

OPTIMISATION DES PERFORMANCES HYGROTHERMIQUES DES LOGEMENTS A LA REUNION

EXPERTISES

Projet OPTHYUM
Amélioration de la qualité sanitaire de l'air intérieur
des logements des Hauts de l'île de La Réunion

RAPPORT FINAL

Septembre
2023

REMERCIEMENTS

Les partenaires du projet tiennent à adresser leurs remerciements à Mme Souad BOUALLALA SELMI et M Vincent CHAUSSERIE-LAPREE, ingénieurs à l'Agence de la transition écologique (ADEME), respectivement spécialiste de la pollution atmosphérique et de la qualité de l'air intérieur, et Ingénieur Energie Bâtiment Climat référent ADEME sur l'île de La Réunion, qui ont assuré le suivi du projet OPTHYUM.

Merci à M Julien CASTELNAU, Responsable de la Politique Technique au sein de la SHLMR, bailleur social à La Réunion pour son aide dans le recrutement des logements, à M Philippe TOUFLAN, conseiller Habitat Santé à l'ATMO Réunion pour la réalisation des diagnostics des logements.

Nos remerciements vont enfin aux collègues et responsables pour leur relecture attentive et leur éclairage : pour le CSTB : Isabelle LACAZE, Ingénieure recherche et Expertise, Corinne BOUNHOURE, cheffe de la Division Qualité Sanitaire des Ouvrages et Driss SAMRI, directeur de la Direction Santé Confort.

CITATION DE CE RAPPORT

BOULET Sylvain, BOURGAUT Tom, DRAGHI Marjorie, LACAZE Isabelle, LAMOULIE Julien, MONTIBUS Mathilde, RUBIO Bernadette, SOUDANI Lucille, ZIBOUCHE Kamel. 2023. **Optimisation des performances hygrothermiques des logements à La Réunion – Rapport 60 pages.**

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1962C0013

Étude réalisée par BOULET Sylvain (FCBA), BOURGAUT Tom (CIRBAT), CARDIA Jany-Damien (CIRBAT), CHANFIN Frédéric (CIRBAT), DRAGHI Marjorie (CSTB), DIJOUX Loïc (CIRBAT), LACAZE Isabelle (CSTB), LAMOULIE Julien (FCBA), MONTIBUS Mathilde (FCBA), RUBIO Bernadette (FCBA), SOUDANI Lucille (CSTB), ZIBOUCHE Kamel (CSTB) pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : CIRBAT

Appel à projet de recherche : CORTEA

Coordination technique - ADEME : BOUALLALA SELMI Souad – Vincent CHAUSSERIE-LAPREE

Direction / Service : Villes et territoires Durables / Service Qualité de l'Air

Direction Régionale Réunion / Mayotte



SOMMAIRE

1. CONTEXTE DU PROJET	7
2. METHODOLOGIE	7
2.1. Choix des stations météorologiques	7
2.2. Sélection des logements	8
2.3. Stratégie de recueil des données de terrain	10
2.3.1. Questionnaire	10
2.3.2. Document d'audit des logements.....	10
2.3.3. Choix de la métrologie	10
2.3.4. Stratégie de prélèvement et d'analyse des moisissures	11
2.3.5. Outils de modélisation numérique	11
2.3.5.1. Simulation thermique dynamique des logements	11
2.3.5.2. Modélisation hygrothermique des parois des logements	12
3. CAMPAGNES DE TERRAIN.....	12
3.1. Première approche : ATMO Réunion	12
3.2. Campagne de déploiement de la métrologie, de prélèvement de moisissures et d'audit technique des logements.....	14
3.3. Vérification de la conformité des logements du projet à la réglementation thermique en vigueur lors de leur construction	15
3.4. Constatation de désordres dans les différents logements.....	17
4. SIMULATIONS NUMERIQUES DYNAMIQUES DES LOGEMENTS	17
4.1. Modélisation des logements et des parois	17
4.1.1. Retours de terrain et exploitation des questionnaires	18
4.1.2. Exploitation des données des capteurs	23
4.2. Simulation Thermique Dynamique (STD) des logements.....	27
4.2.1. Recueil des données d'entrées	27
4.2.2. Hypothèses retenues	27
4.2.3. Résultats des simulations et comparaison avec les mesures.....	27
4.3. Modélisation hygrothermique des parois des logements.....	30
4.3.1. Données climatiques utilisées	31
4.3.2. Composition des parois	31
4.3.3. Hypothèses de calcul	32
4.4. Résultats de simulation pour chaque logement	33
5. ETUDE DU COMPORTEMENT DE PAROIS EN CELLULE EXPERIMENTALES.....	35
5.1. Choix des parois d'intérêt	35
5.2. Choix des conditions climatiques expérimentales	39
5.3. Protocole expérimental de test vis-à-vis du développement fongique.....	40
5.3.1. Caractéristiques de l'inoculum fongique	40
5.3.2. Inoculations	41
5.3.3. Suivi des inoculations	43
5.3.3.1. Prélèvements à T0	43
5.3.3.2. Prélèvements au cours de l'expérimentation	44
6. RECOMMANDATIONS	47
6.1 Revoir l'approche du rayonnement solaire dans la zone des "Hauts" de La Réunion	47
6.2 Revoir les exigences d'isolation et de ventilation des logements des "Hauts".	48
6.3 Renforcer les dispositions empêchant les remontées capillaires.....	49
6.4 Condensation et infiltration au niveau des menuiseries.....	50

6.5 Recommandations pour les occupants des logements des Hauts	51
7. CONCLUSION / PERSPECTIVES	54
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	56
INDEX DES ILLUSTRATIONS	57
SIGLES ET ACRONYMES	59

RÉSUMÉ

En raison de leurs spécificités notamment climatiques ou de modes de vie, les constructions nouvelles d'habitations en territoires ultra marins sont tenues, depuis 2010, de répondre aux exigences de la réglementation thermique RTAA-Dom qui décline les mesures à mettre en œuvre dans les domaines de la thermique, de l'aération et de l'acoustique. Pour autant, les exigences de cette réglementation d'un point de vue thermique ont été établies sur la base de climats tropicaux modèles et la nécessité d'assurer le confort d'été en favorisant la ventilation naturelle, la protection contre les rayonnements solaires ou encore l'utilisation de panneaux solaires pour la production d'eau chaude sanitaire. Concernant l'île de La Réunion, si ces préconisations peuvent répondre aux conditions climatiques rencontrées sur le littoral, leur pertinence vis-à-vis des climats rencontrés dans les Hauts de l'île est discutable. En effet le confort d'hiver qu'impose des températures relativement basses en altitude conduit les occupants des bâtiments à recourir au calfeutrage voire à des systèmes de chauffage autonomes générateurs de vapeur d'eau dans l'ambiance qui, du fait d'une ventilation insuffisante, va condenser sur les parois non ou insuffisamment isolées avec, en corollaire, l'apparition de pathologies.

Dans ce contexte, le projet OPTHYMUM, anthropocentré, s'est focalisé sur la compréhension des phénomènes à l'origine de la dégradation des logements qu'il s'agisse de leur conception ou de leur inadéquation avec les besoins de confort des occupants et l'identification des leviers pour les prévenir.

Pour atteindre ces objectifs, les instituts de recherche locaux et métropolitaines partenaires ont adopté deux approches, numérique et expérimentale, mettant à profit leurs compétences en matière d'expertise de terrain, d'hygrothermique, de modélisation et de microbiologie.

Alimentée par les diagnostics de terrain de huit logements, la stratégie adoptée pour modéliser les habitations s'est révélée robuste offrant la perspective de pouvoir appréhender l'impact de solutions techniques ou de conditions d'usage sur le confort intérieur.

La modélisation du comportement des parois vis-à-vis du risque de développement de moisissures a, quant à elle, démontré la corrélation entre les calculs tels que dimensionnés et les désordres constatés lors des inspections de terrain.

L'approche expérimentale a, pour sa part, mis en évidence la plus-value d'une isolation pour réduire significativement la flore fongique cultivable.

L'ensemble des constatations de terrain combinés aux résultats générés a permis d'élaborer des recommandations à destination de l'ensemble des acteurs : bureaux d'études, maîtres d'œuvre et d'ouvrage mais également usagers pour prendre en compte le climat des Hauts de La Réunion.

Parmi les perspectives de ce projet, il apparaîtrait intéressant de pouvoir instrumenter des logements qui intégreraient les différents enseignements de cette étude afin d'en mesurer la portée et pouvoir, à terme, fournir des outils d'aide à la décision non seulement aux acteurs de la filière construction mais également aux institutionnels en vue de l'éventuelle évolution de la réglementation thermique pour répondre davantage aux besoins spécifiques des Hauts.

ABSTRACT

Due to their specific climatic and lifestyle characteristics, new housing construction in ultra-marine territories has been required since 2010 to meet the requirements of the RTAA-Dom thermal regulations, which set out the measures to be implemented in the fields of heat, ventilation and acoustics. However, the thermal requirements of these regulations were established on the basis of model tropical climates and the need to ensure summer comfort by promoting natural ventilation, protection against solar radiation and the use of solar panels for domestic hot water production. As far as Reunion Island is concerned, while these recommendations may meet the climatic conditions encountered on the coast, their relevance to the climates encountered in the island's uplands is questionable. Indeed, the winter comfort required by relatively low temperatures at altitude leads building occupants to resort to draught-proofing or even self-contained heating systems that generate water vapour in the atmosphere which, due to insufficient ventilation, will condense on uninsulated or inadequately insulated walls, leading to the onset of pathologies.

Against this backdrop, the anthropocentric OPTHYUM project focused on understanding the phenomena at the root of housing deterioration, whether due to its design or its inadequacy in meeting occupants' comfort needs, and identifying the levers for preventing them.

To achieve these objectives, the local and metropolitan research institutes involved have adopted two approaches - numerical and experimental - drawing on their skills in field expertise, hygrothermics, modelling and microbiology.

Fueled by field diagnostics of eight homes, the strategy adopted to model the dwellings proved robust, offering the prospect of being able to apprehend the impact of technical solutions or conditions of use on indoor comfort. The modeling of wall behavior with regard to the risk of mold growth demonstrated the correlation between the calculations as dimensioned and the disorders observed during field inspections.

The experimental approach, for its part, highlighted the added value of insulation in significantly reducing cultivable fungal flora.

All these field findings, combined with the results generated, have enabled us to draw up recommendations for all those involved: design offices, project managers and builders, as well as users, to take into account the climate of the Hauts de La Réunion region.

One of the prospects for this project is to be able to instrument housing that incorporates the various findings of this study, in order to measure their scope and ultimately provide decision-support tools not only for the construction industry, but also for institutional players, with a view to the possible development of thermal regulations to better meet the specific needs of the Highest region of La Réunion.

1. Contexte du projet

Depuis 2010, les constructions nouvelles en territoires ultra marins sont tenues de répondre aux exigences de la réglementation thermique RTAA-Dom qui décline les mesures à mettre en œuvre dans les domaines de la thermique, de l'aération et de l'acoustique. Pour autant, les exigences de cette réglementation d'un point de vue thermique ont été établies sur la base de climats tropicaux modèles et la nécessité d'assurer le confort d'été en favorisant la ventilation naturelle, la protection contre les rayonnements solaires ou encore l'utilisation de panneaux solaires pour la production d'eau chaude sanitaire. Concernant l'île de La Réunion, si ces préconisations peuvent répondre aux conditions climatiques rencontrées sur la zone littorale, leur pertinence vis-à-vis des climats rencontrés dans les Hauts de l'île est discutable. En effet le confort d'hiver qu'impose des températures relativement basses en altitude conduit les occupants des bâtiments à recourir au calfeutrage voire à des systèmes de chauffage autonomes générateurs de vapeur d'eau dans l'ambiance qui, du fait d'une ventilation insuffisante, va condenser sur les parois non ou insuffisamment isolées avec, en corollaire, l'apparition de pathologies.

Dans ce contexte, le projet OPTHYUM, anthropocentré, vise la compréhension des phénomènes à l'origine de la dégradation des logements qu'il s'agisse de leur conception ou de leur inadéquation avec les besoins de confort des occupants et l'identification des leviers pour les prévenir.

Le présent rapport comporte 5 grandes parties. Méthodologie regroupe les éléments nécessaires à la réalisation de l'étude, qu'il s'agisse de l'élaboration de questionnaire et grille d'audits, ou encore de la sélection des stations météo et des logements. Les parties suivantes focalisent sur les campagnes de terrain, les simulations numériques et le volet expérimental. La partie Recommandations s'attache à partager les retours d'expérience permettant d'accompagner les acteurs locaux vers des logements davantage adaptés aux contraintes des Hauts.

Par souci de faciliter la lecture et la compréhension du document, les auteurs ont pris le parti de présenter les Résultats au fil de l'eau. La partie Conclusions et Perspectives fait le bilan du projet et propose des pistes de poursuite.

2. Méthodologie

Les Hauts de l'île de La Réunion se caractérisent par des conditions climatiques particulières avec des températures et humidités associées telles qu'une problématique de confort d'hiver existe pour les occupants des logements situés en altitude.

Sur la base de ce constat l'un des premiers enjeux du consortium, en parallèle du recrutement des logements avec le soutien du bailleur social local la SHLMR, a consisté à identifier les données climatiques pertinentes. Ces données constituent en effet des données d'entrée indispensables tant pour la modélisation du comportement thermohydrigue des logements et de leur enveloppe que pour les essais de parois en laboratoire.

Dans cette partie sont détaillées les différentes étapes du projet :

- Choix des stations météo
- Sélection des logements
- Stratégie de recueil des données de terrain
- Outils de modélisation numérique

2.1. Choix des stations météorologiques

Les stations météorologiques ont été sélectionnées sur la base de leur situation géographique croisée avec la densité des bâtiments et de la disponibilité des données d'intérêt vis-à-vis du volet modélisation à venir.

Les 6 stations retenues sur la base de ces critères sont présentées dans le Tableau 1.



Nom de la station	Altitude (en m)	Année	Longitude	Latitude
Colimaçons	798	2018	55°18'16" E	21°07'49" S
Petite France	1200	2018	55°20'31" E	21°20'31" S
Bellevue Bras-Panon	480	2018	55°37'21" E	21°00'17" S
Plaine des Palmistes	1032	2018	55°37'37" E	21°08'10" S
Le Tampon	860	2005	55°31'49" E	21°15'06" S
Ravine des Cabris	310	2000	55°28'31" E	21°16'28" S

Tableau 1 : Détails sur la localisation des 6 stations de Météo France retenues dans le cadre de l'étude

Pour ce qui est des données climatiques proprement dites, il s'est agi d'identifier une année TYPE, représentative des années sur une durée définie. Pour ce faire, la méthode proposée s'inspire de la norme ISO 15927-4 pour la sélection des variables climatiques et la statistique utilisée. Cette méthode sous-entend de disposer d'observations sur, au moins, dix années successives. Cette norme est dédiée à l'évaluation des besoins d'énergie des bâtiments et concatène les séquences mensuelles les plus représentatives sur au moins 10 années. Pour les besoins de l'étude sur les transferts de masses, une séquence d'un mois est trop courte. La norme a donc été adaptée à des séquences d'un an.

La stratégie adoptée a consisté à utiliser les données climatiques : la température, l'humidité, le rayonnement global et la vitesse du vent heure par heure ; disponibles pour la station de Gillot Aéroport, seule station pour laquelle les données sont disponibles gratuitement et ce sur une longue période (de 2005 à 2018).

Par ailleurs, nous avons fait le postulat que l'année Type pour l'aéroport Gillot est représentative de tous les lieux de l'île de la Réunion. Parmi les 14 années climatiques disponibles, l'année 2018 ressort comme la plus représentative au regard des températures, humidité et rayonnement. Concernant les stations le Tampon et la Ravine des Cabris, en raison des nombreuses données manquantes, nous avons retenu les années 2005 et 2000 respectivement pour ces 2 stations.

Les fichiers climatiques achetés auprès de météo France sont constitués de :

- La température de l'air sec en degré Celsius
- L'humidité relative (HR en %)
- La vitesse du vent en m/s
- La hauteur de précipitation en mm de pluie
- Le rayonnement global horizontal en j/cm²

Par ailleurs, un certain nombre de paramètres climatologiques, nécessaires pour calculer la température et l'humidité intérieure des logements à l'aide d'outils de simulations numériques n'étant pas mesurés, ont été recalculés. Il s'agit notamment :

- de la température du ciel pour calculer les pertes par rayonnement grande longueur d'onde des parois extérieures,
- le rayonnement direct normal au rayon du soleil et le rayonnement diffus horizontal pour calculer le rayonnement sur chaque paroi quelles que soient l'orientation et l'inclinaison.
- l'humidité absolue (en g/kg d'air sec) en tenant compte de l'altitude. A cet effet nous avons exploité la pression mesurée au niveau de la mer correspondant à la date afférente au niveau de la station de l'aéroport de Gillot.

2.2. Sélection des logements

La SHLMR, bailleur social local, a été sollicité pour fournir des logements d'intérêt sur la base de plusieurs critères :

- localisation à des altitudes variées (de 250 à 1000 m)
- proximité avec une station météo référencée,
- date de construction postérieure à 2009 (RTAA Dom).

Ainsi des logements situés dans les communes du Tampon, de la Plaine des Cafres, du Guillaume, de la Plaine des Palmistes, de Bras Panon, des Trois Bassins et de Saint Paul ont été investigués.

Le choix des logements a été contraint par l'acceptation des occupants à participer à l'étude qui sous-entendait leur mobilisation sur une demi-journée et l'installation de métrologie pendant 1 an.

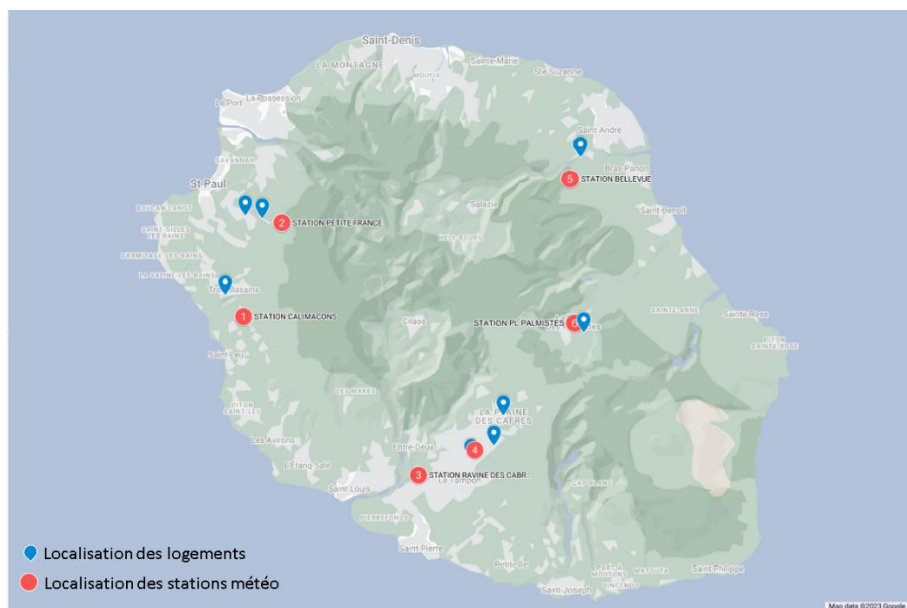


Figure 1: Cartographie des logements du projet et proximité avec les stations météo retenues

Nom	Localisation	Année de construction	Photo
OPHY 1	Le Tampon – 790m	1987	
OPHY 2	Le Tampon – 1008m	2010	
OPHY 3	Le Tampon – 1100m	2020	
OPHY 4	Petite France – 650m	2015	
OPHY 5	Plaine des Palmistes – 970m	2012	

OPHY 6	Bellevue Bras Panon – 240m	2014	
OPHY 7	Colimaçons – 550m	2017	
OPHY 8	Petite France – 905 m	2013	

Tableau 2 : Localisation et année de construction des logements instrumentés

2.3. Stratégie de recueil des données de terrain

Afin de mener à bien le projet il était indispensable de recueillir de nombreuses informations de terrain, qu'il s'agisse de :

- renseigner les habitudes « critiques » des occupants vis-à-vis de la prolifération des moisissures au travers de questionnaires ;
- relever les caractéristiques des logements nécessaires à la modélisation tant des lieux que de leur enveloppe par une grille d'audit technique ;
- mesurer les facteurs abiotiques d'intérêt par le déploiement de capteurs adaptés ;
- qualifier les contaminations fongiques des logements par la réalisation de prélèvements et leur analyse ;

2.3.1. Questionnaire

Des questionnaires ont été réalisés pour pouvoir être proposés aux occupants des logements sélectionnés durant la campagne de terrain. Ces questionnaires concernent le diagnostic de la présence de moisissures ou bien d'humidité au sein des logements, le comportement des usagers dans le logement (nombre de personnes, ventilation, chauffage, équipements), la réalisation éventuelle de travaux ou encore le ressenti des usagers. Les documents sont fournis en Annexe 1. L'objectif de ces questionnaires est de caractériser au mieux le comportement des usagers vis-à-vis du climat extérieur, en lien avec les mesures de la campagne de terrain.

2.3.2. Document d'audit des logements

Une trame de diagnostic a été préparée pour recueillir un maximum d'informations techniques sur les logements lors des visites. Le document est fourni en Annexe 2.

Les informations relevées pour permettre de modéliser les logements ont été de nature variée : composition et orientation des parois, mètres, types et coloris des matériaux de revêtement, présence ou absence de systèmes de ventilation...

Ce diagnostic est par ailleurs lié aux questionnaires décrits au paragraphe précédent.

2.3.3. Choix de la métrologie

Les paramètres identifiés comme d'intérêt pour l'étude sont la température (air et surface), l'humidité ambiante et le taux de CO₂.

Le suivi sur une période d'un an de ces différents paramètres a nécessité d'opter pour des dispositifs enregistreurs autonomes énergétiquement. Notre choix s'est arrêté sur des modèles proposés par Testo.

Les capteurs finalement retenus (Photographie 1) sont les suivants :

- Enregistreur 160IAQ de température, d'humidité relative et de concentration en CO2
- Enregistreur 160TH de température et d'humidité relative
- Sonde pour mesure de température de surface compatible avec un enregistreur Testo Saveris T2



Photographie 1 : Modèles de capteurs déployés dans les logements (de gauche à droite) : 160IAQ – 160TH – Saveris

Les mesures ont été réalisées avec un pas de temps de 1 heure.

2.3.4. Stratégie de prélèvement et d'analyse des moisissures

Pour l'analyse des moisissures dans les logements sélectionnés, une inspection visuelle est d'abord envisagée pour conduire à la localisation des contaminations fongiques. Plusieurs prélèvements sont ensuite possibles :

- des scotchs tests
- des écouvillonnages secs
- des prélèvements de matériaux bruts si ceux-ci sont accessibles et fortement contaminés

En première approche, un examen microscopique des scotchs est utilisé pour identifier les genres de moisissures majoritairement présents.

Une analyse ADN directe ciblant la région ITS a été réalisée sur les écouvillons pour permettre d'identifier l'espèce majoritaire présente au niveau du prélèvement.

Des analyses après mise en culture ont également été réalisées pour caractériser la mycoflore cultivable de la manière la plus exhaustive possible, plusieurs milieux de culture qui favorisent différentes typologies de moisissures ont ainsi été utilisés. Des identifications microscopiques et par ADN ont été réalisées sur les souches pures isolées par repiquages successifs.

Lors des visites, les occupants de trois des logements ont déclaré traiter régulièrement les surfaces à l'eau de Javel de 1 fois par semaine à une fois tous les deux mois.

2.3.5. Outils de modélisation numérique

2.3.5.1. Simulation thermique dynamique des logements

Au commencement de la tâche, il était prévu de réaliser les simulations énergétiques à partir de l'outil COMETH du CSTB, moteur de calcul de la réglementation thermique. Une version spécifique du moteur, dite en « convention ouverte » devait être utilisée, elle permettait de profiter de tous les modèles et hypothèses embarqués dans la réglementation thermique tout en offrant la possibilité de s'affranchir de certaines conventions réglementaires, telles que les fichiers météorologiques ou les scénarios d'occupation.

Un premier travail a été ainsi réalisé pour simuler un des bâtiments du panel, mais des difficultés liées à la gestion des baies de type « jalousie », ou la modélisation des varangues, espaces semi-ouverts en contact avec le bâtiment, et des échanges aérodynamiques possibles entre ces différentes zones ont rapidement abouti au constat que l'outil réglementaire de la métropole n'était pas adapté à la situation.

Nous nous sommes alors dirigés vers un outil de simulation thermique dynamique du bâtiment, plus souple et modulable, plus adapté à cette situation, TRNSYS. TRNSYS est une structure modulaire de simulation des systèmes énergétiques,

développée par le laboratoire d’Energie Solaire de l’Université de Wisconsin-Madison. Créé à l’origine pour étudier plus particulièrement les systèmes concernant l’énergie solaire, il est utilisé actuellement de façon plus générale dans le domaine de la modélisation thermo-aéraulique des bâtiments et des systèmes. Le fonctionnement du logiciel est basé sur l’assemblage de modules élémentaires appelés TYPE, représentant les composants du système simulé. Une bibliothèque regroupant des familles de modules est fournie avec le logiciel. Il est généralement schématisé par une boîte possédant des variables d’entrée, des paramètres constants et des variables de sortie. L’utilisateur doit connecter les entrées et sorties de tous les modules utilisés pour déterminer le comportement du système global. Le logiciel effectue l’ensemble des calculs de manière itérative, jusqu’à obtenir la convergence.

La modélisation du bâtiment est réalisée à l’aide d’un logiciel intégré à TRNSYS, appelé TRNBUILD. Ce dernier permet de générer le TYPE 56 d’un bâtiment multi-zones à partir d’une interface graphique. Ainsi les métrés, composition d’enveloppe, type de baies, pont thermiques, infiltration, débit de ventilation sont autant de paramètres d’entrée à définir, le logiciel se chargeant de réaliser le bilan thermique et hygrothermique. La gestion des protections mobiles et les différents débits aérauliques entre zones (varangues, pièces intérieures, étage) sont calculés en parallèles et intégrés à chaque pas de temps au modèle de bâtiment.

2.3.5.2. Modélisation hygrothermique des parois des logements

Les simulations hygrothermiques à l’échelle de la paroi ont été réalisées à l’aide du logiciel WUFI® (Wärme Und Feuchte Instationär) édité par l’IBP Fraunhofer. À partir des paramètres d’entrée fournis (climats intérieur et extérieur ainsi que les propriétés des matériaux), le logiciel WUFI® permet de déterminer les champs de température, d’humidité relative et de teneur en eau, en tous points des composants de la paroi. Reconnu et très répandu dans le domaine du bâtiment, WUFI est basé en grande partie sur le modèle de transfert de chaleur et d’humidité développé par H. Kunzel (Simultaneous heat and moisture transport in building component – PhD Thesis Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995).

3. Campagnes de terrain

3.1. Première approche : ATMO Réunion

Les 8 logements sélectionnés ont été visités par l’ATMO Réunion courant de l’été 2020. Cette phase de l’étude avait vocation à réaliser leur diagnostic par un Conseiller Médical en Environnement Intérieur (CMEI) et assurer la prise de contact avec les locataires.

Le rapport de l’ATMO, anonymisé, est présenté en Annexe 3.

La synthèse des caractéristiques des 8 logements investigués alors et les résultats des prélèvements de moisissures réalisés sont présentés respectivement dans le Tableau 3 et le Tableau 4.

Désignation	Typologie	Altitude	T°C ext	T°C int	HR % ext	HR % int	CO ₂ ppm ext	CO ₂ ppm int	Moisissures	Nb de prélèvements
OPHY 1	Maison jumelée / F3	800	21.4	20.8	67.2	73.7	322	372	modérée	4
OPHY 2	Maison jumelée / F4	1000	15.6	18.5	62.4	66.7	326	1151	modérée	3
OPHY 3	Maison jumelée / F4	1000	15.6	20.9	62.4	59.2	326	618	légère	2
OPHY 4	Appartement RDC / T5	650	18.7	19.7	57	59.3	355	450	importante	3
OPHY 5	Maison jumelée / F2	975	19.5	18.7	55.9	59.8	333	363	Légère	1
OPHY 6	Appartement 1 ^{er} étage / T2	250	22.7	23.3	69.2	67.4	388	400	Absente	1
OPHY 7	Maison jumelée / F4	580	23.9	22.3	58.3	62.9	355	345	Légère	1
OPHY 8	Maison jumelée / F4	915	16.9	17.5	57.3	59.3	330	372	Importante	3

Tableau 3 : Synthèse des caractéristiques des logements visités

N° prélèvement	date	Localisation	Type	Environnement	Altitude m	Lieu	Pièce	Support	Surf. m²	Méthode	Résultats
OPTY 1	24/06/2020	Le TAMPON	Maison	Péri-urbain	800	mur de la chambre	Chambre	Mur peint.	0,1	ecouvillonnage	Curvularia lunata 21 UFC ; Colonies bactériennes envahissement
OPTY 2	24/06/2020	Le TAMPON	Maison	Péri-urbain	800	Faux plafond bois	Cuisine	Lambris bois	0,5	ecouvillonnage	Colonies bactériennes 8 UFC
OPTY 3	24/06/2020	Le TAMPON	Maison	Péri-urbain	800	Mur	Terrasse	Mur peint	1	ecouvillonnage	Aspergillus niger 3 UFC ; Mucor sp. envahissement
OPTY 4	24/06/2020	Le TAMPON	Maison	Péri-urbain	800	Faux plafond bois	Séjour	Lambris bois	1	ecouvillonnage	Colonies bactériennes envahissement
OPTY 5	04/08/2020	Le TAMPON	Maison jumelée	Péri-urbain	1000	Plafond	Salle de bain	Mur placo	0,1	ecouvillonnage	Penicillium sp. 20 UFC ; Colonies bactériennes envahissement
OPTY 6	04/08/2020	Le TAMPON	Maison jumelée	Péri-urbain	1000	Tête de lit	Chambre	Meuble bois	1	ecouvillonnage	Penicillium sp. semi-envahissement ; Colonies bactériennes envahissement
OPTY 7	04/08/2020	Le TAMPON	Maison jumelée	Péri-urbain	1000	Mur	Chambre	Mur peint	0,01	ecouvillonnage	Colonies bactériennes envahissement
OPTY 8	04/08/2020	Le TAMPON	Maison jumelée	Péri-urbain	1000	Mur	Chambre	Mur peint	0,5	ecouvillonnage	Penicillium sp. envahissement ; Cladosporium sp. Semi-envahissement ; Levures envahissement ; Colonies bactériennes envahissement
OPTY 9	04/08/2020	Le TAMPON	Maison jumelée	Péri-urbain	1000	Faux plafond bois	Salle à manger	Lambris bois	0,5	ecouvillonnage	Colonies bactériennes envahissement
OPTY 10	11/08/2020	Le GUILLAUME	Appartement	Péri-urbain	650	Entrée	Entrée	Mur placo	0,5	ecouvillonnage	Cladosporium sp. 10 UFC ; Aspergillus sp. 15 UFC ; Colonies bactériennes envahissement
OPTY 11	11/08/2020	Le GUILLAUME	Appartement	Péri-urbain	650	Mur	Salle de bain	Mur peint	1	ecouvillonnage	Penicillium sp. semi-envahissement ; Colonies bactériennes envahissement
OPTY 12	11/08/2020	Le GUILLAUME	Appartement	Péri-urbain	650	Paroi plastique	Terrasse	Plastique	0,1	ecouvillonnage	Colonies bactériennes envahissement
OPTY 13	11/08/2020	La PLAINE des PALMISTES	Maison jumelée	Péri-urbain	975	Mur	Cuisine	Mur peint	0,01	ecouvillonnage	Penicillium sp. envahissement
OPTY 14	18/08/2020	BRAS PANON	Appartement	Péri-urbain	250	Grille extraction d'air	Salle de bain	Plastique	0,001	ecouvillonnage	Mucor sp. envahissement ; Fusarium sp envahissement
OPTY 15	20/08/2020	TROIS BASSINS	Maison jumelée	Péri-urbain	580	Mur	Salle de bain	Mur peint	0,001	ecouvillonnage	Mucor sp. envahissement ; Aspergillus niger envahissement
OPTY 16	21/08/2020	Le GUILLAUME	Maison jumelée	Péri-urbain	915	Mur	Séjour	Mur peint	0,01	ecouvillonnage	Cladosporium sp. envahissement ; Aspergillus versicolor envahissement ; colonies bactériennes envahissement
OPTY 17	21/08/2020	Le GUILLAUME	Maison jumelée	Péri-urbain	915	Meuble	Salle de bain	Bois peint	0,5	ecouvillonnage	Cladosporium sp. 30 UFC ; colonies bactériennes envahissement
OPTY 18	21/08/2020	Le GUILLAUME	Maison jumelée	Péri-urbain	915	Mur	Chambre	Mur peint	1	ecouvillonnage	Cladosporium sp. 24 UFC ; Penicillium sp. envahissement ; Rhizopus stonolifer envahissement

Tableau 4 : Résultats des prélèvements moisissures réalisés dans le cadre du projet OPTHYUM

Compte tenu du décalage de la campagne de terrain par rapport à la visite initiale réalisée par l'ATMO, 2 des 8 logements initialement identifiés (OPHY3 et OPHY8) ont dû être remplacés.

A noter que les 8 logements présentés dans le Tableau 2 sont ceux qui ont été effectivement investigués et instrumentés à partir de l'automne 2021.

3.2.Campagne de déploiement de la métrologie, de prélèvement de moisissures et d'audit technique des logements

Initialement envisagée à l'automne 2020, la campagne de terrain, au regard de la pandémie de COVID19 et des mesures sanitaires mises en œuvre localement, a finalement pu être réalisée fin octobre 2021 dans les 8 logements.

Elle a consisté en le recueil d'informations sur la base de l'administration de questionnaires à l'occupant, de l'inspection des lieux avec renseignements autant que possible des caractéristiques du logement (composition des parois, nature des revêtements, mode de chauffage...), des prélèvements de moisissures et le déploiement des capteurs de température, d'humidité et de CO₂

Les capteurs de température, humidité et CO₂ ont été déployés préférentiellement dans les pièces de vie (un capteur de chacun des trois modèles retenus).

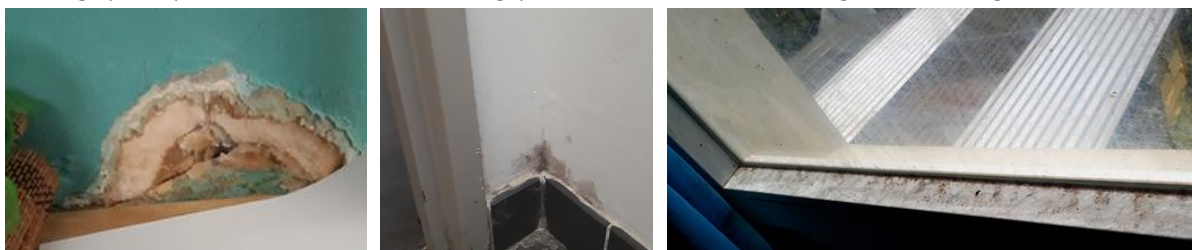
Un capteur de température, d'humidité relative et de concentration en CO₂ (modèle 160IAQ) a par ailleurs été installé à l'extérieur de chaque logement.

Les prélèvements de moisissures ont étéensemencés sur trois milieux nutritifs (Photographie 2) pour identification macroscopique complétée au besoin par analyse biomoléculaire après isolement.



Photographie 2 : développement d'un prélèvement de terrain inoculé sur différents milieux nutritifs

La Photographie 3 présente des contaminations fongiques observées dans différents logements investigués.



Photographie 3 : contaminations fongiques observées dans les logements investigués

Concernant les identifications de moisissures réalisées, les résultats sont présentés en Annexe 4. Il est à noter que 2 logements (OPHY3 et OPHY6) ne présentaient pas de développements apparents et n'ont pas fait l'objet de prélèvements par écouvillonnage.

L'ensemble des analyses a révélé que 2 genres sont très majoritairement représentés au sein de toutes les identifications réalisées : *Aspergillus* (71%) et *Cladosporium* (11%). Ainsi les espèces, *Aspergillus versicolor* et *Cladosporium sphaerospermum* sont très présentes dans le logement OPHY2, logement choisi pour définir les paramètres température et humidité des tests à l'échelle paroi. Du fait de leur prévalence, ces deux souches ont été utilisées pour la réalisation des tests à l'échelle paroi. Il est à noter que le diagnostic des 6 logements investigués par l'ATMO et par le consortium convergent quant à la présence de contaminations fongiques. Pour autant concernant l'identification des moisissures les méthodes déployées (mise en culture par dépôt direct pour l'ATMO vs isolement des souches sur plusieurs milieux de culture pour obtention de souches pures) peuvent expliquer la plus grande diversité fongique obtenue à l'issue de la campagne menée à l'automne 2021 comparativement à celle de l'été 2020.

Concernant les **audits techniques** des logements, réalisés selon la grille présentée en Annexe 2, les différents points suivants ont été relevés et pris en compte :

- Implantation du bâtiment et orientation des façades ;
- Présence de masques extérieurs ;
- Vérification des plans fournis par la SHLMR (métré des locaux, des surfaces vitrées, des surfaces ouvrantes, des occultations...) ;
- Composition et caractéristiques des parois opaques de l'enveloppe du logement ;
- Types de combles ;
- Caractéristiques des menuiseries extérieures et de leurs protections solaires ;
- Composition et caractéristiques des planchers bas et intermédiaires le cas échéant ;
- Présence ou absence d'une ventilation mécanique.

Des clichés ont été réalisés lors de ces visites à titre d'illustration (Photographie 4).



Photographie 4 : Mise en évidence de présence d'une VMC Simple flux dans les combles et mise en évidence de masques créés par les coursives sur une des façades

3.3. Vérification de la conformité des logements du projet à la réglementation thermique en vigueur lors de leur construction

Les logements sélectionnés dans le cadre de l'étude sont quasiment tous construits après 2009, date d'entrée en vigueur de la première version de la réglementation thermique des DOM. Le Tableau 5 rappelle les versions de la réglementation selon lesquelles sera évaluée la conformité des logements.

	Avant 2009	RTAA DOM Version 2009	RTAA DOM Version 2016
Alt. ≤ 600m	-	OPHY 6	
Alt > 600m	OPHY 1	OPHY 2 OPHY 4 OPHY 5 OPHY 8	OPHY 3

Tableau 5 : version de la RTAA Dom applicable aux différents logements du panel de l'étude

Malgré la volonté initiale de ne sélectionner que des logements construits avec les exigences de la réglementation thermique, qui est entrée en vigueur en 2009, il a été décidé de conserver le logement OPHY 1, construit en 1987, qui présentait de sérieuses contaminations fongiques. Ce faisant, il a été possible de constater les différences de qualité de vie, liées au développement fongique, dans les logements construits avant et après la RTAA Dom.

Le calcul de conformité a porté sur les parois opaques du bâtiment et sa ventilation. Les hypothèses établies sur la base des relevés réalisés durant les audits des logements sont présentées en Annexe 5.

Les Tableau 6 et Tableau 7 présentent les exigences minimales pour la protection des parois opaques des logements de la Réunion. Bien que les exigences ne varient pas d'une version à l'autre de la réglementation, celle de 2016 a diminué de 200 mètres l'altitude à partir de laquelle les logements sont considérés en climat des "Hauts" passant de 800 mètres (Version 2009) à 600 mètres (Version 2016).

	RTAA DOM Version 2009	RTAA DOM Version 2016
Paroi horizontale	$S \leq 0.03$	$S \leq$
Paroi Verticale	$S \leq 0.09$	$S \leq 0.09$

Tableau 6 : Exigence minimale pour la protection des parois opaques des logements des "Bas"

	RTAA DOM Version 2009	RTAA DOM Version 2016
Paroi horizontale	$U \leq 0.5$ $W/(m^2.k)$	$U \leq$
Paroi Verticale	$U \leq 2$ $W/(m^2.k)$	$U \leq 2$ $W/(m^2.k)$

Tableau 7 : Exigence minimale pour la protection des parois opaques des logements des "Hauts"

La vérification de la conformité des parois des logements considérés dans le cadre du projet, est présentée dans le Tableau 8. Le détail des calculs est présenté en Annexe 6.

Nom	Conformité des parois	Conformité hygiénique	Ventilation
OPHY 1	Parois Verticales : -		
	Toiture : -		
OPHY 2	Parois Verticales : Non Conforme	Ventilation Ouverture Conforme	d'hygiène minimale
	Toiture : Non Conforme		
OPHY 3	Parois Verticales : Conforme	Ventilation Ouverture Conforme	d'hygiène minimale
	Toiture : -		
OPHY 4	Parois Verticales : Conforme	Ventilation VMC A priori Conforme	d'hygiène
	Toiture : -		
OPHY 5	Parois Verticales : Non Conforme	Ventilation VMC A priori Conforme	d'hygiène
	Toiture : Conforme		
OPHY 6	Parois Verticales : Non Conforme	-	
	Toiture : -		
OPHY 7	Parois Verticales : Conforme	-	
	Toiture : Non Conforme		
OPHY 8	Parois Verticales : Non Conforme	Ventilation Ouverture Non Conforme	d'hygiène minimale
	Toiture : Non Conforme		

Tableau 8 : calcul de la conformité des parois et de la ventilation vis-à-vis de la RTAA – DOM

D'après ces calculs, réalisés sur la base des constatations de terrain, il apparaît une variété de situations s'agissant des parois verticales, toitures et de la ventilation.

Ainsi sur les 7 logements construits après la parution de la RTAA DOM, les exigences pour assurer une ventilation d'hygiène sont respectées dans 4 logements. Dans le cas des logements OPHY 2 et OPHY 3, la ventilation est envisagée naturellement par les ouvertures adaptées. Dans les cas des logements OPHY 4 et OPHY 5 la ventilation est envisagée de manière mécanique mais n'a pas pu être mesurée in situ.

Pour ce qui est de la toiture, sur les 4 logements pour lesquels le calcul de déperdition est possible (OPHY 3,4 et 6 ayant un autre logement au-dessus d'eux), un seul est conforme (OPHY5).

Concernant les parois verticales, sur les 7 logements seulement 3 apparaissent comme conformes.

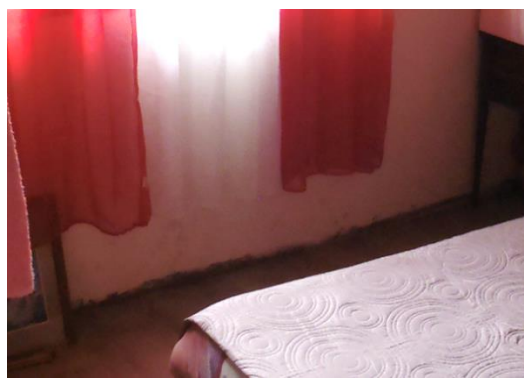
Il apparaît ainsi que seules les parois possédant un complément d'isolation permettent de respecter les exigences réglementaires.

3.4. Constatation de désordres dans les différents logements

Au-delà de simplement fournir les données d'entrée et les hypothèses pour les simulations numériques, la campagne d'audit a permis d'identifier certaines sources de désordres pouvant favoriser le développement de moisissures à l'intérieur des logements.

Parmi les principales causes identifiées, nous en retenons 4 principales, illustrées par des clichés présentés dans la :

- La condensation de l'air intérieur sur des parois froides, en particulier au niveau des menuiseries simple vitrage et au niveau des ponts thermique insuffisamment isolés
- Le manque de renouvellement d'air prolongé dans les pièces humides
- Les remontées capillaires
- Les infiltrations



Photographie 5 (de gauche à droite du haut vers le bas) : Condensation de l'humidité sur la face interne du vitrage et présence de moisissure au niveau des ponts thermiques de la menuiserie - Moisissures prélevées en pied de mur derrière un meuble où l'humidité de l'air est restée suffisamment élevée pour permettre leur développement - Joint d'étanchéité de la menuiserie dégradé ouvrant la voie à des infiltrations d'air froid et d'eau de l'extérieur - Détérioration de la peinture en pied de mur résultant des remontées capillaires

4. Simulations Numériques dynamiques des logements

4.1. Modélisation des logements et des parois

Dans le cadre de cette étude, l'un des enjeux était de modéliser tant les logements investigués afin d'appréhender les conditions climatiques intérieures que les parois pour approcher le risque de prolifération fongiques.

Les paragraphes suivants présentent la stratégie qui a été mise en œuvre pour ce faire avec notamment la détermination des données d'entrée.

4.1.1. Retours de terrain et exploitation des questionnaires

Le présent chapitre vise à présenter et à analyser les données recueillies à partir des questionnaires soumis aux occupants et des retours terrain des logements sélectionnés au cours de notre campagne de terrain. Les questionnaires ont été élaborés dans le but de caractériser au mieux le comportement des usagers vis-à-vis du climat extérieur, en lien avec les mesures effectuées dans le cadre de notre étude. Ils abordent divers aspects tels que le nombre de personnes résidant dans le logement, les pratiques de ventilation et de chauffage, ainsi que la réalisation éventuelle de travaux de rénovation. Les audits ont été menés afin d'obtenir un maximum de données techniques sur les logements lors des visites.

Ces différentes données ont permis de définir le plus précisément possible les données d'entrées à renseigner dans les outils de simulation à l'échelle du bâtiment, que ce soit en termes d'informations liés au bâti (vérification des métrés, analyse de la composition de l'enveloppe, surfaces vitrées...) ou bien en termes de définition des scénarios d'occupation (fréquence d'ouverture de fenêtres, présences des occupants...).

L'ensemble de ces données issues de l'analyse des questionnaires et des diagnostics terrain sont présentées en Annexe 5.

A titre d'exemple les informations recueillies pour le logement, OPTHY 5, sont détaillées ci-après.

OPHY 5

Site

Station météo la plus proche : Plaine des palmistes

Altitude, en m : 970 m



Figure 1 : photo aérienne du site et plan de masse de OPHY5

Généralités sur le bâtiment

Année de construction : 2011 – 2012

Portes Fenêtres séjour H220 x 120 cm

Portes fenêtres chambre H210 x 83 cm

Hauteur sous-plafond 2,48 m

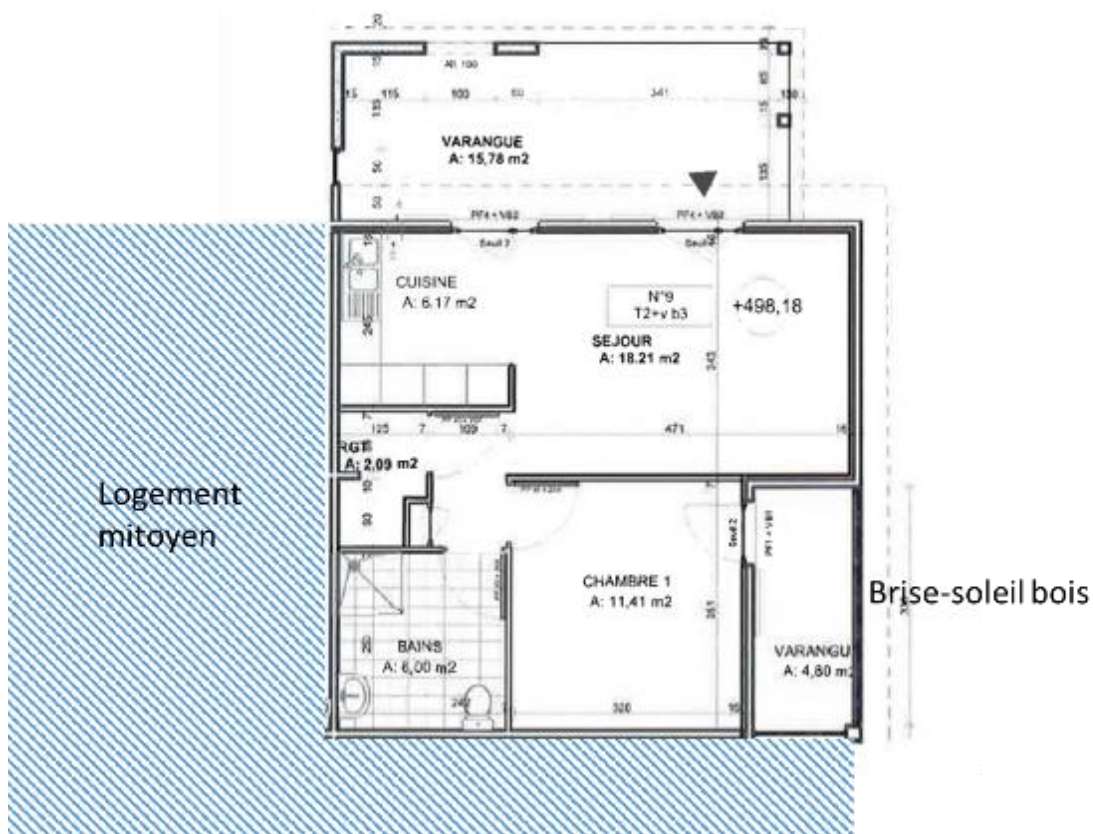


Figure 2 : Plan métré du logement OPTHY5

Toutes les ouvertures sont sous varangues



Photographie 5 : cliché OPTHY5 - Photo générale extérieur du bâtiment

Types de parois opaques

Murs verticaux :

- Nord : peinture ext + béton 10 cm+ contre-cloison non-isolée BA13H
- Ouest : peinture int sur mur mitoyen
- Sud : peinture int sur mur mitoyen
- Est : peinture ext + béton + contre-cloison non-isolée BA13H

Toiture : *comble perdu isolé avec laine minérale et plafond BA13 (Laine minérale URSA ép 15 cm)*

Plancher bas : Plancher béton non isolé sur terre-plein

Teintes extérieures des parois opaques (selon nuancier)

Coloris	Blanc Jaune Orange Rouge clair	Rouge sombre Vert clair Bleu clair Gris clair	Brun Vert sombre Bleu vif Gris moyen	Noir Brun sombre Bleu sombre Gris sombre
Type de couleur	« couleur claire »	« couleur moyenne »	« couleur sombre »	« couleur noire »

Murs verticaux

Clares

Toiture

Moyennes



Photographie 6 : cliché OPTHY5 - Façade nord



Photographie 7 : cliché OPTHY5 - Façade est



Photographie 8 : cliché OPTHY5 - Varangue (est)

Types de parois vitrées

Vitrage : Simple vitrage (toutes les ouvertures sont sous varangues)

Menuiserie : PVC

Protection solaire : Volet opaque (roulant ou battant) // volet battant PVC

Moustiquaire : pas de moustiquaire

Teintes extérieures des protections solaires (selon nuancier)

Protections solaires : pas de protections solaires (Toutes les ouvertures sont sous varangues)

Types de revêtements intérieurs

Sols : sol souple PVC +

Murs : BA 13 H ou peinture sur porteur

Plafonds : BA13

Ventilation et systèmes

Ventilation : VMC

Refroidissement : Aucun

Chauffage : convecteur d'appoint bain d'huile

Présence d'un brasseur d'air : non

Présence

Semaine (lundi au vendredi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Weekend (samedi et dimanche)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Ouverture des fenêtres

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
f	f	f	f	f	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	f	f	f	f	f	f	f	f

VMC

☒ Cuisine (fonctionnement continu)

- ☒ SDB (fonctionnement continu)
- ☒ WC (fonctionnement continu)
- ☐ Chambres

Equipements

- Lave-linge (1x/semaine)
- Télévision
- Ordinateur
- Réfrigérateur
- Congélateur
- Fontaine à eau

4.1.2. Exploitation des données des capteurs

Au cours de notre projet de recherche, nous avons supervisé huit logements à l'aide d'un réseau de capteurs variés (voir §2.3.3), visant à recueillir des informations précieuses sur les conditions de confort des occupants. Toutefois, il est important de noter que certains capteurs ont rencontré des dysfonctionnements, entraînant une perte partielle de données. Parmi les causes desdits dysfonctionnements, la principale identifiée est la difficulté d'accès à internet dans certaines zones, qui a compromis la télétransmission des données mesurées au serveur. Cela a également contraint l'équipe à changer de stratégie et d'opter pour une relève manuelle des données des capteurs.

Malgré ces contraintes, nous disposons de résultats significatifs et intéressants qui ont fait l'objet d'une analyse approfondie.

A titre d'exemple quelques résultats sont présentés ci-après avec :

- les concentrations intérieures et extérieures en CO₂ mesurées dans le logement OPTHY5 (Figure 3),
- les température et humidité relative mesurées dans le logement OPTHY8 (Figure 4),
- les température et humidité relative mesurées dans le logement OPTHY5 et en extérieur (Figure 5 et Figure 6).

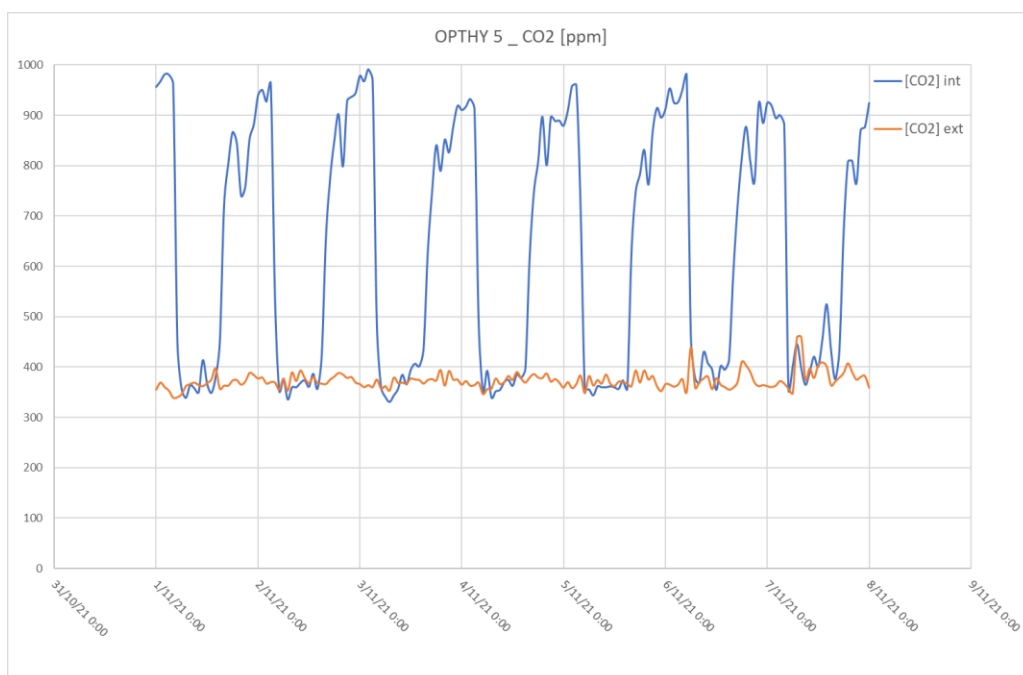


Figure 3 : Mesure des concentrations en CO₂ intérieur et extérieur, pour le logement OPTHY5, pour une semaine estivale type

Les données de concentration en CO₂ (pas de temps de mesure d'une heure) ont permis de conforter les scénarios d'ouverture de fenêtres relevés lors des enquêtes auprès des usagers, apportant ainsi une validation solide des données subjectives obtenues. En effet, les pics de concentration en CO₂, de l'ordre de 800 à 1000 ppm, correspondent aux périodes de fermeture des fenêtres au contraire des minimums de concentrations en CO₂ qui se rapprochent des niveaux extérieurs, de l'ordre de 400 ppm, confirmant les ouvertures des menuiseries.

La Figure 4 présente les température et humidité relative mesurées par l'un des capteurs disposés dans le logement OPTHY8.

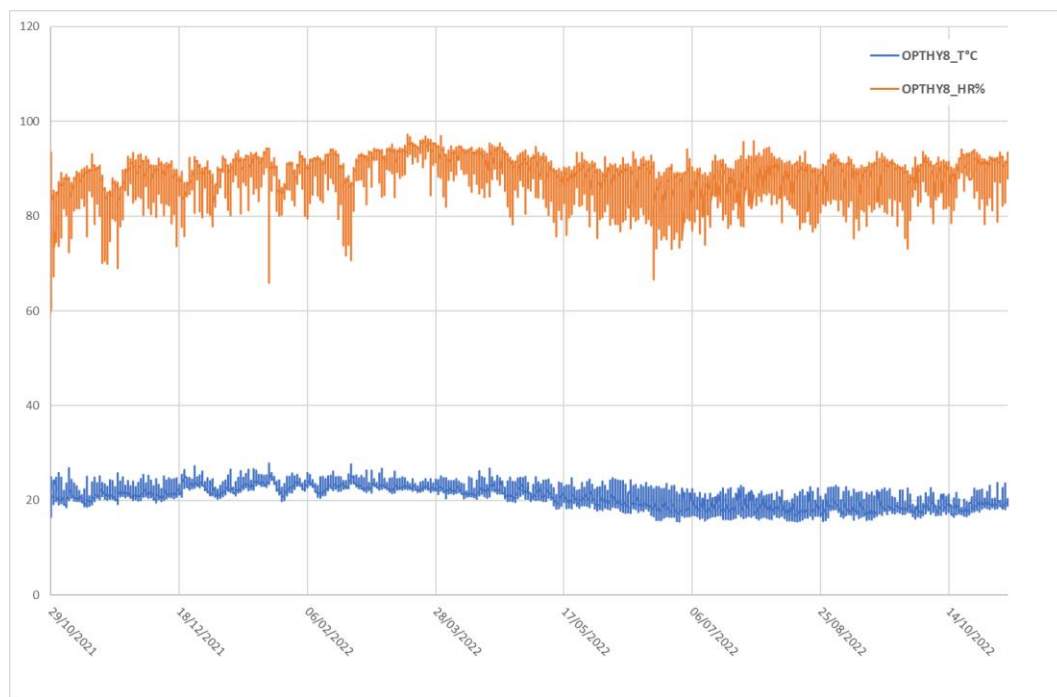


Figure 4 : Mesure des températures et humidités relatives intérieures pour le logement OPTHY8

Les profils de températures et d'humidités relatives mesurées par un capteur au sein d'un logement, font apparaître une certaine variabilité des données vis-à-vis du pas de temps (1 heure), cette observation est constatée pour la majorité des autres logements : on peut observer une variation journalière maximale de l'ordre de 28% sur l'HR et de 6° sur la température ; concernant la variabilité saisonnière on observe une différence de 0,4% sur l'HR et de 5,7° sur la température entre la saison chaude (mois de février) et la saison froide (mois d'août) avec des températures moyennes respectives de 23,4°C et 17,7°C et des humidités relatives moyennes respectives de 88,7% et de 88,4%.

Les données mesurées à l'intérieur des logements peuvent également être mises en regard des relevés effectués par les capteurs installés en extérieur, comme présenté dans la Figure 5 pour les températures et dans la Figure 6 pour l'humidité relative.

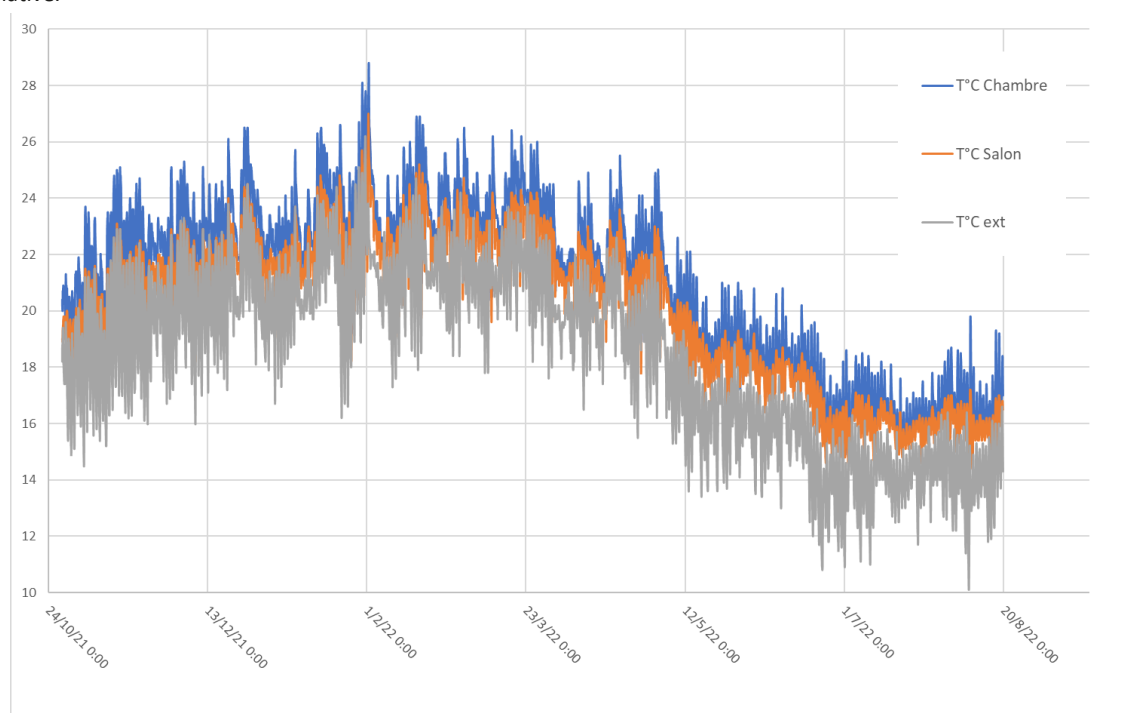


Figure 5 : Mesure des températures intérieures et extérieures pour le logement OPTHY5

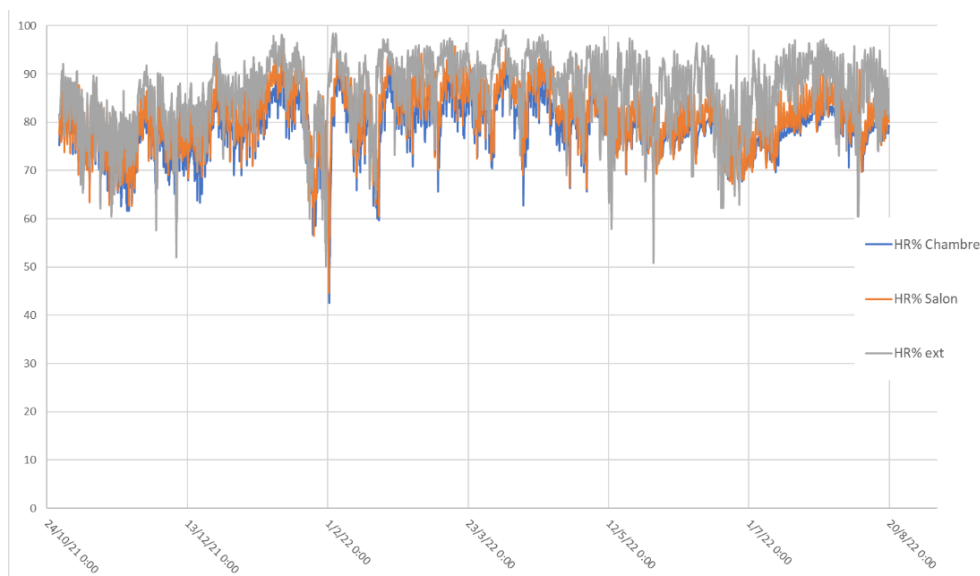


Figure 6 : Mesure des humidités relatives intérieures et extérieures pour le logement OPTHY5

Les profils des températures et humidités relatives mesurées dans les logements et en extérieur ont permis de confirmer une corrélation significative entre les conditions climatiques extérieures et les données d'ambiance à l'intérieur des logements. En effet les courbes intérieures et extérieures présentent les mêmes allures avec des écarts relativement faibles si l'on s'intéresse à la saisonnalité :

- Pour la saison chaude (mois de février) on constate un écart moyen de l'ordre de 6,4% entre les humidités relatives extérieures et intérieures (écart type 8,1%) et de l'ordre de 2°C entre les températures intérieures et extérieures (écart type de 1,3°),

Pour la saison froide (mois d'août) on constate un écart moyen de l'ordre de 7% entre les humidités relatives extérieures et intérieures (écart type 6,1%) et de l'ordre de 1,9°C entre les températures intérieures et extérieures (écart type de 1°C).

Il est admis que les variations d'humidité relative à l'intérieur des logements doivent être contenues entre 40% et 60% pour éviter tout risque pour la santé. De plus, à partir de 60% d'humidité relative les conditions deviennent favorables au développement fongique (Figure 7).

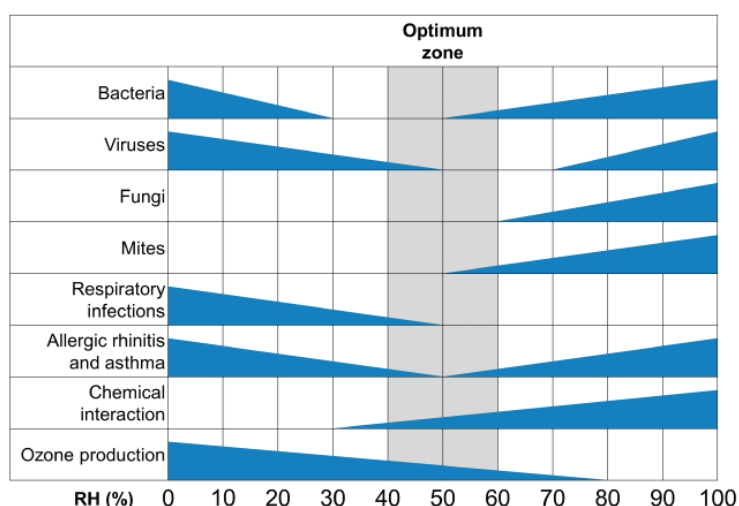


Figure 7 : impact de l'humidité relative sur différents éléments susceptibles d'impacter la santé des occupants dans les lieux de vie ¹

¹ Anthony Arundel, Elia Sterling, and Judith Biggin. Indirect health effect of relative humidity in indoor environments. Environmental Health Perspectives, 65:351, 1986.

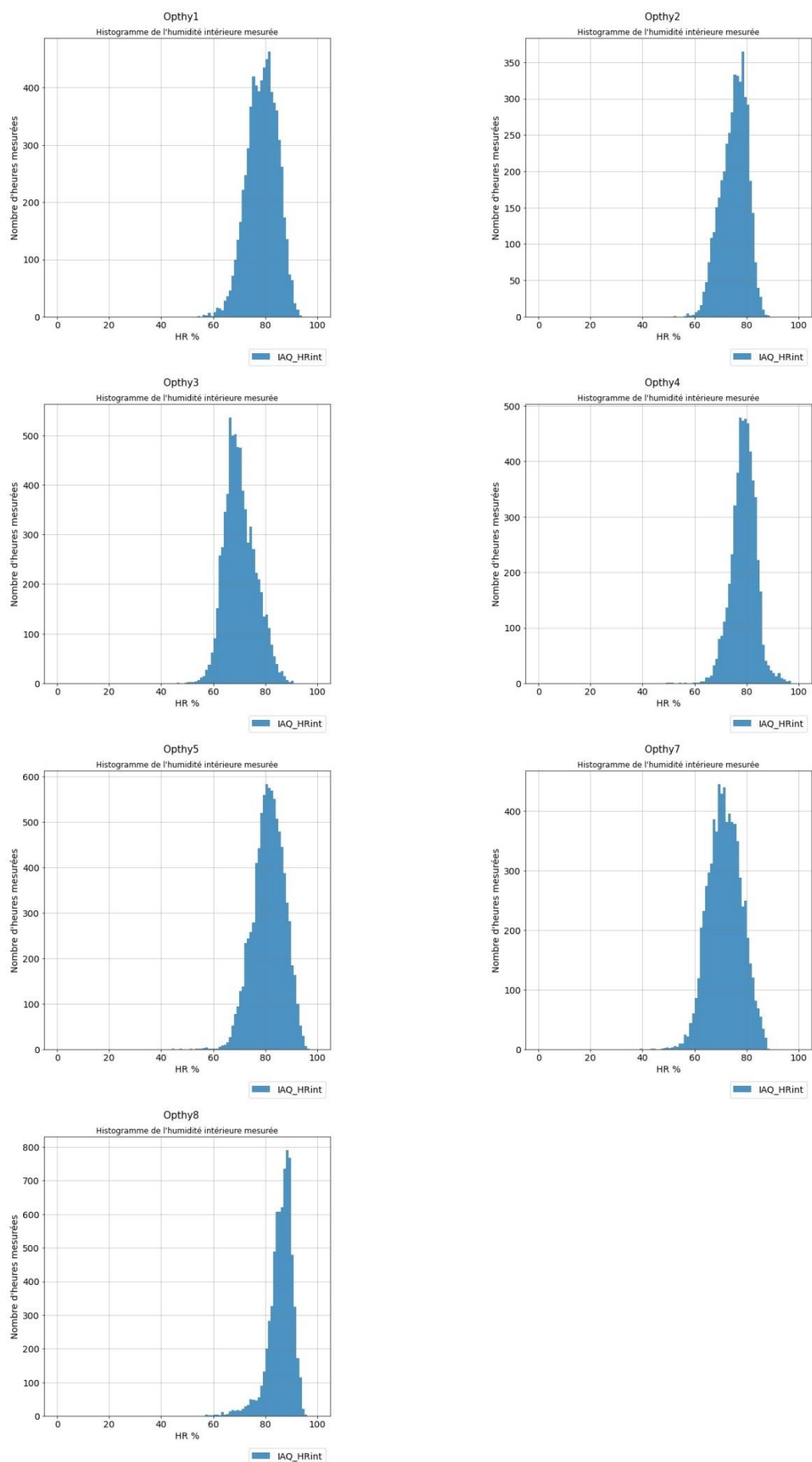


Figure 8 : Histogramme de l'humidité relative mesurée à l'intérieur des logements

En regardant l'histogramme de distribution de l'humidité relative à l'intérieur des différents logements, sur toute la période de mesure, nous pouvons constater que le seuil des 60% est dépassé la majorité du temps (Figure 8).

4.2. Simulation Thermique Dynamique (STD) des logements

4.2.1. Recueil des données d'entrées

Les données d'entrées nécessaires aux simulations regroupent :

- Les données météorologiques ;
- Les surfaces, métrés et orientation du bâtiment ;
- Les compositions de parois et fenêtres ;
- Les scénarios d'occupation et les apports internes.

Concernant les fichiers météorologiques, pour chaque bâtiment simulé nous avons sélectionné un des fichiers météorologiques des différentes stations définies dans le cadre du projet, à partir du positionnement géographique du projet. Une correction en altitude sur la température et l'humidité absolue a toutefois été nécessaire pour prendre en considération les différences d'altitude entre station et projet.

Les différents métrés ont été obtenus à partir des plans fournis par la SHLMR et corrigés le cas échéant par les retours terrain lors des investigations par les équipes du CSTB du CIRBAT et de FCBA (Annexe 5). Cette même démarche a été adoptée concernant la composition des parois.

Les informations recueillies dans les CCTP, parfois parcellaires ou incertaines, ont été mises à jour sur la base des retours terrains afin de valider les hypothèses prises.

Concernant les scénarios d'occupation et les apports internes, ils ont été définis sur la base des retours terrain.

4.2.2. Hypothèses retenues

Concernant la gestion des ouvrants, nous avons distingué les différentes baies en présence :

- Jalousies
- Baies autres que jalousie sur l'extérieur
- Baies autre que jalousie sur varangues
- Baies des varangues

Le mode de gestion est inspiré de la réglementation thermique mais des adaptations ont été faites pour chaque type.

Ainsi l'ouverture des jalousies dépend de la température extérieure et intérieure : fermées s'il fait trop froid ou trop chaud, ouvertes plus ou moins en fonction de la température intérieure. Il est pris pour hypothèse que ce fonctionnement est indépendant de la présence.

Les fenêtres autres que jalousies donnant sur l'extérieur sont gérées de la même manière, à la différence près qu'en cas d'inoccupation du bâtiment, elles sont considérées comme fermées.

La gestion des baies des varangues donnant sur l'extérieur est également identique à la différence près que c'est la température intérieure de la varangue qui intervient dans le calcul et que les baies sont considérées fermées en cas d'inoccupation et la nuit.

Enfin pour ce qui concerne les baies donnant sur les varangues, ici encore il est supposé qu'elles soient fermées en cas d'inoccupation et leur gestion est faite de sorte qu'elles s'ouvrent pour profiter de la chaleur de la varangue s'il fait froid dans le bâtiment, qu'elles se ferment pour éviter les surchauffes.

Le calcul des différents débits échangés est inspiré de la norme NF EN 16798 et dépend du caractère traversant ou non du bâtiment.

4.2.3. Résultats des simulations et comparaison avec les mesures

A l'issue des simulations, et sur la base des hypothèses considérées, explicitées en amont, les courbes de température et humidité relative intérieures et extérieures ont été générées pour chaque logement considéré. À noter que pour les logements OPTHY 2 et 7 qui disposaient d'un étage, les température et humidité relative au RDC et à l'étage ont été

différenciées. Les graphiques présentant les variations en termes de température et d'humidité relative des différents logements sont détaillés en Annexes 6 et 7.

Les températures et humidité relatives issues des simulation STD ont été confrontées aux mesures terrain. La comparaison entre simulation et mesure doit se faire en termes d'ordre de grandeur et de tendance et non sur des valeurs exactes car les situations météorologiques sont différentes (année type 2018 pour la simulation et 2022 pour la mesure terrain). Les courbes des Figure 9, Figure 10 et Figure 11 présentent, à titre d'illustration, la comparaison entre ces valeurs pour les logements OPTHY3, OPTHY5 et OPTHY7.

Ophy3

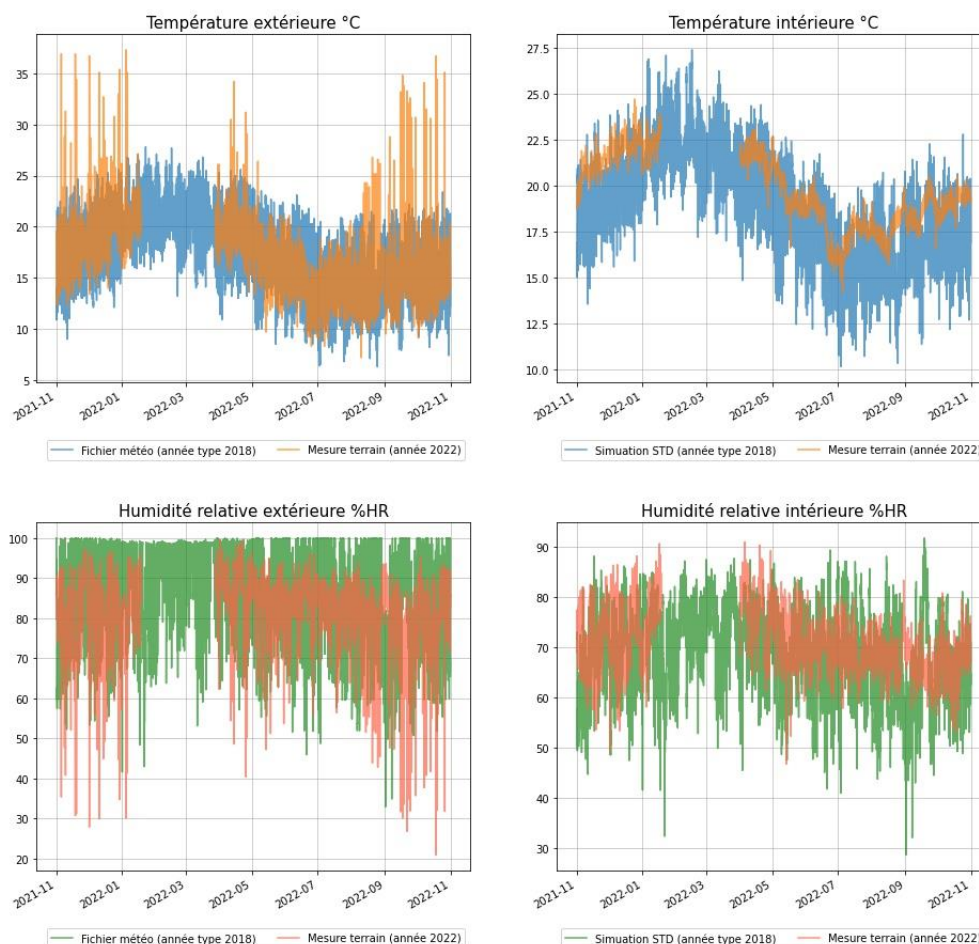


Figure 9 : Logement Ophy 3, comparaison des données de température et humidité relative à l'intérieur du logement, calculés par STD et mesurés

Opthy5

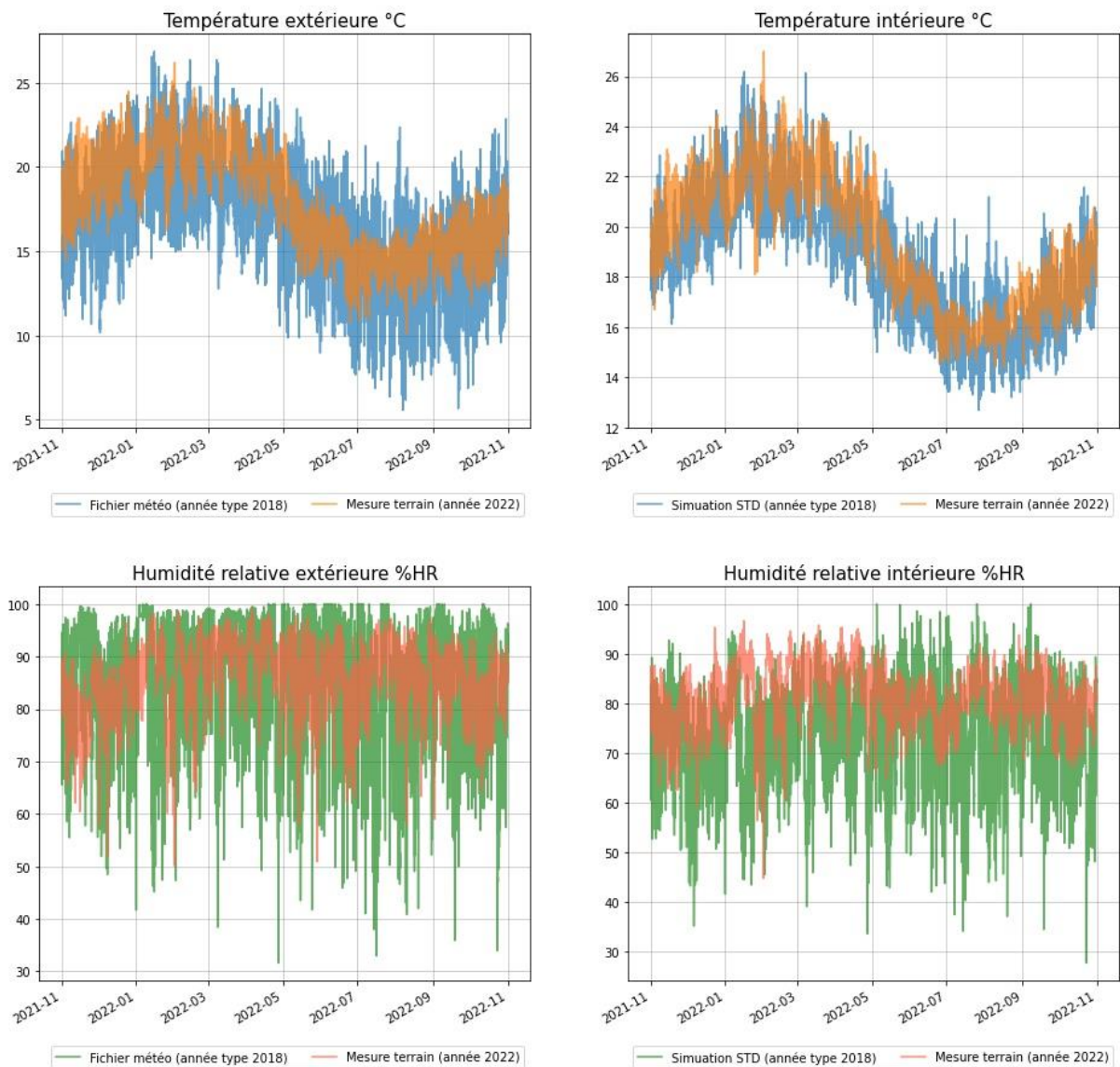


Figure 10 : Logement Opthy 5, comparaison des données de température et humidité relative à l'intérieur du logement, calculés par STD et mesurés

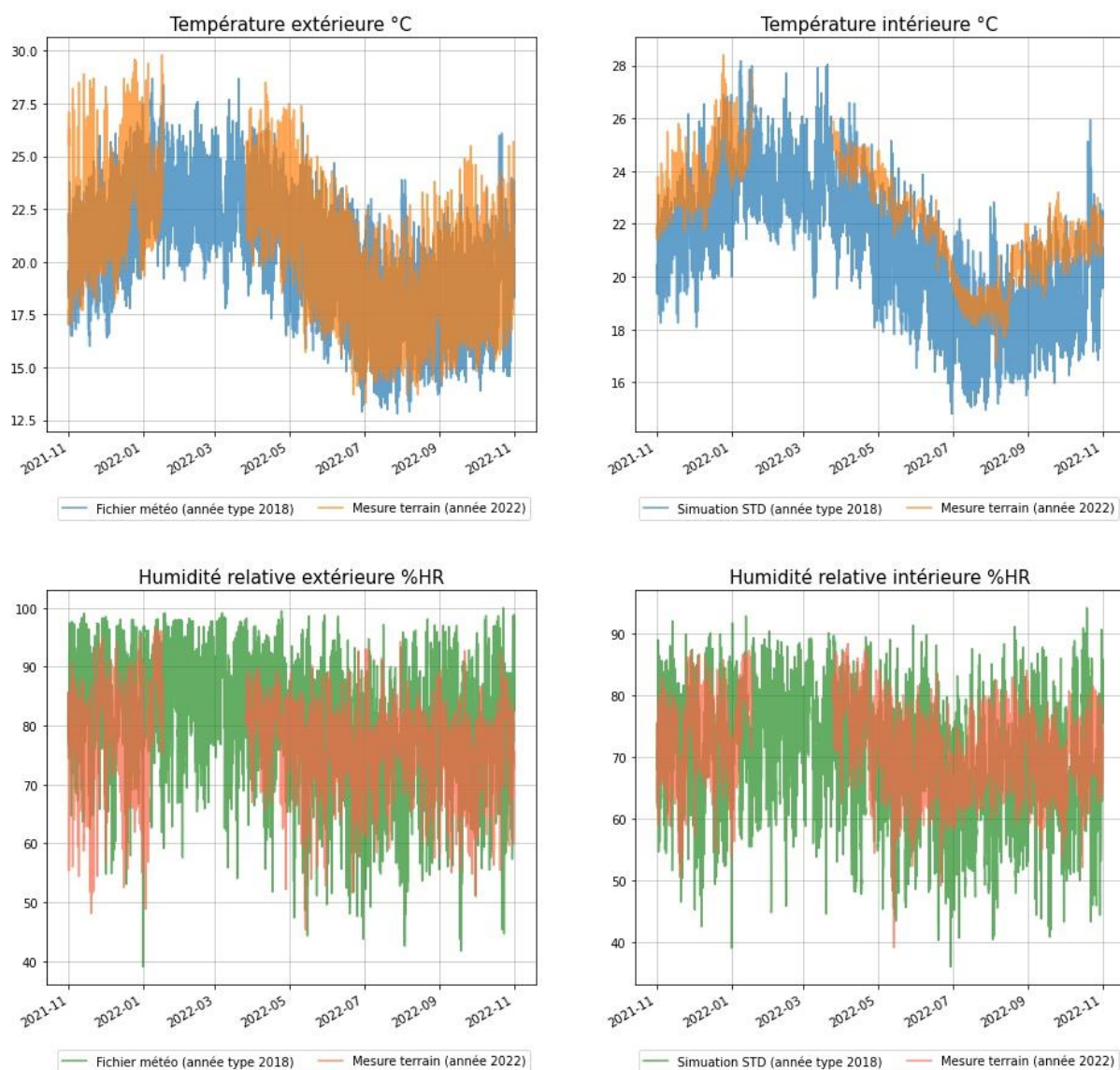


Figure 11 : Logement Ophy 7, comparaison des données de température et humidité relative à l'intérieur du logement, calculés par STD et mesurés

On remarque une bonne concordance entre les valeurs calculées et mesurées. À noter tout de même que les amplitudes des variations quotidiennes, de la température et de l'humidité relative dans les logements, sont plus importantes dans la simulation. En perspective, ces résultats offrent à la modélisation la possibilité d'étudier l'impact de potentielles pistes d'amélioration telles que le comportement des usagers vis-à-vis de la ventilation naturelle par ouverture des menuiseries, de l'optimisation des équipements tels que l'installation d'une VMC, ou l'ajout d'un chauffage dans les pièces critiques optimisé par programmation, l'amélioration du bâti (revêtement intérieur, isolation...).

4.3. Modélisation hygrothermique des parois des logements

Cette section décrit les étapes de travail conduisant à l'évaluation des transferts hygrothermiques dans les logements faisant l'objet de la campagne de terrain. Les simulations sont réalisées en 1D à l'échelle de la paroi à l'aide du logiciel WUFI.

Les résultats de ces simulations permettront pour chaque paroi :

- L'évaluation du risque de condensation à l'intérieur des parois
- L'évaluation du risque de développement fongique

4.3.1. Données climatiques utilisées

Afin de mener à bien les simulations hygrothermiques à l'échelle de la paroi, il est nécessaire de définir les données climatiques qui seront appliquées de part et d'autre.

Concernant les température et humidité relative intérieures et extérieures, les données sont issues des mesures terrain à partir des capteurs placés à l'intérieur et à l'extérieur des logements. Malheureusement, ces données sont parcellaires avec des « trous » de durées importantes (plusieurs semaines ou mois) ce qui ne permet pas de reconstituer une année entière. Pour les logements Ophy 1, Ophy 2, Ophy 3, Ophy 4, Ophy 5 et Ophy 7, les périodes manquantes sont complétées par les données climatiques issues de l'année type 2018 (données acquises auprès de Météo France) en faisant attention aux raccordements (pas de sauts). Pour Ophy 6 aucune donnée n'est remontée des capteurs et pour Ophy 8 les mesures ne représentent que 3 mois et ne couvrent pas la période hivernale. Pour ces raisons, la modélisation des transferts hygrothermiques à travers les parois n'est pas réalisée pour les logements Ophy 6 et Ophy 8.

Les autres données climatiques nécessaires à la modélisation (i.e. rayonnement solaire et précipitation de pluie) ne sont pas mesurées. Pour le rayonnement solaire et la précipitation le choix est fait d'utiliser les valeurs de l'année type 2018. Une vérification de la cohérence avec l'année 2022 est faite à travers les valeurs cumulées mensuelles issues des « Bulletin climatique mensuel de la Réunion » publiés par Météo France.

4.3.2. Composition des parois

Les investigations terrain ont permis de collecter des informations sur la composition des parois des logements étudiés. Ces informations étant incomplètes dans la plupart des cas, tant au niveau de la nature de certains matériaux que des épaisseurs, nous avons dû faire un certain nombre d'hypothèses. Les parois modélisées sont décrites dans le Tableau 9.

Logements	Composition des parois (de l'intérieur vers l'extérieur)	Epaisseurs (cm)
OPHY 1	Enduit hydraulique et peinture	1
	Parpaings	20
	Enduit hydraulique	2,5
OPHY 2	Enduit hydraulique et peinture	1
	Parpaings	20
	Enduit hydraulique	2,5
OPHY 3	Plaque de plâtre	1,3
	Parpaings	19
	Polystyrène	3
	Enduit hydraulique	1,5
OPHY 4	Peinture	0,1
	Parpaings	20
	Polystyrène	3
	Lame d'air ventilée	2,5
	Bois léger	1,8
OPHY 5	Peinture	0,1
	Plaque de plâtre	1,3
	Béton	10
	Peinture extérieure	0,1
OPHY 6	Peinture	0,1
	Plaque de plâtre	1,3
	Parpaing	15
	Peinture extérieure	0,1
OPHY 7	Enduit hydraulique	1
	Parpaings	20
	Enduit hydraulique	1

OPHY 8	Enduit plâtre	1
	Béton	20
	Enduit extérieur	1

Tableau 9 : Composition des parois des 8 logements sur la base des observations de terrain

Les paramètres hygrothermiques des différents matériaux ont été déterminés à partir de données génériques. En revanche, nous avons dû rechercher les valeurs spécifiques de la perméabilité à la vapeur des peintures utilisées, telles qu'indiquées par la SHLMR. Selon les fiches techniques, les produits utilisés sont de classes V2 (« moyenne »), et d'après la norme EN 1062-1, cela correspond à un Sd compris entre 0,14 et 1,4. Les simulations ont été réalisées avec ces valeurs extrémales.

Le Tableau 10 précise la valeur des paramètres hygrothermiques des différents matériaux constitutifs des parois verticales de l'enveloppe des logements investigués.

Matériau	Masse volumique [kg/m³]	Chaleur spécifique [j/(kg.K)]	Conductivité thermique sèche [W/(m.K)]	μ ou Sd [-] OU [m]
Béton	2300	850	1,6	$\mu= 180$
Parpaing	1900	850	1	$\mu= 40$
Enduit hydraulique	1600	850	0,7	$\mu= 12$
Bois léger	440	1600	0,12	$\mu= 106$
Plaque de plâtre	850	850	0,24	$\mu= 8,4$
Polystyrène	20	1500	0,038	$\mu= 40$
Peinture intérieure	NP*	NP*	NP*	Sd=0,14 ou Sd=14

Tableau 10 : paramètres hygrothermiques des différents matériaux constitutifs des parois des logements investigués

4.3.3. Hypothèses de calcul

Les simulations sont habituellement réalisées sur une période de 10 ans, en conformité avec le guide SimHuBat qui établit les règles de simulation des transferts hygrothermiques. Au vu des résultats des premières simulations, l'équilibre étant atteint plus rapidement, nous avons pris la décision de réduire la durée des simulations à 5 ans pour ce cas d'étude.

Pour illustration, la Figure 12 présente l'évolution de l'humidité relative dans la paroi du logement OPHY 1 sur les 5 années de calcul : nous pouvons constater que l'équilibre est atteint entre la 2^{ème} et la 3^{ème} année, donc l'est a fortiori au bout de 5 ans.

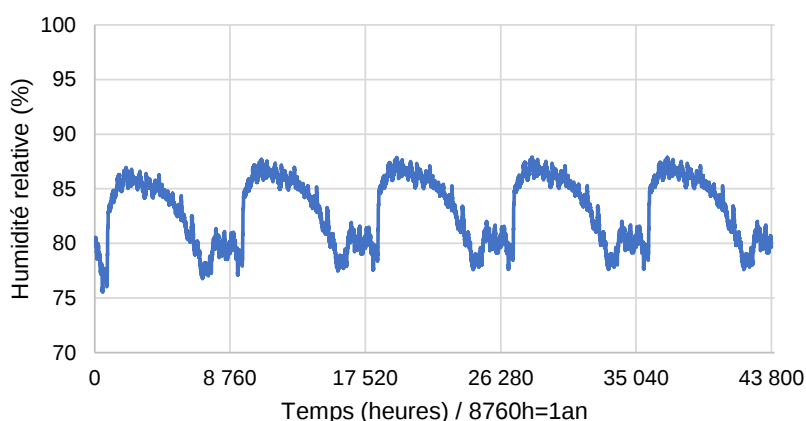


Figure 12 : Evolution de l'humidité relative dans la paroi pour le logement OPHY 1 - équilibre atteint à la fin de la 3^{ème} année

4.4. Résultats de simulation pour chaque logement

Les résultats des simulations des transferts hygrothermiques réalisées peuvent être présentés de différentes manières. Les seuils considérés et explicités ci-dessous sont extraits du document « SimHuBat » qui encadre les hypothèses pour les calculs de transfert hygrothermique.

La Figure 13 présente la **variation en température et en humidité au sein de la paroi du logement OPTHY1**, dans la transversalité, et pour la dernière année. Les fuseaux correspondent aux valeurs extrémales atteintes durant la dernière année considérée (5^{ème} année en l'occurrence). Ces graphiques permettent d'évaluer les quantités maximales d'humidité présentes et leur localisation dans la paroi.

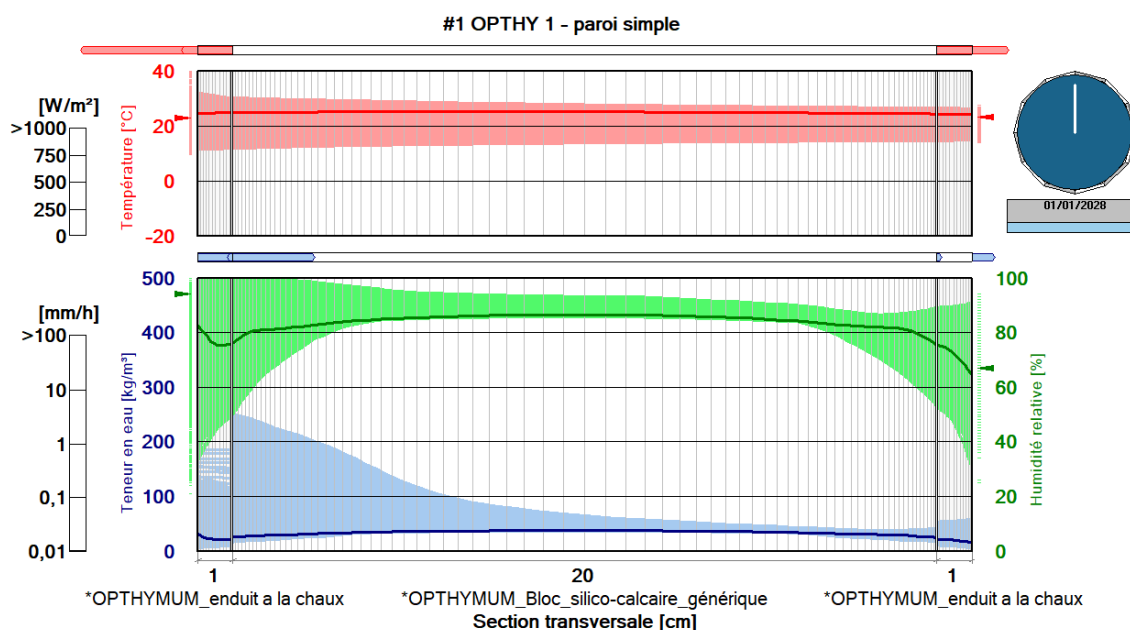


Figure 13 : Illustration du résultat de OPTHY 1 - données mesurées - Variation de T et HR au sein de la paroi pour la dernière année de calcul

Une paroi, pour être jugée satisfaisante, ne doit pas contenir des éléments dont l'humidité relative est supérieure à 98 %, même en des endroits particuliers de la paroi. En effet les tolérances du logiciel font qu'au-delà de 98 %, le risque de condensation peut être considéré comme très probable. Un tableau synthétique des résultats par logement, en Annexe 8, regroupe les **valeurs maximales d'humidité relative** au cours de la dernière année, aux interfaces des différents matériaux composant la paroi.

À titre d'illustration, le Tableau 11 regroupe les résultats du logement OPTHY1 vis-à-vis de l'évaluation, sur la base des données mesurées, de l'humidité et de la teneur en eau en masse maximales pour induire respectivement un risque de condensation et de développement fongique au niveau de chaque constituant de la paroi du logement.

OPHY 1	Résultats mesurées	données
Evaluation du risque de condensation : HR maximale	Enduit extérieur : 100% Parpaing : 91,4 % Enduit intérieur : 89,6 %	
Evaluation du risque de développement fongique : teneur en eau en masse maximale	Enduit extérieur : 11,6% Parpaing : 3,9% Enduit intérieur : 3,4%	

Tableau 11 : détermination, à partir des données mesurées, de l'humidité et de la teneur en eau en masse maximales pour induire respectivement un risque de condensation et de développement fongique au niveau de chaque constituant de la paroi du logement OPTHY1

Pour l'évaluation du **risque de développement fongique** d'après le guide SimHuBat, la teneur en eau d'un élément de la paroi contenant des produits biosourcés n'intervenant pas dans la stabilité de l'ouvrage ne pourra être qu'occasionnellement (moins de 8 semaines par an) supérieure à 23 % en masse. Dans notre cas d'étude, il n'y a pas de produit biosourcés. Ce critère ne sera donc pas exploité dans le reste de l'analyse. Cependant, afin d'affiner l'évaluation du risque de développement fongique, différents indices disponibles ont également été évalués :

- **WUFI bio** : il s'agit d'un indicateur tricolore basé sur un modèle bio-hygrothermique adapté à l'évaluation du risque de développement fongique sur les surfaces intérieures.
- **VTT** : il s'agit d'un modèle empirique, proposant également une visualisation sous forme de feu tricolore
- **Courbe de niveaux** : elles servent déjà dans le calcul de l'indicateur de WUFI bio, mais la visualisation graphique permet d'apporter plus de nuances dans la comparaison des résultats. L'exemple d'un tel graphique est donné dans la Figure 14. Les points jaune clair correspondent aux premiers pas de temps (1^{ère} année) ; les points noirs correspondent à la dernière année. Le graphique comporte également 2 courbes grises qui représentent les limites d'acceptabilité du risque suivant la classe de sensibilité considérée (Classe I : très sensible ; classe II : moyennement sensible).

Isoplèthes

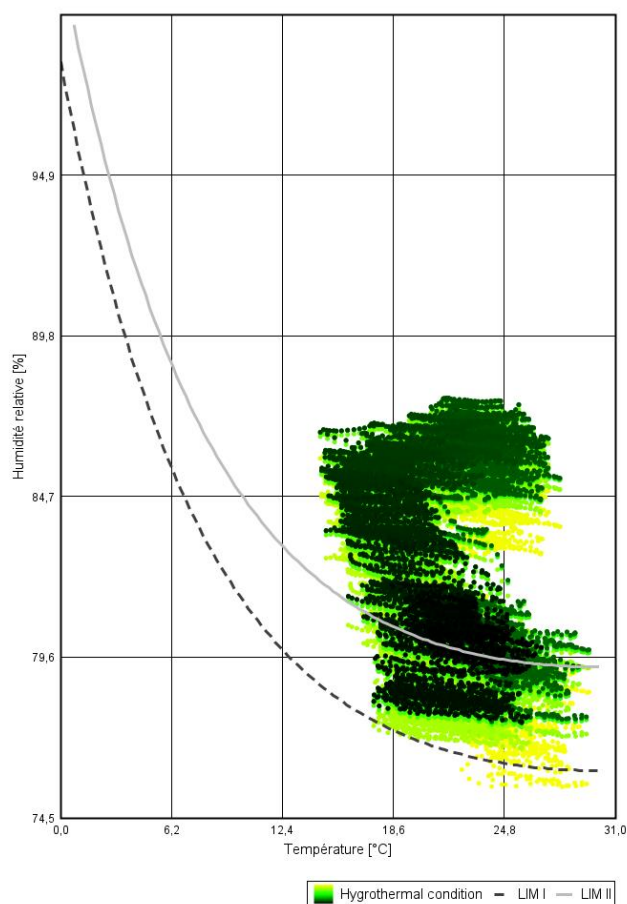


Figure 14 : Courbes de niveau HR / T pour le logement OPTHY 1 - données calculées

5. Etude du comportement de parois en cellule expérimentales

5.1. Choix des parois d'intérêt

Dans le cadre du projet, le comportement, vis-à-vis du risque de développement de moisissures, de deux parois a été appréhendé.

Il s'agissait de comparer, à cet égard, une paroi représentative de celles couramment rencontrées dans la région, désignée par « Paroi de référence », et une paroi « Optimisée ». Chacune des deux parois est montée dans une des ouvertures séparant deux enceintes climatiques simulant l'environnement extérieur d'un côté et l'ambiance intérieure de l'autre (Bancs d'essai FCBA).

Le choix des deux parois d'intérêt a été orienté par les retours terrains, la connaissance des acteurs locaux et par l'analyse du guide des isolants élaborés par le CIRBAT (Guide des isolants thermiques - Prescriptions pour l'utilisation des isolants thermiques à l'île de La Réunion). Concernant la paroi intérieure, nous avons fait le choix de ne pas la revêtir pour simuler des parois vieillies dont le revêtement aurait été altéré, permettant l'accès par les moisissures aux éléments différenciant à savoir au BA13 pour la paroi optimisée et au parpaing pour la paroi de référence.

Le comportement, vis-à-vis des moisissures, des peintures de revêtement, dont la nature nous a été communiquée par les acteurs locaux : sous-couche COVATEX MAT et une peinture de finition ACRYSTYL VELOURS de la marque MAUVILAC, a été déterminée au travers de tests en laboratoire qui ont révélé les propriétés antifongiques de ces revêtements. Ce résultat justifie le choix qui a été fait de ne pas revêtir les parois testées.

Le Tableau 12 précise ainsi la composition des deux parois qui ont en commun un enduit mortier extérieur et des parpaings en béton creux.

Désignation de la paroi	Constitution
Référence	Parpaing béton creux de 190 + enduit mortier intérieur et extérieur
Optimisée	Enduit mortier extérieur + parpaing de 190 + ossature métallique pour disposer isolant polystyrène de 30 et panneau de BA13

Tableau 12 : constitution des deux parois à investiguer en cellules climatiques FCBA

Pour chacune des parois, le suivi de la température et de l'humidité relative est assuré par la mise en place, dans une alvéole de parpaing en béton creux, d'un capteur spécifique.

Pour la paroi « Optimisée », cette mesure est complétée par l'installation d'un capteur à l'interface entre la plaque de BA13 et l'isolant.

Pour les deux types de paroi, la surface intérieure est équipée d'un capteur de température SAVERIS, déployé lors de la campagne terrain.

Les Figure 15 et Photographie 9 présentent le positionnement des différents capteurs de température et d'humidité mis en place au niveau des deux types de parois considérées.

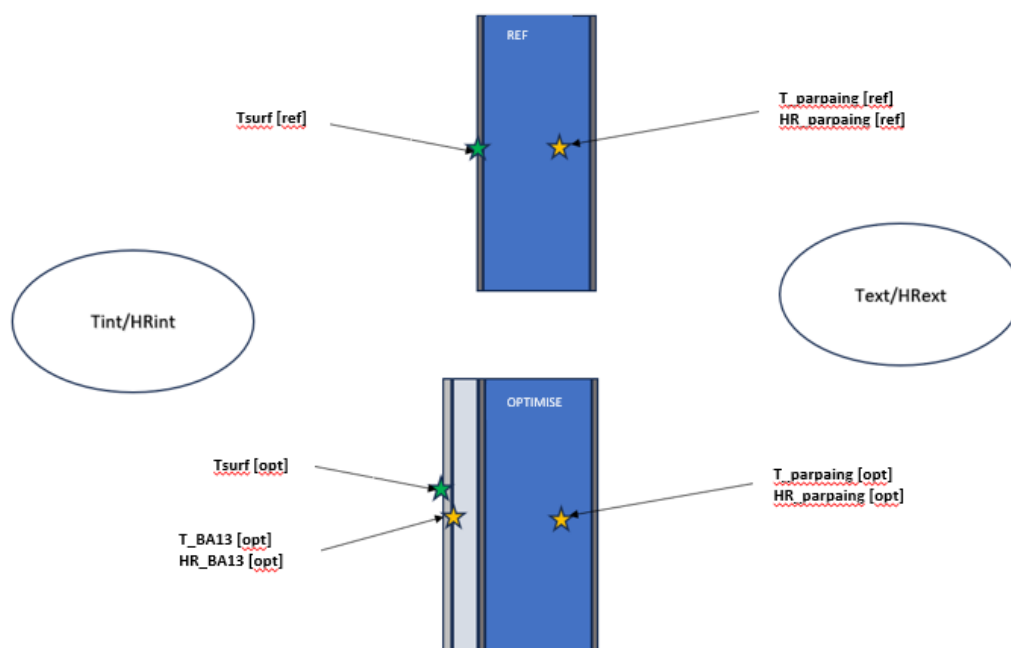


Figure 15 : Paramètres mesurés durant l'essai en laboratoire et positionnement des capteurs au niveau des deux types de parois testées



Photographie 9 : montage de la structure en parpaings pour les deux parois avec mise en place des capteurs de température et d'humidité relative (côté extérieur à gauche)

Les résultats issus de l'instrumentation mise en place au sein des deux parois sont présentés dans les figures suivantes avec :

- le suivi de la température de surface (Figure 16),
- les profils des températures dans les parois et de part et d'autre (Figure 17)
- les profils des humidités relatives mesurées au sein des deux parois et de part et d'autre (Figure 19).

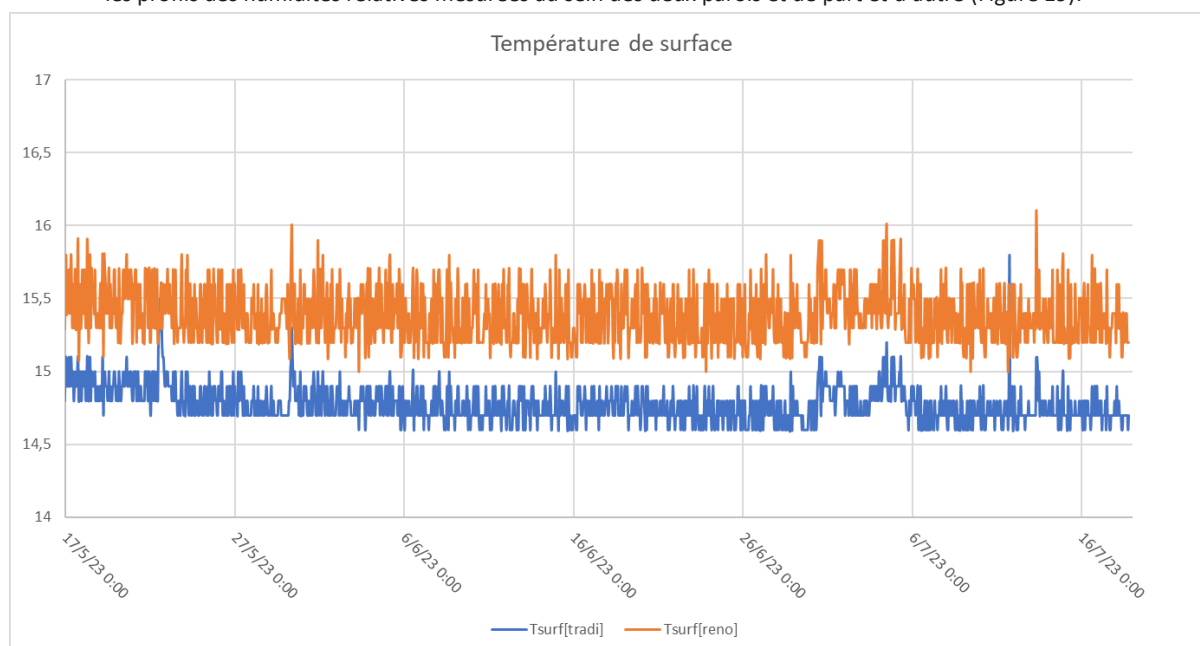


Figure 16 : Mesure des températures de surface pour les 2 échantillons mis en œuvre au sein des cellules climatiques

L'essai en laboratoire a démontré que la paroi améliorée, intégrant une isolation intérieure, présente une température de surface plus élevée de l'ordre de 1°C, par rapport à la paroi de référence, offrant ainsi un meilleur confort thermique aux occupants pour une température extérieure correspondant à une saison froide (10°C dans le cadre de nos expérimentations). Par ailleurs, cette augmentation de la température de surface du revêtement intérieur dans le cas d'une isolation est favorable à une réduction du risque de condensation.

Les calculs réalisés par la méthode GLASER a démontré un écart de température identique avec une température majorée pour la paroi isolée (Figure 18).

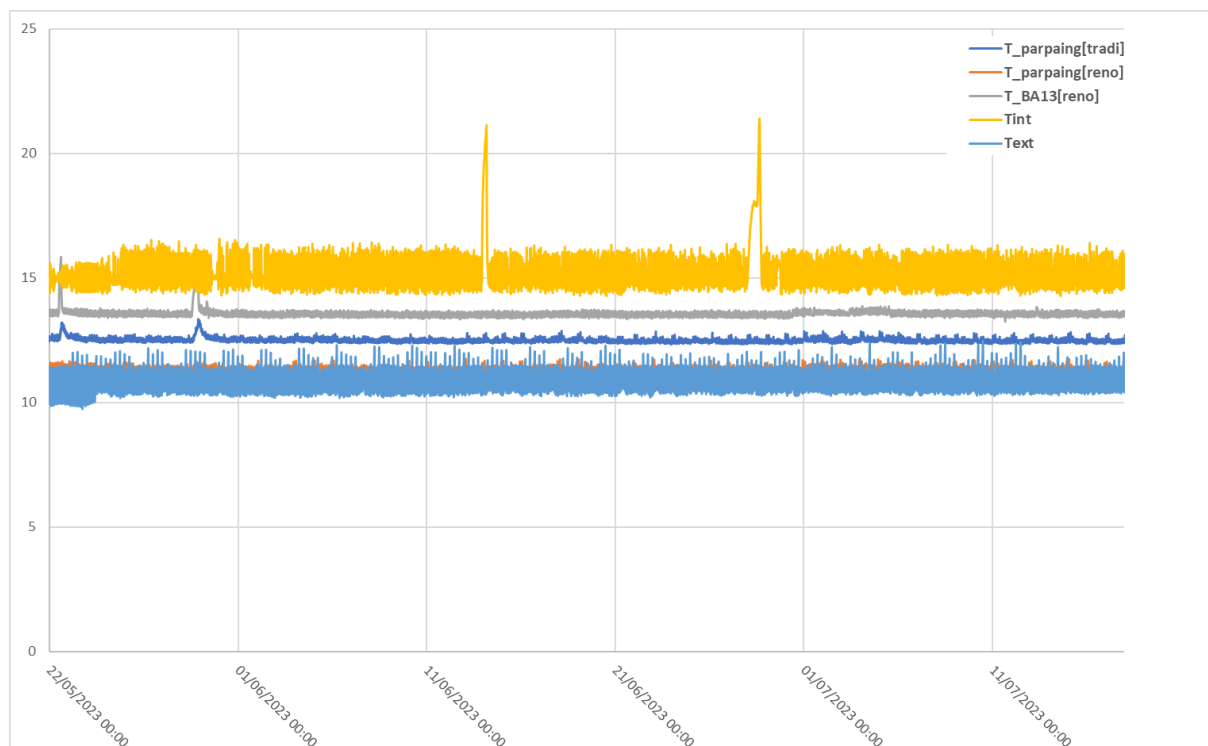


Figure 17 : Profils des températures mesurées au sein des deux parois et de part et d'autre (T de l'air)

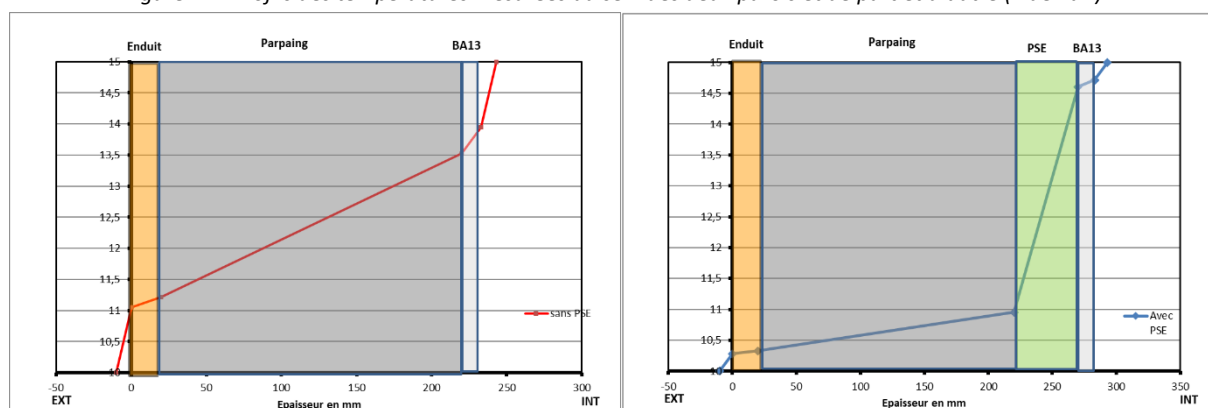


Figure 18 : Profils des températures estimées par la méthode Glaser (à droite sans isolation polystyrène expansé (PSE) et à gauche avec isolation PSE)

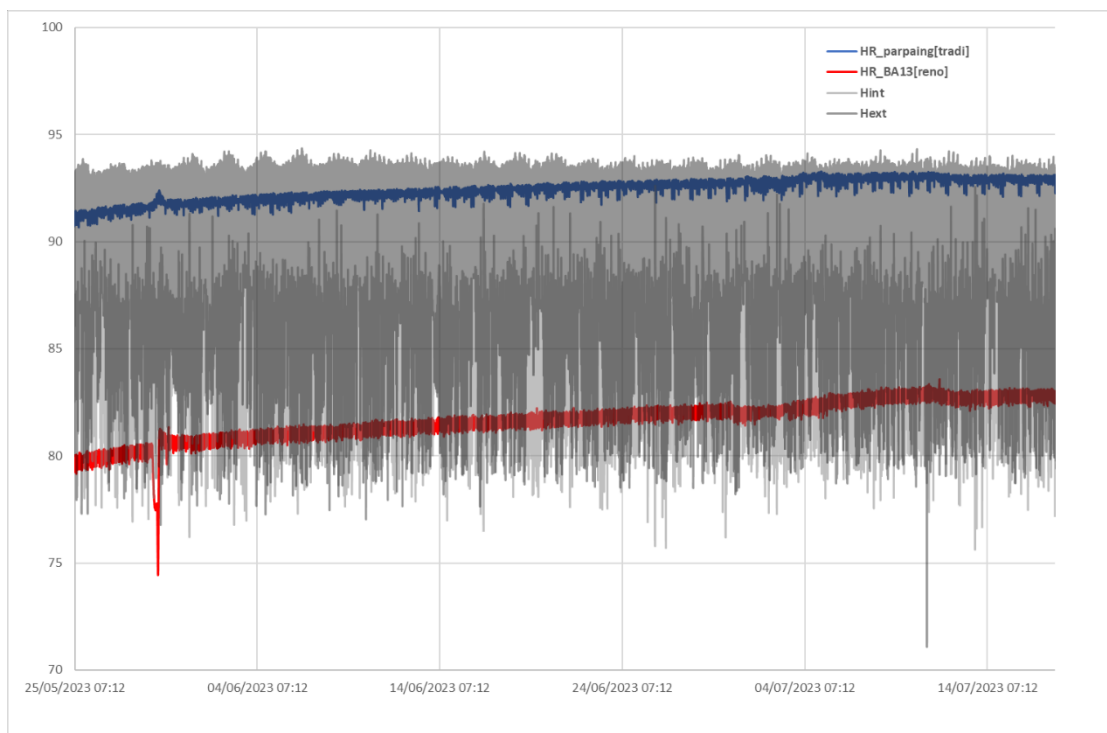


Figure 19 : Profils des humidités relatives mesurées au sein des deux parois et de part et d'autre

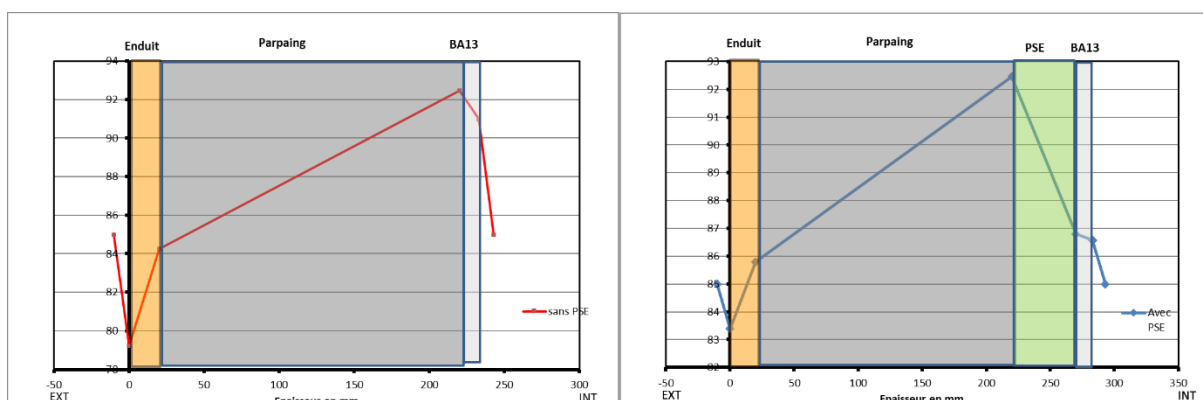


Figure 20 : Profils des HR estimées par la méthode Glaser (à droite sans PSE et à gauche avec PSE)

Les courbes de températures montrent une répartition cohérente des températures au sein des parois. Alors que les consignes d'humidités relatives ambiante, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur, sont établies à une valeur identique (85 %), les courbes des taux d'humidité relative mesurés révèlent une influence significative du différentiel de température. En effet, les données issues des capteurs indiquent une différence moyenne d'environ 10,8 % d'humidité relative sur la période observée entre le point de mesure au niveau du BA13, présentant une humidité moins importante, et celui dans le parpaing. Par ailleurs, les niveaux d'humidité ont tendance à augmenter très lentement à l'intérieur des parois.

5.2. Choix des conditions climatiques expérimentales

Dans le cadre de cette étude l'enjeu a consisté à déterminer expérimentalement le comportement des deux parois vis-à-vis du développement de moisissures pour des conditions climatiques représentatives des Hauts de l'île de la Réunion. Les paramètres de température et humidité correspondent aux conditions extérieures des logements qui peuvent induire à l'intérieur des logements, de la part des occupants, des comportements critiques, vis-à-vis du développement de moisissures, tels que le calfeutrement des entrées d'air pour prévenir un inconfort thermique.

Par ailleurs les retours de terrain ont permis d'identifier la présence de développements de moisissures dans les chambres du fait de l'absence de ventilation et de taux d'humidité élevés en lien avec le métabolisme des personnes avec le constat, dans certains cas, de zones de condensation sur le mur en tête de lit.

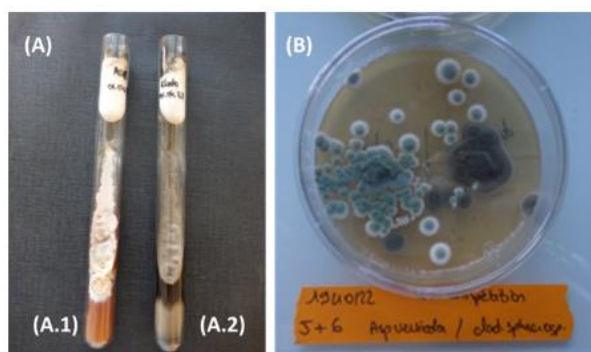
Sur la base de ces considérations et de l'analyse des conditions de température extérieure et intérieure relevées, nous avons choisi **une température d'essai de 10°C pour simuler le milieu extérieur et 15°C pour l'ambiance intérieure. L'humidité relative a, quant à elle, été fixée à 85%** tant pour l'extérieur que pour l'intérieur.

5.3. Protocole expérimental de test vis-à-vis du développement fongique

Un protocole expérimental a été mis en place de façon à évaluer l'impact de la constitution des parois sur le développement de moisissures en milieu intérieur.

5.3.1. Caractéristiques de l'inoculum fongique

L'analyse des prélèvements réalisés dans les logements lors de la campagne menée à l'automne 2021, a révélé la présence de deux souches fongiques majoritaires : *Aspergillus versicolor* et *Cladosporium sphaerospermum* dont l'absence de compétition a été vérifiée par leur mise en culture sur un même milieu nutritif (Photographie 10). Ce résultat a permis de valider la possibilité d'utiliser ces deux espèces en simultanément pour les essais de parois. Ainsi, une suspension de spores a été préparée à partir de ces deux souches et ajustée à 10^6 spores/mL.



Photographie 10 : Souches fongiques utilisées dans le protocole expérimental

A : Photographie des deux souches fongiques (A.1), *Aspergillus versicolor* et (A.2), *Cladosporium sphaerospermum*

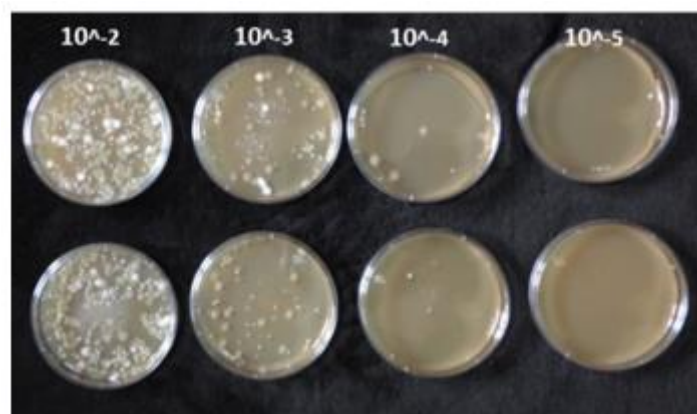
B : Observation des deux souches fongiques après 6 jours d'incubation sur le même milieu de culture

Dans le cadre de cette expérimentation, nous avons fait le choix d'appréhender deux états de paroi : neuf et vieilli. Ces dernières étant simulées par la présence de nutriments facilement assimilables par les microorganismes.

De fait, deux suspensions de spores, équivalentes en termes de concentrations, ont été préparées :

- **Solution de spores additivée : solution (A)** dans laquelle les spores ont été diluées dans une solution nutritive
- **Solution de spores non additivée : solution (NA)** dans laquelle les spores ont été diluées dans de l'eau contenant de l'agent mouillant

Lors de la préparation de ces deux solutions de spores une **vérification de leur viabilité** a été menée en effectuant des dépôts sur milieu de culture malt-agar (malt 4%, agar 2 % m/m). Pour cela à partir de la solution NA, des dilutions successives ont été effectuées (10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5}) puis deux boîtes ont étéensemencées par dilution (dépôt de 100 μ L). Les boîtes sont ensuite incubées pendant 72h avant comptage des colonies. **Ainsi la viabilité initiale des spores des deux moisissures de la solution NA est de $5,9 \cdot 10^5$ spores par mL** (Photographie 11 et Tableau 13).



Photographie 11 : Etat de viabilité de la suspension de spores après 72h d'incubation

Dilution	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	Nombre de spores viables par échantillon
Volume étalement	0,1 mL				
Nombre de colonies boîte 1	NC*	50	3	0	5,9.10 ⁵
Nombre de colonies boîte 1	NC*	71	5	1	
Moyenne nombre de colonies	NC*	60,5	4	0,5	

Tableau 13 : Comptage des colonies de la solution NA après dépôt sur milieu malt-agar - Pour chaque dilution deux boîtes de dépôt sont réalisées. La moyenne du nombre de colonies par dilution est effectuée. *NC : non comptable

D'après cette analyse la concentration de la suspension fongique préparée est satisfaisante vis-à-vis de la concentration cible attendue de l'ordre de 10⁶ spores/mL.

5.3.2. Inoculations

A partir des solutions de spores préparées, différentes inoculations ont été réalisées. Ces inoculations ont été effectuées en utilisant un vaporisateur de façon à effectuer des pulvérisations contrôlées et reproductibles.

Des inoculations ont été effectuées sur des zones bien définies de la paroi « référence », PR et de la paroi « optimisée », PO (respectivement clichés A et B de la Photographie 12). Pour rappel, les parois sont placées dans une chambre climatique de façon à simuler les conditions de température et d'humidité relative (HR) du milieu extérieur et intérieur d'un logement. Ainsi, des températures d'essai de 10°C et de 15°C ont été retenues pour le milieu extérieur et intérieur, respectivement. L'humidité relative a, quant à elle, été fixée à 85 %.

Les zones inoculées ont une surface de 150 cm². Un volume de 2.5 mL de solution de spores (A ou NA) correspondant à 12 sprays du vaporisateur a été inoculé sur chaque zone.

Sur chaque paroi, les zones inoculées correspondent :

- 4 zones inoculées avec la solution A de spores parmi lesquelles 3 zones (Z1_A, Z2_A et Z3_A) seront prélevées en fin d'expérimentation.
- 5 zones inoculées avec la solution NA de spores parmi lesquelles 3 zones (Z1_NA, Z2_NA et Z3_NA) seront aussi prélevées en fin d'expérimentation. La zone notée « T0_écouvillon » sera prélevée le jour même de l'inoculation (T0) à l'aide d'un écouvillon



Photographie 12 : Identification des différentes zones d'inoculation sur la paroi « référence » (à gauche) et la paroi « optimisée » (à droite)

Divers témoins d'inoculation ont également été réalisés :

- Des échantillons correspondant aux matériaux utilisés pour la réalisation des deux parois à savoir enduit (échantillon_PR) et BA13 (échantillon_PO) (Photographie 13). L'objectif étant ici d'effectuer des prélèvements à T0 de façon destructive par prélèvement de matière qui seront comparés aux prélèvements à T0 effectués par écouvillonnage sur les zones « T0_Ecouvillon » des deux parois. Les zones inoculées sur ces échantillons ont une surface de 80 cm² et ont été inoculées avec un volume d'inoculum de 1.25 mL (6 sprays).
- Des papiers filtres en fibres de verre non additivés inoculés avec la solution NA et A. L'objectif étant de pouvoir suivre le développement des moisissures sur ces papiers depuis l'inoculation (T0) à la fin de l'expérimentation. Des prélèvements sont donc prévus toutes les deux semaines sur ces papiers filtres.



Photographie 13 : Visuels des divers échantillons témoins

Echantillons correspondants aux matériaux des deux parois avec : photo de l'échantillon de paroi référence (parpaing) à gauche et la photo de l'échantillon de paroi optimisée (BA13) à droite
 Les photos du haut correspondent au moment de l'inoculation. Les photos du bas ont été prises après prélèvement

5.3.3. Suivi des inoculations

Après l'étape d'inoculation, différents prélèvements ont été effectués de façon à suivre l'évolution de la survie et/ou le développement des moisissures.

5.3.3.1. Prélèvements à T0

Des prélèvements ont été effectués le jour de l'inoculation (T0) de façon à avoir une quantification initiale de la charge fongique.

Ce prélèvement à T0 avait aussi pour objectif de comparer deux méthodes de prélèvement par écouvillonnage et en destructif.

Ces prélèvements ont été effectués :

- Sur les zones T0_Ecouvillon des deux parois inocuées avec la solution NA, prélèvement par écouvillonnage
- Sur les échantillons de matériau des parois référence (parpaing) et optimisée (BA13) inocués avec la solution NA, prélèvements destructifs
- Sur un papier filtre en fibres de verre non additivés ayant été inoculé avec la solution de spores NA

L'ensemble des échantillons prélevés ont été dilués ($1/10^{\text{ème}}$) dans une solution d'eau + NaCl 0.9% + agent mouillant 0.05% puis broyés pendant 1 minute au stomacher. Des dilutions successives (10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4}) ont été ensuite réalisées. Enfin, des dépôts (100 μ L) de chaque dilution ont été effectués sur milieu de culture (milieu malt 4%, agar 2 % m/m) avec deux boîtes réalisées par dilution (Figure 21). Les boîtes ont été placées en chambre climatique à 22°C/70 % HR pendant 3 jours avant d'effectuer le dénombrement des colonies.

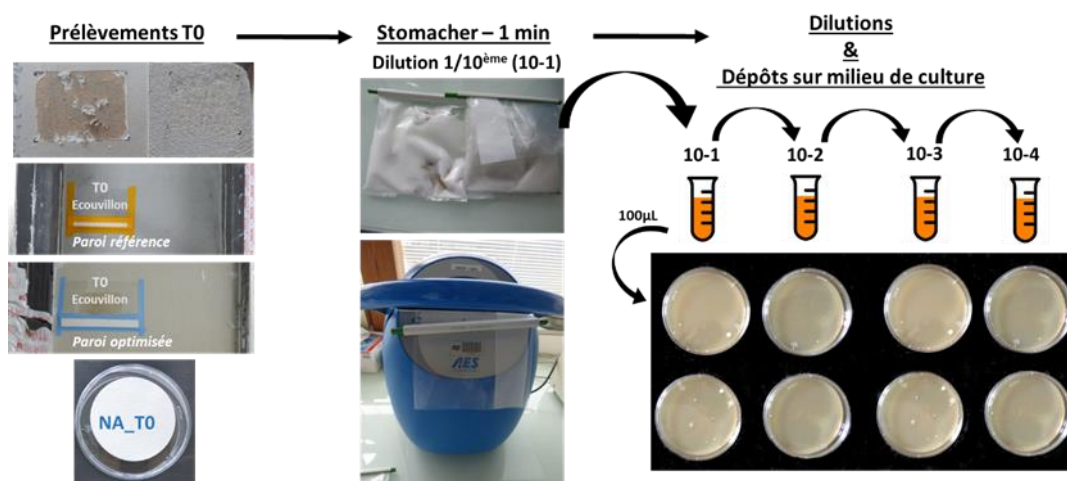


Figure 21 : Etapes de traitement des prélèvements T0 jusqu'au dépôt sur boîte

Description des différentes étapes de traitement des prélèvements effectués à T0.

Les échantillons prélevés correspondent 1, aux échantillons de matériaux des deux parois prélevées de façon « destructive » ; 2, échantillon prélevé par écouvillonnage sur la paroi de référence ; 3, échantillon prélevé par écouvillonnage sur la paroi optimisée ; 3, échantillon de papier filtre en fibres de verre non additivé inoculé avec la solution NA.

Les résultats des dénombrements, exprimés en $\log_{10}(\text{UFC}/\text{cm}^2)$, sont présentés dans le Tableau 14.

Echantillon	Type de prélèvement	Log10 (UFC/cm ²)
Paroi Référence	Ecouvillon	1,44
Echantillon Référence	Destructif	2,64
Paroi optimisée	Ecouvillon	1,52
Echantillon optimisé	Destructif	3,21
PF non additivé	Destructif	3,46

Tableau 14 : Récapitulatif des résultats issus du dénombrement des boîtes de culture à T0 - PF : Papier filtre ; UFC : Unité Formant Colonie

Ces prélèvements à T0 mettent en évidence une différence entre les deux méthodes de prélèvements (écouvillons vs. destructif) qui est de l'ordre de 1,2 LOG (2,64 – 1,44) et 1,69 LOG (3,21 – 1,52) pour les parois référence et optimisée respectivement. **Ainsi, c'est la méthode dite destructive qui présente une meilleure efficacité de prélèvement. C'est donc la méthode qui sera utilisée en point final dans le cadre de cet essai.**

Par rapport au résultat de dénombrement obtenu sur le papier filtre non additivé, considéré comme la référence d'un prélèvement optimisé, il n'y a pas de différence d'efficacité de prélèvement (0,25 de différence de log) vis-à-vis de la paroi optimisée.

En revanche, on note une efficacité de prélèvement moins importante sur la paroi référence par rapport au papier filtre référence (0,82 de différence de log).

Il y a donc une différence d'efficacité de prélèvement entre deux parois qui est supérieure pour la paroi optimisée par rapport à la paroi référence. Cela souligne l'importance et la nécessité de procéder à des prélèvements et dénombrements de la charge fongique à T0 sur les 2 types de parois. Ainsi, l'évaluation de l'impact de ces deux parois sur le développement des moisissures s'effectuera en prenant comme référence ce dénombrement effectué à T0.

5.3.3.2. Prélèvements au cours de l'expérimentation

Sur les 8 semaines pendant lesquelles l'expérimentation a été menée après inoculation, divers prélèvements ont été effectués et sont résumés dans le Tableau 15. A noter que les prélèvements sur les deux parois ont été effectués majoritairement en point final (8 semaines post-inoculation, SPI).

Le suivi de l'évolution de la survie/développement des moisissures a quant à lui, été effectué tout au long de l'expérimentation sur les papiers filtres en fibres de verre non additivés ayant été inoculés avec les solutions NA et A de spores.

Inoculation	Prélèvements				
	T0	2SPI	4SPI	6SPI	8SPI (Tfinal)
2 zones solution NA	OUI				
Paroi Référence_3 zones solution NA	NON	NON	NON	NON	OUI
Paroi Référence_3 zones solution A	NON	NON	NON	NON	OUI
Paroi Optimisée_3 zones solution NA	NON	NON	NON	NON	OUI
Paroi Optimisée_3 zones solution A	NON	NON	NON	NON	OUI
Echantillon Paroi Référence (Parpaing)	OUI				
Echantillon Paroi Optimisée (BA13)	OUI				
1 Papier filtre FV non additivé	OUI				
4 Papiers filtres FV non additivés NA	NON	OUI	OUI	OUI	OUI
4 Papiers filtres FV non additivés A	NON	OUI	OUI	OUI	OUI

Tableau 15 : Récapitulatif des différents prélèvements effectués pendant la durée d'expérimentation - Les zones vertes correspondent aux prélèvements effectués. Les zones grises correspondent aux échantillons déjà prélevés donc n'existant plus sur la suite de l'expérimentation, SPI : Semaine post-inoculation, FV : Fibres de verre

A chaque prélèvement le protocole mis en place pour quantifier la charge fongique cultivable est le même que celui décrit dans le paragraphe précédent à T0 (Figure 21).

➔ Suivi de la viabilité de l'inoculum sur les papiers filtres en fibre de verre non additivés placés dans les conditions de température/humidité des deux parois

Le suivi de la survie/développement des spores a été effectué via la quantification de la charge fongique cultivable sur des papiers filtres en fibres de verre non additivés ayant été inoculés avec les solutions de spores NA et A, respectivement. Ce suivi a été réalisé toutes les deux semaines après inoculation (Tableau 16).

Echantillon	Log10 (UFC/cm ²)	Delta T0
Papier filtre FV NA 2SPI	2,53	-0,93
Papier filtre FV A 2SPI	5,15	1,69
Papier filtre FV NA 4SPI	2,46	-1,01
Papier filtre FV A 4SPI	4,56	1,1
Papier filtre FV NA 6SPI	2,56	-0,9
Papier filtre FV A 6SPI	5,06	1,55
Papier filtre FV NA 8SPI	2,24	-1,22
Papier filtre FV A 8SPI	4,62	1,16

Papier filtre FV NA T0	3,46
------------------------	------

UFC : unité formant colonie ; FV : Fibres de verre ; A : solution de spores additivée ; NA : solution de spores non additivée ; SPI : semaines post-inoculation

Delta T0 : correspond à la différence entre la charge fongique cultivable quantifiée à l'issue de l'incubation et celle initialement inoculée (T0). Pour rappel, le dénombrement, exprimé en log10(UFC/cm²) effectué à T0 sur le papier filtre non additivé était de 3,46. Les résultats de cette différence sont présentés en rouge ou en vert en fonction s'il y a une perte ou une augmentation du nombre d'UFC/surface par rapport au T0, respectivement

Tableau 16 : Récapitulatif des résultats issus du dénombrement des prélèvements des papiers filtres en fibres de verre non additivés inoculés avec les solutions de spores NA et A de 2SPI jusqu'à 8SPI

Les résultats des dénombrements montrent des **différences significatives entre les papiers filtres inoculés avec la solution NA et ceux inoculés avec la solution A**. Ainsi, les papiers filtre ayant été inoculés avec la solution A présentent un nombre plus important d'UFC/surface.

En revanche, pour une même solution de spores, il n'y a pas de différences significatives dans le nombre d'UFC entre les papiers filtres au cours du temps (de 2SPI à 8SPI).

Par rapport au T0, on constate une réduction de la charge fongique cultivable sur les papiers filtres inoculés avec la solution NA d'en moyenne 1 log sur l'ensemble des 8 semaines. Au contraire, sur les papiers filtres inoculés avec la solution A, une augmentation de la charge fongique cultivable de l'ordre de 1,69 log est notée à 2SPI. Elle reste ensuite constante sur les 6 autres semaines d'expérimentation, les différences entre les valeurs obtenues n'étant pas significatives.

Ce résultat nous permet de mettre en évidence que la solution de spores additivée entraîne un développement des moisissures récupérées qui se maintiennent ensuite. La solution non additivée quant à elle entraîne une diminution de la quantité de spores récupérée qui se maintient dans le temps. Ainsi le fait de mimer une paroi neuve présentant plus de nutriments assimilables montre que la charge fongique peut être plus élevée en présence de nutriments assimilables que sans mais que ce phénomène n'influe pas sur le maintien ou non dans le temps d'une contamination fongique. Nous avons donc ensuite travaillé avec les solutions de spores non additivées puisqu'elles étaient suffisantes pour permettre une contamination maintenue dans le temps.

➔ Comparaison des deux parois en point final

Les prélèvements en point final ont été effectués 8 semaines post-inoculations sur 6 zones par paroi dont 3 avaient été inoculées avec la solution de spores NA et les trois autres avec la solution A. Pour rappel, les prélèvements ont été effectués par la méthode dite « destructive » par prélèvement de la surface des parois.

Sur les deux parois, il n'y a pas de différences significatives de dénombrement entre les zones inoculées avec la solution NA de celles inoculées avec la solution A. En effet, les différences de dénombrement entre les deux solutions d'inoculations ne sont que de 0,14 log et 0,17 log pour la paroi référence et optimisée, respectivement.

Ainsi, les comparaisons entre les deux parois seront donc réalisées à partir des résultats obtenus sur les zones inoculées avec la solution NA de façon à pouvoir tenir compte des différences d'efficacité de prélèvement qui avaient été notées lors des prélèvements effectués à T0 sur les échantillons de chaque paroi ayant été inoculés avec la solution NA.

Pour rappel, une différence d'efficacité de prélèvement a été notée à T0 entre les deux parois. En effet, la figure 18 montre bien que à T0 par rapport à ce qui est déposé (3,87 log), on récupère 1,23 log de moins sur la paroi référence alors que sur la paroi améliorée on a une perte moindre de l'ordre de 0,66 log. Cette différence d'efficacité de prélèvement peut s'expliquer par la différence des matériaux testés : parpaing pour la paroi référence difficilement broyable et friable au moment des prélèvements contre BA 13 pour la paroi optimisée facilement prélevable et broyable. Ce phénomène explique donc que la récupération des microorganismes soit plus facile pour la paroi optimisée et qu'une perte de microorganismes puisse avoir lieu sur la paroi référence au moment du prélèvement. L'analyse du différentiel entre le T8 semaines et le T0 permet de s'affranchir de cette différence d'efficacité entre les 2 matériaux.

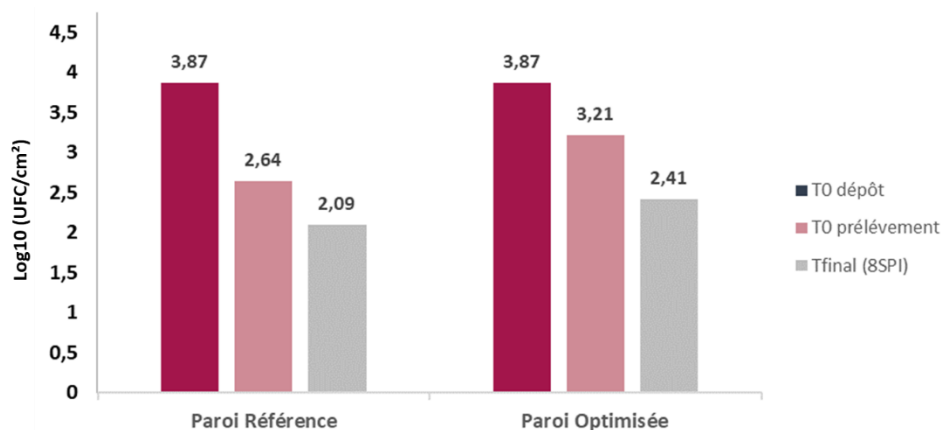


Figure 22 : Représentation graphique des valeurs de log obtenues après les dénombrements effectués à T0 et en point final à 8 semaines post-inoculation (SPI) sur les deux parois

En rouge foncé sont représentés les résultats correspondant aux valeurs à T0 du dépôt effectué sachant que la viabilité de la solution de spores était de $5,9 \times 10^5$ avec une surface inoculée de 80 cm². En rouge clair, les valeurs de log correspondant aux prélèvements effectués à T0. En gris, les résultats de log issus des prélèvements effectués 8SPI.

Les résultats des dénombrements sur l'ensemble de ces zones, inoculées avec la solution NA, sont aussi présentés dans le Tableau 17.

Echantillon	log10(UFC/cm ²)	Delta T0	
Paroi "Référence"			T0 Echantillon Paroi "Référence"
PR_Z1_NA	2,05	-0,59	2,64
PR_Z2_NA	2,12	-0,52	
PR_Z3_NA	2,1	-0,54	
Moyenne_PR_NA	2,09	-0,55	
Paroi "Optimisée"			T0 Echantillon Paroi "Optimisée"
PO_Z1_NA	2,36	-0,85	3,21
PO_Z2_NA	2,59	-0,62	
PO_Z3_NA	2,29	-0,92	
Moyenne_PO_NA	2,41	-0,80	

UFC : unité formant colonie ; NA : solution de spores non additivée ; SPI : semaines post-inoculation ; PR : paroi référence ; PO : paroi optimisée

Delta T0 : correspond à la différence de dénombrement par rapport à celui effectué à T0. Pour rappel, le dénombrement, exprimé en log10(UFC/cm²) effectué à T0 sur la paroi référence était de 2,64 et celui sur la paroi optimisée était de 3,21

Tableau 17 : Dénombrements des prélèvements 8SPI au niveau des zones inoculées avec les solutions de spores NA sur les deux parois

Les deltas obtenus montrent que la charge fongique est maintenue sur la paroi référence (pas de diminution ni d'augmentation). En revanche, en ce qui concerne la paroi optimisée, une tendance à la diminution de cette charge fongique 8 semaines après inoculation est observée (-0,8 log de différence observée).

Ainsi, les deux parois, dans les conditions d'expérimentation (15°C, 85 %HR pendant 8 semaines) n'ont pas permis le développement des deux souches fongiques testées. Une diminution de cette charge fongique est même observée sur la paroi optimisée. Afin de conforter ces résultats, des échantillons supplémentaires seraient nécessaires. Une prolongation de la durée d'essai pourrait également permettre de confirmer ces observations.

6. Recommandations

Les présentes recommandations sont issues des constats de terrain et des connaissances générées lors du projet en tant que tel au travers des approches de modélisations numériques et expérimentales.

Ces recommandations se déclinent selon diverses thématiques allant de la conception du bâtiment aux pratiques des occupants et font également un focus sur les défauts des menuiseries.

6.1 Revoir l'approche du rayonnement solaire dans la zone des "Hauts" de La Réunion

Le relief particulièrement accidenté dans la plupart des "Hauts" de l'île contraint les concepteurs dans leur manière d'implanter les bâtiments. Les audits ont permis de mettre en avant certains facteurs qui peuvent aggraver le risque de développement fongique.

Il a été constaté que la façade la plus ouverte est systématiquement orientée dans le sens de la pente (vers l'océan) et qu'elle ne permet pas de bénéficier systématiquement des apports solaires pouvant réchauffer l'atmosphère intérieure des logements. C'est particulièrement le cas pour les logements situés dans le sud de l'île.

De plus, conformément aux prescriptions en vigueur dans la zone des "Bas" les logements audités présentaient régulièrement des protections solaires protégeant les parois et privant d'autant plus les logements de lumière et d'apports solaires (Photographie 14).



Photographie 14 : Façade Sud du logement OPTHY 2 dont l'orientation et les protections solaires ne permettent pas de bénéficier d'apports solaires

Sans une exposition au soleil, les parois des logements ne se réchauffent pas ou peu, elles continuent de « diffuser » du froid à cause de leur forte inertie thermique. Elles deviennent propices à la condensation d'un air chaud et humide produit par l'activité humaine (respiration, évapotranspiration, cuisine, douche, ...). L'atmosphère intérieure, qui bénéficie de peu d'apports solaires, reste froide et incite les occupants à rester enfermés pour ne pas ajouter un courant d'air. De fait, cela engendre une accumulation d'eau dans l'air intérieur et accentue le risque de condensation.

La première recommandation de ce rapport est donc de **revoir l'approche sur le rayonnement solaire, pour les logements des Hauts, en phase de conception, en considérant notamment la possibilité d'un effet bénéfique sur l'ambiance interne et le confort des occupants.**

Le rapport montre notamment que la simulation thermique dynamique donne des résultats cohérents avec les mesures de terrain et peut servir à valider des hypothèses sur les apports solaires.

Attention, il ne s'agit pas de retirer toute protection solaire des logements, qui lors de l'été austral sont utiles notamment pour les logements de moyenne altitude. Il convient de les adapter en choisissant éventuellement des protections amovibles (volets persiennes projetables, coulissant, ou autres ...) qui seraient déployables l'été et rétractées l'hiver, ou bien en diminuant la valeur cible du coefficient de masque pour les protections fixes.

6.2 Revoir les exigences d'isolation et de ventilation des logements des “Hauts”.

La condensation résulte du contact entre un air, qui contient par nature une certaine quantité d'eau sous-forme de vapeur, et une surface à une température plus froide que cet air. Plus l'air contient de vapeur d'eau et plus la température de condensation est proche de la température d'ambiance. A titre d'exemple, dans une ambiance à 20°C avec une humidité relative de 85%, de la condensation se produira sur toutes les surfaces dont la température est inférieure à 19°C.

Pour se prémunir de la condensation dans les bâtiments, il y a deux leviers d'actions possibles :

- Réduire à un minimum la différence entre la température de surface interne de la paroi et la température d'ambiance ;
- Réduire la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air intérieur ;

Dans le cadre de nos visites, nous avons constaté que les constructions des Hauts étaient souvent propices à des phénomènes de condensations en période d'hiver austral.

En effet, toutes les habitations visitées ont été bâties avec des parois maçonnées peu ou pas isolées. Sans isolation, les parois captent beaucoup de froid de l'air extérieur et baissent en température devenant ainsi propices à la condensation. Comme les éléments de maçonnerie possèdent une forte inertie thermique, les murs des bâtiments restent froids pendant plusieurs heures.

Par ailleurs, le renouvellement d'air hygiénique dans les logements audités est souvent prévu grâce à une ventilation naturelle. Cette ventilation est rendue possible grâce à des surfaces d'ouvertures minimales imposées dans la réglementation. Or, en saison froide, ces ouvertures sont généralement fermées par les occupants qui veulent éviter à l'air froid de pénétrer dans leur intérieur. Il en résulte donc que l'air intérieur, qui n'est plus renouvelé, se charge en humidité et en polluants divers générés par l'activité humaines. Cela peut favoriser le développement fongique et nuire à la santé des occupants, notamment les plus fragiles.

Enfin, le fait de rajouter ces ouvertures, rendu possible par la réglementation, peut localement favoriser le développement de moisissures à cause des ponts thermiques générés. Ce dernier point fait l'objet d'une recommandation spécifique détaillée dans la suite de ce chapitre.

Dans la situation donnée des logements des Hauts, la seconde recommandation émise est de **renforcer l'étude de la ventilation des logements notamment au regard du confort des occupants.** Une piste, qui n'a pas pu être investiguée dans cette étude, serait d'opter pour une ventilation mixte entre la ventilation naturelle en journée et une ventilation minimale d'hygiène par VMC durant la nuit et les périodes froides.

Il est également recommandé aux concepteurs de **renforcer l'isolation des parois verticales par rapport à la valeur cible de la RTAA DOM.** En ce sens, il est possible de se référer aux préconisations du Référentiel PERENE Réunion qui sont fixées à 0,5 W/(m².K) au lieu de 2 W/(m².K), pour les zones Z3 et Z4.

6.3 Renforcer les dispositions empêchant les remontées capillaires

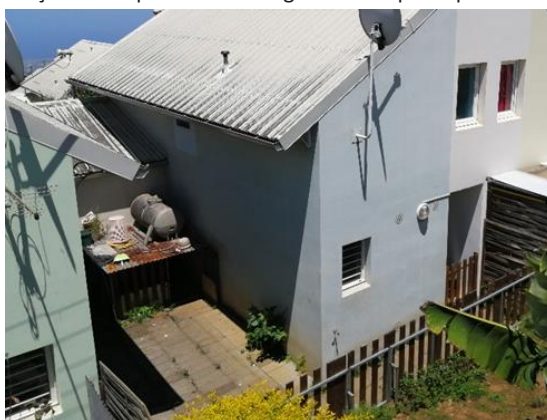
Les différentes visites ont permis de mettre en avant des traces prononcées d'humidité dans les parties basses des murs (Photographie 15). Ces désordres sont liés au phénomène de remontées capillaires, qui se produit lorsqu'un matériau poreux se trouve en contact avec le sol humide. Toutes les constructions présentant des signes de remontées capillaires ont été construites à partir de blocs maçonnés sur une dalle en béton, qui sont tous deux des matériaux poreux.



Photographie 15 : Traces d'humidité et de moisissure en pied de mur dues à une remontée capillaire importante

La dalle bétonnée est coulée sur un sol insuffisamment drainé vis-à-vis des contraintes climatiques tropicales où les épisodes de pluies sont réguliers et parfois importants. Ainsi le sol sous la dalle s'humidifie par l'infiltration et le ruissellement des eaux de pluie et permet au béton de la dalle d'absorber une partie de cette humidité.

Il a été constaté, dans certains logements la présence d'une prolongation de la dalle bétonnée aux abords du bâtiment, complètement exposée aux intempéries. Cette prolongation accentue le risque de remontées capillaires car elle capte directement l'eau de pluie en pied de mur sans la laisser s'infiltrer dans le sol. On peut voir ce phénomène sur la Photographie 16 où la décoloration au pied de la façade et la présence de végétaux indique la présence importante d'eau liquide.



Photographie 16 : Croissance importante de végétaux dans un interstice entre la façade et la cour extérieure rendue possible par la présence importante d'eau dans cette zone

L'humidité contenue dans la paroi constitue des conditions propices au développement de moisissures. C'est d'autant plus vrai que cette humidité est contenue dans la masse du matériau et non pas sur la surface ce qui implique un temps de "séchage" très long et pouvant nécessiter l'intervention d'un professionnel.

Aussi il est recommandé, pour éviter le développement de moisissure à cause de remontées capillaires, de bien prendre en compte le drainage des fondations lors de la conception. A ce sujet, la SHLMR et l'association Qualitel ont produit un référentiel de conception des logements dans les Hauts qui présentent des exigences renforcées sur le drainage des constructions (Figure 23).

Le drainage peut être accompagné de la réalisation d'une barrière d'étanchéité au niveau des fondations des constructions. Cette barrière étanche peut être réalisée à partir d'un enduit bitumineux ou la pose d'une membrane plastique.

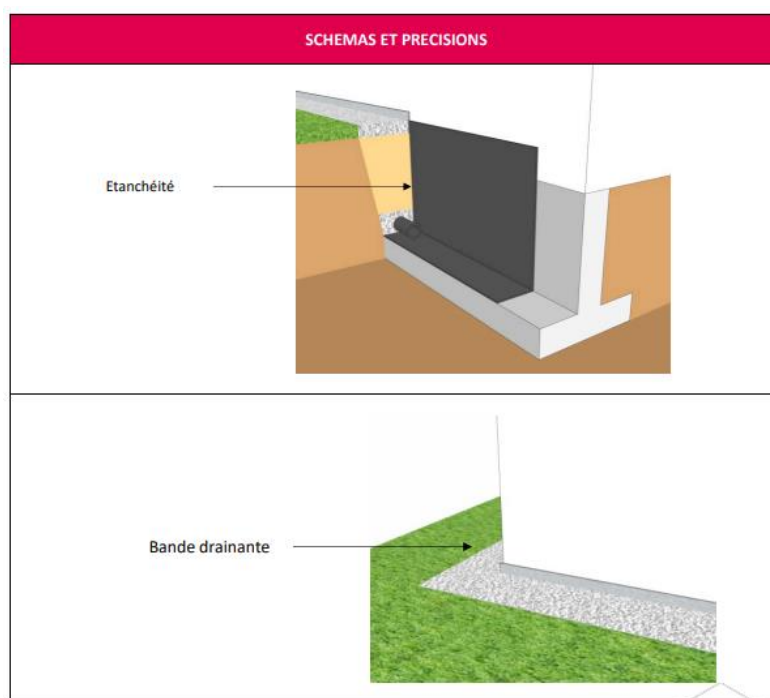


Figure 23 : Représentation en 3D des exigences au niveau des fondations du Label logement des hauts Île de La Réunion

Pour les logements où les remontées capillaires sont déjà présentes, différents types de travaux existent. Ils consistent la plupart du temps à sécher les maçonneries, dans un premier temps, puis à mettre en place ou remplacer la barrière étanche.

6.4 Condensation et infiltration au niveau des menuiseries

Les visites dans les différents logements des Hauts nous ont également permis de constater la présence de moisissures au niveau des menuiseries.

Dans certains cas, il a été constaté des défauts d'étanchéité à l'interface entre le bâti et la menuiserie. Ces défauts, que l'on retrouve principalement au niveau des appuis de fenêtres, favorisent l'infiltration de l'eau de pluie, humidifiant de fait la partie du mur située sous la menuiserie. La maçonnerie mettra plusieurs jours à sécher devenant donc un terrain propice pour le développement de moisissures.

Dans d'autres cas, il a été remarqué une condensation de l'humidité de l'air intérieur sur la face interne du vitrage. Le verre, qui est un matériau faiblement isolant, devient rapidement froid, ce qui favorise la condensation. Cette condensation lorsqu'elle est importante peut former, en ruisselant, des petites flaques et humidifier les cadres et joints qui de par leur composition ou leur encrassement peuvent devenir le siège de développement fongique. Ces moisissures ont ainsi pu être observées et prélevées au niveau des joints d'étanchéité et au niveau des jonctions des profilés formant la menuiserie qui sont des ponts thermiques pour l'air extérieur.

La Photographie 17 représente particulièrement bien ce phénomène. On y retrouve la condensation sur la face intérieure du vitrage qui conduit à la formation de petites flaques et au développement de moisissures sur le joint d'étanchéité. On constate également le développement causé par l'infiltration de l'air extérieur au niveau des ponts thermiques, tout en longueur à la jonction des profilés aluminium formant la fenêtre.



Photographie 17 : Développement de moisissures sur une menuiserie dû à la condensation de l'humidité intérieur sur le vitrage et aux ponts thermiques

D'autres défauts d'étanchéité à l'eau dus au vieillissement des joints d'étanchéité ont été constatés sur les menuiseries. L'étanchéité de la menuiserie étant défectueuse, il peut alors y avoir infiltration d'eau au niveau du tableau et infiltration d'air extérieur qui sont tous deux des vecteurs particulièrement propices au développement fongique (Photographie 18).



Photographie 18 : Défaut du joint d'étanchéité entre la partie mobile et le cadre de la menuiserie

Le traitement des désordres causés par les menuiseries nécessite leur remplacement tout ou partie en fonction des défauts identifiés.

Il est par exemple possible de conserver le cadre fixe qui accueille les ouvrants si on ne constate pas de défauts d'infiltration au niveau de la maçonnerie.

Il est recommandé de vérifier régulièrement la qualité des joints d'étanchéité entre le cadre fixe et l'(es) ouvrant(s) et de procéder rapidement à leur remplacement lorsque c'est nécessaire.

Pour les travaux de pose, les professionnels peuvent notamment trouver des recommandations pour la réalisation de leurs travaux sur la « Fiche pathologie bâtiment » D.01 de l'AQC, disponible sur leur site internet.

6.5 Recommandations pour les occupants des logements des Hauts

Durant la visite des logements, il a été possible d'interroger et d'observer les habitudes et modes de vies des occupants. Bien que chacun ait des pratiques différentes en fonction de son emploi du temps, son logement, sa région et ses habitudes, certaines d'entre elles sont partagées par plusieurs occupants et ont des impacts plus ou moins bénéfiques sur la qualité de l'air, le confort intérieur et sur le développement de moisissures. Voici, quelques informations / préconisations à destination des occupants dans l'objectif d'améliorer la qualité de l'air à l'intérieur des logements et de limiter l'apparition de moisissures.

Les ouvertures, localisées au niveau des menuiseries, permettent le renouvellement hygiénique de l'air et la réduction des polluants tant chimiques que biologiques comme les spores de moisissures et l'humidité qui s'accumulent dans les pièces. Elles sont associées à un système d'extraction d'air mécanique.

Boucher ces ouvertures favorise la condensation de l'humidité de l'air sur les surfaces qui peuvent devenir le siège de développement des moisissures qui sont naturellement présentes dans l'air et, de fait, sur les surfaces sur lesquelles elles se déposent. En bouchant les ouvertures on force également le système d'extraction à fonctionner en sursystème car le moteur ne s'arrête pas de tourner. Cela engendre des surconsommations électriques et favorise les pannes. De plus le bâtiment qui est mis en dépression par cette aspiration va quand même recevoir de l'air extérieur mais par des endroits qui n'étaient pas prévus ce qui peut engendrer de nouvelles zones propices aux condensations et aux moisissures.

Inciter les occupants à porter des vêtements longs en intérieur peut contribuer à diminuer la sensation de froid ressentie, grandement imputable à la circulation d'air forcée par la VMC. La longueur des vêtements va réduire la surface d'échange entre la peau et l'air extérieur et donc limiter la perte de chaleur.

Aérer quotidiennement le logement au moins une demi-heure, en particulier lorsque le temps est clément, a un double effet bénéfique. Cela permet de faire un renouvellement de l'air intérieur et il se peut parfois que la température de l'air extérieur soit supérieure à la température intérieure permettant donc de réchauffer les parois par l'intérieur. Cela permet aussi au rayonnement solaire de pénétrer dans les pièces de vie et de les réchauffer. Il est à noter que le renouvellement de l'air des pièces de nuit, est d'autant plus recommandé que la quantité d'eau émise par le métabolisme s'est accumulée durant le sommeil.

Un mur humide constitue un risque de voir des moisissures proliférer. Aussi pour prévenir ces développements microbiens, potentiellement délétères, il est important de maintenir autant que faire se peut une humidité moindre au niveau de l'enveloppe du logement en procédant notamment aux réparations nécessaires pour stopper la source d'humidité (voir fiches précédentes).

Dans le cas où le nettoyage est envisagé, il est primordial de se conformer strictement aux recommandations d'usage du produit et de prendre les mesures organisationnelles et individuelles afin de ne pas être exposé aux éventuelles émanations et projections du produit d'une part mais également aux particules microbiologiques que le nettoyage pourrait mettre en suspension dans l'air.

Il est à noter que dans certains cas, le remplacement des surfaces infestées devra être envisagé.

La manipulation et le traitement des éléments contaminés devront être réalisés par des personnes en bonne santé et munies au préalable d'équipements de protection individuelle : masque de protection respiratoire de type N95 ou FFP2 (les masques chirurgicaux ne sont pas adaptés), lunettes de protection, gants ménagers voire combinaison intégrale jetable pour des surfaces moissies au-delà de quelques taches disparates. Tous ces équipements sont disponibles dans les enseignes de bricolage.	 Source : CSTB
Les opérations se feront, dans la mesure du possible, en l'absence des occupants. A minima les personnes « à risque » devront être écartées. Les éléments de décoration et d'ameublement a priori sains, présents dans l'environnement à traiter, seront déménagés dans une pièce saine pour limiter les risques de contamination. Ce qui ne peut pas être évacué sera recouvert de bâches plastiques, fermées hermétiquement avec du ruban adhésif.	
La procédure de traitement des moisissures sur les matériaux de construction et de décoration dépendra, d'une part, de l'ampleur de l'infestation et, d'autre part, de la porosité des matériaux infestés. Les fiches suivantes détaillent les protocoles de traitements des contaminations fongiques selon les situations.	

Contamination visible cumulée dans le logement de 0,2 à 3 m²

1. Evacuer les occupants, a minima les personnes à risque, de la pièce à traiter
2. S'équiper des protections individuelles
3. Préparer le chantier :
 - ✓ débarrasser les meubles et objets se trouvant dans la pièce à traiter,
 - ✓ recouvrir les sol et murs sains et les meubles et équipement ne pouvant être déplacés, d'une bâche plastique fixée hermétiquement avec du ruban adhésif.
4. A l'aide d'un essuie-tout ou d'un chiffon non pelucheux imprégné du produit ménager utilisé habituellement ou d'une lingette :
 - Procéder au nettoyage du haut vers le bas et, pour les zones contaminées les plus étendues, du plus propre vers le sale,
 - Renouveler l'opération, après avoir changé d'essuie-tout ou de chiffon, jusqu'au retrait complet des contaminations visibles,

L'apparition de tout symptôme, notamment respiratoire, doit conduire à l'arrêt immédiat des opérations

5. Retirer les matériaux poreux (plaque de plâtre et dérivés, papier peint, revêtement textiles, isolants fibreux...) ne pouvant pas être nettoyés, les mettre dans un sac plastique fermé hermétiquement et les éliminer rapidement en décharge pour éviter leur récupération ;
6. Sécher les surfaces nettoyées à l'aide d'essuie-tout ou de chiffons propres et secs ;
7. Regrouper les éléments souillés (bâches, équipements de protection individuelle, lingettes, chiffons) dans un sac poubelle doublé et les éliminer ;
8. Procéder au nettoyage du chantier à l'aide d'un aspirateur muni d'un filtre HEPA ;
9. Pour parfaire le séchage, aérer le plus possible la pièce traitée ;
10. Surveiller régulièrement le support afin de vérifier que les moisissures ne réapparaissent pas.

Le séchage complet des matériaux est un préalable indispensable à la pose d'un nouveau revêtement. Cette phase de séchage dépend des conditions climatiques intérieures et extérieures et peut prendre plusieurs mois selon le degré d'humidification des produits et de leur nature.

 L'usage de tout produit actif (détergent, substance biocide...), nécessite de respecter scrupuleusement le mode d'emploi donné par le fabricant (mode de préparation éventuelle, conditions de ventilation, port d'équipements de sécurité, temps de contact...) sous peine d'une efficacité moindre voire de risques pour la santé de l'opérateur.

Pour rappel l'eau de Javel est un blanchissant et un désinfectant mais n'a pas de propriétés de détergence ou de nettoyage

Son application sur les surfaces intervient après nettoyage pour ne pas compromettre son efficacité.

L'eau de Javel doit être diluée dans de l'eau froide et ne pas être mélangée avec des produits ammoniacés ou acides (produits détartrants ou vinaigre blanc par exemple) sous peine de dégagement de gaz toxiques.

Cas des tapis, moquettes, canapés, matelas tissus d'ameublement ...

Pour prévenir le développement des moisissures, procéder régulièrement à l'aspiration des articles et nettoyage si possible (housse de canapé, tapis...).

A partir de 48 h d'exposition à une forte humidité les moisissures ont commencé à se développer. Sans le séchage complet et rapide des éléments leur élimination est préconisée. De même si des taches de moisissures, d'humidité ou des odeurs persistantes sont constatées. Cette précaution est d'autant plus valable pour les matelas compte tenu de la proximité et de la durée d'exposition à ces contaminants.

En deçà de 48 heures : procéder au séchage à cœur des articles puis les aspirer à l'aide d'un aspirateur muni d'un filtre HEPA 14. Vérifier au préalable l'état du filtre (empoussièrement et intégrité) et le remplacer si nécessaire.

Figure 24 : recommandations sur le traitement des surfaces moisies (Guide CSTB actualisé pour le compte de la DGS, non publié à date)

7. Conclusion / Perspectives

Le projet OPTHYUM s'est focalisé sur les logements des Hauts de l'île de La Réunion dont les occupants sont confrontés à une problématique de confort d'hiver. Cette étude avait pour objectif de renseigner les caractéristiques structurelles, climatiques et d'usage de ces habitations afin d'identifier des leviers d'amélioration du confort tout en prévenant le développement de moisissures potentiellement délétères.

Pour ce faire, deux approches ont été combinées sur la base d'investigations de terrain et d'instrumentation approfondies : numérique pour modéliser les logements considérés et le comportement de parois vis-à-vis du risque de développement de moisissures et expérimental pour appréhender l'éventuelle plus-value d'une composition de paroi isolée réaliste vis-à-vis des contraintes ultra marines.

Au-delà du recrutement de 8 logements en altitude, il s'est agi de collecter les informations nécessaires à l'alimentation des outils numériques.

Cette tâche a nécessité :

- d'obtenir les données météo issues de stations officielles choisies sur la base de différents critères : proximité aux logements, disponibilité des données d'intérêt, complétude des relevés sur une année,
 - de collecter des informations sur les logements tant vis-à-vis des habitudes des occupants notamment pour assurer leur confort thermique, que des conditions climatiques intérieures ou encore de leur structure et équipements.
- Aussi des questionnaires, grilles d'audit techniques ont été élaborés et des capteurs appropriés déployés sur une année.

Les informations recueillies ont également été mises à profit pour déterminer les conditions d'essai auxquelles ont été soumises deux parois verticales dont la composition a été sélectionnée sur la base des retours terrain et des recommandations des acteurs locaux. Ainsi le comportement vis-à-vis de la prolifération de moisissures d'une paroi représentative de l'existant et d'une paroi optimisée en termes d'isolation thermique a été étudiée.

Ainsi la modélisation des huit logements, établie sur la base des informations collectées au travers de l'analyse des questionnaires et des conditions climatiques extérieures a démontré une bonne corrélation avec les mesures in situ (conditions d'ambiance intérieure).

L'analyse des données issues des modélisations, sur la base du diagramme de Fauconnier présenté Figure 25, a permis d'établir le pourcentage d'heures « d'inconfort » prévisible dans les huit logements et le pourcentage d'heure propice au développement de micro-champignons. Cette interprétation, complétée du degré de contamination fongique visible pour chacun des huit logements, est présentée dans le Tableau 18.

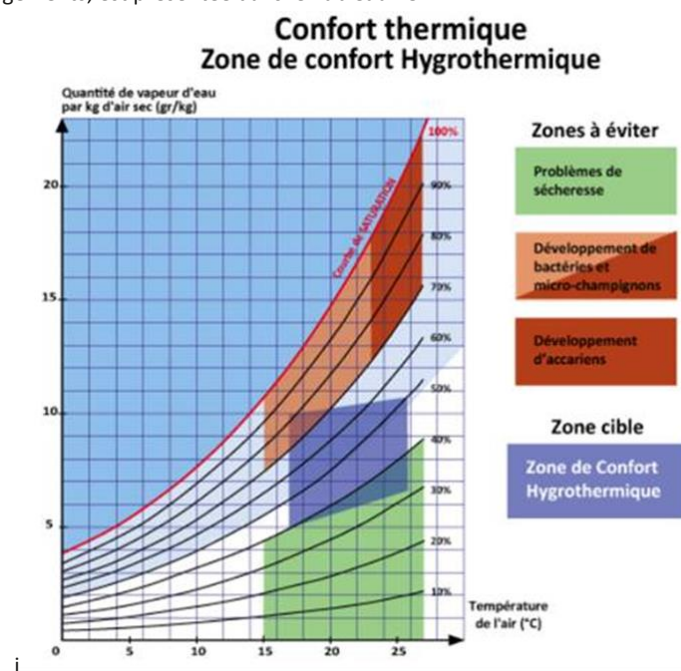


Figure 25 : Diagramme de Fauconnier

Logement	Pourcentage d'heures hors zone de confort prévisible par modélisation STD	Pourcentage d'heure avec HR > 70% prévisible par modélisation STD	Degré de contamination fongique relevé dans les logements
OPHY1	62%	51%	+++
OPHY2	74%	70%	++
OPHY3	66%	53%	-
OPHY4	93%	91%	+
OPHY5	72%	67%	++
OPHY6	78% *	65%	-
OPHY7	56%	47%	+
OPHY8	89%	87%	+++

* inconfort majoritairement dû à une température supérieure à 27°C

Tableau 18 : détermination des périodes d'inconfort prévisibles et constats de terrain de la présence de contaminations fongiques visibles dans les huit logements investigués

Ces résultats démontrent que la seule prise en compte des paramètres de l'enveloppe et des comportements ne suffit pas pour évaluer correctement le risque de développement fongique. Cependant, ils ouvrent la perspective de pouvoir utiliser les modèles numériques STD et Wufi, en phase de conception, pour tester l'impact de modes constructifs ou de différents scénarios sur le confort des occupants. Il peut être également envisagé d'appréhender l'impact de solutions innovantes pour pallier les problématiques de confort d'hiver dans les logements existants avec le déploiement des métrologies déployées dans le cadre du projet OPTHYUM.

La modélisation des parois des logements investigués, menée notamment avec le logiciel WUFI Bio a, pour sa part permis de constater que l'évaluation des risques de développement fongique par cette approche était confortée par l'observation effective de contaminations fongiques visibles.

Les investigations de terrain ont été riches d'enseignements tant concernant les contaminations fongiques que l'identification de malfaçons ou pratiques critiques vis-à-vis du risque de développement fongique. Ces retours de terrain ont notamment été utilisées pour établir des recommandations à l'attention des différents acteurs impliqués : maitres d'œuvre et d'ouvrage, gestionnaires mais également occupants.

Les essais en enceintes climatiques échelle 1 ont permis de différencier l'impact sur le développement des moisissures représentatives du terrain de deux parois de composition différente. Ainsi la paroi isolée a induit une perte significative de culturabilité des microorganismes inoculés comparativement à la paroi de référence, démontrant ainsi la plus-value que peut apporter l'isolation des parois verticales.

En perspective, ces résultats offrent à la modélisation hygrothermique la possibilité d'évaluer, vis-à-vis du risque de développement fongique, l'impact de potentielles pistes d'amélioration en complément de la simulation thermique dynamique STD.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arrêté du 17 avril 2009 définissant les caractéristiques thermiques minimales des bâtiments d'habitation neufs dans les départements de la Guadeloupe, de la Martinique, de la Guyane et de La Réunion, JOFR n°0092 du 19 avril 2009

Arrêté du 11 janvier 2016 modifiant l'arrêté du 17 avril 2009 définissant les caractéristiques thermiques minimales des bâtiments d'habitation neufs dans les départements de la Guadeloupe, de la Martinique, de la Guyane et de La Réunion, l'arrêté du 17 avril 2009 relatif aux caractéristiques acoustiques des bâtiments d'habitation neufs dans les départements de la Guadeloupe, de la Martinique, de la Guyane et de La Réunion et l'arrêté du 17 avril 2009 relatif à l'aération des bâtiments d'habitation neufs dans les départements de la Guadeloupe, de la Martinique, de la Guyane et de La Réunion, JOFR n°0010 du 13 janvier 2016

Label logement des hauts île de La Réunion – Guide Technique ; Version Avril 2022 ; SHLMR

Fiche D.01- Infiltration par les liaisons menuiserie extérieure/ gros œuvre, Agence Qualité Construction, 2019., (<https://qualiteconstruction.com/fiche/infiltrations-par-les-liaisons-menuiserie-exterieure-gros-oeuvre/>)

Fauconnier, R., 1992. L'action de l'humidité de l'air sur la santé dans les bâtiments tertiaires. Revue Chauffage Ventilation Conditionnement 10/1992 (<http://www.energieplus-lesite.be>)

INDEX DES ILLUSTRATIONS

FIGURES

Figure 1 : photo aérienne du site et plan de masse de OPTHY5.....	19
Figure 2 : Plan métré du logement OPTHY5	20
Figure 3 : Mesure des concentrations en CO ₂ intérieur et extérieur, pour le logement OPTHY5, pour une semaine estivale type	23
Figure 4 : Mesure des températures et humidités relatives intérieures pour le logement OPTHY8.....	24
Figure 5 : Mesure des températures intérieures et extérieures pour le logement OPTHY5	24
Figure 6 : Mesure des humidités relatives intérieures et extérieures pour le logement OPTHY5.....	25
Figure 7 : impact de l'humidité relative sur différents éléments susceptibles d'impacter la santé des occupants dans les lieux de vie	25
Figure 8 : Histogramme de l'humidité relative mesurée à l'intérieur des logements	26
Figure 9 : Logement Opthy 3, comparaison des données de température et humidité relative à l'intérieur du logement, calculés par STD et mesurés	28
Figure 10 : Logement Opthy 5, comparaison des données de température et humidité relative à l'intérieur du logement, calculés par STD et mesurés	29
Figure 11 : Logement Opthy 7, comparaison des données de température et humidité relative à l'intérieur du logement, calculés par STD et mesurés	30
Figure 12 : Evolution de l'humidité relative dans la paroi pour le logement OPTHY 1 - équilibre atteint à la fin de la 3ème année	32
Figure 13 : Illustration du résultat de OPTHY 1 - données mesurées - Variation de T et HR au sein de la paroi pour la dernière année de calcul.....	33
Figure 14 : Courbes de niveau HR / T pour le logement OPTHY 1 - données calculées.....	34
Figure 15 : Paramètres mesurés durant l'essai en laboratoire et positionnement des capteurs au niveau des deux types de parois testées	36
Figure 16 : Mesure des températures de surface pour les 2 échantillons mis en œuvre au sein des cellules climatiques.....	37
Figure 17 : Profils des températures mesurées au sein des deux parois et de part et d'autre (T de l'air)	38
Figure 18 : Profils des températures estimées par la méthode Glaser (à droite sans isolation polystyrène expansé (PSE) et à gauche avec isolation PSE)	38
Figure 19 : Profils des humidités relatives mesurées au sein des deux parois et de part et d'autre.....	39
Figure 20 : Profils des HR estimées par la méthode Glaser (à droite sans PSE et à gauche avec PSE)	39
Figure 21 : Etapes de traitement des prélèvements T0 jusqu'au dépôt sur boîte	43
Figure 22 : Représentation graphique des valeurs de log obtenues après les dénombrements effectués à T0 et en point final à 8 semaines post-inoculation (SPI) sur les deux parois	46
Figure 23 : Représentation en 3D des exigences au niveau des fondations du Label logement des hauts Île de La Réunion .	50
Figure 24 : recommandations sur le traitement des surfaces moisies (Guide CSTB actualisé pour le compte de la DGS, non publié à date)	53
Figure 25 : Diagramme de Fauconnier	54

PHOTOGRAPHIES

Photographie 1 : Modèles de capteurs déployés dans les logements (de gauche à droite) : 160IAQ – 160TH – Saveris	11
Photographie 2 : développement d'un prélèvement de terrain inoculé sur différents milieux nutritifs	14
Photographie 3 : contaminations fongiques observées dans les logements investigués.....	14
Photographie 4 : Mise en évidence de présence d'une VMC Simple flux dans les combles et mise en évidence de masques créés par les coursives sur une des façades	15
Photographie 5 : cliché OPTHY5 - Photo générale extérieur du bâtiment	20
Photographie 6 : cliché OPTHY5 - Façade nord	21
Photographie 7 : cliché OPTHY5 - Façade est	21



Photographie 8 : cliché OPTHY5 - Varangue (est)	22
Photographie 9 : montage de la structure en parpaings pour les deux parois avec mise en place des capteurs de température et d'humidité relative (côté extérieur à gauche).....	36
Photographie 10 : Souches fongiques utilisées dans le protocole expérimental	40
Photographie 11 : Etat de viabilité de la suspension de spores après 72h d'incubation	41
Photographie 12 : Identification des différentes zones d'inoculation sur la paroi « référence » (à gauche) et la paroi « optimisée » (à droite).....	42
Photographie 13 : Visuels des divers échantillons témoins.....	42
Photographie 14 : Façade Sud du logement OPTHY 2 dont l'orientation et les protections solaires ne permettent pas de bénéficier d'apports solaires	47
Photographie 15 : Traces d'humidité et de moisissure en pied de mur dues à une remontée capillaire importante	49
Photographie 16 : Croissance importante de végétaux dans un interstice entre la façade et la cour extérieure rendue possible par la présence importante d'eau dans cette zone.....	49
Photographie 17 : Développement de moisissures sur une menuiserie dû à la condensation de l'humidité intérieur sur le vitrage et aux ponts thermiques	51
Photographie 18 : Défaut du joint d'étanchéité entre la partie mobile et le cadre de la menuiserie.....	51

TABLEAUX

Tableau 1 : Détails sur la localisation des 6 stations de Météo France retenues dans le cadre de l'étude.....	8
Tableau 2 : Localisation et année de construction des logements instrumentés.....	10
Tableau 3 : Synthèse des caractéristiques des logements visités	13
Tableau 4 : Résultats des prélèvements moisissures réalisés dans le cadre du projet OPTHYUM	13
Tableau 5 : version de la RTAA Dom applicable aux différents logements du panel de l'étude	15
Tableau 6 : Exigence minimale pour la protection des parois opaques des logements des "Bas"	16
Tableau 7 : Exigence minimale pour la protection des parois opaques des logements des "Hauts"	16
Tableau 8 : calcul de la conformité des parois et de la ventilation vis-à-vis de la RTAA – DOM	16
Tableau 9 : Composition des parois des 8 logements sur la base des observations de terrain.....	32
Tableau 10 : paramètres hygrothermiques des différents matériaux constitutifs des parois des logements investigués.....	32
Tableau 11 : détermination, à partir des données mesurées, de l'humidité et de la teneur en eau en masse maximales pour induire respectivement un risque de condensation et de développement fongique au niveau de chaque constituant de la paroi du logement OPTHY1	33
Tableau 12 : constitution des deux parois à investiguer en cellules climatiques FCBA	35
Tableau 13 : Comptage des colonies de la solution NA après dépôt sur milieu malt-agar - Pour chaque dilution deux boîtes de dépôt sont réalisées. La moyenne du nombre de colonies par dilution est effectuée. *NC : non comptable.....	41
Tableau 14 : Récapitulatif des résultats issus du dénombrement des boîtes de culture à T0 - PF : Papier filtre ; UFC : Unité Formant Colonie.....	43
Tableau 15 : Récapitulatif des différents prélèvements effectués pendant la durée d'expérimentation - Les zones vertes correspondent aux prélèvements effectués. Les zones grises correspondent aux échantillons déjà prélevés donc n'existant plus sur la suite de l'expérimentation, SPI : Semaine post-inoculation, FV : Fibres de verre	44
Tableau 16 : Récapitulatif des résultats issus du dénombrement des prélèvements des papiers filtres en fibres de verre non additivés inoculés avec les solutions de spores NA et A de 2SPI jusqu'à 8SPI.....	45
Tableau 17 : Dénombrements des prélèvements 8SPI au niveau des zones inoculées avec les solutions de spores NA sur les deux parois	46
Tableau 18 : détermination des périodes d'inconfort prévisibles et constats de terrain de la présence de contaminations fongiques visibles dans les huit logements investigués	55

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
CIRBAT	Centre d'Innovation et de Recherche du Bâti Tropical
CMA	Chambre de Métiers et de l'Artisanat
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
FCBA	Centre technique industriel français, chargé des secteurs de la forêt, de la cellulose, du bois-construction et de l'ameublement.
RTAA DOM	Réglementation Thermique Acoustique et Aération des DOM

L'ADEME EN BREF

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



OPTIMISATION DES PERFORMANCES HYGROTHERMIQUES DES LOGEMENTS A LA REUNION

Résumé

Le projet OPTHYUM s'est intéressé à la problématique de confort d'hiver rencontré dans les logements situés dans les Hauts de l'île de La Réunion.

Par des approches complémentaires de diagnostic de terrain, modélisation et expérimentation en laboratoire, cette étude a abouti à plusieurs grandes avancées. Elle a ainsi permis de dimensionner un modèle numérique robuste pour rendre compte des conditions thermo hydriques des logements en altitude, laissant envisager son utilisation pour appréhender l'impact sur le confort de solutions techniques ou d'usages alternatifs. La modélisation des parois s'est révélée fiable pour prédire la présence de développement fongique. Le volet expérimental a pour sa part mis en évidence la plus-value d'une isolation de paroi. Les enseignements de ce projet ont enfin été mis à profit pour formuler des recommandations aux parties prenantes dans la construction : du bureau d'étude à l'utilisateur de ces logements.

Enfin, les connaissances produites par ce projet pourraient alimenter la réflexion des pouvoirs publics sur la mise à jour de la RTTA-Dom afin de prendre davantage en compte les spécificités des Hauts.

Essentiel à retenir ou exergue ou discours marketing

Le confort d'hiver dans les logements des Hauts de La Réunion est une problématique à laquelle la RTAA-DOM, à ce jour, ne permet pas de répondre. S'appuyant sur les expertises du consortium scientifique dans le diagnostic de terrain, la modélisation ou encore la microbiologie, le projet OPTHYUM s'est donné pour objectif de proposer des outils pratiques pour améliorer le confort thermique des occupants sans compromettre leur santé.

