart-types (W/[m².K])	Coefficient de variation (écart-type/moyenne)
Avant travaux	151	2,6	1,1	42,3 %
Mises en œuvre	249	1,3	0,2	15,4 %

Les menuiseries mises en œuvre permettent globalement un saut de performance de 50 %, avec un U_w qui passe d'une valeur moyenne très dispersée avant travaux à peu dispersée dans les mises en œuvre opérées après travaux. En comparaison avec les critères seuil du CITE de $U_w \leq 1,3$ W/(m².K) et $S_w \geq 0,3$ ou $U_w \leq 1,7$ W/(m².K) et $S_w \geq 0,36$, les valeurs observées se situent au même niveau de performance. L'isolation du bâti, pour être pleinement efficace et ne pas créer de pathologie, nécessite également un traitement de l'étanchéité à l'air. Ce sujet constituait un objectif de performance particulier au sein des programmes. Il fait l'objet de la partie suivante.



ÉTANCHÉITÉ À L'AIR DES ENVELOPPES RÉNOVÉES

Dans les dispositions générales obligatoires, le programme « Je rénove BBC », comme pour les « 50 chantiers pionniers », a imposé une étanchéité à l'air inférieure à la valeur $Q_{4_psurf}=0,8 \text{ m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$, quelle qu'ait été la méthode choisie (référentiel technique ou étude thermique). À titre de comparaison, les maisons individuelles neuves soumises à la RT 2012, ont pour obligation d'atteindre une valeur Q_{4_psurf} de 0,6 ($\text{m}^3/[\text{m}^2.\text{h}]$). Outre les résultats des tests d'étanchéité à l'air, un inventaire des difficultés de mise en œuvre et des solutions associées est développé dans le fascicule F : La mise en œuvre. Dans ce sens, les opérations ont fait l'objet d'un accompagnement et d'une sensibilisation sur le sujet de l'étanchéité à l'air dans le cadre d'une démarche encadrée par l'engagement de résultat des intervenants. Cet accompagnement initial se poursuit en cours de chantier, avec la possibilité de réaliser un test d'infiltrométrie intermédiaire. Cet ensemble est par la suite validé par un test d'infiltrométrie final, en fin de chantier, réalisé par un organisme externe et certifié. En cas de non-atteinte de la performance, les maîtres d'œuvre se sont engagés à faire rectifier les éléments portant à anomalies afin de bénéficier des subventions.

En cas de difficultés techniques entraînant des solutions économiquement non viables, les organisateurs des programmes se sont réservé le droit de pouvoir mettre en place une dérogation à cet objectif pour ne pas compromettre les efforts consentis sur le chantier considéré.

Valeurs d'étanchéité à l'air obtenues après travaux

La figure ci-dessous illustre la répartition des performances d'étanchéité à l'air obtenues après travaux, sur 262 opérations.

Avec un taux de réussite de 84 % sur 262 opérations considérées, (programmes JRBBBC et 50 chantiers pionniers confondus), il est possible d'affirmer qu'un objectif d'étanchéité correspondant à $Q_{4_psurf}=0,8 \text{ m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$ est atteignable pour la plupart des opérations en rénovation, moyennant un accompagnement spécifique et une attention particulière lors de la conception et de la réalisation.

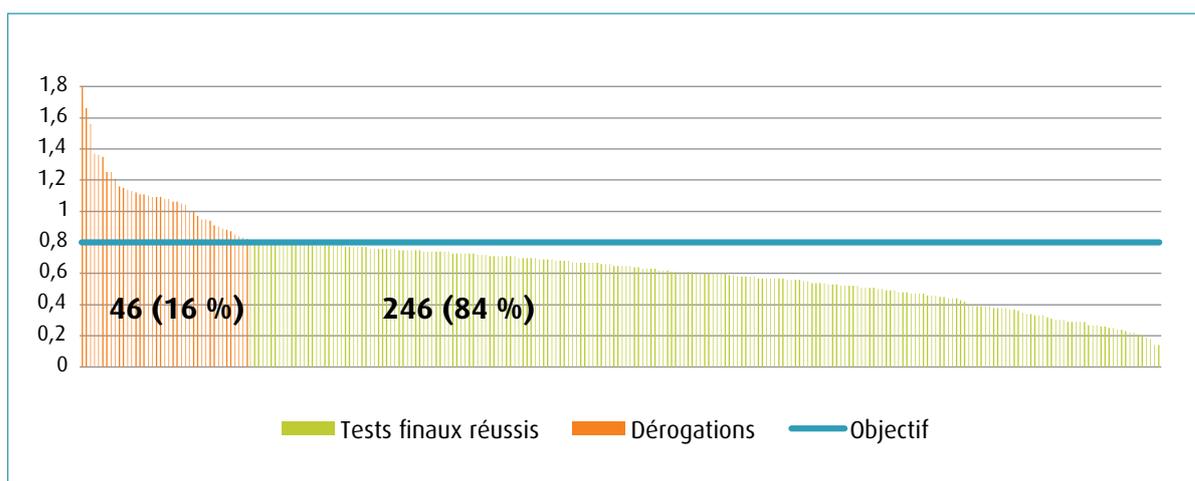


Figure 21 : Répartition des performances d'étanchéité à l'air (262 opérations).

Analyse des valeurs d'étanchéité à l'air obtenues

Il est proposé ici d'analyser les valeurs de Q_{4_psurf} sous forme de moyenne, de répartition et d'écart-type selon les différentes typologies de bâti et de chantier.

S'agissant tout d'abord des typologies de bâti, trois principales catégories sont considérées :

- les maisons à colombages (bâti ancien) ;
- les maisons maçonnées ;
- les maisons à ossature bois.

La figure ci-dessous illustre les valeurs de Q_{4_psurf} obtenues pour chacune de ces catégories.

Typologies de bâti		Q_{4_psurf} moyen $m^3/(m^2.h)$	Profil de répartition Q_{4_psurf}	Écart-type Q_{4_psurf} $m^3/(m^2.h)$
Maçonnerie ou béton 223 opérations		0,63		0,24
Taux de réussite	88 %			
Colombage 29 opérations		0,84		0,39
Taux de réussite	62 %			
Ossature bois 10 opérations		0,78		0,29
Taux de réussite	60 %			

Figure 22 : Répartition des valeurs Q_4 selon les typologies de bâti (262 opérations).

Par nature, l'intervention sur l'existant, qui plus est lorsqu'il est ancien, rend le traitement de l'étanchéité à l'air plus délicat. **Pour des typologies maçonnées, l'atteinte d'une valeur de Q_4 inférieure à 0,8 ($m^3/[m^2.h]$) semble poser moins de difficultés, avec quasiment 90 % de réussite.**

Sans surprise, **les typologies « ossature bois » et « colombage » semblent plus difficiles à traiter en rénovation, avec respectivement 62 % et 60 % de réussite.** Ces taux de réussite demeurent cependant respectables. Les difficultés sur ces typologies s'expliquent par le grand nombre d'éléments traversant l'enveloppe, chacun étant

synonyme de fuite d'air potentielle. À cela il faut ajouter les contraintes propres aux maîtres d'ouvrage ne permettant pas forcément le démontage du cloisonnement intérieur et des planchers (hors solivages et poutres) rendant l'accès difficile aux défauts d'étanchéité. Ces typologies font également moins l'objet d'une isolation par l'extérieur avec 25 % d'ITE pour la typologie « colombage » et 50 % pour la typologie « ossature bois » contre 78 % pour les typologies maçonnées. Ce dernier paramètre demeure important, car l'isolation par l'extérieur permet de traiter plus facilement les raccords d'étanchéité, notamment ceux situés entre l'isolant et les menuiseries.

Nous analysons par la suite les valeurs d'étanchéité à l'air obtenues selon la typologie des travaux menés.

Deux principales catégories sont considérées ici : les rénovations dites « simples », sans réaménagement interne (représentant 78 % de notre panel), et les

rénovations dites « lourdes » avec réaménagement, extension ou transformation d'usage (représentant 22 % de notre panel).

La figure ci-dessous illustre les valeurs de Q_{4_psurf} obtenues pour chacune de ces catégories.

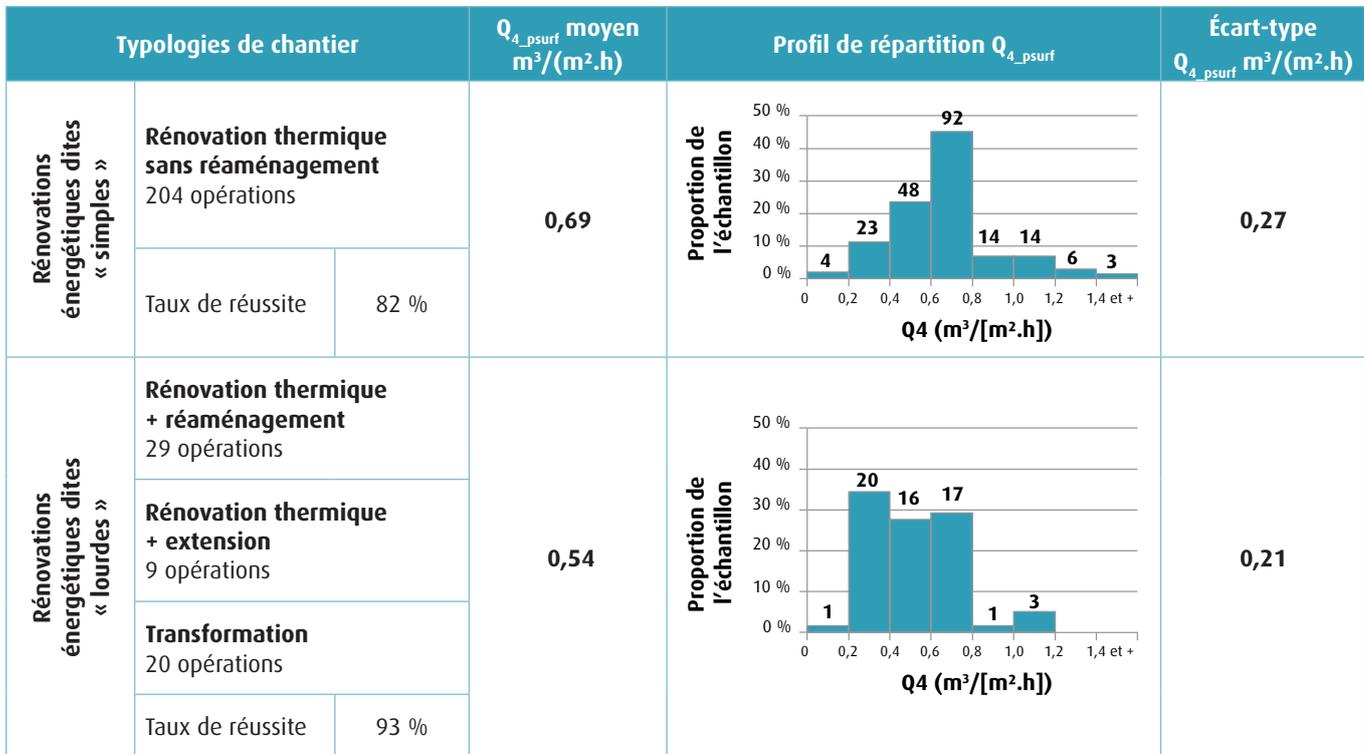


Figure 23 : Répartition des valeurs Q_4 selon les typologies de chantier (262 opérations).

Les rénovations énergétiques « lourdes » connaissent un fort taux de réussite au test d'étanchéité à l'air (93 %), qui est supérieur au taux de réussite des rénovations énergétiques « simples » (82 %). Cela peut s'expliquer par différents facteurs.

Dans une rénovation lourde, le fait de travailler sur tous les lots permet de traiter l'étanchéité à l'air en détail. Dans ces cas, par exemple, il est plus facile de démonter les périphéries de plancher intermédiaire pour passer et raccorder les membranes d'étanchéité à l'air, mais également de revoir l'agencement des cloisons, ce qui permet de traiter plus facilement les passages de fluides, de gaines électriques et aérauliques.

Les rénovations énergétiques « simples », sans création de surface habitable, réussissent dans 82 % des cas à remplir l'objectif initial d'étanchéité à l'air. Bien que ce taux de réussite soit plus faible, il n'en demeure pas moins un taux élevé.

De manière générale, il semble ainsi que plus la typologie de chantier induit des travaux lourds, plus le taux de réussite d'atteinte d'une valeur $Q_{4_psurf} = 0,8 m^3/(m^2.h)$ est important.

Après avoir abordé la performance thermique puis aéraulique de l'enveloppe, le dernier paragraphe de ce fascicule présente la problématique des transferts d'humidité au sein des parois.



FOCUS SUR LES TRANSFERTS D'HUMIDITÉ DANS L'ENVELOPPE

En Alsace, environ un tiers des logements ont été construits avant 1948. Les bâtiments de cette époque sont constitués de matériaux traditionnels et locaux (pans de bois, torchis, pierres, briques de terre cuite...) qui présentent globalement une forte sensibilité aux transferts d'humidité, sous forme de vapeur et sous forme liquide.

Les techniques de construction contemporaines, quant à elles, ont souvent recours à des matériaux industriels aux propriétés hygriques différentes : peu perméables à la vapeur d'eau, peu capillaires.

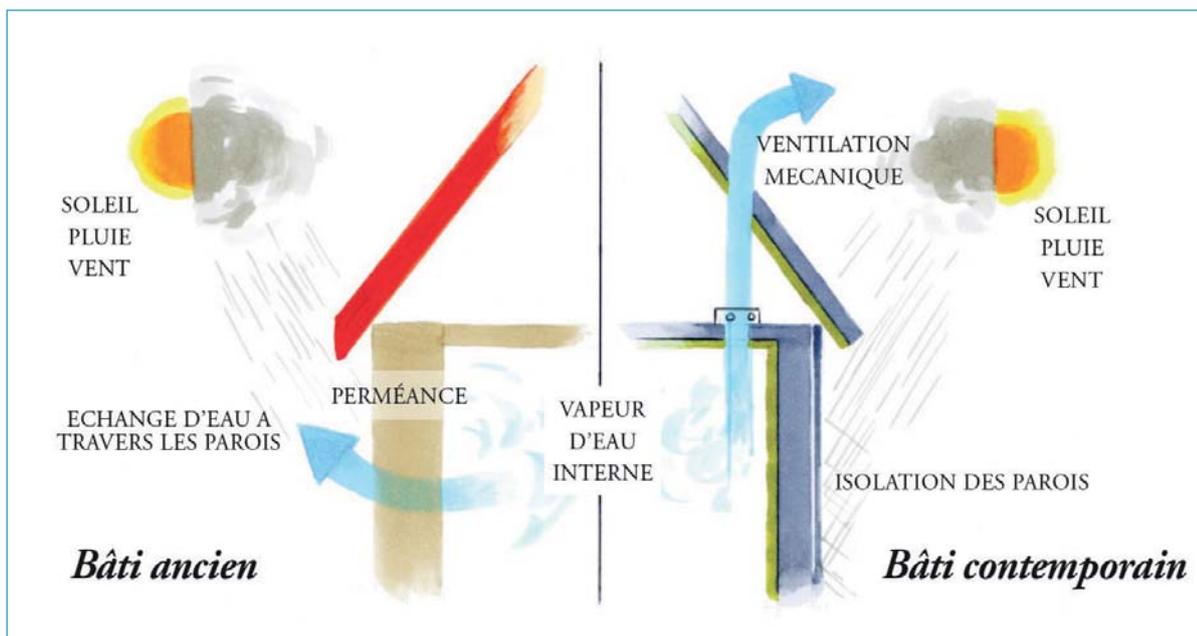


Figure 24 : Comparaison des fonctionnements hygriques entre bâti ancien et bâti contemporain (source : www.maisons-paysannes.org).

Des études menées précédemment, telles que HYGROBA (DGALN, CETE de l'Est, MPF, ENSA Toulouse, INSA Toulouse, 2011), ont pu mettre en évidence les risques de pathologies liées à des procédés d'isolation non adaptés aux parois anciennes (condensation, développement de moisissures, dégradation des propriétés thermiques, voire structurales, de la paroi...) spécifiquement dans les cas d'isolation thermique par l'intérieur.

Ainsi, dans le cadre des programmes « 50 CP » et « JRBC », une étude a été réalisée par le Cerema pour étudier les risques hygrothermiques liés aux travaux

de rénovation. L'étude s'est basée sur le suivi instrumenté de deux murs d'une maison à colombages, isolée par l'intérieur. La mesure sur 1 an de la température et de l'humidité dans les 2 murs a permis de caler des modélisations faites sous le logiciel WUFI. Ce logiciel du Fraunhofer Institute permet de simuler les transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi, selon un modèle de calcul dynamique. Ces modélisations ont permis ensuite de suivre la quantité d'eau dans le mur sur 10 ans pour plusieurs scénarios : mur d'origine, avec différents isolants, avec ou sans source d'humidité additionnelle.

Résultat de l'instrumentation d'un mur en pan de bois après isolation par l'intérieur



Figure 25 : Vues extérieure et intérieure de la maison étudiée - avant travaux (source : EDF).

Le bouquet de travaux de rénovation de la maison considérée comprend l'isolation par l'intérieur des parois verticales, l'isolation des combles et du plancher bas, le changement des menuiseries, l'installation d'un ballon électrique pour l'ECS, d'un

poêle à bois, de radiateurs électriques et d'une VMC simple flux hygro-réglable de type B dont le bon fonctionnement a pu être vérifié par des mesures. La constitution des murs à pan de bois instrumentés est présentée dans la figure suivante.

Orientation	Nord	Ouest
Constitution du mur⁵ (de l'extérieur vers l'intérieur)	<ul style="list-style-type: none"> - 2 à 4 cm d'enduit bâtard - 13 cm de brique entre colombages 	<ul style="list-style-type: none"> - 2 à 4 cm d'enduit de chaux - 15 cm de grès jaune
Pièce intérieure	Buanderie	Bureau

Figure 26 : Description des deux murs instrumentés.

Le complexe isolant intérieur posé sur les murs de la maison présente des caractéristiques de perméabilité à l'humidité dont le détail est donné en annexe.

S'agissant de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe rénovée, elle respecte les exigences du programme. Le coefficient n_{50} obtenu en fin de chantier est de 2,5 vol/h (soit $Q_4 = 0,6 \text{ m}^3/[\text{h.m}^2]$).

L'instrumentation mise en œuvre a permis de mesurer la température et l'humidité relative en différents points : dans une partie courante du mur (dans la brique ou la pierre, à l'interface entre le mur et l'isolant et dans l'isolant), à l'extérieur (sous le débord de toiture) et à l'intérieur.

Dans la suite du fascicule, nous présentons les résultats issus des mesures et des calculs pour la seule paroi ouest. En effet, les résultats s'avèrent équivalents pour les 2 murs étudiés.

⁵ Cf. Annexe B : Propriétés hygriques des matériaux utilisés.

Pour les 2 murs instrumentés, les mesures faites sur un an, à un pas de temps horaire (figures ci-dessous) ne montrent pas d'augmentation globale de l'humidité au cours du temps : le mur se charge de vapeur d'eau en automne/hiver et sèche au printemps, de telle sorte qu'au bout d'un an l'humidité relative se situe au même niveau que l'année précédente. **La paroi trouve ainsi son équilibre à des seuils acceptables et sans risque de pathologie particulier** (humidité relative globale inférieure à 80 %). **Un point de vigilance est tout de même à porter sur le risque de dégradation par des cycles de gel/dégel de l'enduit extérieur et de la brique**, car, au niveau de leur interface, la température peut descendre sous les 0 °C et l'humidité relative peut y dépasser les 80 % voire 90 %.

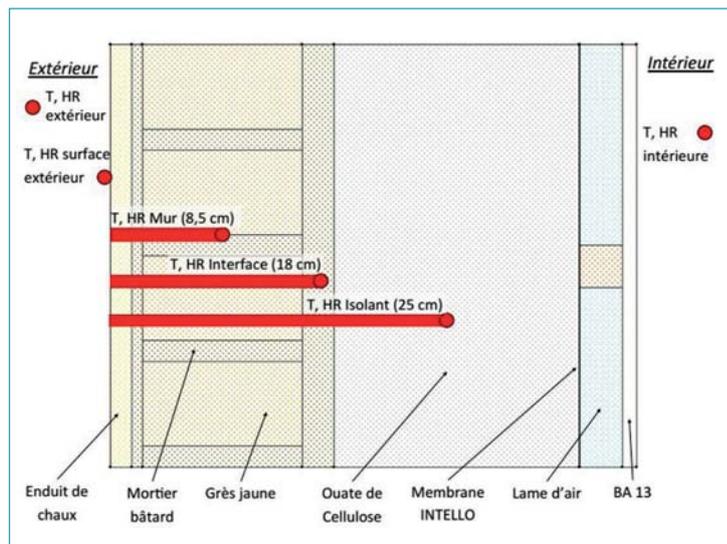


Figure 27 : Instrumentation posée sur le mur ouest

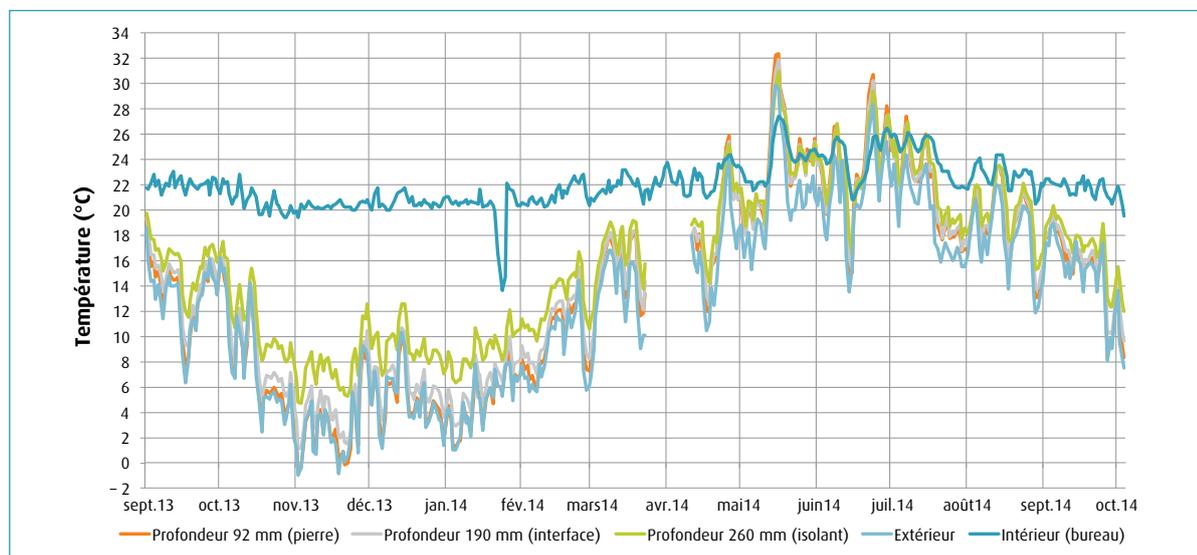


Figure 28 : Moyenne quotidienne des températures mesurées (paroi ouest) (°C)⁶.

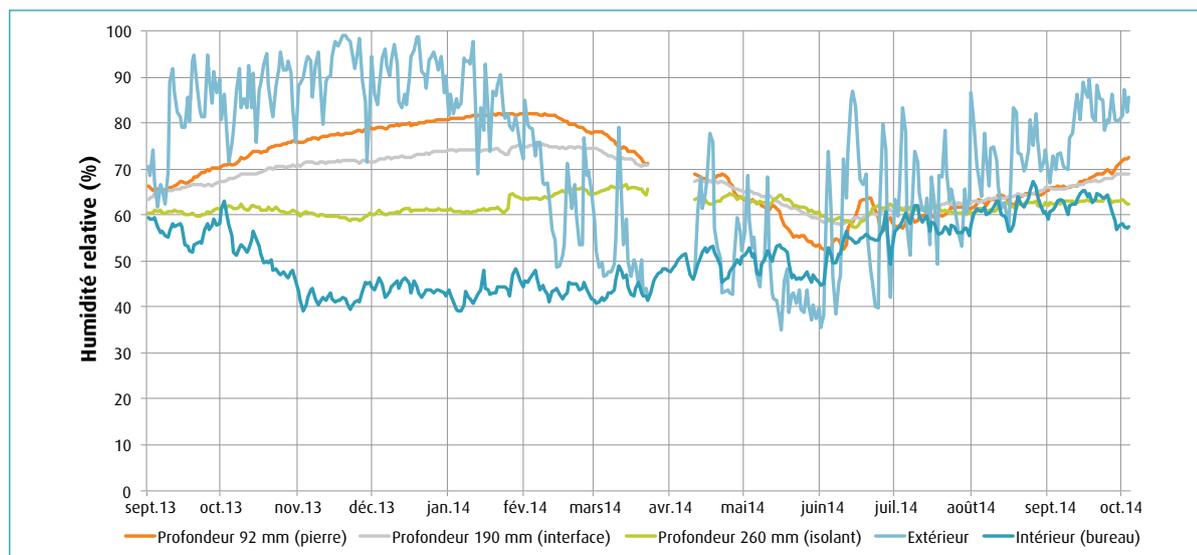


Figure 29 : Moyenne quotidienne des humidités relatives mesurées (paroi ouest) (%).

⁶ L'instrumentation a dysfonctionné du 18 avril au 6 mai 2014.

Résultats de la modélisation d'un mur en pans de bois après isolation par l'intérieur

Les phénomènes de transferts hygriques devant s'observer sur une période très longue (pour un même climat « type »), nous avons eu recours à un modèle de simulation dynamique permettant d'extrapoler les résultats de l'instrumentation menée sur une seule année.

Ce modèle numérique a été calé de telle sorte que la température et l'humidité relative simulées correspondent au mieux à celles mesurées. Le calage est globalement satisfaisant, même si la pluie battante et le rayonnement solaire direct sur le mur (notamment ouest) constituent des phénomènes plus complexes à intégrer dans le modèle. Les caractéristiques des matériaux utilisés et les hypothèses de modélisations sont détaillées dans les annexes B et C.

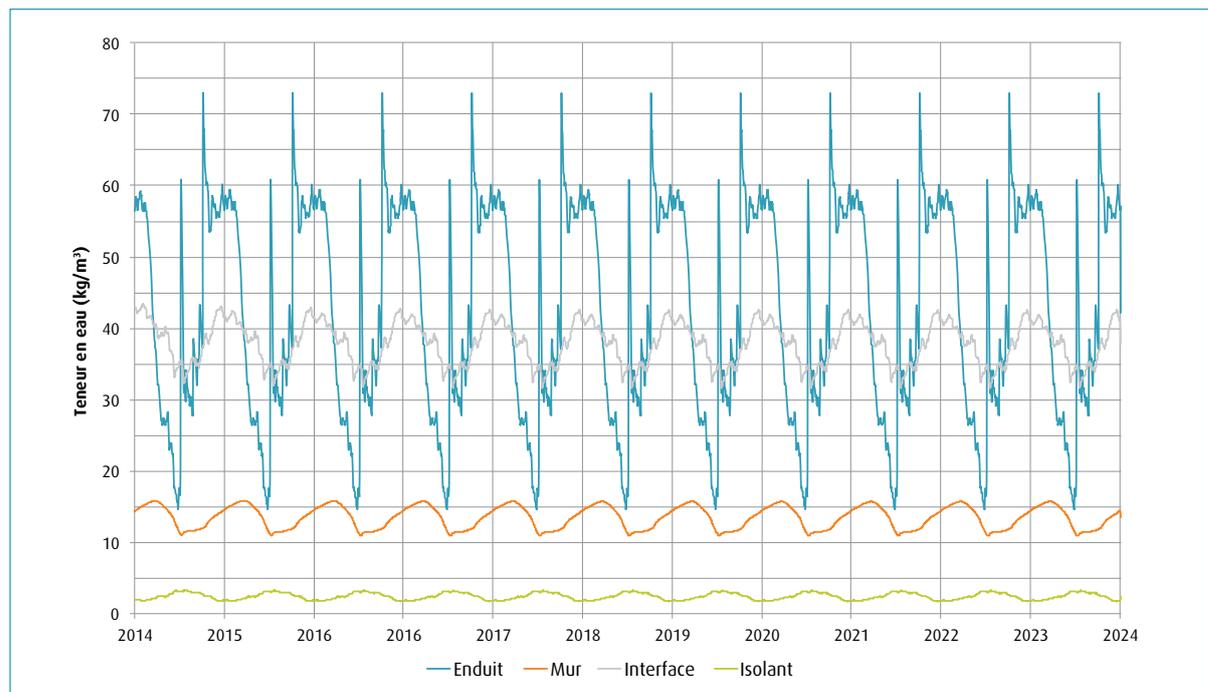


Figure 30 : Teneur en eau dans les différents matériaux sur 10 ans (paroi nord).

La simulation du comportement hygrothermique du mur sur une période longue de 10 ans (figure ci-dessus) montre que la teneur en eau fluctue entre les saisons, mais sans accumulation d'une année sur l'autre.

Nous pouvons alors conclure que le complexe isolant intérieur installé (ouate de cellulose et membrane frein-vapeur hydrovariable) **semble ne pas générer de risque de pathologie particulier dans les parties courantes du mur considéré.**

Par la suite, nous simulons d'autres configurations du mur avec différents isolants aux propriétés hygriques diverses, plus ou moins perméables à la vapeur et plus ou moins hygroscopiques⁷ :

- avec 22 cm de ouate de cellulose et frein-vapeur hydrovariable (projet) ;
- avec 22 cm de laine de bois et frein-vapeur hydrovariable ;
- avec 22 cm de laine de verre et frein-vapeur hydrovariable ;
- avec 22 cm de polystyrène ;
- sans isolation, avec seulement un enduit intérieur (base).

⁷ Cf. Annexe B : Propriétés hygriques des matériaux utilisés.

Au moyen de ces simulations supplémentaires, nous observons (figure ci-dessous) que, quel que soit le type d'isolant considéré et selon nos hypothèses⁸, la quantité d'eau à l'interface entre le mur et l'isolant est stable et reste faible sur les 10 ans.

Ainsi, aucun risque de pathologie particulier ne semble apparaître. Nous pouvons toutefois constater que, par rapport à la situation de base (mur originel, sans isolant), toutes les solutions simulées génèrent une augmentation de la teneur en eau moyenne dans le mur.

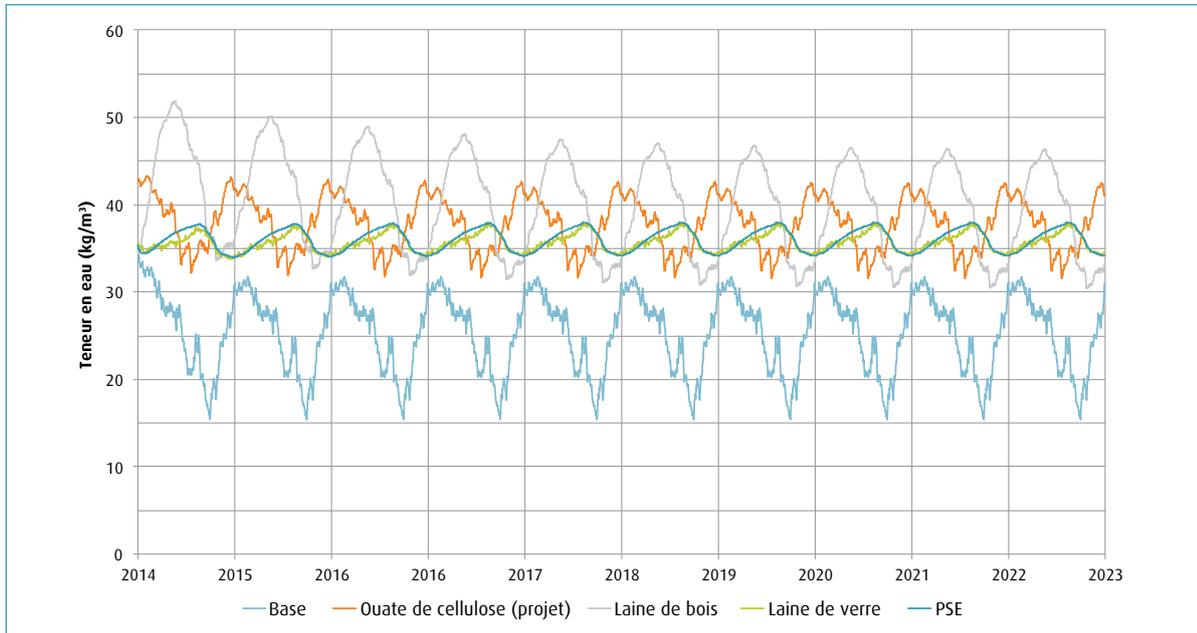


Figure 31 : Teneur en eau de l'interface pour différents types d'isolants.

Enfin, pour tester la durabilité de la paroi en situation « accidentelle », une source d'eau liquide a été ajoutée dans le modèle numérique, au niveau de la maçonnerie intérieure. Cette source peut

représenter des condensats issus d'air humide passant par une brèche dans le frein-vapeur, des remontées capillaires ou, dans une moindre mesure, un réseau fuyant.

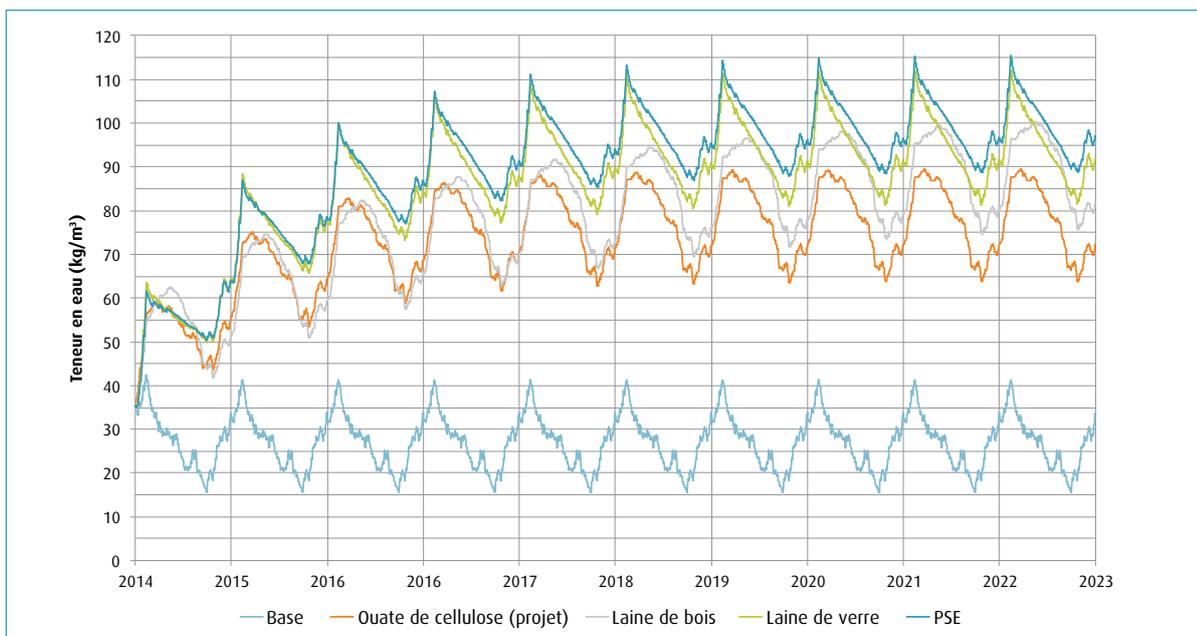


Figure 32 : Teneur en eau de l'interface pour différents types d'isolants soumis à une source d'humidité.

⁸ Cf. Annexe C : Hypothèses de modélisation.

Pour chacune des configurations d'isolation testées, nous observons alors (figure ci-avant) que la quantité d'eau à l'interface augmente d'une année sur l'autre pour se stabiliser à un niveau bien supérieur à la situation sans isolant. Un risque de dégradation de la paroi peut alors apparaître sur le long terme.

Nous constatons aussi que les teneurs en eau à l'interface s'avèrent plus importantes dans le cas de la laine de verre et du polystyrène expansé que dans le cas de la laine de bois et de la ouate de cellulose. Ce dernier isolant présente le comportement hygrothermique le moins défavorable.

Ce constat s'explique par les différences de propriétés d'hygroscopicité et de résistance à la vapeur d'eau de ces matériaux. **Les configurations d'isolation avec des matériaux perméables à la vapeur et hygroscopiques présentent ainsi une plus grande capacité de stockage puis de séchage de l'humidité.**

Enfin, la situation sans isolant ne semble pas présenter de risque particulier.

Conclusions issues des mesures et des simulations hygrothermiques effectuées

Les résultats sont énoncés pour le cas d'étude considéré et avec les hypothèses présentées en annexe.



Vis-à-vis du complexe isolant intérieur mis en œuvre dans le cas d'étude (ouate de cellulose avec frein-vapeur hygrovariable), les mesures effectuées, confortées par des modélisations à 10 ans, présentent des seuils de teneur en eau acceptables, sans risque de pathologie particulier a priori.

Un risque de dégradation par des cycles de gel/dégel dans l'enduit extérieur existe toutefois.

Des modélisations effectuées avec d'autres isolants ne présentent pas de risque de pathologie particulier par ailleurs.

Néanmoins, lors d'une sollicitation accidentelle en humidité (remontée capillaire, percement de la membrane...), un risque de dégradation de la paroi apparaît pour l'ensemble des configurations d'isolation. Les solutions d'isolation avec des matériaux hygroscopiques et perméables à la vapeur (type ouate de cellulose ou laine de bois) présentent toutefois les comportements les plus favorables, car elles ont une plus grande capacité de séchage.

Il apparaît donc nécessaire, lors d'une rénovation thermique de l'enveloppe, de limiter toute source d'humidité dans la paroi, en veillant notamment :

- à la protection de la façade vis-à-vis de la pluie ;
- au traitement préalable des remontées capillaires ;
- à une bonne mise en œuvre de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe permettant de maîtriser les infiltrations d'air humide (cf. fascicule F : La mise en œuvre).



À retenir du fascicule

S'agissant des performances d'isolation observées dans les programmes JRBCC :

- Le coefficient moyen d'isolation $U_{bât}$ est réduit globalement d'environ 75 % après travaux. Les résistances thermiques moyennes des différents lots sont toutes légèrement supérieures à celles exigées par le crédit d'impôt pour la transition énergétique de 2016.
- L'isolation thermique par l'extérieur des murs est très répandue, loin devant la mise en œuvre par l'intérieur.
 - Dans le cadre de l'ITE, l'utilisation d'isolants sous enduits est majoritaire, avec un recours important au polystyrène. Les isolants bio-sourcés représentent une proportion non négligeable.
 - Dans le cadre de l'ITI, l'utilisation de matériaux bio-sourcés devance les matériaux minéraux ou synthétiques.
- L'isolation des toitures a fait l'objet d'une forte utilisation des matériaux bio-sourcés, notamment la laine de bois, la fibre de bois et la ouate de cellulose.
- Les menuiseries, tout comme les portes d'entrée ou de service, ont connu un fort taux de renouvellement. Nous observons une utilisation généralisée de double vitrage performant et l'apparition d'une part non négligeable de triple vitrage.

S'agissant des performances s'étanchéité à l'air observées dans les programmes JRBCC :

- Une très grande majorité des opérations ont réussi à atteindre l'objectif d'étanchéité à l'air, démontrant la viabilité de ce dernier en rénovation lourde, moyennant la mise en place d'une démarche d'accompagnement des chantiers et une mise en œuvre coordonnée et soignée utilisant des produits adaptés.
- La typologie de bâti ainsi que la typologie de chantier sont des facteurs influençant la difficulté de mise en œuvre de l'étanchéité à l'air. Plus la nature de l'opération induit des travaux lourds, plus le taux de réussite est important.

S'agissant des transferts d'humidité dans l'enveloppe et des risques associés à la rénovation thermique :

Les configurations d'isolation étudiées n'ont pas fait apparaître de risque particulier.

Il apparaît néanmoins nécessaire, lors d'une rénovation thermique de l'enveloppe, de limiter toute source d'humidité dans la paroi, en veillant notamment :

- à la protection de la façade vis-à-vis de la pluie ;
- au traitement préalable des remontées capillaires ;
- à une bonne mise en œuvre de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe, permettant de maîtriser les infiltrations d'air humide (cf. fascicule F : La mise en œuvre).



ANNEXE A : DÉFINITIONS DES GRANDEURS UTILISÉES

Grandeurs thermiques

La conductivité thermique λ (W/[m.K]) : elle caractérise la capacité du matériau à se laisser traverser par la chaleur. Plus un matériau est isolant, plus sa conductivité thermique est faible.

La résistance thermique R ([m².K]/W) : c'est l'aptitude d'un matériau à ralentir la propagation de la chaleur qui le traverse. Plus la résistance thermique d'une paroi est importante, meilleure est l'isolation thermique.

Le coefficient de transmission thermique Uw (W/[m².K]) : c'est le coefficient de transmission thermique reflétant la capacité de la menuiserie à conserver la température intérieure. Plus le coefficient est faible, moins la menuiserie est déperditive. Ce coefficient prend en compte les performances du vitrage et du châssis de la menuiserie.

Le coefficient $U_{\text{bât}}$ (W/[m².K]) : il caractérise le coefficient moyen de déperditions spécifique par transmission du bâtiment qui tient compte à la fois des pertes thermiques surfaciques et linéiques ramenées à la somme des aires intérieures des parois déperditives.

La masse volumique (kg/m³) : il s'agit de la masse du matériau par unité de volume. Plus un matériau est dit lourd (ex : maçonneries...) plus sa masse volumique est élevée. Les matériaux apportant de l'inertie thermique possèdent, en général, une forte masse volumique.

La capacité thermique massique Cp (J/[kg.K]) : elle caractérise l'énergie nécessaire pour élever 1 kg de matériau de 1°C. Les matériaux apportant de l'inertie possèdent, en général, une forte capacité thermique massique.

Grandeurs hygriques

L'humidité relative HR (%) : elle correspond au rapport entre la pression de vapeur d'eau « P_v » et la pression de saturation de la vapeur d'eau « P_{vs} » :

$$HR = \frac{P_v}{P_{vs}}$$

Concrètement, l'humidité relative est le rapport entre la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air par rapport la quantité de vapeur d'eau maximale que cet air peut contenir. La pression de saturation de la vapeur d'eau « P_{vs} » dépend de la température. Ainsi l'humidité relative est liée à la température.

La teneur en eau (kg/m³) : elle représente la masse d'eau dans un mètre cube de matériau.

La teneur en eau de référence W_{80} (kg/m³) : il s'agit de la teneur en eau d'équilibre du matériau, lorsqu'il est maintenu dans une ambiance ayant une humidité relative de 80 %. Cette valeur constitue un bon moyen d'évaluer le caractère hygroscopique du matériau. L'hygroscopicité est la capacité du matériau à pouvoir stocker de l'eau en son sein lorsqu'il est mis en contact avec de l'air humide. Ce phénomène dépend de l'importance de la microporosité et de l'humidité relative de l'air. Concrètement, plus un matériau est hygroscopique, plus son W_{80} est élevé.

Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ (-) caractérise la capacité du matériau à empêcher son franchissement par la vapeur d'eau. Plus un matériau est étanche à la vapeur d'eau, plus le μ est élevé. Par convention, on considère que l'air immobile possède un coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau $\mu = 1$. Un matériau peu résistant à la diffusion de vapeur d'eau est parfois également qualifié de « perspirant ».

L'épaisseur de lame d'air équivalente (S_d en m) :
en pratique, l'épaisseur de lame d'air équivalente (S_d en m) remplace le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur (μ sans unité). Ces deux grandeurs sont reliées par la relation suivante :

$$S_d = \mu \times e$$

où e est l'épaisseur (en mètre) du matériau en question.

Le coefficient d'absorption liquide A ($\text{kg}/[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}]$) :
il caractérise la capacité du matériau à absorber de l'eau liquide par capillarité, c'est-à-dire lorsqu'il est mis en contact avec un plan d'eau. Plus un matériau est capillaire, plus son coefficient A est élevé. Ce paramètre est, lui aussi, fonction de la nature porométrique du matériau.



ANNEXE B : PROPRIÉTÉS HYGRIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS

	Paramètres hygriques				Paramètres thermiques		
	μ [-]	e [m]	Sd [m]	W_{g0} [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/(m.K)]	Masse volumique [kg/m ³]	Chaleur spécifique [J/(kg.K)]
Mur nord							
Enduit bâtard	19	0,04	0,76	45	0,8	1 900	850
Brique	15	0,13	1,95	4,5	0,6	1 800	850
Mur ouest							
Enduit à la chaux	7	0,02	0,14	30	0,7	1 600	850
Mortier bâtard	45,89	0,01	0,46	24,65	0,8	1 910	850
Grès (Reinharsdorf)	16	0,15	2,4	6	2,343	1989	883
Commun aux deux murs							
Frein vapeur hygrovariable Intello	[250 - 26 000]	0,001	[0,25 - 26]	6,7	2,4	115	2 500
Lame d'air	0,38	0,04	0,0152	-	0,23	1,3	1 000
BA 13	8,3	0,013	0,108	6,3	0,2	850	850
Différents isolants							
Fibre de cellulose (projet)	1,8	0,22	0,40	5,5	0,034	50	2 000
Laine de bois	3	0,22	0,66	19	0,042	155	2 000
Laine de verre	1	0,22	0,22	0,46	0,035	25,2	1 000
Polystyrène	50	0,22	11	0	0,04	30	1 500



ANNEXE C : HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION

Hypothèses du logiciel WUFI

- **Flux en 2D** : le logiciel modélise des transferts de chaleur et transports de matière en 2D. Les flux dans la troisième dimension sont négligés.
- **Phénomènes modélisés** : les bilans de transport d'eau et de transferts de chaleur couplés sont pris en compte, mais le logiciel n'intègre pas l'écoulement gravitaire de matière et le bilan d'air (i.e. transfert de chaleur convectif et transports de vapeur d'eau dans le matériau).
- **Maillage** : le modèle WUFI approxime la géométrie par une discrétisation en volumes finis.

Hypothèses de modélisation

- **Géométrie** : la géométrie a été établie selon les mesures, les observations faites sur le terrain.
- **Matériaux** : le choix des matériaux est fait en fonction des observations sur site, des factures des entreprises et du calage du modèle par rapport aux mesures. Les matériaux ont été choisis dans la base de données du logiciel WUFI et les courbes de sorption ont été lissées.
- **Conditions initiales** : la mesure au 28 septembre 2013 (date de départ du modèle) permet de fixer les conditions initiales dans les matériaux.
- **Condition aux limites** : les conditions aux limites basses et hautes sont fixées comme adiabatiques. C'est-à-dire qu'il est supposé qu'il n'y a pas d'échange thermique et hydrique vers le sol et vers le haut du tronçon de mur modélisé.

Côté intérieur, le climat est fixé grâce au capteur de température et d'humidité de la buanderie (mur nord) et du bureau (mur ouest).

Côté extérieur, le climat est fixé par le capteur de température et d'humidité fixé au niveau du mur, par la pluviométrie, la vitesse du vent et l'orientation du vent de la station Météo France de Waltenheim-sur-Zorn, l'ensoleillement global de la station Météo France d'Urrwiller et l'ensoleillement diffus calculé par la méthode de Perez⁹. Suite au calage, l'ensoleillement n'est pas utilisé pour le mur nord, car le mur est constamment à l'ombre. Paroi Ouest, une perte de précision est due aux différences entre le rayonnement réel reçu par le mur et celui enregistré par la station météo France et projeté par calcul sur la paroi verticale ouest. De même pour la pluie battante, la fraction de pluie reçue par le mur est issue d'un calcul empirique.

- **Source d'humidité** : la source d'humidité est positionnée à l'interface avec la maçonnerie intérieure. Cette source équivaut à un total de 0,4 gramme d'eau par mètre carré sur une année. Elle peut représenter des condensats issus de l'air humide passant par une brèche de 26 cm² dans le frein vapeur. Elle est dépendante des températures intérieure et extérieure, de l'humidité relative intérieure, de la vitesse et de l'orientation du vent.
- **Calage du modèle** : pour le calage des deux modèles, la géométrie, les matériaux, les conditions initiales et les conditions aux limites ont été ajustés afin de retrouver les températures et humidités relatives mesurées dans le mur. Les résultats du calage sont très bons : l'écart maximum entre la mesure et le modèle est de 5 % pour l'humidité relative et de 3°C pour la température.

⁹ Réalisé avec le logiciel TRNSYS 16 (type 16c).

A - La performance énergétique globale et le confort thermique

B - La performance de l'enveloppe

c - Les systèmes de chauffage, d'ÉCS et de ventilation

D - Le bilan carbone des rénovations énergétiques

E - La qualité de l'air intérieur

F - La mise en œuvre

G - Les enseignements économiques

H - Les enseignements sociologiques

Directeur de publication
Bernard Larrousturou

Directeur délégué de publication
Christian Curé

Maquettage
PAO Concept

Impression
JOUVE 53100 Mayenne

© 2017 - Cerema
La reproduction totale ou partielle du document doit être soumise à l'accord préalable du Cerema.

Collection
Connaissances
ISSN 2417-9701
Dépôt légal : juin 2017



Fascicule réalisé sous la coordination de
Sabine Mirtain-Roth (EDF) et Julien Burgholzer (Cerema)

Rédacteurs

Vianney Leroy (EDF)
Pierrick Nussbaumer (Cerema)

Contributeurs

Maxime Raynaud (EDF)
Ludovic Parisot (BET HD2E)
Julien Burgholzer (Cerema)

Relecteurs

Matthieu Flahaut (Région Grand Est)
Éric Gaspard (Ademe)
Bertrand Chauvet (AQC)
Marina Gaspard (Energivie.pro)
Olivier Eber (ES)
Fabien Auriat (DGALN)
Philippe Jary, Cyril Pouvesle, Pascal Cheippe (Cerema)
Laurent Grignon-Massé, Nadège Chatagnon (EDF)

Contacts

sabine.mirtain@edf.fr
julien.burgholzer@cerema.fr

Photos

EDF

Boutique en ligne: catalogue.territoires-ville.cerema.fr

La collection « Connaissances » du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées..

Aménagement et développement des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment