



RESTORE

RAPPORT RESTORE

RAPPORT D'ÉVALUATION IN-SITU DE LA DURABILITÉ DES ISOLANTS BIOSOURCÉS SUR LES CHANTIERS RESTORE

Décembre 2025



SOMMAIRE

<u>Introduction</u>	<u>3</u>
<u>1. Méthodologie</u>	<u>4</u>
<u>1.1. Principes de définition des protocoles de suivi</u>	<u>5</u>
<u>1.2. Méthodologie de suivi de l'humidité et de son impact sur la durabilité</u>	<u>7</u>
<u>2. Elaboration des protocoles théoriques</u>	<u>14</u>
<u>2.1. Identification des points sensibles</u>	<u>14</u>
<u>2.2. Protocoles théoriques</u>	<u>15</u>
<u>3. Elaboration des protocoles simplifiés</u>	<u>40</u>
<u>3.1. Chantier AGNEAUX - Baticok 2</u>	<u>40</u>
<u>3.2. Chantier MESNIL-PATRY - Baticok 2</u>	<u>56</u>
<u>3.3. Chantier FLEURY - Baticok 1</u>	<u>58</u>
<u>3.4. Chantier CHAMBERY - Blokiwood</u>	<u>60</u>
<u>3.5. Chantier TOURCOING – Béton de chanvre</u>	<u>64</u>
<u>4. Recommandation de suivi de la durabilité</u>	<u>70</u>
<u>Bibliographie</u>	<u>72</u>

INTRODUCTION

Les projets RENOSTANDARD puis RESTORE ont été engagés pour favoriser la massification de la rénovation des bâtiments de maison individuelle diffus. Ce parc de maisons (16,5 millions de maisons en résidence principale) est un vivier très important pour la réduction du besoin énergétique et l'impact environnemental du secteur des bâtiments, sachant que plus de 40% des maisons ayant un DPE sont notées E, F ou G.

Le projet RESTORE fait suite au projet PROFEEL RENOSTANDARD qui avait pour objectif de proposer des solutions de rénovation globale pour des typologies d'habitation représentatives de plusieurs régions de France Métropolitaine. Ce projet a permis de constituer des groupements de professionnels porteurs de solutions innovantes, adaptées à chaque typologie et donc réplicables à grande échelle. Ces solutions de rénovation ont été présentées et diffusées sous la forme de fiches propres à chaque typologie.

L'objectif du projet RESTORE est de mettre en œuvre ces solutions de rénovation innovantes conçues dans le cadre de RENOSTANDARD.

Le lot 4 du projet RESTORE se focalise sur l'évaluation de la performance globale des solutions de rénovation mises en œuvre à travers plusieurs aspects :

- Évaluation de la performance thermique de l'enveloppe avant et après rénovation : protocole SEREINE.
- Évaluation de la qualité d'air intérieur, du confort thermique et acoustique de l'occupant et de la consommation énergétique avant et après rénovation : protocole QSE.
- Évaluation de la performance énergétique du logement : suivi énergétique complet pendant un an après les travaux.
- Évaluation de la durabilité de la solution : suivi du comportement hygrothermique des éléments d'enveloppe afin d'assurer une détection précoce de l'apparition de conditions propices au développement de pathologies.

A noter que les protocoles SEREINE et QSE ont été élaborés dans le cadre de projets PROFEEL précédents, alors que le protocole Durabilité a été développé dans le cadre du lot 4 du projet RESTORE.

Les paragraphes suivants décrivent les étapes de l'élaboration de ce protocole Durabilité ainsi que son application pour les cas d'étude du projet.

1. METHODOLOGIE

Connaître la durabilité des composants du bâtiment est un enjeu majeur pour d'une part limiter la sinistralité et garantir les performances essentielles dans le temps et d'autre part pour réduire l'obsolescence des produits et limiter la pression sur les ressources.

S'il est physiquement impossible d'arrêter le vieillissement d'un composant, sa vitesse de détérioration doit être maîtrisée. A l'échelle d'un produit homogène, cette vitesse de dégradation dépend de deux facteurs imbriqués :

- Type de matériaux présents dans le produit : polymères, matière végétale, métaux, matière minérale, etc.
- Exposition aux aléas : liés au climat (humidité, chaleur, pluie, gel, UV, salinité...) et à l'usage (fatigue mécanique, fluage en compression, conditions hygrothermique intérieure, etc.)

L'interaction entre types de matériaux et aléas peut conduire à une dégradation. La cinétique de cette dégradation tout comme son impact sur les performances essentielles attendues par le produit (i.e. isolation thermique, résistance à la compression, etc.) sont complexes à quantifier et dépendent de mécanismes de dégradation ayant lieu à petite échelle. Si la phénoménologie fine reste un sujet de recherche ouvert, certains mécanismes sont bien connus au moins qualitativement, par exemple :

- Modification photo-chimique des polymères sur l'action des UV
- Corrosion des métaux
- Carbonatation des bétons
- Déformations irréversibles liées à la chaleur et/ou à l'humidité
- Pourrissement des bois par excès d'eau liquide
- Développement microbiologique (croissance fongique, mérule, etc.)
- Colonisation espèces (xylophages, rongeurs, etc.)

Les produits n'étant jamais seul dans un ouvrage, en particulier en rénovation, la durabilité de l'ouvrage complet doit de plus tenir compte des problématiques suivantes supplémentaires :

- Interactions physico-chimiques entre produits (ex : corrosion du fait d'effet électro-chimique entre métaux)
- Effet de couplage de défaillances (ex : en cas de défaillance de la membrane d'étanchéité -> humidification de l'isolant support, etc.)
- Effet d'une mauvaise mise en œuvre

Ce dernier point est crucial et difficile à objectiver : en effet si des méthodes de diagnostic visuel, couplés potentiellement à des mesures de performance à réception (type SEREINE) peuvent renseigner sur un défaut entraînant immédiatement une contre-performance, un défaut de mise en œuvre ayant un effet à long terme est à ce jour impossible à objectiver.

Ainsi, si la prédition fine de la durabilité reste un sujet de recherche ouvert, il existe en France une obligation légale de Garantie Décennale pour les parties d'ouvrages neufs qui implique une évaluation possible de l'aptitude à l'emploi pour limiter la sinistralité à horizon 10 ans, essentiellement basée sur :

- Des méthodes standardisées de prédition de la durabilité a priori. Elles se basent sur des essais de vieillissement accélérés normatifs dont les conditions sont peu documentées scientifiquement, mais aussi sur des méthodes mixtes mesures / simulations notamment pour les effets de l'humidité. La robustesse de ces protocoles, leur capacité prédictive au-delà de 10 ans ainsi que leur adaptation nécessaire au changement climatique à venir restent des sujets ouverts.
- Des retours d'expérience terrain, qui se limitent à ce jour à des analyses de remontées de sinistralités.

L'objectif poursuivi dans le cadre de RESTORE est d'explorer la possibilité d'adoindre à ce REX sinistralité des métriques issues d'un monitoring ciblé, de manière à détecter plus préocement l'émergence d'une pathologie ou d'un vieillissement anormal avant l'apparition du sinistre.

Ainsi, l'élaboration du protocole de suivi de la durabilité s'est faite en plusieurs étapes répondant à des besoins différents :

- Un protocole théorique permettant d'identifier de manière exhaustive les mesures à réaliser sur les solutions RESTORE testées sur les chantiers visant à détecter de manière précoce des signaux précurseurs de pathologie ou de vieillissement anormal
- Un protocole simplifié adapté spécifiquement aux chantiers réalisés et tenant compte des adaptations des solutions RESTORE propres à ces chantiers tout en réduisant le nombre de capteur installés.

Du fait des solutions techniques déployées dans le cadre de RESTORE, notamment du fait de la présence importante de matériaux bois et autres produits biosourcés, l'enjeu prioritaire qui a été retenu dans l'analyse concerne les risques liés à l'accumulation d'humidité quelle qu'en soit la cause. Les autres sources de dégradation (photochimique, corrosion, carbonatation, etc.) n'ont donc pas été analysés dans la cadre de ce travail.

Enfin, ces protocoles ont été partagés avec un Groupe de Travail dédié composé d'experts en mesures sur chantier, des problématiques en lien avec l'humidité notamment.

1.1. Principes de définition des protocoles de suivi

1.1.1. 2.1.1. Protocole théorique

A partir des fiches descriptives des solutions de rénovation issues du projet RENOSTANDARD, les points sensibles des différentes parties de bâtiment ont été identifiés. Les points sensibles sont catégorisés en fonction de différents critères de risque :

- Des critères portant sur le type de matériaux : béton de chanvre, fibre de bois, etc.
- Des critères d'exposition : isolation extérieure, contraintes environnantes, etc.
- Des critères de localisation dans le bâti : menuiseries, interface mur / toiture, etc.

A noter que les solutions de rénovation proposées ne constituent pas des techniques courantes au sens assurantiel du terme. A ce titre, elles n'ont pas fait l'objet d'évaluation de leur aptitude à l'emploi dans le cadre d'une procédure d'évaluation ce qui nous conduit à identifier des points d'attention supplémentaires.

Pour chaque point sensible identifié, la deuxième étape a été de déterminer la méthode de suivi de la durabilité. Pour le protocole proposé, elles sont au nombre de trois :

- Liste de vérification lors du chantier de rénovation afin de limiter les malfaçons et donc l'apparition des pathologies.
- Plan d'instrumentation afin de mesurer les grandeurs physiques caractéristiques (température, humidité relative, présence d'eau liquide).
- Programme d'inspection afin de repérer le plus tôt possible l'apparition de pathologie.

1.1.2. Protocole simplifié

Lors du recrutement des chantiers expérimentaux, plusieurs contraintes ont imposé d'apporter des modifications au protocole théorique décrit précédemment. Les contraintes ont été de plusieurs types :

- Modification de la solution de rénovation : pour des raisons de coûts ou de faisabilité technique, certaines solutions n'ont pas été appliquées à l'identique de la solution RENOSTANDARD de référence.
- Acceptabilité et intrusion de l'instrumentation : certains occupants ont souhaité ne pas démultiplier les capteurs, l'implantation des capteurs a pu être contrainte ou modifiée par l'agencement intérieur des logements : répartition des pièces et usages, matériaux de revêtement intérieur, emprise intérieure des boîtiers de transmission des capteurs, etc.
- Budget alloué au projet : la quantité totale de capteurs a dû être adaptée au budget disponible.

Ces contraintes ont conduit à simplifier le protocole initial, et ainsi à améliorer la faisabilité de sa mise en pratique. Seuls les points les plus sensibles ont pu être instrumentés.

1.2. Méthodologie de suivi de l'humidité et de son impact sur la durabilité

1.2.1. Etat de l'art

L'étude des transferts hygrothermiques dans l'enveloppe des bâtiments représente un levier central pour la durabilité des constructions. Outre leur impact direct sur la conservation des matériaux, ces phénomènes conditionnent aussi la performance énergétique, le confort des occupants et la qualité sanitaire des ambiances intérieures. L'humidité excessive est en effet un vecteur majeur de développement fongique, particulièrement critique dans les matériaux bio- et géo-sourcés en raison de leur forte hygroscopicité.

Si les outils numériques de simulation hygrothermique (ex. : WUFI, Delphin) permettent d'estimer les flux de chaleur et d'humidité, leur fiabilité dépend largement de la connaissance des propriétés des matériaux, souvent mal caractérisées, notamment pour les systèmes émergents. De plus, ces modèles sont souvent limités dans la prise en compte des régimes transitoires ou des effets dynamiques locaux.

Pour pallier ces limites, l'instrumentation in situ devient un outil indispensable. En fournissant des données expérimentales précises sur les conditions internes des parois (humidité relative, teneur en eau, température, flux), elle permet à la fois la validation des modèles, l'affinage des seuils de risque, et la mise en œuvre de stratégies de maintenance prédictive. Cette revue analyse de manière critique les pratiques actuelles d'instrumentation hygrothermique et leur capacité à prédire les risques fongiques, en articulant l'analyse autour de deux axes : les techniques d'instrumentation hygrothermique, le type de capteurs et leur adaptation aux matériaux, et l'utilisation des données réelles pour prédire le risque de développement fongique.

L'un des points cruciaux d'un suivi hygrothermique réussi réside dans le choix des emplacements de capteurs. Celui-ci doit concilier pertinence physique (zones à risque élevé) et faisabilité pratique (accessibilité, intégrité des matériaux).

Les interfaces entre matériaux (isolant/mur porteur, enduit/ossature) sont systématiquement instrumentées car elles concentrent les gradients thermiques et hydriques les plus marqués, sources de condensation interstitielle.

[1], dans leur étude sur des murs anciens isolés par l'intérieur, ont montré qu'une humidité relative (HR) supérieure à 85 % était fréquemment mesurée à l'interface isolant-mur, seuil que les Auteurs jugent critique pour la germination fongique.

Les points singuliers tels que les jonctions toiture/mur, les pieds de mur, les abouts de poutres ou les ponts thermiques mur-plancher sont également fortement instrumentés. L'étude de [2] sur un pont thermique mur-plancher à Hangzhou démontre une accumulation d'humidité significative en pied de mur, induisant un risque fongique localisé.

Par ailleurs, pour les parois massives ou hétérogènes (terre, béton de chanvre), l'approche multicouche reste la plus courante : positionnement des capteurs à la surface, à 1/3 et 2/3 de l'épaisseur, voire au centre pour détecter les poches de condensation internes [3]. [4] ont validé cette approche dans un bâtiment en béton de chanvre, identifiant une humidité très élevée à l'intérieur de la paroi.

Le choix des capteurs dépend étroitement des propriétés des matériaux étudiés, du type de paramètre à suivre (HR, teneur en eau, température, flux), et des conditions d'exposition.

- Les capteurs capacitifs sont les plus utilisés pour mesurer température et HR en raison de leur bon rapport coût/précision ($\pm 2\%$ HR, $\pm 0.3^\circ\text{C}$) et leur facilité d'intégration[5], [6] , [7]. Toutefois, ils présentent des dérives en conditions saturées (HR $>90\%$), ce qui peut compromettre leur fiabilité dans les parois fortement humides. Pour des environnements extrêmes, des filtres/membranes spécifiques (Gore-Tex [11], SF2 [4]) ont été testés pour améliorer la précision.
- Les sondes TDR (Time Domain Reflectometry) sont privilégiées pour mesurer la teneur en eau volumique dans les matériaux poreux (terre, béton végétal). Leur précision ($\pm 1\%$) reste conditionnée à une calibration fine selon la matrice poreuse [8]. Les fluxmètres thermiques quantifient les pertes énergétiques, mais leur installation exige des surfaces parfaitement planes et des pâtes thermiques pour réduire les artefacts, une contrainte soulignée par [9] et [10]. Enfin, des capteurs complémentaires (anémomètres, pluviomètres, capteurs de CO₂) sont encore trop rarement intégrés, bien qu'ils puissent apporter des informations intéressantes sur les conditions aux limites et notamment les taux de ventilation.

Au-delà des sujets météorologiques, l'enjeu majeur réside dans la capacité à déduire des séries temporelles mesurées des indicateurs de risques fiables, notamment en termes de risque de développement fongique. De récents travaux montrent qu'un monitoring ciblé, associé à des modèles d'interprétation affûtés, permet de dégager des indicateurs de risque robustes et évolutifs.

Tout d'abord, le positionnement des capteurs s'avère décisif. Placer des sondes de température et d'humidité relative aux interfaces mur/intérieur et mur/extérieur (comme dans [1] et [13]) permet, selon les Auteurs, de capter précisément les zones de condensation de surface propices aux germinations. En parallèle, l'intégration de capteurs capacitifs ou résistifs au cœur du matériau (proches de la face froide ou des ponts thermiques) révèle les accumulations d'humidité interstitielle non visibles en surface, zone critique pour la prolifération fongique ([14] et [7]). Enfin, positionner des sondes dans les jonctions structurelles (poutres, planchers, raccords) cible les gradients thermiques extrêmes où l'eau peut stagner et favoriser la moisissure ([2] et [15]).

La cadence et la durée des mesures sont également essentielles. Les cycles journaliers, avec des variations de RH et de température susceptibles de franchir à plusieurs reprises des seuils critiques, nécessitent une fréquence d'acquisition horaire voire sub-horaire pour ne pas lisser les épisodes favorables à la croissance fongique [16]. De même, un monitoring pluriannuel permet d'intégrer les effets de saisons contrastées (pluie, ensoleillement, modes de ventilation différents) sur les bilans hydriques, ce qu'ignore souvent une campagne limitée à quelques mois ([2] et [17]).

Pour transformer ces masses de données en indicateurs de risque, plusieurs approches complémentaires ont été développées. En particulier le modèle de prédition du risque de développement fongique de référence développé à l'échelle nationale et décrit dans le **Guide SimHuBat** [21]. Dans ce modèle le risque de développement fongique est évalué en deux temps à partir d'une simulation des transferts hygrothermiques. Dans un premier temps, la teneur en eau massique de matériaux biosourcés est calculée en fonction du temps : si celle-ci ne dépasse pas les 23 % pendant plus de 8 semaines par an, sur toutes zones locales de 5

x 20 mm, le risque est écarté. Dans le cas contraire, un essai de vulnérabilité fongique du produit biosourcé doit être réalisé conformément au Cahier du CSTB 3713 qui stipule le conditionnement à réaliser pour le test de vulnérabilité en fonction des résultats de la simulation hygrothermique [22]. À ce jour, le Cahier du CSTB laisse la possibilité d'utiliser deux types de conditionnement de la norme NF EN 17886 : 2023 [23] : condition 1 (28 °C / HR 95 %) ou condition 3 (28 °C / HR 85 %). Le choix entre ces deux modes de conditionnement se fait en enregistrant dans le modèle de simulation numérique, au niveau de certaines zones clefs, les durées au cours desquelles l'humidité relative est supérieure à 85 % et la température est supérieure à 12 °C. Le choix se fait ensuite en fonction du cumul annuel de ces durées de concomitance locale température / humidité relative.

De très nombreuses autres approches d'estimation du risque de croissance fongique ont été développées dans la Littérature. La revue bibliographique ci-dessous a été réalisée dans le cadre du projet PROFEEL QSE [24] en 2020. Les éléments principaux sont repris ci-dessous.

Deux types de modèles empiriques sont proposés dans la littérature :

- Certains fixent un seuil critique en température et/ou en humidité relative au-delà duquel le risque de développement fongique est avéré : Annexe 14 de l'IEA [25], isoplèthes de WUFI Bio [2], Building Moisture Index BMI [13]
- D'autres proposent des modèles de croissance d'un indice caractéristique en fonction de divers paramètres : Mould Index [1], Time of Wetness TOW [26], modèle développé par le VTT [27], [28] et ses différentes évolutions [29],

Il est à noter que de nombreuses publications ont regroupé les différents modèles existants et ont comparé leur fiabilité [30], [31], [32] et [33]. Il en ressort que ces modèles empiriques précédents sont adaptés aux conditions particulières de matériaux ou d'environnement pour lesquelles ils ont été développés, mais **manquent de robustesse pour être tout aussi fiables lorsque celles-ci sont modifiées**.

Face à la variabilité multiparamétrique (perméance à la vapeur, précipitations, infiltration d'air), les modèles probabilistes (RSM, bayésiens) développés dans [18], [19] et [20] permettent de quantifier l'incertitude et de hiérarchiser la sensibilité des paramètres. Ces méthodes font passer le diagnostic du niveau binaire (risque/non risque) à une probabilité de risque, plus adaptée à la gestion de la maintenance prédictive.

La combinaison d'un déploiement intelligent de capteurs, d'une acquisition haute fréquence et d'indicateurs dynamiques (Mould Index, BMI) ou probabilistes, constitue une stratégie puissante pour prédire et prévenir les dégradations fongiques. Toutefois, des calibrations croisées entre laboratoire et in situ restent nécessaires pour affiner les seuils et réduire les incertitudes, et l'intégration d'algorithmes d'apprentissage pourrait à terme automatiser la détection précoce et la gestion adaptative du risque fongique dans les bâtiments. Par exemple, [11] ont démontré que les auto-encodeurs, réseaux de neurones non supervisés, permettent de reconstruire avec précision des séries temporelles incomplètes de données intérieures de température et d'humidité, facilitant ainsi l'identification de comportements anormaux liés à des risques de condensation ou de confort thermique dégradé. De leur côté, [12] ont utilisé des réseaux de neurones à mémoire longue (LSTM) couplés à la tomographie d'impédance électrique pour détecter l'humidité dans des murs en briques, avec une capacité à anticiper les épisodes critiques.

Ces approches, encore expérimentales, ouvrent la voie à une interprétation plus robuste, prédictive et automatisée des données de monitoring, indispensable pour généraliser les diagnostics d'humidité à grande échelle dans les bâtiments.

Malgré les avancées, plusieurs **limites** entravent la fiabilité de l'ensemble des études :

1. **Dérive et saturation des capteurs**: En humidité élevée, les capteurs capacitifs saturent, rendant les mesures incertaines. Leur calibration régulière est nécessaire mais rarement effectuée.
2. **Données long terme** : Un nombre limité d'études s'étendent au-delà de trois ans, ce qui demeure insuffisant pour caractériser le comportement des matériaux à inertie hydriques lente (terre-paille).
3. **Biais de modélisation** : Les logiciels de simulation hygrothermique présentent encore des limites et adoptent une approche très conservatrice, ce qui réduit leur capacité à exploiter pleinement les données issues du monitoring pour prédire la durabilité des parois, en particulier lorsqu'il s'agit de matériaux émergents.
4. **Difficulté d'interprétation** : L'analyse des séries temporelles issues du monitoring hygrothermique (température, humidité relative, teneur en eau) sur plusieurs mois ou années reste une tâche complexe, en raison de la multiplicité des capteurs, de la variabilité diurne et saisonnière, et de l'influence croisée des conditions climatiques et des usages. Traditionnellement réalisée manuellement ou à l'aide de scripts spécifiques, cette analyse tend à s'automatiser grâce aux avancées en intelligence artificielle.

1.2.2. Capteurs T/HR retenus

Les données de mesure sont issues de capteurs communicants LoRa. Cette technologie permet aux différents capteurs positionnés dans les parois de communiquer par ondes radio jusqu'à une passerelle dédiée installée dans le logement. Cette dernière assure la remontée des données vers un serveur distant grâce à une connexion internet.

Afin de suivre l'évolution des conditions thermiques et hygrométriques dans les isolants, des sondes communicantes de température / humidité de type capacitifs déportées Remote THR 3M (WATTECO) ont été positionnées dans les parois. Les sondes sont de diamètre 8 mm et de longueur 40 mm. Elles sont généralement installées sur chantier, après la fermeture de la paroi par perçage de cette dernière au diamètre de la sonde et jusqu'à la profondeur souhaitée. La sonde est ensuite insérée dans la paroi avec une réorganisation locale de l'isolant pour s'assurer de la bonne homogénéité de ce dernier autour de la sonde. Le boîtier de communication LoraWan de la sonde est positionné à l'intérieur du logement et fixé au nu intérieur de la paroi, de sorte qu'il puisse être allumé depuis l'intérieur du logement et que les piles puissent être remplacées si besoin. Seul le câble de communication entre la sonde et le boîtier d'une longueur de 2,9 m, dans une gaine plastique isolée, traverse le nu intérieur de la paroi, ce qui limite fortement les risques de pont thermique. L'étanchéité à l'air de la paroi est reprise après l'installation de la sonde, notamment autour du passage du câble de communication.

La température et l'humidité sont mesurées avec un pas de temps de 10 minutes sur une durée d'au moins un an après les travaux. La précision du capteur est de 0,2 °C et 2 % d'humidité relative. La résolution est respectivement de 0,1 °C et 1 %.



Figure 1: Photo d'une sonde T/HR déportée – modèle Remote THR 3m, Watteco.

1.2.3. Capteurs d'eau liquide retenus

Des capteurs permettant la détection de fuite (ACW/LW8-WL de chez ATIM) ont également été installés dans les parois afin de pouvoir détecter d'éventuelles infiltrations d'eau ou des phénomènes de condensation dans l'isolant biosourcé. Les capteurs se composent d'un câble de détection d'une longueur de 3 m et d'un boîtier de communication LoraWan. Le câble de détection est mis en place dans l'isolant au moment de la mise en œuvre de ce dernier, que ce soit directement sur chantier ou en atelier de préfabrication. Le câble chemine à l'intérieur de l'isolant dans les zones les plus à risque d'infiltration : interfaces mur / menuiseries, mur / toiture, etc. L'information transmise par le capteur est booléenne (présence d'eau ou non) et n'est pas localisée (l'eau est présente le long du câble sans indication sur sa position). Aucun élément métallique ne doit être en contact avec le câble afin de ne pas perturber la mesure.

Le boîtier de communication du capteur est positionné à l'intérieur du logement et fixé au nu intérieur de la paroi, de sorte à ce qu'il puisse être allumé depuis l'intérieur du logement et que les piles puissent être remplacées si besoin. Seul le câble de communication entre la sonde et le boîtier, dans une gaine plastique isolée, traverse le nu intérieur de la paroi, ce qui limite fortement les risques de pont thermique. L'étanchéité à l'air de la paroi est reprise après l'installation de la sonde, notamment autour du passage du câble de communication par ajout d'adhésif.



Figure 2 : Photo d'un câble détecteur de fuite d'eau - modèle ACW/LW8-WL, ATIM.

1.2.4. Méthodologie d'exploitation des données retenue

Les données sont récupérées sous forme de série temporelle pour les capteurs de température / humidité et sous forme de booléen pour les détecteurs de fuite. Le pas de temps de chaque mesure est de 10 minutes.

Les données des capteurs de température et d'humidité seront exploitées afin de permettre :

- L'identification d'éventuelles anomalies (mesures des ambiances et mesures à l'intérieur des parois).
- La comparaison des mesures à l'intérieur des parois avec des données simulées, tirées des modélisations sous WUFI réalisées pour l'analyse de risque en phase de conception.

Les données de température / humidité mesurées dans les parois sont comparées aux simulations WUFI réalisées avec les mêmes conditions aux limites grâce aux autres mesures de température et humidité intérieures et extérieures au logement (voir § 4.1.3 présentant les paramètres, limites et résultats comparatifs des simulations WUFI réalisées pour le chantier d'Agneaux). Cette comparaison permettra de valider la pertinence des simulations et de l'analyse de risque qui ont été faites avant les travaux et de s'assurer de l'absence de risque de développement de pathologies au sein de la paroi. En particulier il est intéressant d'analyser les données issues des mesures afin de vérifier comment les conditions réelles de mise en œuvre et d'exploitation peuvent impacter les conditions hygrométriques dans la paroi et valider si ces dernières sont cohérentes avec les données issues de la simulation.

Les données permettent également de vérifier que les conditions intérieures à la paroi ne sont pas propices au développement fongique grâce à leur comparaison à différents seuils de risque définis dans des normes ou la littérature **selon le protocole défini lors du [projet QSE \(Qualité Sanitaire et énergétique des rénovations\) du programme PROFEEL](#) [24] et du [projet ADEME IVMH](#) [34]**.

L'Etat de l'Art (cf. 1.2.1) met en effet en lumière à la fois la multiplicité des modèles de croissance fongique existants, mais aussi leurs nombreuses limites individuelles. Ce protocole propose ainsi de combiner différents seuils qui prennent en considération un nombre restreint de paramètres d'entrée, afin d'en améliorer la fiabilité. Il provient des rapports suivants produits dans le cadre du projet QSE du programme PROFEEL :

- ["Modélisation du risque potentiel d'apparition de moisissures et de leur éventuel développement"](#) (revue bibliographique)

- "Impact des travaux de rénovation sur les transferts hydrothermiques et prédition de la contamination fongique".

Le premier rapport (revue bibliographique) rassemble notamment les différentes méthodes rencontrées dans les normes et la littérature, ayant pour objectif de prédire le risque d'apparition de moisissures et/ou d'évaluer leur éventuel développement.

Il sert l'objectif global du second rapport de présenter la démarche élaborée pour proposer une méthode consolidée permettant aux bureaux d'étude et de contrôle de prédire les risques de développement fongique dans les parois des bâtiments.

Ce deuxième document propose un arbre décisionnel reproduit sur la figure suivante afin d'évaluer les risques fongiques. Les détails concernant chaque méthode issue des normes et de la littérature sont spécifiés dans le premier rapport QSE.

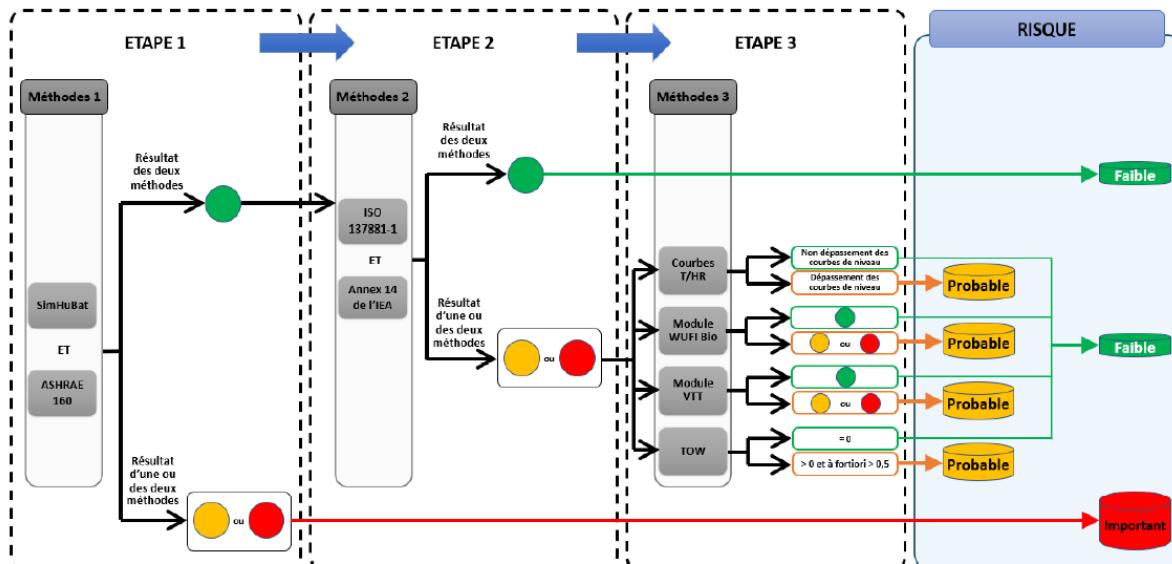


Figure 3: Arbre décisionnel pour l'évaluation du risque de développement fongique par étapes, issu du projet PROFEEL - QSE

Pour information, les normes et textes considérés sont notamment :

- La norme ASHRAE 160 [35],
- Le cahier technique du CSTB 3713 [22],
- Le guide SimHuBat [21],
- L'annexe 14 de l'IEA [25],
- L'indicateur VTT [27], [28], [29]
- L'indicateur TOW [26],
- La norme ISO 13788-1 [36].

2. ELABORATION DES PROTOCOLES THEORIQUES

2.1. Identification des points sensibles

L'élaboration des protocoles théoriques se base sur une analyse qualitative experte par lots constructifs pour chaque solution RESTORE étudiées. Le résultat de l'analyse est regroupé dans les tableaux suivants :

Lot constructif

3.2.1. Plancher de comble

Méthodes pour vérifier chaque point de contrôle

Solution RESTORE

Label Energie – Chambéry | Plancher de comble

Points de contrôle à vérifier		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Risque	Type		Références	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
Famille de risque	Risque mécanique	Vérification de la teneur en eau dans l'isolant	REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Installation de sondes de détection d'eau liquide dans l'isolant ou capteur T/HR	Valeur seuil à fixer	Vérification visuelle
		Vérification de la compatibilité de la masse de l'isolant avec le type de plafond suspendu a-t-elle été vérifiée ? Critère de compatibilité ?				
		Vérification de la fissuration du revêtement intérieur du plafond du dessous	Inspection visuelle			Sondre la façade à l'endroit des fissures (inspection visuelle)

Risque identifié

2.2. Protocoles théoriques

2.2.1. Plancher de comble

 Label Energie – Chambéry Plancher de comble						
Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
Risque mécanique	Affaissement du plancher sous le poids de l'isolation	Vérification de la teneur en eau dans l'isolant		Installation de sondes de détection d'eau liquide dans l'isolant ou capteur T/HR	Valeur seuil à fixer	Vérification visuelle
		Vérification de la compatibilité de la masse de l'isolant avec le type de plafond suspendu	La compatibilité de la masse de l'isolant avec le type de plafond suspendu a-t-elle été vérifiée ? Critère de compatibilité ?			

Label Energie – Chambéry Plancher de comble						
Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
		Vérification de la fissuration du revêtement intérieur du plafond du dessous	Inspection visuelle			Sondre la façade à l'endroit des fissures (inspection visuelle)
		Vérification de la criticité de la fissure				Si apparition d'une fissure --> mesurer la largeur de la fissure avec un fissuromètre
		Détermination de la vitesse d'évolution de la fissuration du revêtement intérieur				Installation de jauge de fissuration de part de d'autre de la direction de la fissure pour déterminer sa vitesse de propagation
Risque incendie	Propagation du feu	Vérification de l'absence de contact entre l'isolant	Vérification de l'absence de contact			

 Label Energie – Chambéry Plancher de comble						
Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
		et le conduit de cheminée	entre l'isolant et le conduit de cheminée			
Risque d'infiltration par la toiture	Développement de moisissures dans l'isolant	Vérification de la teneur en eau dans l'isolant		Installation de sondes de détection d'eau liquide dans l'isolant ou capteur T/HR	Valeur seuil à fixer	Vérification visuelle
	Dégradation de la toiture	Vérification de l'état des tuiles				Vérification visuelle
	Dégradation de la toiture	Vérification de la teneur en eau de la charpente		Installation de capteur de teneur en eau du bois de charpente	Valeur seuil à fixer	

 <h2>Label Energie – Chambéry Plancher de comble</h2>						
Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
Risque sur l'efficacité des travaux d'isolation	Dégradation de la performance thermique	Suivi du tassement de l'isolant		Installation de régllet sur la toiture pendant les travaux (mesures avant et après - suivi)		Vérification visuelle + relevé de la mesure du régllet
		Vérification de mise en œuvre jonctions murs/toiture	PROTOCOLE QUALITE Les jonctions sont-elles conformes au document de référence avec un adhésif adéquat ? Si non, préciser les éléments de non-conformité : Comment est traité le pont thermique entre les murs et le plancher de combles perdus ?			Mesure caméra thermique (éventuellement commune au protocole SEREINE)

Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
		Vérification de l'étanchéité de l'écran de sous-toiture		Installation de sondes de détection d'eau liquide dans l'isolant (pas forcément dans le bois de charpente) ou capteur T/HR	Valeur seuil à fixer	Vérification visuelle (check-list)

2.2.2. Plancher bas

 **Label Energie – Chambéry | Plancher bas**

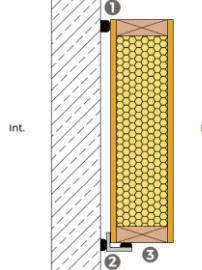
Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
Risque mécanique	Arrachement des fixations	Vérification de la résistance à l'arrachement des fixations	Résultats de l'essai de résistance à l'arrachement si réalisé ?			Vérification visuelle (critère à identifier)
	Affaissement des plaques d'isolant	Mesure de l'affaissement des plaques d'isolant				Vérification visuelle (check-list)
Risque sur l'efficacité des travaux d'isolation	Dégénération de la performance thermique due au transfert d'air	Vérification de l'étanchéité entre les panneaux d'isolant	Mesure de la taille des joints en fin de chantier			Mesure caméra thermique (éventuellement commune avec le protocole SEREINE) ou vérification visuelle

 <h2>Baticok Plancher bas</h2>						
Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
Risque mécanique	Arrachement des fixations	Vérification de la résistance à l'arrachement des fixations	Résultats de l'essai de résistance à l'arrachement si réalisé			Vérification visuelle (critère à identifier)
	Affaissement des plaques d'isolant	Mesure de l'affaissement des plaques d'isolant				Vérification visuelle (check-list)
Risque sur l'efficacité des travaux d'isolation	Dégénération de la performance thermique due au transfert d'air	Vérification de l'étanchéité entre les panneaux d'isolant	Mesure de la taille des joints en fin de chantier			Mesure caméra thermique (éventuellement commune avec le protocole SEREINE) ou vérification visuelle

2.2.3. Mur préfabriqué

 **Label Energie – Chambéry | Mur préfabriqué**

Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
Risque mécanique	Arrachement des fixations	Vérification de la résistance à l'arrachage des fixations	Résultats de l'essai de résistance à l'arrachement si réalisé			Vérification visuelle
	Affaissement du bâtiment	Mesure de l'affaissement du bâtiment				
Risque sur l'efficacité des travaux d'isolation	Dégradation de la performance thermique due aux	Vérification de l'étanchéité à l'air des caissons		Installation d'un capteur T/HR à l'intérieur des caissons, au contact avec la fibre de bois (côté mur)	Seuil d'HR à établir + évolution suspecte	

Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation				
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)	
	transferts d'air	Vérification de l'étanchéité à l'air entre le caisson et le mur	Résultats de la vérification de l'étanchéité à l'air entre le caisson et le mur sur les trois points du schéma	Installation d'un capteur T/HR dans la lame d'air, selon faisabilité 			Vérification visuelle du bon calfeutrement

 <h2>Label Energie – Chambéry Mur préfabriqué</h2>						
Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
		Vérification de l'étanchéité à l'air entre les caissons	Résultats de la vérification de l'étanchéité à l'air entre les caissons			Vérification de l'état du pare-pluie avec caméra endoscopique derrière le bardage, selon faisabilité
		Vérification d'absence de pont thermique entre le mur et la toiture	Vérification selon le protocole de contrôle qualité			Mesure caméra thermique
		Vérification de la descente de l'isolation entre le bas des caissons et le sol	Vérification de la descente d'isolation de 30 cm avec un matériau obligatoirement non sensible à l'eau			Vérification visuelle de la bonne protection de l'isolant et de l'état de l'étanchéité

Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
		Vérification de la jonction caisson / fenêtre		Installation d'un capteur d'eau liquide au niveau des bas des fenêtres, selon faisabilité et de sorte qu'il ne soit pas au contact d'éléments métalliques		Vérification visuelle de l'absence de traces d'humidité sur/aux abords des menuiseries
Risque esthétique	Dégénération du bardage extérieur	Vérification visuelle de l'état extérieur				Vérification visuelle (check-list)



Lille | Mur préfabriqué (rénovation)

Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
Risque sur l'efficacité des travaux d'isolation	Dégénération de la performance thermique due aux transferts d'air	Vérification des jointures des blocs de béton au niveau des points singuliers				Vérification des ponts thermiques avec la caméra thermique au niveau des points singuliers (fenêtre, coin, jonction mur/toiture)
Risque de pourrissement du béton de chanvre	Infiltration et prise en eau des blocs de béton de chanvre	Mesure de la présence d'eau liquide à la jonction et au bas de la fenêtre/haut du mur		Installation d'une sonde de détection d'eau liquide au niveau de la jonction et au bas de la fenêtre/haut du mur	Etablir un seuil + suivi de l'évolution	
		Mesure T/HR dans le mur d'origine à l'interface avec les blocs de béton de chanvre		Installation d'un capteur T/HR à l'interface entre le mur d'origine et les blocs de béton de chanvre	Etablir un seuil + suivi de l'évolution	

 <h2>Lille Mur préfabriqué (neuf)</h2>						
Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
Risque sur l'efficacité des travaux d'isolation	Dégénération de la performance thermique due aux transferts d'air	Vérification des jointures des blocs de béton au niveau des points singuliers				Vérification des ponts thermiques avec la caméra thermique au niveau des points singuliers (fenêtre, coin, jonction mur/toiture)
		Vérification de l'étanchéité entre les caissons d'isolant	Vérification de la liaison entre les caissons avant la pose du pare-pluie			
Risque de pourrissement du béton de chanvre	Infiltration et prise en eau des blocs de béton de chanvre	Mesure de la présence d'eau liquide à la jonction et au bas de la fenêtre/haut du mur		Installation d'une sonde de détection d'eau liquide au niveau de la jonction et au bas de la fenêtre/haut du mur, selon faisabilité		

Lille Mur préfabriqué (neuf)						
Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
		Teneur en eau initiale du béton de chanvre	Mesure de l'état hydrique du béton de chanvre dans les caissons avant la fermeture			
		Tassement du béton de chanvre à l'intérieur des caissons	Vérification visuelle du tassement du béton de chanvre à l'intérieur des caissons ayant pour cause les vibrations durant le transport			
		Mesure T/HR dans le mur d'origine à l'interface avec les blocs de béton de chanvre		Installation d'un capteur T/HR à l'interface entre le mur d'origine et les blocs de béton de chanvre		

2.2.4. Mur

 Baticok Mur						
Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
Risque mécanique	Arrachement des fixations	Vérification de la résistance à l'arrachage des fixations	Résultats de l'essai de résistance à l'arrachement si réalisé			Inspection visuelle
Risque sur l'efficacité des travaux d'isolation	Dégradation de la performance thermique due aux transferts d'air	Vérification de l'étanchéité à l'air des caissons		Installation d'un capteur T/HR dans la ouate de cellulose, côté intérieur (lors de la fabrication en usine)	Valeur seuil à fixer + suivi de l'évolution	
		Vérification de l'étanchéité à l'air entre le pare pluie rigide (panneau de fibre de bois) et le mur	Résultats de la vérification de l'étanchéité à l'air entre le pare pluie rigide (panneau de fibre de bois) et le mur	Installation d'un capteur T/HR entre la ouate de cellulose et le panneau de fibre de bois	Valeur seuil à fixer + suivi de l'évolution	

 Baticok Mur						
Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
		Vérification de l'étanchéité entre les caissons	Vérification des jonctions pendant le chantier, avant la pose du pare-pluie			
		Vérification de la bonne ventilation de la lame d'air				Vérification visuelle
		Vérification d'absence de pont thermique entre le mur et la toiture	Vérification selon le protocole de contrôle qualité			Mesure caméra thermique
		Vérification de la jonction caisson / fenêtre		Installation d'un capteur d'eau liquide au niveau des bas des fenêtres, selon la faisabilité		Inspection de traces de condensation sur la surface intérieure du pourtour de la fenêtre

 Baticok Mur						
Risque		Type d'évaluation	Moyen d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
Risque esthétique	Dégradation du bardage extérieur	Vérification visuelle de l'état extérieur				Vérification visuelle (check-list)

2.2.5. Toiture

 Lille Toiture						
Risque		Type d'évaluation	Méthode d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
Risque mécanique	Affaissement de la charpente sous le poids de l'isolation	Mesure de la teneur en eau de l'isolant		Installation d'un capteur d'eau liquide dans l'isolant au contact avec la membrane HPV ou bitumineuse / ou capteur T/HR		
		Mesure de la teneur en eau du bois de charpente		Installation de capteur teneur en eau dans les chevrons		
		Mesure de la teneur en eau de l'écran de sous-toiture en fibre de bois		Installation d'un capteur d'eau liquide dans l'écran de sous-toiture en fibre de bois		
Risque incendie		Vérification de l'absence de contact	Vérification selon le protocole de contrôle qualité			

 Lille Toiture						
Risque		Type d'évaluation	Méthode d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
		entre l'isolant et le conduit de cheminée				
Risque de pourrissement de l'isolant	Développement de moisissures dans l'isolant	Mesure de la teneur en eau de l'isolant		Installation d'un capteur T/HR entre les deux couches de fibre de bois		
Risque sur l'efficacité des travaux d'isolation	Dégénération de la performance thermique due aux transferts d'air	Vérification d'absence de pont thermique aux jonctions mur / toiture	Vérification selon le protocole de contrôle qualité			Inspection visuelle (check liste)

 Baticok Toiture						
Risque		Type d'évaluation	Méthode d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
Risque mécanique		Vérification de la teneur en eau dans l'isolant		Installation d'un capteur d'eau liquide dans l'isolant ou capteur T/HR	Valeur seuil à fixer + suivi de l'évolution ; deux seuils à regarder (risques mécaniques + développement fongique)	
		Vérification de la teneur en eau dans la charpente en bois		Installation d'un capteur d'eau liquide dans le bois de charpente	Valeur seuil à fixer	
Risque incendie		Vérification de l'absence de contact entre l'isolant et le conduit de cheminée	Vérification selon le protocole de contrôle qualité			
Risque de pourrissement	Développement	Vérification de la teneur en eau dans l'isolant		Installation d'un capteur d'eau liquide dans	Vérification de dépassement des seuils de risque de développement	

 Baticok Toiture						
Risque		Type d'évaluation	Méthode d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
ent de l'isolant	moisissures dans l'isolant			l'isolant ou capteur T/HR	fungique (numériquement)	
Risque sur l'efficacité des travaux d'isolation	Dégradation de la performance thermique due au transfert d'air	Vérification d'absence de pont thermique aux jonctions mur / toiture	Vérification selon le protocole de contrôle qualité			Mesure caméra thermique
		Vérification du tassement des isolants en rampant / haut des murs				Mesure caméra thermique
		Vérification de la continuité de la membrane pare-vapeur mise en place par l'extérieur avant la pose des caissons.	Vérification selon le protocole de contrôle qualité			



Baticok | Toiture

Risque		Type d'évaluation	Méthode d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
	Vérification de l'état de la membrane HPV.		Vérification selon le protocole de contrôle qualité de la continuité à la jonction mur / toiture			Vérification via caméra endoscopique dans les lames d'air, si accessible

2.2.6. Toiture préfabriquée

 Baticok Toiture préfabriquée						
Risque		Type d'évaluation	Méthode d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
Risque mécanique	Affaissement de la charpente sous le poids des caissons	Vérification de la teneur en eau dans l'isolant		Installation d'un capteur d'eau liquide dans l'isolant ou capteur T/HR	Valeur seuil à fixer + suivi de l'évolution ; deux seuils à regarder (risques mécaniques + développement fongique)	
		Vérification de la teneur en eau dans la charpente en bois		Installation d'un capteur d'eau liquide dans le bois de charpente	Valeur seuil à fixer + suivi de l'évolution ; deux seuils à regarder (risques mécaniques + développement fongique)	
		Vérification de la teneur en eau dans		Installation d'un capteur d'eau liquide dans	Valeur seuil à fixer + suivi de l'évolution ; deux seuils à regarder (risques mécaniques +	

 Baticok Toiture préfabriquée						
Risque		Type d'évaluation	Méthode d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
		l'écran de sous-toiture en fibre de bois		l'écran de sous-toiture en fibre de bois	développement fongique)	
Risque incendie		Vérification de l'absence de contact entre l'isolant et le conduit de cheminée	Vérification selon le protocole de contrôle qualité			
Risque de pourrissement de l'isolant	Développement de moisissures dans l'isolant	Vérification de la teneur en eau dans l'isolant		Capteur T/HR	Vérification de dépassement des seuils de risque de développement fongique (numériquement)	



Baticok | Toiture préfabriquée

Risque		Type d'évaluation	Méthode d'évaluation			
Type	Nature		REX mise en œuvre / Qualité (via Questionnaire)	Instrumentation	Post-traitement des données mesurées	Inspection (vérification visuelle, mesure ponctuelle ou questionnaires)
Risque sur l'efficacité des travaux d'isolation	Dégradation de la performance thermique due aux transferts d'air	Vérification d'absence de pont thermique aux jonctions mur / toiture	Vérification selon le protocole de contrôle qualité			

3. ELABORATION DES PROTOCOLES SIMPLIFIES

3.1. Chantier AGNEAUX - Baticok 2

3.1.1. Description de la rénovation

Le chantier concerne une maison du type Maison jumelée ou en bande 1975-1981 (type B4.2 de la typologie RESTORE¹) de 132,7 m² située à Agneaux (50) en Normandie.

La maison date de 1981 et possède un étage, des combles aménagés, présente une mitoyenneté côté garage et n'a pas de sous-sol.

Pour en savoir plus sur le projet de rénovation la fiche chantier est disponible en ligne : [Fiche chantier de rénovation globale à Agneaux \(50\) - Réalisation, suivi et analyse de la mise en œuvre.](#)



Figure 4 : Photos de la maison d'Agneaux. Avant (gauche) et après (droite) rénovation.

La solution de rénovation² Baticok 2 se compose d'éléments d'ITE préfabriqués en atelier et installés manuellement sur site directement sur la maçonnerie ou la charpente existante. Les panneaux d'ITE préfabriqués sont composés comme suit :

- Isolation des murs
 - Support d'isolation : ossature en épicéa traité rabotée, 45/145 mm, entretoisée tous les 60 cm.
 - Contreventement Intérieur : panneaux agglomérés avec revêtement étanche à l'air posé en face intérieure des murs.
 - Pare-pluie : panneau fibre de bois rigide d'épaisseur 60 mm, $R = 1.42 \text{ m}^2.\text{K/W}$, ACERMI.

¹ [Maison jumelée ou en bande 1975-1981 - B4.2 - Fiche RESTORE - Pro'Réno](#)

² [Module présentation de solution Baticok 2 - Pro'Réno](#)

- Isolation : ouate de cellulose insufflée, 55 kg/m³, de 145 mm, R = 3,72 m².K/W, ACERMI.
- Revêtement : bardage douglas en pose verticale pour les façades et enduit ETICS pour les pignons.
- Isolation de toiture
 - Support d'isolation : ossature en épicéa traité rabotée, 45/145 mm, entretoisée tous les 60 cm.
 - Contreventement de toiture : Panneaux agglomérés avec revêtement étanche à l'air posé en sous face intérieure de la toiture.
 - Pare-pluie : Pare-pluie : panneau fibre de bois rigide d'épaisseur 60 mm avec contrelattes 60/40 mm, R = 1.42 m².K/W, ACERMI.
 - Isolant : ouate de cellulose insufflée dans l'épaisseur des chevrons porteurs, 55 kg/m³, R = 5.64 m².K/W, épaisseur 22 cm, ACERMI.

Les principales interfaces traitées sont :

- Jonction de la toiture du garage avec la maison mitoyenne.
- Continuité de l'isolation entre mur et toiture.
- Étanchéité à l'air entre menuiseries et mur en bois.
- Étanchéité à l'air à la périphérie des percées des équipements CVC (conduit du poêle, sorties de ventilation...) dans l'enveloppe de panneaux préfabriqués.
- Isolation du soubassement en panneaux liège apparent de 140 mm, R=3,5 m².K/W, sur une hauteur de 500 mm dont 300 mm enterré et 200 mm hors sol.

L'espace du garage, non chauffé, a également été isolé par la mise en œuvre d'un isolant mixte chanvre-lin-coton de 145 mm (R = 3,7 m².K/W) sur les parois et de 120 mm en sous-face du plafond (R = 3,15 m².K/W) associé à une membrane d'étanchéité à l'air HPV.

3.1.2. Description de l'instrumentation

La localisation des capteurs implantés dans les parois est donnée Figure 5. Les détails d'installation des différents capteurs sont donnés Figure 6.

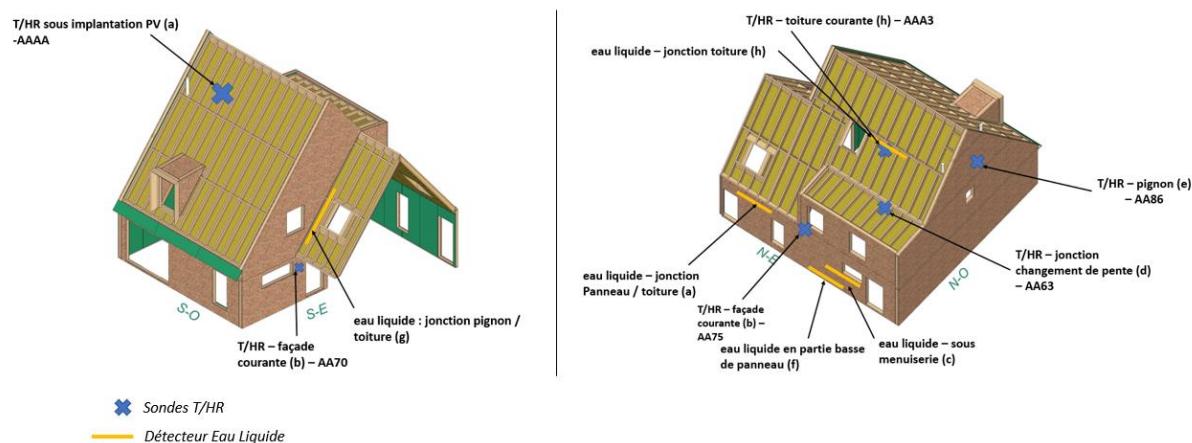


Figure 5 : Schéma d'implantation des capteurs - Agneaux.

Afin de vérifier que les conditions hygrométriques à l'intérieur de la ouate insufflée ne dépassent pas les seuils de risque de condensation et de développement fongique, des sondes déportées ont été installées dans différentes parois du bâtiment présentant des risques d'accumulation d'eau. En particulier au niveau des zones d'interface telles que : les zones de raccordement mur / toiture, les zones sous menuiseries, les changements de pente de toiture, les façades les plus exposées à l'accumulation d'humidité (zone sous toiture du garage en façade S-E, zone de toiture sous implantation panneaux photovoltaïques).

L'implantation des détecteurs d'eau a été réalisée selon les mêmes modalités. Un capteur supplémentaire a été positionné en partie basse de la façade afin d'identifier d'éventuelles problématiques de remontées capillaires dans l'isolant.

Les détecteurs d'eau liquide ont été installés en atelier au moment de la préfabrication des panneaux afin d'être parfaitement intégrés à la ouate insufflée (Figure 7.a). Les sondes T/HR ont été installées sur chantier par perçage des panneaux côté intérieur (Figure 7.b).

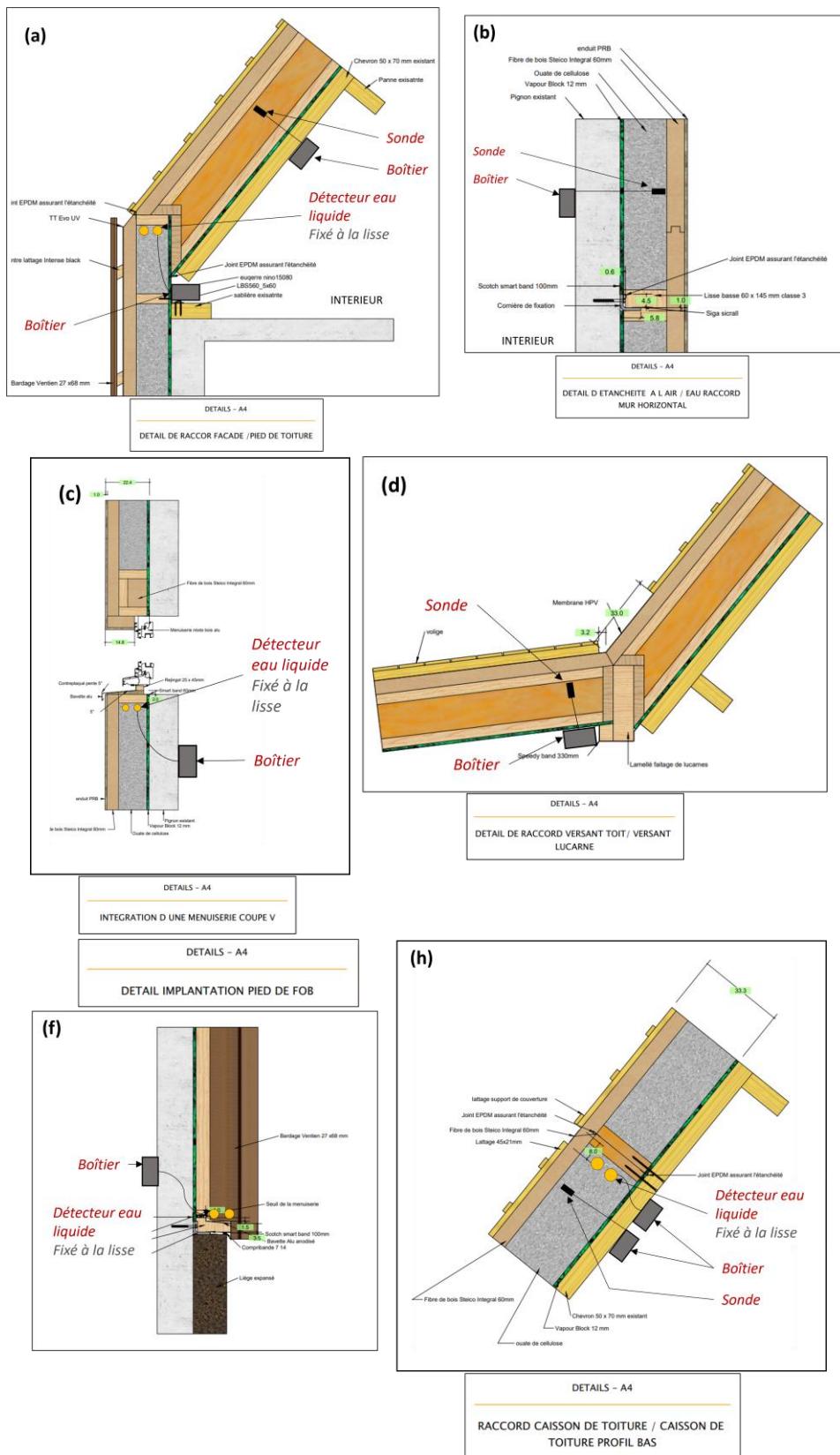


Figure 6 : Schéma d'installation des capteurs - Agneaux

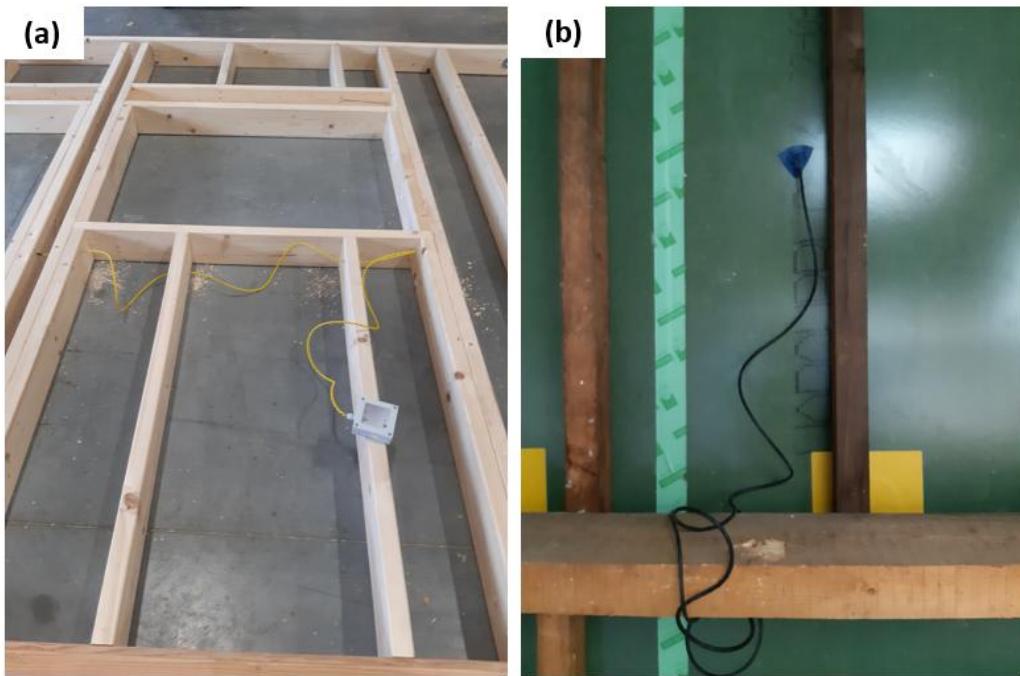


Figure 7 : Photos d'installation d'un détecteur d'eau liquide (a) et d'une sonde T/HR en toiture (b).

3.1.3. Analyse des données

3.1.4. Capteurs de détection d'eau liquide

Les capteurs de détection d'eau liquide n'ont renvoyé aucune alerte de fuite. Aucune présence d'eau liquide n'a donc été détectée dans la paroi.

3.1.5. Capteurs T/HR intégrés dans l'isolant

Le chantier d'Agneaux ayant bénéficié de mesures réalisées sur 10 mois, il a été possible de les comparer avec les simulations réalisées lors de l'analyse de risque initiale, dont les paramètres ont été ajustés pour se rapprocher des cas réels correspondant à chaque capteur (typologie de paroi et climats intérieur et extérieur).

Il est à noter que les différents cas considérés lors de l'étude de risque initiale n'avaient pas montré de risque spécifique au niveau de l'isolant en ouate de cellulose (pas de risque d'accumulation d'humidité importante au cours du temps et pas d'alerte spécifique sur un éventuel risque de développement fongique aux vues des teneurs en eau massiques restant bien inférieures au seuil de 23 %M du **guide technique SimHuBat – Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température / humidité dans les parois de bâtiments.**).

Cette partie présente ainsi :

- Les nouvelles configurations de parois dont les paramètres ont été ajustés pour correspondre aux spécificités des parois dans lesquels ont été implantés les capteurs T/HR sur le chantier d'Agneaux ;
- Les résultats des comparaisons entre ces nouvelles simulations et les données réelles relevées par les capteurs dans les parois.

3.1.6. Configurations de parois et hypothèses considérées pour les simulations numériques

Les modalités de réalisation de ces simulations sont les mêmes que celles définies dans le rapport d'étude hygrothermique « Chantier AGNEAUX de type Baticok 2 » (méthodologie, fichiers matériaux, etc.), moyennant quelques ajustements (parois, fichiers climats, etc.) pour se rapprocher des cas réels correspondant à chaque capteur. Les hypothèses prises en compte émanent ainsi du guide technique *SimHuBat – Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température / humidité dans les parois de bâtiments*.

Les modélisations sont réalisées en monodimensionnel (1D) représentant la partie de la paroi propre à l'emplacement des capteurs.

Les ajustements de paramètres communs à l'ensemble des nouvelles modélisations sont les suivants :

- Les conditions aux limites génériques du modèle ont été remplacées par les données réelles mesurées sur site (sur la période considérée de 10 mois, au pas de temps horaire) :
 - o Les données climatiques extérieures sont issues de la station météo installée sur la parcelle de la maison. Celle-ci ne disposant pas d'un anémomètre, ces données sont issues d'une station météo proche (Saint-Lô - 50000). Par ailleurs, la décomposition du rayonnement solaire global est approchée via le modèle Perez à partir des mesures de rayonnement global horizontal fourni par la station météo.
 - o Les conditions intérieures (température et humidité relative) sont celles issues des thermohygromètres d'ambiance intérieure installés dans les pièces correspondantes aux points de mesure dans les parois (ou dans la pièce la plus proche sinon).
- Pour les parois verticales, les effets du rayonnement courtes longueurs d'onde (solaire) sont pris en compte sans ombrage aux vues de l'absence de masques conséquents aux abords de la maison. Le coefficient d'absorption solaire α_e est spécifique à chaque cas selon la teinte du parement extérieur et est précisé dans le tableau des configurations calculées. Dans l'étude de risque initiale, un coefficient générique α_e égal à 0,21 était considéré (teinte moyenne avec prise en compte d'un ombrage).
- En toiture, α_e est pris égal à 0,675 comme dans le cas de l'étude initiale (modèle de lame d'air ventilé sous couverture).
- Par ailleurs l'humidité relative initiale des composants de la paroi, fixée par défaut à 80 %HR dans l'ensemble de la paroi, est ici ajustée pour la ouate de cellulose pour laquelle elle est connue via les capteurs T/HR.

Les ajustements spécifiques à chaque cas étudié sont quant à eux précisés dans le Tableau 1.

La Figure 8 présente l'implantation des capteurs au sein des parois, correspondant à autant de configurations spécifiques pour les simulations numériques. Dans tous les cas, le capteur est inséré dans la ouate de cellulose à l'interface avec le pare-pluie rigide (côté extérieur) (Figure).

Les trois premiers cas concernent des parois verticales, les trois suivants concernent des toitures.

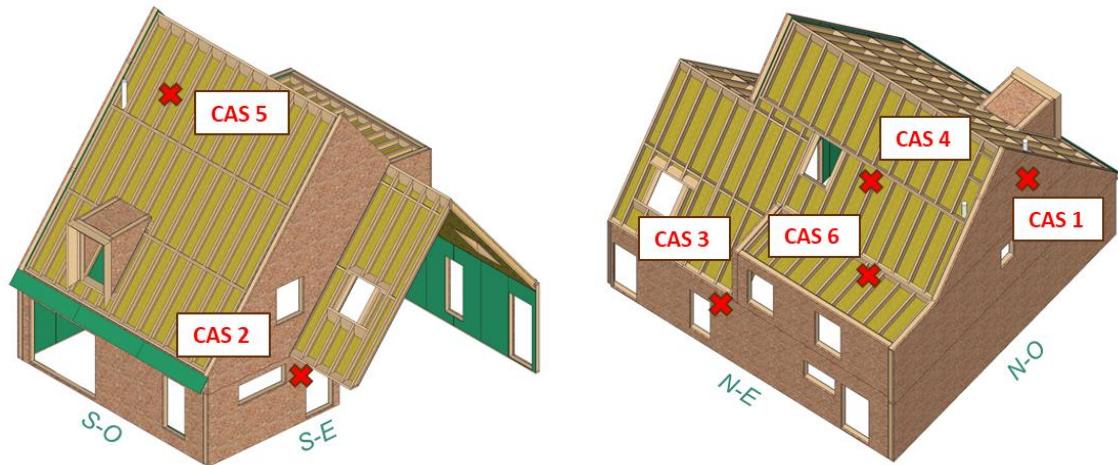
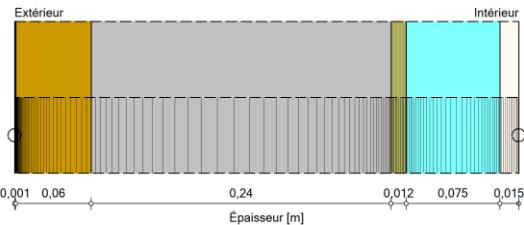
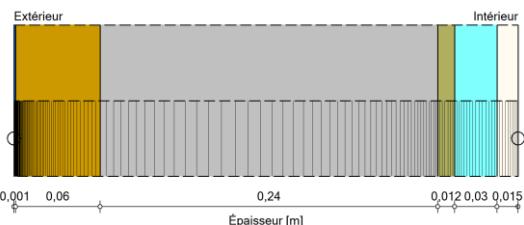


Figure 8 : Localisation des cas étudiés

Tableau 1 : Description des différentes configurations calculées.

Cas (et n° capteur)	Schéma	Localisation & orientation	Spécificités par rapport à l'étude de risque initiale	HR initiale de la ouate
1 (AA86)	<p>Cas : #1 Cas-1(AA86)_V1 - Pignon N-O haut</p> <p>Extérieur</p> <p>Intérieur</p> <p>0,006 0,06 0,15 0,012</p> <p>Épaisseur [m]</p> <p>Enduit ETICS (6 mm), Panneau* (ouate 150 mm)</p>	<p>Pignon</p> <p>-</p> <p>Nord-Ouest</p>	<p>Pas de mur support au niveau du capteur</p> <p>-</p> <p>$\alpha_e = 0,3$</p> <p>-</p> <p>Climat int. « combles »</p>	<p>HR(0)</p> <p>= 81,0 %</p>

Cas (et n° capteur)	Schéma	Localisation & orientation	Spécificités par rapport à l'étude de risque initiale	HR initiale de la ouate
5 (AAAA)	<p>Cas : #2 Cas-5(AAAA)_V1 - Toit S-O</p>  <p>Panneau* (ouate 240 mm), Lame d'air (75 mm), Plaque de plâtre (15 mm)</p> <p>(Couverture et lame d'air ventilée non représentées)</p>	<p>Toiture courante</p> <p>-</p> <p>Sud-Ouest</p>	<p>Inclinaison toiture : 50°</p> <p>-</p> <p>Climat int. « Combles »</p>	<p>HR(0)</p> <p>= 65,0 %</p>
6 (AA63)	<p>Cas : #1 Cas-6(AA63)_V1 - Toit N-E Lucarne</p>  <p>Ecran souple de sous-toiture HPV, Panneau* (ouate 240 mm), Lame d'air (30 mm), Plaque de plâtre (15 mm)</p> <p>(Couverture et lame d'air ventilée non représentées)</p>	<p>Toiture faible pente (5°) de la lucarne</p> <p>-</p> <p>Nord-Est</p>	<p>Climat int. « chambre 1 »</p>	<p>HR(0)</p> <p>= 69,1 %</p>

*Le panneau préfabriqué comprend : Pare-pluie rigide fibre de bois (60 mm), Ouate insufflée (150 mm en mur, 240 mm en toiture), Panneau aggloméré avec revêtement étanche à l'air (12 mm).

Quelques cas de figure sont illustrés Figure 9.

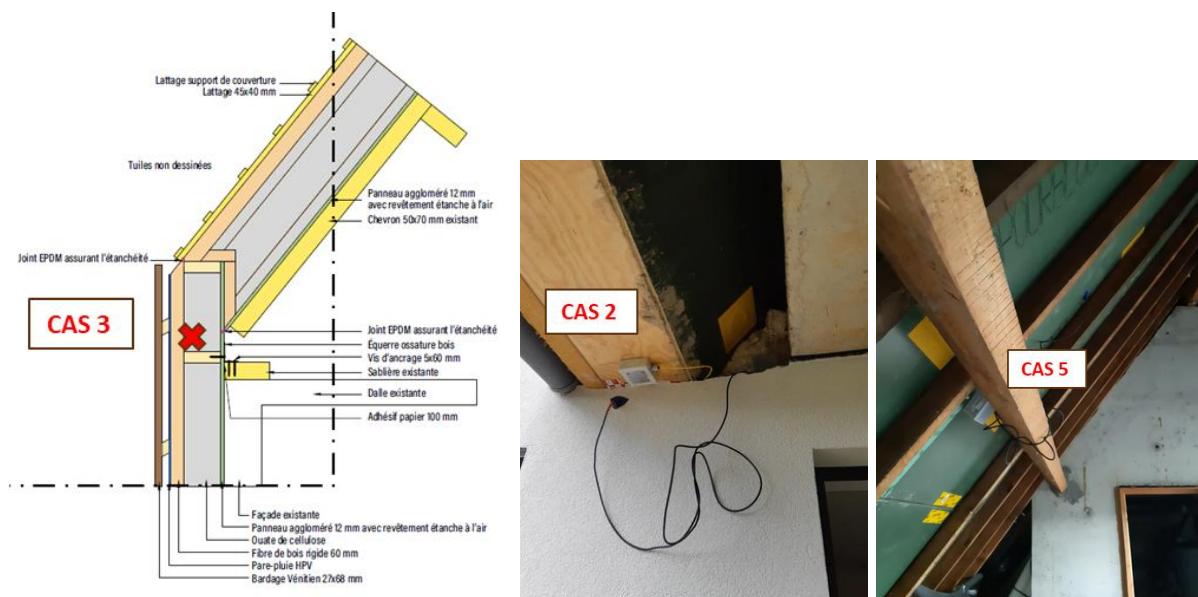


Figure 9 : Illustration des emplacements de capteurs pour les cas 2, 3 et 5

3.1.7. Résultats

L'analyse des données de mesure des instrumentations doit être menée en tenant compte des limites imposées par les contraintes techniques et opérationnelles de ce type d'approche pratique. Ainsi certaines données peuvent s'avérer manquantes ou incomplètes telles que :

- L'emplacement exact du capteur dans l'épaisseur de la paroi : dans les premiers centimètres de l'isolant au contact du pare-pluie rigide mais non précisément déterminé ;
- Les informations concernant les parois existantes peuvent parfois s'avérer approximatives : variations de la composition de la paroi suivant la façade considérée, épaisseurs exactes d'isolant, spécificités locales au voisinage du capteur, etc. ;
- Les propriétés propres des matériaux utilisés sur chantier : des données génériques sont considérées en l'absence de caractérisation fine en laboratoire ;
- Les teneurs en eau initiales dans les matériaux mis en œuvre : des données génériques sont utilisées ;
- Les données de mesure ne sont disponibles que sur un temps relativement court (une année) ne permettant pas de s'affranchir de l'influence des conditions initiales, qui sont peu connues ;
- Les capteurs ne sont placés qu'à une seule profondeur dans la paroi donc une seule interface, ne permettant pas de comparer les évolutions à d'autres interfaces ou profondeurs pour un avoir une vision plus globale.

Ainsi les sources d'incertitude sont ainsi nombreuses et demandent d'être prudent lors de l'interprétation des résultats.

Il est cependant possible de vérifier les tendances en termes d'évolution temporelle de l'humidité relative, de la teneur en eau, et de la température, entre données expérimentales relevées par les sondes et données issues des simulations numériques.

Une seule interface est instrumentée ici (les 6 sondes sont placées dans l'isolant à l'interface avec le pare-pluie rigide), cependant plusieurs points d'observations sont choisis pour les résultats relatifs aux simulations numériques. Ceux-ci sont situés au sein de l'isolant afin de visualiser le comportement attendu dans la globalité et les variations possibles selon les points d'observation :

- Ouate à l'interface du pare-pluie rigide (0 à 5 mm ou 0 à 20 mm) : zone représentative de l'emplacement théorique de la sonde ;
- Ouate à l'interface du pare-pluie rigide (20 à 50 mm) : zone légèrement plus éloignée du pare-pluie rigide, pour point de comparaison représentatif d'une sonde placée moins profondément que prévu dans la paroi, ceci n'ayant pu être vérifié précisément ;
- Ouate globale : point de comparaison représentant le comportement théorique moyen dans l'ensemble de l'isolant ;
- Ouate à l'interface du panneau de contreventement intérieur (panneau aggloméré avec revêtement étanche à l'air) : point de comparaison du comportement théorique de la ouate du côté intérieur de la paroi (épaisseur de 5 mm en contact avec le contreventement).

La Figure 10 présente l'évolution des humidités relatives enregistrées par les sondes d'une part (courbes bleues) et obtenues par simulation numérique d'autre part (toutes les autres courbes).

Concernant les cas 1 et 3 (parois verticales), l'évolution sur les 4 premiers mois est cohérente entre sondes et résultats de simulation où un assèchement est observé. Les graphes des sondes sont en effet proches des graphes obtenus par simulation dans la zone des 5 premiers cm dans la ouate à l'interface du pare-pluie extérieur, en particulier de la zone de 20 à 50 mm (courbes rouges).

L'évolution à partir du printemps (mars-avril) est cependant beaucoup moins cohérente. Là où la simulation prévoit un assèchement de la ouate au voisinage du pare-pluie rigide, les sondes enregistrent une évolution inverse à savoir une augmentation significative d'humidité relative, particulièrement marquée dans le cas 1, et sortant des gammes de variation plausibles issues des simulations. Les nombreuses sources d'incertitudes déjà énoncées peuvent participer dans une large mesure à observer des écarts entre simulation et données de terrain, cependant une telle différence de tendances amène à une vigilance particulière. Elle pourrait avoir différentes causes : fuite d'eau ponctuelle au voisinage de la zone instrumentée amenant une élévation de l'humidité relative, problème de capteur, etc. Néanmoins, l'augmentation brutale d'humidité qui varie assez peu par la suite et le profil d'évolution plus proche de celui du graphe de simulation correspondant à la zone d'observation proche du contreventement intérieur, peuvent laisser soupçonner ici un possible tassement de l'isolant, donnant lieu à une chute de sa densité au voisinage du capteur voire à l'apparition d'un vide d'air. Ceci apparaît compatible avec la position du capteur, et possible compte-tenu des causes connues de ce phénomène :

- Vibrations lors du transport des panneaux et de leur mise en œuvre,
- Variations hygrothermiques durant leur vie en œuvre.

Un contrôle de cette hypothèse par thermographie IR est prévu.

Dans le cas 2 (paroi verticale également), le profil d'évolution global est plus cohérent entre sonde et simulation, amenant une moindre suspicion de tassement même si celui-ci ne peut être exclu au vu de l'assèchement moindre toujours constaté après le printemps.

Concernant les cas 4, 5 et 6 (toitures), l'évolution sur les 5 premiers mois peut laisser apparaître des divergences plus ou moins prononcées selon les cas. Les graphes des simulations, dans la zone de 5 premiers centimètres dans la ouate à l'interface du pare-pluie extérieur (courbes jaunes, vertes et rouge toujours), montrent une augmentation rapide sur le premier mois de simulation pour atteindre environ 80 %HR, avant de diminuer légèrement sur les mois suivants tout en restant dans un intervalle compris entre 70 et 80 %HR. Si la sonde du cas 5 montre un profil d'évolution similaire quoique moins marqué, les données des sondes des cas 4 et 6 montrent plutôt un assèchement sur les premiers mois. Il est délicat d'interpréter ces différences plus ou moins prononcées en fonction des sondes, notamment en raison de l'influence importante des conditions initiales en début de simulation qui sont ici inconnues pour la plupart des matériaux constitutifs de la paroi donc fixées par défaut. La disponibilité de données réelles T/HR sur plusieurs années concernant la sonde placée dans l'isolant permettrait de vérifier l'évolution de ces tendances sur plusieurs années en limitant l'effet des conditions initiales.

Les évolutions à partir du printemps apparaissent quant à elles cohérentes entre données mesurées et issues des simulations, et les courbes ne montrent pas de différences notables entre elles.

Il est cependant important de noter qu'**aucun des 6 capteurs ne présente de dépassement des seuils du guide SimHuBat**. D'après l'isotherme de sorption de la ouate considérée (ouate générique provenant de la base de données WUFI), le seuil à 23 %M du guide correspond à une humidité relative de 95 %HR.

Ce seuil n'est jamais atteint au cours de la période et les humidités relatives enregistrées en restent généralement éloignées, atteignant très occasionnellement les 90 %HR au maximum pour les cas 1 et 2.

De même que pour l'étude de risque réalisée initialement, aucun risque de détérioration de l'isolant n'est donc identifié concernant la ouate sur la première année après rénovation.

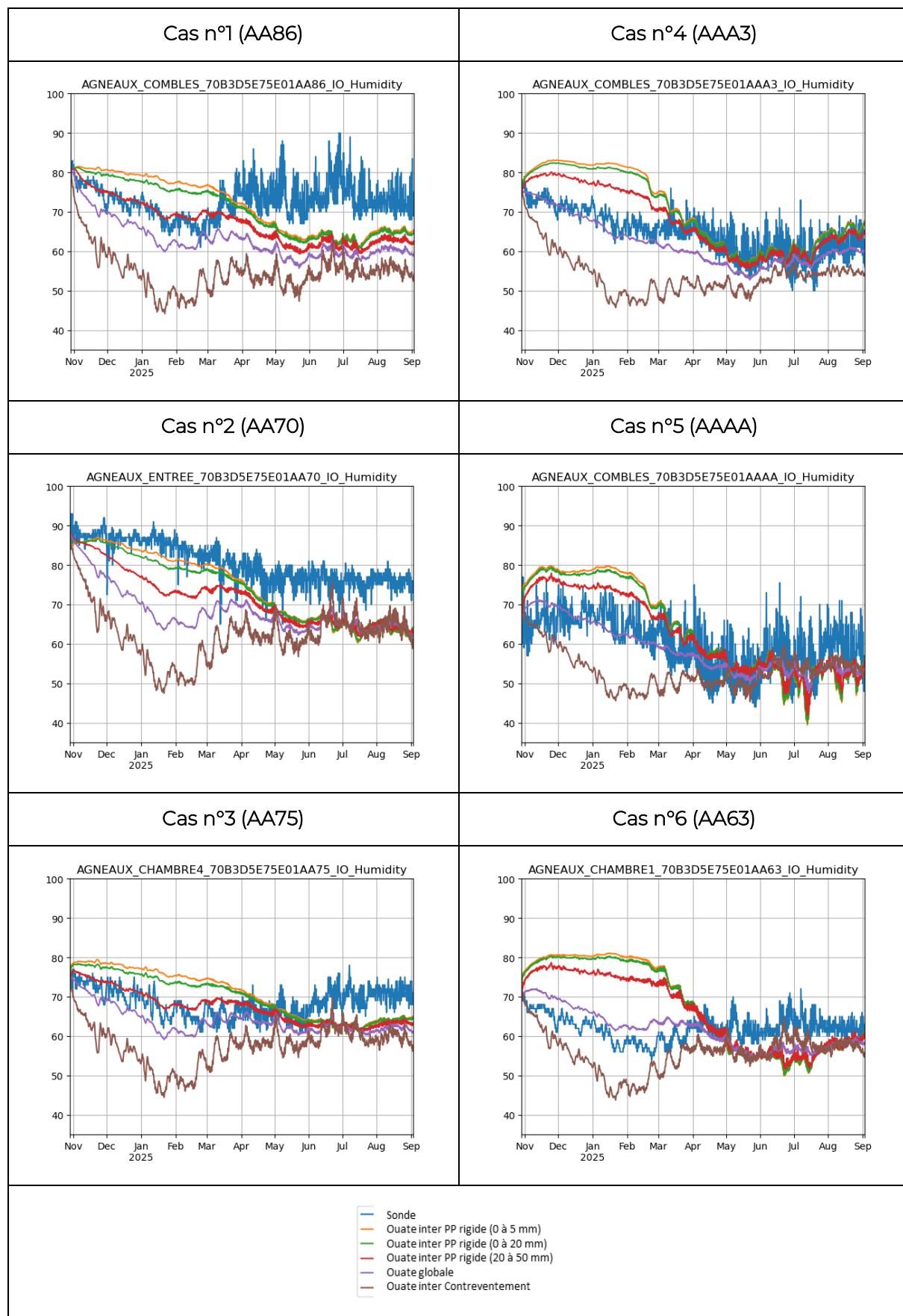


Figure 10 : Graphes comparatifs en humidité relative (%HR)

La Figure 11 présente l'évolution des teneurs en eau relatives aux sondes d'une part (courbes bleues) et obtenues par simulation numérique d'autre part (toutes les autres courbes).

Les teneurs en eau ne sont pas directement enregistrées par les sondes T/HR. Ce sont les isothermes de sorption de la ouate de cellulose (provenant du matériau générique utilisé pour les simulations) qui ont permis de transposer les humidités relatives en teneurs en eau massiques (%M). Ceci permet simplement une comparaison plus directe au seuil de 23 %M relatif au risque de développement fongique dans les matériaux biosourcés non structurels d'après le guide SimHuBat (ce seuil ne doit pas être dépassé plus de 8 semaines cumulées dans l'année, en ne comptabilisant que les périodes supérieures à une semaine).

Les graphes ainsi tracés mettent bien en évidence l'absence d'alerte spécifique quant à ce seuil. Les courbes bleues restent soit très loin du seuil quel que soit le moment de l'année (cas 3 à 6), soit montrent quelques pics dépassant occasionnellement la dizaine de % en masse. Il est à noter que plus les variations d'humidité relative se situent proche des 100 %HR plus l'impact sur la teneur en eau est important, à cause de la sorption qui varie de façon exponentielle aux humidités relatives élevées. Les pics importants constatés pour le cas 1 renforcent la suspicion de tassement de l'isolant, mais sont aussi à interpréter en tenant compte du fait que dans la réalité l'équilibre de sorption n'est pas instantané : un pic d'humidité relative très court n'occasionnera pas le pic théorique de teneur en eau obtenu par conversion directe via l'isotherme de sorption.

La Figure 12 présente l'évolution des températures enregistrées par les sondes d'une part (courbes bleues) et obtenues par simulation numérique d'autre part (toutes les autres courbes). Les données relevées par les sondes sont globalement cohérentes avec les données obtenues par simulation.

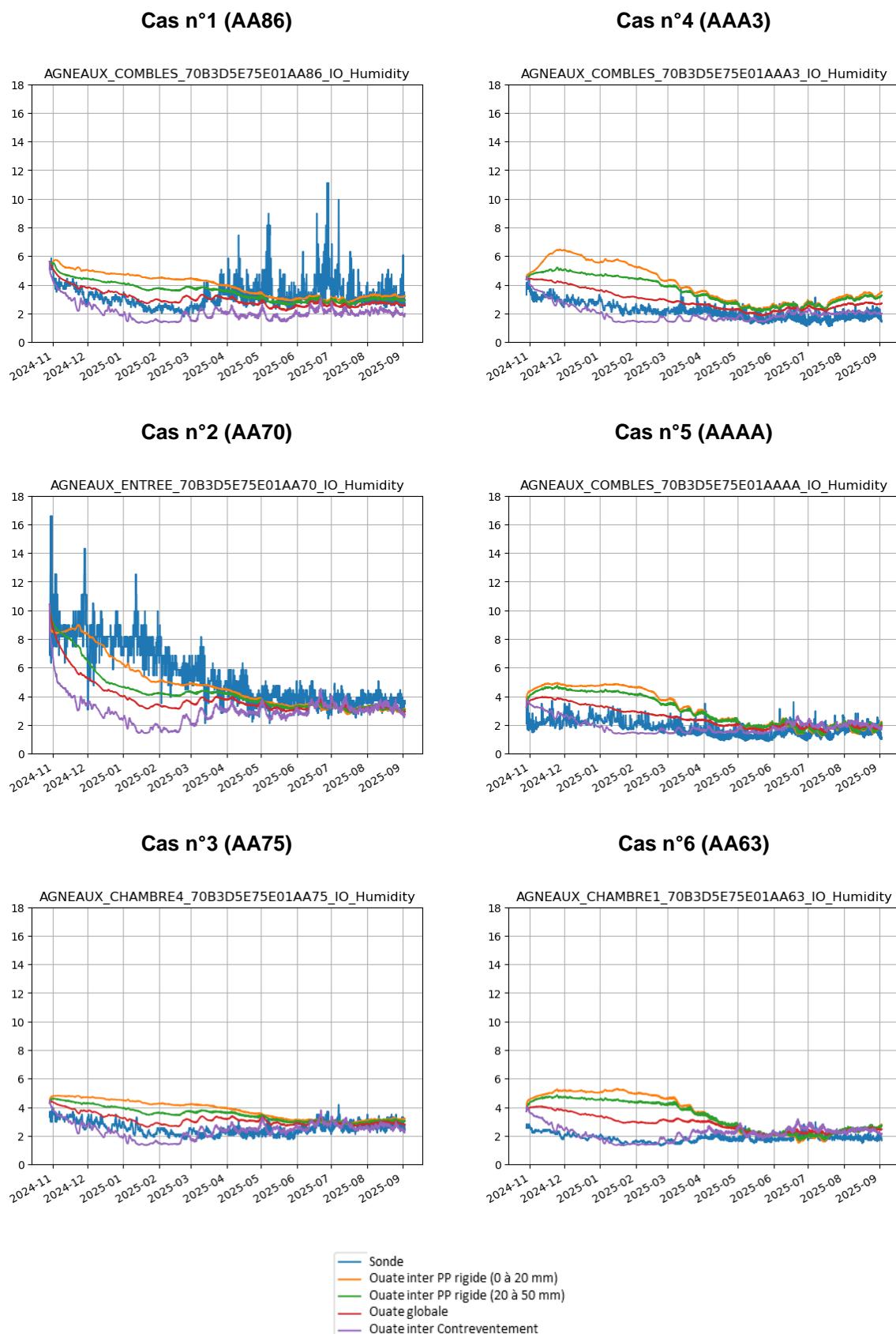


Figure 11 : Graphes comparatifs en teneur en eau massique (%M)

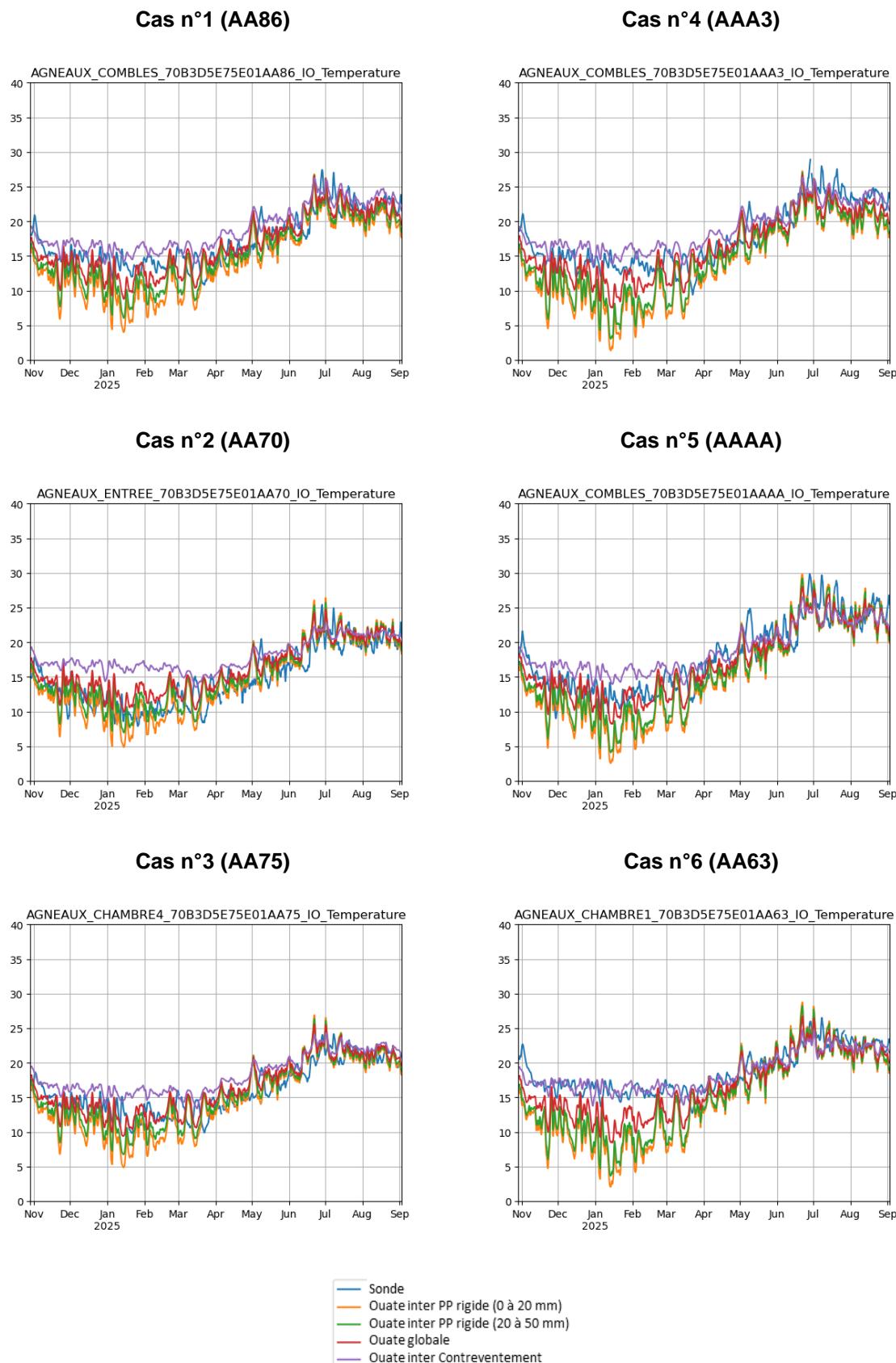


Figure 12: Graphes comparatifs en température (°C)

3.2. Chantier MESNIL-PATRY - Baticok 2

3.2.1. Description de la rénovation

Le chantier concerne la rénovation d'un bâtiment à usage agricole des années 50 d'une surface habitable de 150 m² (après travaux) située au Mesnil-Patry (14) dans la région Normandie.

La maison a été construite entre 1950 et 1960 et possède un étage, des combles perdus aménagés, ne présente pas de mitoyenneté côté et n'a pas de sous-sol.

Pour en savoir plus sur le projet de rénovation la fiche chantier est disponible en ligne : [Fiche chantier de rénovation globale à Mesnil-Patry \(14\) - Réalisation, suivi et analyse de la mise en œuvre.](#)



Figure 13 : Photos de la maison de Mesnil-Patry. Avant (gauche) et après (droite) rénovation.

La solution de rénovation³ Baticok 2 se compose d'éléments d'ITE préfabriqués en atelier installés sur site à l'aide d'une grue et fixés directement sur la maçonnerie. Pour ce chantier, seules les façades ont été isolées à l'aide d'éléments préfabriqués et la toiture a été isolé directement sur site sans recours à la préfabrication du fait de la proximité de l'atelier au chantier.

L'ITE mise en œuvre se compose comme suit :

- Isolation des murs par panneaux d'ITE préfabriqués en atelier (R = 5,14 m².K/W)
 - Support d'isolation : ossature en épicéa traité rabotée, 45/145 mm, entretoisée tous les 60 cm.
 - Contreventement Intérieur : panneaux agglomérés avec revêtement étanche à l'air posé en face intérieure des murs.
 - Pare-pluie : panneau fibre de bois rigide d'épaisseur 60 mm, R = 1.42 m².K/W, ACERMI.
 - Isolation : ouate de cellulose insufflée, 55 kg/m³, de 145 mm, R = 3,72 m².K/W, ACERMI.
 - Revêtement : bardage douglas en pose.

³ [Module présentation de solution Baticok 2 - Pro'Réno](#)

- Isolation de la toiture sur site sans recours à la préfabrication ($R = 7,10 \text{ m}^2.\text{K/W}$)
 - Pose d'un pare-vapeur sous rampants.
 - Isolation par une couche de fibre de bois entre les chevrons existants, certifiée ACERMI 80 mm, $R = 2,1 \text{ m}^2.\text{K/W}$.
 - Isolation par une seconde couche de fibre de bois, certifiée ACERMI 180 mm, $R=5 \text{ m}^2.\text{K/W}$, avec contre ossature croisée fixée sur le chevonnage existant.
 - Pose d'un écran souple de sous-toiture HPV.

Les principales interfaces traitées sont :

- Réalisation d'une nouvelle fondation sur toute la périphérie du bâtiment pour reprendre le poids des murs préfabriqués.
- Isolation des jouées et du dessus de la lucarne en continuité de l'isolation de la toiture.
- Continuité de l'isolation entre mur et toiture.
- Étanchéité à l'air entre menuiseries et mur en bois.
- Étanchéité à l'air à la périphérie des percées des équipements CVC (sorties de la ventilation, etc.).
- Isolation du soubassement sur 50 cm de hauteur au total, en panneaux de liège $R=1,5 \text{ m}^2.\text{K/W}$.

3.2.2. Description de l'instrumentation

Mesures en cours. Résultats à venir.

3.2.3. Analyse des données

Mesures en cours. Résultats à venir.

3.3. Chantier FLEURY - Baticok 1

3.3.1. Description de la rénovation

Le chantier concerne une maison du type Maison jumelée ou en bande 1982-1989 (type B5.2 de la typologie RESTORE⁴) de 84 m² située à Fleury-sur-orne (14) en Normandie.

La maison a été construite en 1983 et possède un étage, des combles perdus, présente une mitoyenneté côté garage et n'a pas de sous-sol.

Pour en savoir plus sur le projet de rénovation la fiche chantier est disponible en ligne : [Fiche chantier de rénovation globale à Fleury \(14\) - Réalisation, suivi et analyse de la mise en œuvre.](#)



Figure 14 : Photos de la maison de Fleury. Avant (gauche) et après (droite) rénovation.

La solution Baticok 1 consiste, dans sa version générique, à isoler la toiture par l'extérieur par la pose d'un isolant biosourcé à base de fibres de bois et à traiter le défaut d'étanchéité à l'air de la jonction mur / toiture caractéristique des typologies de maisons auxquelles elle s'adresse. La rénovation de la maison a été complétée par une isolation par l'extérieur à base d'un isolant fibre de bois sur la façade Ouest et le pignon du garage. La plupart des menuiseries extérieures ont été conservées, seules la porte d'entrée et une fenêtre de toit ont été remplacées et une nouvelle fenêtre a été ajoutée sur la façade Ouest.

Les éléments d'isolation se composent comme suit :

- Isolation des murs ($R = 4,7 \text{ m}^2.\text{K/W}$)
 - Isolant fibre de bois d'une épaisseur de 180 mm sous ACERMI, compris dans une ossature bois 145x45 mm avec vide de 35 mm ménagé côté mur existant.
 - Bardage bois, compris pare-pluie sur lattage bois 29 mm.
- Isolation de la toiture ($R = 6,4 \text{ m}^2.\text{K/W}$)
 - Extension des rives de toiture par chevrons et panne de butée. Débord d'environ 40 cm du mur maçonnerie formant protection des murs isolés par l'extérieur.
 - Membrane pare-vapeur fixée sur chevrons existants côté intérieur sous l'isolant.

⁴ [Maison jumelée ou en bande 1982-1989 - B5.2 - Fiche RESTORE - Pro'Rénovation](#)

- Panneaux isolants fibre de bois en deux couches d'épaisseur 100+145 mm sous ACERMI R = 2,6 + 3,8 m².K/W, posés entre chevrons neufs 45x245 mm.
- Écran sous-toiture HPV (Haute Perméabilité à la Vapeur) placé au-dessus des panneaux de fibre de bois.
- Contre-lattage 38x38 mm.
- Ardoises synthétiques.
- Finition des débords de la toiture : Isolant incompressible 68 mm en sous-face et planche de rive PVC.

Les principales interfaces traitées sont :

- Continuité de l'isolation entre mur et toiture.
- Jonction de la toiture du garage avec celle de la maison.
- Interfaces toiture/lucarnes et toiture/fenêtre de toit : habillage, tablettage, raccords d'étanchéité, isolation des jouées de la lucarne...
- Étanchéité à la périphérie des percées des équipements de chauffage et de ventilation (abergement de cheminée, sorties de la ventilation...).
- Reprise de la zinguerie et de la couverture à la suite des travaux sur la toiture.
- Interface entre mur et menuiseries : isolation et habillage des tableaux.

3.3.2. Description de l'instrumentation

Les sondes T/HR ont été installées sur la façade isolée, de manière à être insérées dans l'épaisseur de l'isolant extérieur en fibre de bois. Les zones critiques instrumentées se situent à l'angle de la maison côté véranda et sous la menuiserie principale de la façade. En toiture, les sondes ont été déployées sur chaque versant en partie courante.

Les sondes sont installées par perçage des éléments maçonnisés depuis l'intérieur du logement, avec remise en forme de l'isolant autour de la sonde et réfection de l'étanchéité autour du perçage par ajout d'adhésif.

Pour ce chantier, l'implantation des capteurs, et en particulier des sondes T/HR, a été fortement contrainte par les matériaux et revêtements des murs intérieurs en fonction de la possibilité de procéder au perçage ou non de ces éléments (faïence, carrelage, etc.).

3.3.3. Analyse des données

Mesures en cours. Résultats à venir.

3.4. Chantier CHAMBERY - Blokiwood

3.4.1. Description de la rénovation

Le chantier concerne une maison autonome d'un quartier résidentiel homogène des années 1950 (corpus B de la typologie RESTORE) de 67 m² située à Chambéry (73) dans la région Auvergne-Rhône-Alpes.

La maison a été construite en 1955 et est représentative des lotissements construits après-guerre dans des quartiers homogènes où un même exemplaire de maison est massivement répliqué. Elle présente une forme simple et des matériaux peu coûteux. C'est une maison de plain-pied sans sous-sol et sans combles aménagés.

Pour en savoir plus sur le projet de rénovation la fiche chantier est disponible en ligne : [Fiche chantier de rénovation globale à Chambéry \(73\) - Réalisation, suivi et analyse de la mise en œuvre.](#)



Figure 15 : Photos de la maison de Chambéry. Avant (gauche) et après (droite) rénovation.

La solution de rénovation⁵ Blokiwood se compose d'éléments d'ITE préfabriqués en atelier, manuportables et installés manuellement sur site directement sur la maçonnerie existante. Les panneaux d'ITE préfabriqués sont composés comme suit :

- Isolation des murs par caissons d'ITE préfabriqués en atelier
 - Structure en panneaux OSB côté intérieur, MDF côté extérieur.
 - Remplissage isolant en fibre de bois ACERMI 20 cm, résistance 5,3 m².K/W.
 - Revêtement : pare-pluie, panneaux de ciment enduits
 - Finition : enduit résine siloxane.

Les travaux en toiture ont été réalisés sur site, sans recours à la préfabrication et se sont décomposés ainsi :

- Couverture en tôles nervurées en acier (neuves).
- Étanchéité : écran sous toiture HPV ventilé des deux côtés.
- Isolation en fibre de bois entre chevrons, 30 cm, ACERMI, résistance totale 7,2 m².K/W.

⁵ <https://www.prorenc.fr/documents/module-presentation-de-solution-blokiwood>

- Frein vapeur en sous-face de l'isolant.

Les principales interfaces traitées sont :

- Isolation du soubassement par panneaux de polystyrène (épaisseur 24 cm, hauteur 50 cm).
- Coupe-froid en fibre de bois dans les embrasures des menuiseries.
- Étanchéité des traversées gérée par mousse polyuréthane et acrylique étanche à l'air.
- Pas de continuité d'isolant entre murs et toiture pour des raisons de hauteur de toiture et de coût.

3.4.2. Description de l'instrumentation

Les sondes T/HR (Figure 16) et les détecteurs d'eau liquide (Figure 17) ont été intégrés dans les panneaux d'ITE en atelier au moment de leur préfabrication. Ce procédé a permis de contrôler finement la position des capteurs dans les panneaux (Figure 17.a) et de gérer de manière optimale le percement et la reprise d'étanchéité de ces derniers (Figure 17.d). Les boîtiers de communication LoraWan sont fixés sur le nu intérieur des panneaux afin de rester accessibles.

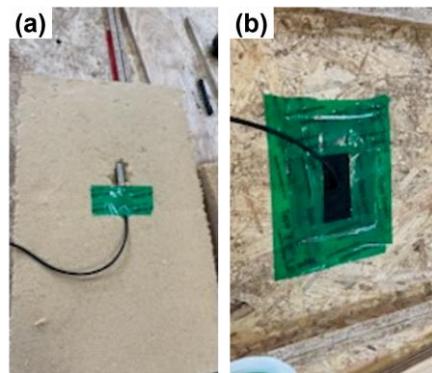


Figure 16 : Photos de l'intégration des sondes T/HR. Intégration de la sonde dans l'épaisseur de la première couche d'isolant (a), fermeture du panneau OSB intérieur après passage du câble de communication (b).

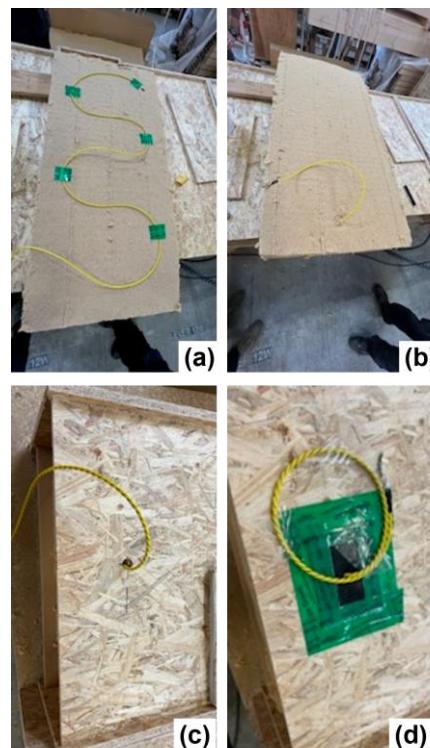


Figure 17: Photos de l'intégration des détecteurs d'eau liquide dans les panneaux Blokiwood. Cheminement du câble sur la surface de la première couche d'isolant fibre de bois (a), sortie du câble de détection après mise en place de la seconde couche d'isolant (b), sortie du câble de détection après mise en place du panneau OSB (c), câble en attente après reprise de l'étanchéité du trou de perçage du panneau OSB (d).

L'implantation des capteurs a été réalisée en fonction des contraintes de l'aménagement et en fonction du calepinage des panneaux (Figure 18). Notamment, la présence de pièces d'eau et de surfaces intérieures carrelées ont amené à privilégier une instrumentation de la façade S-E au lieu de la façade N-O, qui aurait été plus défavorable aux apports éventuels d'humidité. Les zones sensibles instrumentées correspondent aux façades courantes, aux jonctions mur / toiture (voir détail en Figure 19) et aux jonctions mur / menuiserie.

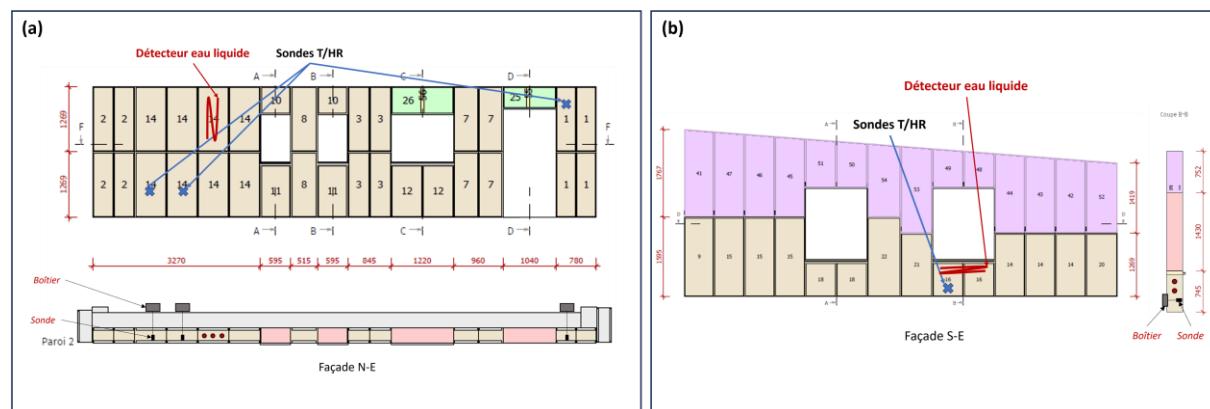


Figure 18 : Schéma d'implantation des capteurs sur le plan de calepinage des panneaux ITE - Chambéry.

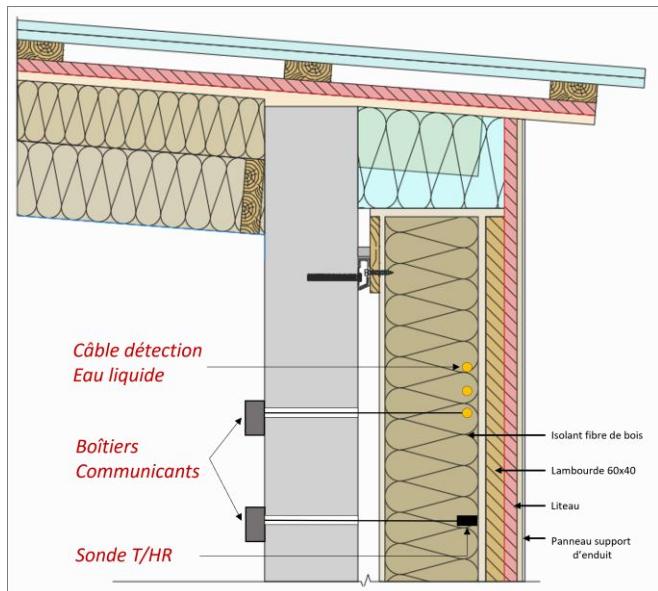


Figure 19 : Implantation des capteurs sur un détail de jonction mur/toiture vue en coupe - Chambéry.

3.4.3. Analyse des données

Mesures en cours. Résultats à venir.

3.5. Chantier TOURCOING – Béton de chanvre

3.5.1. Description de la rénovation

Le chantier concerne une maison de ville en briques du Nord (type A4.1 de la typologie RESTORE⁶) de 105 m² située à Tourcoing (59) dans la région Hauts-de-France.

La maison, construite en 1930, possède deux étages, un sous-sol, des combles aménagés sous brisis de toiture et une double mitoyenneté. La maison est détenue par le bailleur LMH et a vocation à être louée à des particuliers.

Pour en savoir plus sur le projet de rénovation la fiche chantier est disponible en ligne : [Fiche chantier de rénovation globale à Tourcoing \(59\) - Réalisation, suivi et analyse de la mise en œuvre.](#)



Figure 20 : Photos de la maison de Tourcoing. Façade arrière, avant (gauche) et après (milieu) rénovation. Façade avant après rénovation (droite).

La solution de rénovation⁷ dérivée de la solution développée par le CD2E sur RENOSTANDARD, repose sur une isolation thermique par l'intérieur par l'utilisation de béton de chanvre projeté sur une ossature bois, par des panneaux de fibre de bois ou par des panneaux en fibres de coton en fonction de la localisation des parois à isoler. Les menuiseries ainsi que l'extension du RDC en jardin sont remplacées par des solutions plus performantes. Une VMC simple flux ainsi qu'une chaudière gaz à condensation sont installées. Les principaux éléments d'isolation sont les suivants :

- Isolation des murs
 - Les murs en façade rue et cour sont isolés par du béton de chanvre projeté sur une épaisseur de 26 cm ($R = 3,80 \text{ m}^2.\text{K/W}$). Ces murs sont doublés par des panneaux de parement perméables à la vapeur d'eau : parti pris de LMH pour des raisons d'esthétique et d'usage (Figure 21 - 1).

⁶ <https://www.proreno.fr/documents/maison-ouvriere-basique-a41-fiche-restore>

⁷ [Maisons de ville du Nord - Solution RénoStandard - Pro'Reno](https://www.proreno.fr/documents/maisons-de-ville-du-nord-solution-reno-standard-pro-reno)

- Murs mitoyens : isolation acoustique par 145 mm de matériau à base de textile recyclé ($R = 3,90 \text{ m}^2.\text{K/W}$). À certains endroits étroits, l'épaisseur de cet isolant est réduite à 60 mm.
- Isolation de toiture et plancher haut
 - Isolation des pans du brisis par 280 mm de laine de bois ($R = 7,35 \text{ m}^2.\text{K/W}$) (Figure 21 - 2).
 - Remplacement des tuiles et reprise des chevrons, de la charpente, du chien assis et du chéneau.
 - Plancher haut : nouveau faux plafond, isolation en combles perdus par 280 mm de ouate de cellulose soufflée ($R = 6 \text{ m}^2.\text{K/W}$) (Figure 21 - 3).
- Plancher bas
 - Plancher bas partiel sur terreplein : isolation sous dalle en polyuréthane, épaisseur 68 mm, $R = 3,15 \text{ m}^2.\text{K/W}$ (Figure 21 - 4).
 - Plancher bas partiel sur cave : isolation collée en sous-face, épaisseur 100 mm, $R = 2,60 \text{ m}^2.\text{K/W}$ (Figure 21 - 5).
- Extension RDC
 - Murs à ossature bois : isolation en fibre de bois, épaisseur totale du complexe : 200 mm ($R = 5,55 \text{ m}^2.\text{K/W}$).
 - Toiture : isolation de la toiture plate par du verre cellulaire d'épaisseur 180 mm ($R = 4,90 \text{ m}^2.\text{K/W}$) côté extérieur et 100 mm de laine de bois ($R = 2,50 \text{ m}^2.\text{K/W}$) côté intérieur (Figure 21 - 6).
 - Isolation de la toiture en shed par de la laine de bois d'épaisseur 275 mm ($R = 7,50 \text{ m}^2.\text{K/W}$).
 - Plancher : carrelage sur chape, dalle béton armé sur panneau polyuréthane d'épaisseur 68 mm ($R = 3,15 \text{ m}^2.\text{K/W}$).
- Les principales interfaces traitées sont :
 - Béton de chanvre projeté / menuiseries extérieures.
 - Béton de chanvre projeté / plancher existant.
 - Jonction extension / façade existante (continuité de l'isolation thermique) (Figure 21 - 7).
 - Continuité de l'isolation entre murs et toiture (Figure 21 - 8).

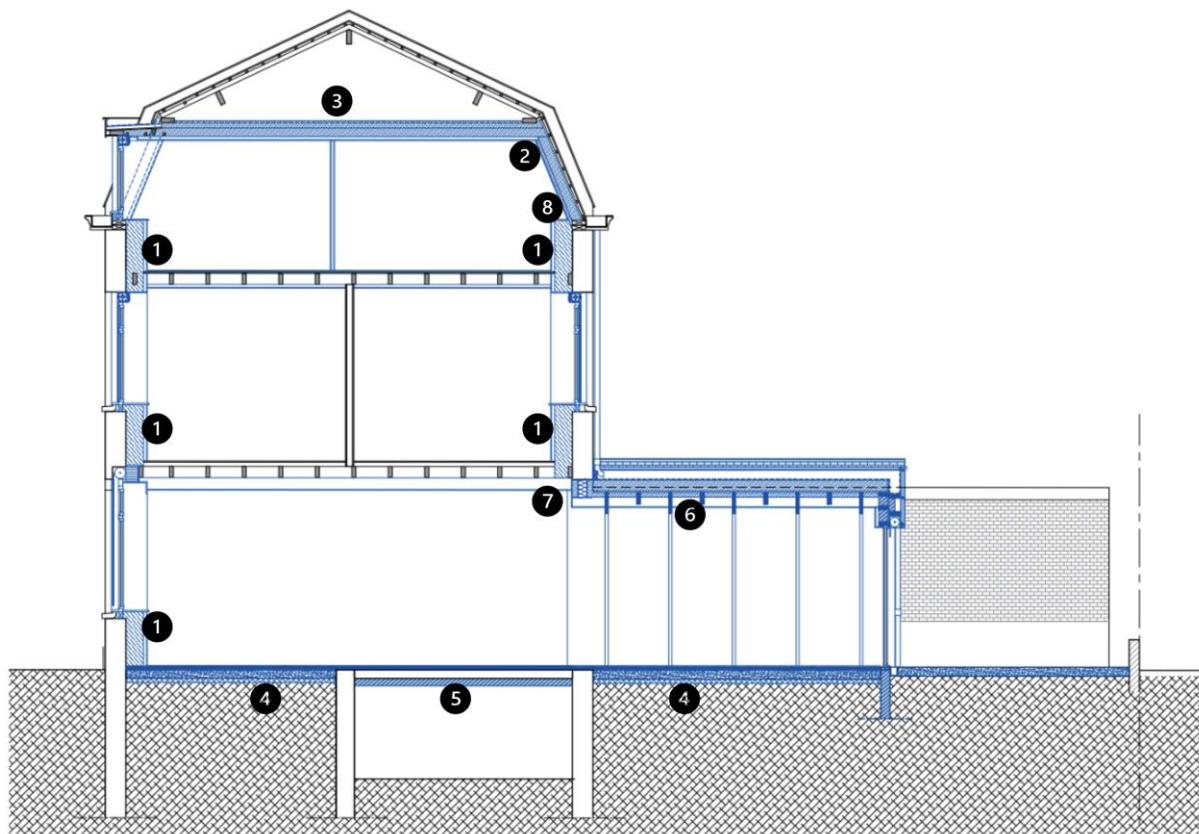


Figure 21 : Schéma en coupe de la solution de rénovation - Tourcoing.

3.5.2. Description de l'instrumentation

Les objectifs de cette instrumentation sont :

1. Déetecter une éventuelle arrivée d'eau dans les isolants en fibre de bois grâce aux détecteurs d'eau liquide.
2. Mesurer les conditions thermiques et hygrométriques dans les isolants biosourcés afin d'évaluer le risque de développement fongique.
3. Mesurer la cinétique de séchage du béton de chanvre et évaluer les conditions thermo-hydriques dans l'épaisseur du béton grâce aux sondes T/HR.

Les objectifs 1 et 2 sont communs à l'ensemble des chantiers RESTORE alors que l'objectif 3 est propre au béton de chanvre projeté mis en œuvre par voie humide. Les schémas d'implantation des capteurs dans la maison sont donnés en Figure 22 et Figure 23.

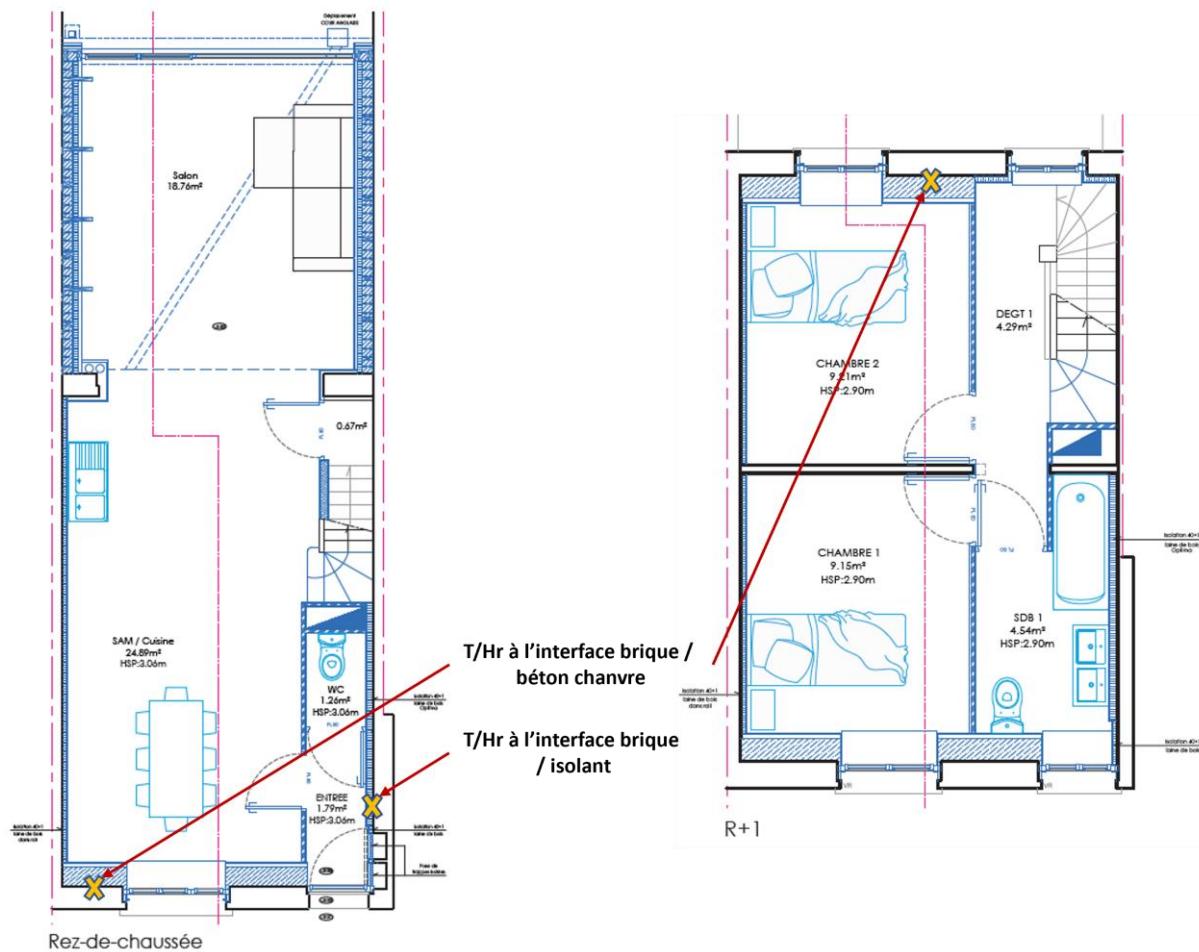


Figure 22 : Schéma d'implantation des capteurs vue en plan - Tourcoing.

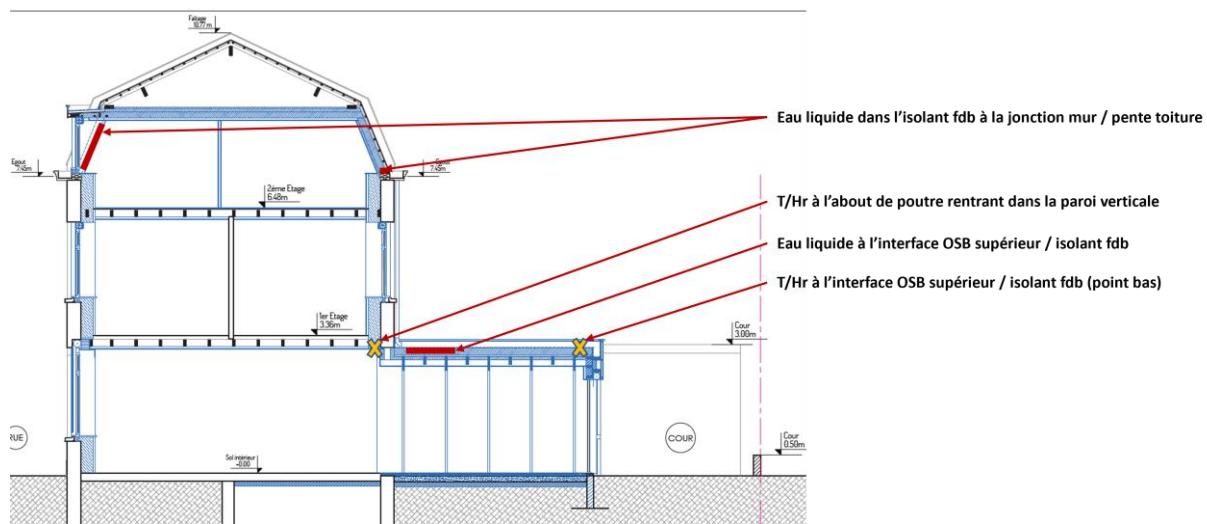


Figure 23 : Schéma d'implantation des capteurs vue en coupe - Tourcoing.

La Figure 24 montre deux photos de la mise en place des détecteurs d'eau liquide dans l'isolant fibre de bois, que ce soit au niveau de la face latérale du chien assis avant mise en œuvre de l'isolant (Figure 24.a) ou au niveau de l'isolation du brisis de toiture à l'interface avec le béton de chanvre (Figure 24.b). Les parties du câble de détection en dehors de la zone de

mesure sont isolées à l'aide d'adhésif étanche afin d'éviter de détecter de l'eau en dehors de la zone de mesure, et en particulier au droit des zones de projection de béton de chanvre (Figure 24.b). Cette protection a été suffisante pour que le câble ne détecte pas l'eau contenue dans le béton au moment de la projection.

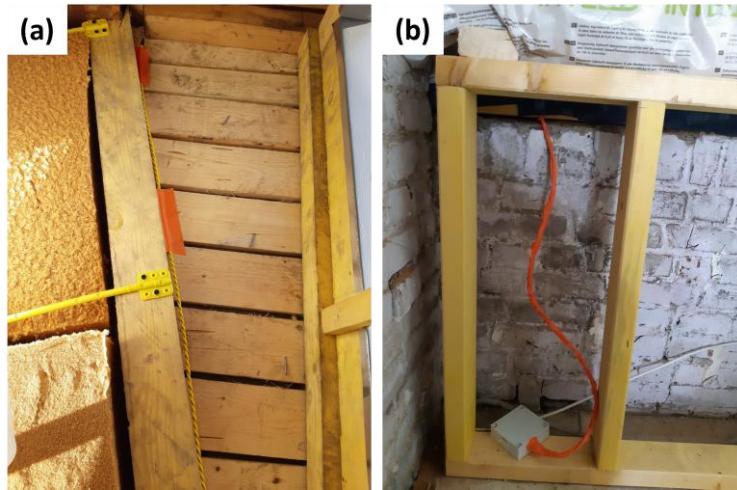


Figure 24 : Photos de la mise en œuvre des détecteurs d'eau liquide dans l'isolant fibre de bois. (a) Au niveau de la face latérale du chien assis avant mise en place de l'isolant et (b) au niveau du brisis de toiture, après mise en place de l'isolant et avant projection du béton de chanvre.

Afin de mesurer la cinétique de séchage du béton de chanvre mise en œuvre par voie humide, des sondes T/HR ont été installées dans l'épaisseur de ce dernier sur les deux façades de la maison (Figure 22). Au niveau R+1, trois sondes ont été installées dans l'épaisseur du béton de chanvre (voir schéma Figure 25.a). Deux d'entre elles ont été mises en place avant la projection du béton (Figure 25.b) et la dernière a été positionnée au nu intérieur du béton une fois projeté. Au RDC, deux sondes ont pu être installées dans l'épaisseur.

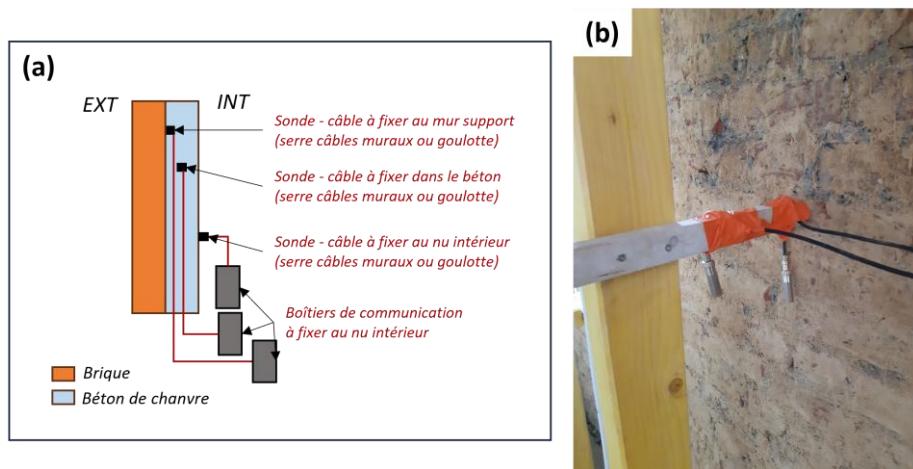


Figure 25 : (a) Schéma de détail de l'installation des sondes T/HR dans l'épaisseur de la paroi et (b) photo de la mise en place des sondes avant projection du béton de chanvre.

La projection du béton de chanvre ne semble pas avoir détérioré la partie sensible des sondes puisque celles-ci ont communiqué des données dès leur activation à la fin de la projection.

Aucune divergence anormale n'a été notée par rapport aux données renvoyées par les sondes au nu intérieur, mises en place après la projection.

3.5.3. Analyse des données

Les courbes suivantes montrent l'évolution de l'humidité relative et absolue à l'intérieur du béton de chanvre et aux différentes épaisseurs. On peut nettement voir l'effet de la fermeture de la paroi par mise en œuvre du parement intérieur qui a un effet sur l'augmentation de l'humidité au voisinage intérieur du béton de chanvre. Ce point est à surveiller car l'accumulation d'humidité dans le parement intérieur peut être source de développement fongique à réception des chantiers ou la première année suivant la réception. Cependant l'analyse des courbes d'humidité absolue, donc la quantité d'eau vapeur dans l'air indépendante de la température de l'air, permet de confirmer une tendance générale de séchage : baisse d'humidité absolue dans la lame d'air entre béton de chanvre et parement intérieur.

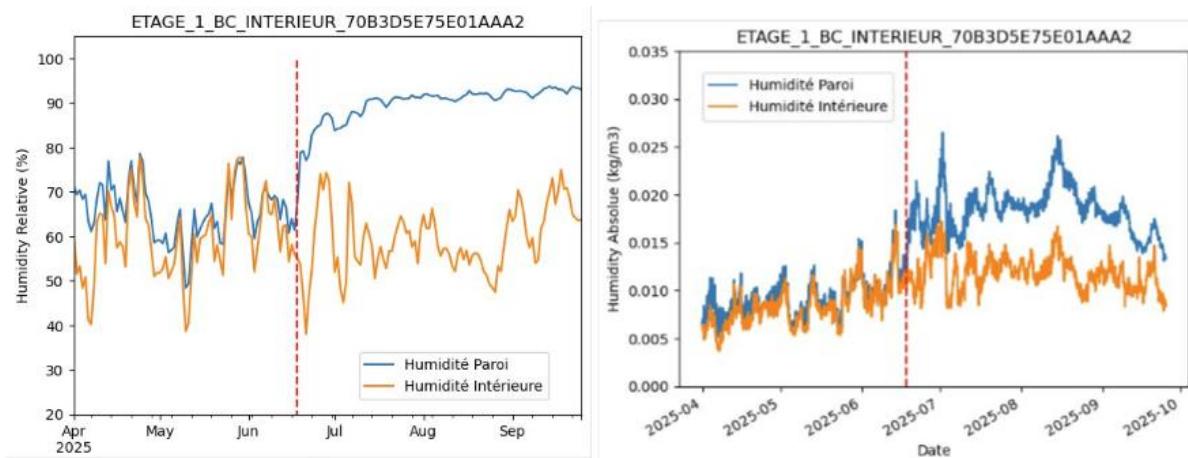


Figure 26 : Evolution de l'humidité relative (gauche) et de l'humidité relative (droite) dans le béton de chanvre et dans la pièce correspondante.

Il faut cependant noter que :

- L'humidité à l'intérieur du béton de chanvre reste saturée après plus de 9 mois de séchage
- Les temps de séchage qui ont été suivis dans ce chantier (environ 10 semaines), avant mise en œuvre du parement intérieur, ont été beaucoup plus longs que les temps minimums de séchage recommandés dans les Règles Professionnelles (21 jours).

Ces constats, à confirmer par d'autres mesures, doivent nous interroger sur les dynamiques de séchages réelles du béton de chanvre et réinterroger les bonnes pratiques à suivre pour éviter les pathologies liées à l'accumulation d'eau en phase chantier.

4. RECOMMANDATION DE SUIVI DE LA DURABILITE

L'exploitation des données des capteurs placés dans les parois sur les chantiers RESTORE a été faite selon deux stratégies complémentaires.

Tout d'abord, une exploitation directe des données de certains capteurs permet d'analyser certains risques de dégradation immédiat comme la détection de présence d'eau liquide sous les baies qui seraient le signe d'une infiltration d'eau problématique. Elle permet également de caractériser des risques à moyen terme par l'analyse des humidités absolues dans les parois et leur comparaison aux seuils de risques présents dans la littérature.

Le grand avantage de l'analyse directe des données réside dans sa simplicité. Cependant, elle ne permet pas à elle seule de répondre sur des tendances d'évolution plus long terme pour lesquelles des durées de monitoring plus longs seraient nécessaires (5 ans à minima) pour capter les variabilités climatiques et d'usage.

Pour pallier ce temps d'exposition (et de collecte de données) relativement courts, une stratégie alternative consiste à utiliser un modèle numérique pour prédire les tendances à plus long terme et comparer les valeurs simulées aux séries temporelles mesurées par les capteurs sur les premiers mois. Cette approche se heurte aux limites de l'exercice de comparaison mesures / calculs pour des phénomènes de transferts aussi complexes. Les principales sources d'incertitude étant :

- Position exacte du capteur physique dans la paroi.
- Etat hygrothermique initial réel des parois pour lancer la simulation numérique.
- Propriétés hygrothermiques réelles des composants pour faire tourner la simulation numérique.
- Conditions aux limites locales au voisinage des vraies parois (notamment pluie battante réellement absorbée localement, flux solaire reçu, etc.)

D'autres projets [37] ont pu montrer qu'en conditions de laboratoire parfaitement maîtrisées, une comparaison précise mesures / calculs concernant les phénomènes de transfert hygrothermique était très délicate. Ainsi, il est probablement illusoire d'attendre une grande précision entre les valeurs simulées et celles issues de la mesure sur une vraie paroi instrumentée.

Cependant, cette approche croisée simulation hygrothermique / mesures peut avoir un intérêt en termes d'analyse grossière des dynamiques d'évolution temporelle. La détection d'un écart brutal entre les variations d'humidité simulées versus celles mesurées sont par exemple le signe d'un problème à investiguer.

Le tableau suivant synthétise le protocole d'exploitation des résultats qui pourrait être approfondi ultérieurement et les perspectives d'exploitation envisageables. Le point clef étant la durée de données disponibles :

Durée du monitoring	Exploitations possibles	Perspective d'amélioration
< 2 ans	Monitoring direct de sous-indicateur de risque : détection d'eau liquide sous jonctions clefs, mesures des humidités absolue (critère en % en masse, etc.)	Adjoindre des dispositifs de mesures ponctuels de teneur en eau le moins intrusif possible
	Vérification des dynamiques d'évolution temporelle d'humidité par croisement données T/HR mesurées / simulées	Améliorer la connaissance des données d'entrées du modèle numérique : propriété des matériaux et état initial. Rendre l'analyse plus robuste : filtrage des séries temporelles par moyenne glissante et analyse des dérivées par exemple
Entre 2 et 5 ans	Monitoring direct de sous-indicateur de risque : détection d'eau liquide sous jonctions clefs, mesures des humidités absolue (critère en % en masse, etc.)	Tester des méthodes de prédictions statistiques permettant d'apprendre sur une fenêtre temporelle courte et de prédire sur des temps plus long (modèles ARMAX, mobilisation d'IA ou autre)
	Vérification des dynamiques d'évolution temporelle d'humidité par croisement données T/HR mesurées / simulées	Ajouter dans les parois des mesurandes permettant d'objectiver l'impact direct de l'humidité (type ICF dans la paroi, etc.)
Entre 5 et 10 ans	Monitoring direct de sous-indicateur de risque : détection d'eau liquide sous jonctions clefs, mesures des humidités absolue (critère en % en masse, etc.)	
	Vérification des dynamiques d'évolution temporelle d'humidité par croisement données T/HR mesurées / simulées	Croiser les alertes remontées par le monitoring avec la sinistralité constatée sur le terrain

BIBLIOGRAPHIE

- [1] T. K. Hansen, S. P. Bjarløv, R. H. Peuhkuri, et M. Harrestrup, « Long term in situ measurements of hygrothermal conditions at critical points in four cases of internally insulated historic solid masonry walls », *Energy and Buildings*, vol. 172, p. 235-248, août 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.05.001.
- [2] Y. Xue, Y. Fan, J. Lu, et J. Ge, « The moisture distribution in wall-to-floor thermal bridges and its influence on mould growth », *UCL Open Environ*, vol. 4, 2022, doi: 10.14324/111.444/ucloe.000042.
- [3] O. Douzane, G. Promis, J.-M. Roucoult, A.-D. Tran Le, et T. Langlet, « Hygrothermal performance of a straw bale building: In situ and laboratory investigations », *Journal of Building Engineering*, vol. 8, p. 91-98, déc. 2016, doi: 10.1016/j.jobe.2016.10.002.
- [4] B. Moujalled, Y. Aït Ouméziane, S. Moissette, M. Bart, C. Lanos, et D. Samri, « Experimental and numerical evaluation of the hygrothermal performance of a hemp lime concrete building: A long term case study », *Building and Environment*, vol. 136, p. 11-27, mai 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.03.025.
- [5] N. Boumediene, « Comportement hygrothermique de matériaux biosourcés à l'échelle de la paroi en ambiance contrôlée et in-situ », PhD Thesis, 2022. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.theses.fr/2022REN1S009/document>
- [6] M. Bendouma, T. Colinart, et P. Glouannec, « Comparaison du comportement hygrothermique de trois systèmes d'isolation thermique par l'extérieur », présenté à Conference: IBPSA FranceAt: Bordeaux, 2018.
- [7] T. Colinart, P. Glouannec, et P. Chauvelon, « Influence of the setting process and the formulation on the drying of hemp concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 30, p. 372-380, mai 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.030.
- [8] P.-A. Chabriac, A. Fabbri, J.-C. Morel, J.-P. Laurent, et J. Blanc-Gonnet, « A Procedure to Measure the in-Situ Hygrothermal Behavior of Earth Walls », *Materials*, vol. 7, n° 4, p. 3002-3020, avr. 2014, doi: 10.3390/ma7043002.
- [9] S. Claude, « Étude expérimentale et numérique de solutions basées sur les éco-matériaux pour la rénovation thermique du patrimoine bâti urbain », 'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2018. [En ligne]. Disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-01884760v1/file/2018SophieCLAUDE.pdf>
- [10] M. M. de Almeida, « Etude de la rénovation hygrothermique de parois anciennes utilisant des matériaux biosourcés », 'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-03904224>
- [11] A. Liguori, R. Markovic, T. T. H. Dam, J. Frisch, C. van Treeck, et F. Causone, « Indoor environment data time-series reconstruction using autoencoder neural networks », 2020, doi: 10.48550/ARXIV.2009.08155.
- [12] G. Kłosowski, A. Hoła, T. Rymarczyk, Ł. Skowron, T. Wołowiec, et M. Kowalski, « The Concept of Using LSTM to Detect Moisture in Brick Walls by Means of Electrical Impedance Tomography », *Energies*, vol. 14, n° 22, p. 7617, nov. 2021, doi: 10.3390/en14227617.

- [13] M. Ali, M. Olaide Oladokun, S. B. Osman, S. A. Mohd Din, M. S. Ibrahim, et F. Yusof, « HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF BUILDING ENVELOPES IN THE TROPICS UNDER OPERATIVE CONDITIONS: CONDENSATION AND MOULD GROWTH RISK APPRAISAL », *Jurnal Teknologi*, vol. 78, n° 5, avr. 2016, doi: 10.11113/jt.v78.8309.
- [14] M. Stewart, « An Experimental Approach to the Study of Moisture Dynamics in Walls », in *Moisture Migration in Buildings*, ASTM International100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1982, p. 92-101. doi: 10.1520/STP38687S.
- [15] P. Lopez-Arce, H. Altamirano-Medina, J. Berry, D. Rovas, F. Sarce, et S. Hodgson, « Building moisture diagnosis: Processing, assessing and representation of environmental data for root cause analysis of mould growth », *Build. Simul.*, vol. 13, n° 5, p. 999-1008, oct. 2020, doi: 10.1007/s12273-020-0680-8.
- [16] X. He, C. Feng, et H. Zhang, « Coupled heat and moisture transfer in walls featuring moisture-buffering materials and ventilating layers: An Experimental study », *Energy and Built Environment*, vol. 5, n° 1, p. 97-109, févr. 2024, doi: 10.1016/j.enbenv.2022.08.003.
- [17] M. N. A. Saïd, « Measurement Methods of Moisture in Building Envelopes – A Literature Review* », *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 1, n° 3, p. 293-310, sept. 2007, doi: 10.1080/15583050701476754.
- [18] K. Gradeci et U. Berardi, « Application of probabilistic approaches to the performance evaluation of building envelopes to withstand mould growth », *Journal of Building Physics*, vol. 43, n° 3, p. 187-207, nov. 2019, doi: 10.1177/1744259119861784.
- [19] B. Ryan, D. Bristow, et P. Mukhopadhyaya, « A probabilistic approach for risk assessment of moisture-related degradation of building envelopes », *Journal of Building Physics*, vol. 48, n° 2, p. 168-196, sept. 2024, doi: 10.1177/17442591241261078.
- [20] B. Ryan et D. N. Bristow, « Investigating the Influence of Material Properties, Infiltration, and Climatic Conditions on Hygrothermal Risk of Building Envelopes », *IJTech*, vol. 15, n° 2, p. 383, févr. 2024, doi: 10.14716/ijtech.v15i2.6688.
- [21] PACTE. 2021. Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température / humidité dans les parois de bâtiments. *Programme d'Action pour la qualité de la Construction et de la Transition Energétique*. [En ligne](#).
- [22] CCFAT. 2025. Cahier 3713 - Isolants à base de fibres végétales ou animales – Produits isolants destinés à l'isolation thermique par l'intérieur. Guide technique spécialisé pour la constitution d'un Dossier de demande d'Avis Technique *Commission Chargée de la Formulation des Avis Techniques*.
- [23] NF EN 17886 : 2023. Produits isolants thermiques - Évaluation de la sensibilité au développement de moisissures - Méthode d'essai de laboratoire. AFNOR.
- [24] PROFEEL. 2022. Rapport "Modélisation du risque potentiel d'apparition de moisissures et de leur éventuel développement" (revue bibliographique). [En ligne](#).
- [25] IEA Annex 14. 1990. Condensation and energy. Guidelines and practice. Leuven Acco.
- [26] ADAN, 1994. Olaf Clemens Gerardus. On the fungal defacement of interior finishes. PhD Thesis, TU Eindhoven, Department of the Built Environment.

- [27] HUKKA, 1999. Antti et VIITANEN, H. A. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology*, vol. 33, no 6, p. 475-485.
- [28] OJANEN, 2011. Tuomo, PEUHKURI, Ruut, VIITANEN, Hannu, et al. Classification of material sensitivity–new approach for mould growth modeling. In : 9th Nordic symposium on building physics. 2011. p. 867-874
- [29] Berger, J. et Al. 2018. Analysis and improvement of the VTT mold growth model: Application to bamboo fiberboard. *Building and Environment*, 138, 262–274 | 10.1016/j.buildenv.2018.03.031
- [30] VEREECKEN, Evy et ROELS, Staf. 2012. Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Building and Environment*, vol. 51, p. 296-310.
- [31] VEREECKEN, Evy, VANOIRBEEK, Kristof, et ROELS, Staf. 2015. Towards a more thoughtful use of mould prediction models: A critical view on experimental mould growth research. *Journal of Building Physics*, vol. 39, no 2, p. 102-123.
- [32] VEREECKEN, Evy, VANOIRBEEK, Kristof, et ROELS, Staf. 2015. A preliminary evaluation of mould prediction models based on laboratory experiments. *Energy procedia*, vol. 78, p. 1407-1412.
- [33] COLINART, Thibaut, BENDOUMA, Mathieu, et GLOUANNEC, Patrick. 2016 Indicateurs de pathologies liées à l'humidité : analyse des modèles et influence de l'hystérésis des isothermes de sorption. Conférence IBPSA France 2016
- [34] FAURE X., PIOT A., SOUDANI L., DEMOUGE F., GAUTIER R., CARRE S. 2024 Impact de la ventilation sur la migration d'humidité dans l'enveloppe des bâtiments. ADEME, Janvier 2024. [En ligne](#).
- [35] Standard 160-2016 : Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings, ASHRAE, 2016
- [36] EN ISO 13788 : 2013. Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments - Température superficielle intérieurs permettant d'éviter l'humidité superficielle critique et la condensation dans la masse - Méthode de calcul, 2013
- [37] CSTB, CEREMA, FCBA. 2021. HYGRO-PV - Impact de la mise en œuvre du pare-vapeur : risque de pathologies liés à une perturbation dans la continuité du pare vapeur