

METHODE DE PREDICTION DU RISQUE DE DEVELOPPEMENT FONGIQUE DANS LES PAROIS DES BATIMENTS

MAI 2022



RAPPORT

Rédaction

Lucile SOUDANI, CSTB, Ingénieure
Noha AL-HAFFAR, CSTB, Ingénieure
Mickaël DERBEZ, CSTB, Ingénieur
Nicolas PLACE, CSTB, Ingénieur
Géraldine GARNIER, CSTB, Cheffe de pôle
Rukshala ANTON, CSTB, Ingénieure
Stéphane MOULARAT, CSTB, Ingénieur

Coordination

Corinne MANDIN, CSTB, Chef de Division

PARTENAIRES PROFEEL :

Pouvoirs Publics



Porteurs



Financeurs



Filière Bâtiment



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



SOMMAIRE

Introduction et objectifs	5
1. Méthodes	8
1.1. Volet expérimental	8
1.1.1. Parc de l'étude	8
1.1.2. Instrumentation des bâtiments pour le suivi de la température et de l'humidité relative	11
1.1.3. Informations descriptives collectées pour chaque bâtiment	12
1.1.4. Diagnostic fongique – Stratégie d'investigation	13
1.1.5. Mesure de l'indice de contamination fongique	15
1.1.1. Questionnaire Diagnostic moisissure (méthode simplifiée)	16
1.2. Volet numérique	18
1.2.1. Résumé de la revue bibliographique	18
1.2.1. Méthode de simulation numérique	19
2. Résultats	23
2.1. Résultats des mesures in-situ	23
2.2. Résultats des simulations numériques	24
2.3. Discussion par bâtiment	27
2.3.1. Bureaux	28
2.3.1. Ecoles	30
2.3.2. Logements	36
2.4. Synthèse des observations	50
2.4.1. Bilan des résultats expérimentaux et numériques	50
2.4.2. Conclusions	51
3. Investigation complémentaire	53
3.1. Etude bibliographique	53
3.2. Influence de la classe de sensibilité des matériaux de la paroi	54
3.2.1. Variation du modèle de WUFI Bio	54
3.2.2. Variation du modèle de ASHRAE 160	58
3.2.3. Variation du modèle VTT	58
3.3. Influence des autres paramètres d'entrée	60
3.3.1. Variation du modèle de ASHRAE 160	60
3.3.2. Variation du modèle VTT	61
3.4. Ajustement des seuils de risque	61
3.4.1. Variation du modèle TOW	61
3.4.2. Variation du modèle SIMHUBAT	63
4. Recommandations sur la prédiction du risque de développement fongique	64



4.1. Approche proposée	64
4.2. Application pratique	66
Conclusion	68
Bibliographie	69



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Le projet Qualité Sanitaire et Energétique des rénovations (QSE) propose d'élaborer, d'évaluer et de tester des méthodes de mesure de la performance globale des bâtiments dans le cadre de rénovations énergétique. Cette performance globale inclut la performance énergétique, indispensable pour lutter contre le changement climatique, mais également sanitaire, afin de s'assurer que les gains énergétiques ne sont pas réalisés au détriment du confort et de la santé des occupants. Ce triptyque Santé-Confort-Energie est désigné par l'appellation « Performance Globale ».

L'objectif de l'étude QSE est de développer une méthode simplifiée permettant d'évaluer cette performance globale dans le cas de bâtiments rénovés. Cette méthode simple et peu coûteuse doit pouvoir être mise en œuvre par des propriétaires de bâtiments et des gestionnaires de parcs pour qualifier leur parc de bâtiments. Ce volet a fait l'objet d'un premier livrable intitulé « Méthode simplifiée d'évaluation du risque d'excès d'humidité et de développement fongique potentiel ».

L'objectif du présent livrable est de présenter la démarche qui a été élaborée pour proposer une méthode consolidée permettant aux bureaux d'étude et de contrôle de prédire les risques de développement fongique dans les parois des bâtiments. Cette étude a été initiée dans un précédent livrable intitulé « Revue bibliographique préalable à l'exploitation des données relatives à l'humidité, tâche 2.3 ». La démarche adoptée consiste à tester les différentes méthodes rencontrées dans les normes et la littérature qui prédisent le risque potentiel d'apparition de moisissures et/ou d'évaluer leur éventuel développement.

Le Tableau 1 récapitule les objectifs des méthodes simplifiée et consolidée qui ont pour objet d'évaluer les risques de développement fongique dans les parois.

Tableau 1 : Résumé des méthodes simplifiée et consolidée pour l'évaluation des risques de développement fongique

	Méthode simplifiée	Méthode consolidée
Destinée à	Tout opérateur qui souhaite évaluer la performance de la rénovation de son bâtiment au regard du triptyque énergie-confort-santé (gestionnaire de parc, bailleurs sociaux, propriétaires de bâtiments, etc.)	Bureau d'étude : évaluation des risques de développement fongique en phase de conception, y compris dans le cadre d'une rénovation (Hors apport d'eau accidentel)
Tâche dans le cadre du projet QSE	Définir une méthode simplifiée qualitative, en stipulant bien les restrictions que cela comporte	Fiabilisation des méthodes actuellement utilisées, c'est-à-dire : <ul style="list-style-type: none">• Eprouver les réglementations, normes et modèles de la littérature au regard de la confrontation données terrain / modélisation



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Méthode simplifiée		Méthode consolidée
		<ul style="list-style-type: none"> • Définir le/les modèles existants le/les plus fiables / faciles d'utilisation, • Proposer une méthode renforçant la fiabilité de l'évaluation du risque
Livrable du projet QSE	<ul style="list-style-type: none"> • Contribution au guide pratique d'évaluation de la performance globale d'une rénovation sous forme d'une fiche technique à compléter. • Evaluation directe du risque de pathologie en lien avec l'humidité. En conclusion <ul style="list-style-type: none"> ○ 0 : pas de risque ○ 1 : risque avéré qui implique une expertise par simulation hygrothermique auprès d'un BE. 	Proposition d'une méthode consolidée pour le calcul du risque de développement fongique.

La méthode consolidée étant destinée aux bureaux d'étude, nous avons décidé de travailler conjointement avec un bureau d'études réalisant des études hygrothermiques dans l'objectif, notamment, de déceler d'éventuels risques de développement fongique pour les parois de bâtiments. Pour ce faire, le questionnaire présenté dans l'Annexe 2 a été établi et adressé à WIGWAM Ingénierie, un bureau d'étude spécialisé dans la maîtrise de la performance technique et environnementale de l'enveloppe du bâtiment.

Dans le cadre de leur travail, le besoin de prédiction de risque a été rencontré pour la conception, l'expertise judiciaire et les projets de dépôt des avis techniques et des appréciations techniques d'expérimentation (ATEX). Ce besoin a été reconnu pour tous types de parois, pour le neuf comme pour la rénovation (ex. : bois (MOB, CLT), maçonnerie, ossature métallique, etc.). Cette prédiction est réalisée grâce aux instructions contenues dans le guide SimHuBat (Programme PACTE, Nov. 2021), ainsi qu'à l'aide du module WUFI Bio (Fraunhofer IBP).

Les échanges ont permis de conclure sur une satisfaction mitigée des outils à disposition, par le fait que les critères et les seuils permettant de juger de la pérennité ou non du développement de moisissures possibles sont très variables, ce qui rend l'analyse complexe. Ainsi, le manque d'un seuil d'acceptabilité ou d'un indice de risque réel en cas de développement de moisissures est un frein important à l'évaluation réaliste du risque.

Ceci permet de mettre en évidence, communément avec la revue bibliographique réalisée dans un précédent document, le besoin de disposer d'une méthode robuste de prédiction du développement fongique pour les professionnels travaillant en bureau d'étude.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Le présent livrable s'organise en plusieurs parties. Tout d'abord, les objectifs de la méthode consolidée sont détaillés. S'en suit une présentation des méthodes d'études expérimentales et de simulations numériques mises en œuvre dans le cadre du projet. Ensuite, les résultats des études réalisées sont présentés et interprétés. Afin d'approfondir notre compréhension sur la prédiction numérique du risque, une investigation complémentaire a été menée, comprenant la variation des paramètres d'entrée des modèles ainsi que les seuils des risques. Enfin, une méthode consolidée a été proposée sous forme d'un arbre décisionnel pour l'évaluation du risque de développement fongique.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

1. METHODES

L'étude décrite dans cette partie comporte deux volets :

- Volet expérimental : collecte de données dans un ensemble de bâtiments
- Volet numérique : évaluation numérique du risque de développement fongique à l'aide des modèles sélectionnés dans la littérature

1.1. Volet expérimental

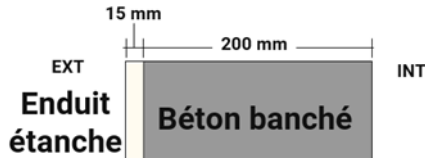
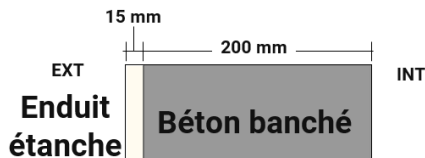
Dans le cadre du projet QSE, il était prévu d'étudier les transferts hygrothermiques dans les parois pour mieux comprendre et pouvoir mieux prédire l'apparition et le développement de moisissures. Pour cela, la température et l'humidité relative de l'air ont été mesurées de part et d'autre des parois ciblées.

1.1.1. Parc de l'étude

L'étude a été menée dans un sous-échantillon de 19 bâtiments du panel des bâtiments instrumentés dans le cadre du projet QSE. Les données collectées ont servi de données d'entrée pour la modélisation des transferts hygrothermiques des parois via le logiciel WUFI.

Les bâtiments faisant l'objet de cette étude sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2: Liste des bâtiments investigués

Type du bâtiment	Code bâtiment	Département	Type de paroi
Bureaux	QSEB07	Rhône	
	QSEB09	Var	



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Type du bâtiment	Code bâtiment	Département	Type de paroi
	QSEB11	Var	
Ecoles	QSEE03	Isère	
	QSEE07	Charente-Maritime	
	QSEE08	Bas-Rhin	
	QSEE20	Haut-Rhin	
	QSEL05	Rhône	
Logements	QSEL06	Rhône	



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Type du bâtiment	Code bâtiment	Département	Type de paroi
	QSEL08	Bouches-du-Rhône	
	QSEL14	Haute-Corse	
	QSEL32	Charente-Maritime	
	QSEL35	Seine-Saint-Denis	
	QSEL36	Rhône	
	QSEL43	Corse-du-Sud	
	QSEL45	Corse-du-Sud	



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Type du bâtiment	Code bâtiment	Département	Type de paroi
	QSEL51	Vienne	
	QSEL67	Corse-du-Sud	
	QSEL73	Var	

1.1.2. Instrumentation des bâtiments pour le suivi de la température et de l'humidité relative

Afin de collecter les données nécessaires à l'étude des transferts hygrothermiques, les dispositifs de mesures suivants ont été déployés dans les bâtiments.

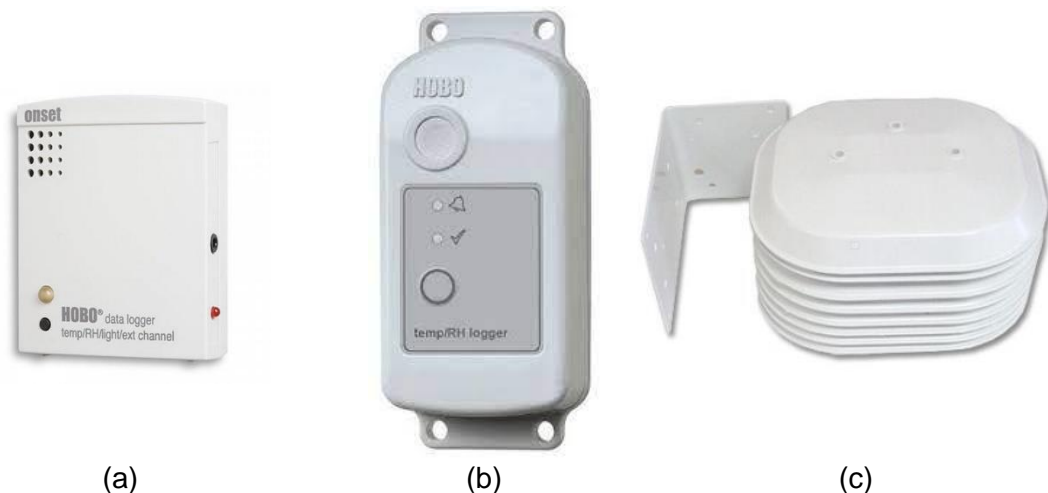


Figure 1: (a) Capteur T/HR intérieur ; (b) Capteur extérieur ; (c) Abri solaire

Les **capteurs intérieurs** de température et d'humidité relative sont des boîtiers HOBO® U12 :



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

- Le boîtier a été posé sur une surface verticale située dans la pièce à instrumenter à une hauteur comprise entre 0,7m et 1,8m ;
- Ces appareils ont été calibrés par le CSTB et réglés sur un pas de temps de mesure de 1h. Ils ont été envoyés prêts à l'emploi aux partenaires qui se sont chargés de les poser avant rénovation, le jour de leur intervention. A noter que les capteurs sont restés dans le bâtiment pendant toute la durée des travaux de rénovation et ont été retirés par les partenaires après rénovation le jour de leur intervention. Ils ont été ensuite renvoyés au CSTB pour récupération des données.

Les **capteurs extérieurs** sont des boîtiers HOBO 0665-MX2301A :

- Le boîtier a été positionné dans un abri solaire (RS1 Solar Radiation Shield) qui a été placé à l'extérieur du bâtiment (sur la descente d'eau de pluie, sur la balustrade ou le garde-corps du balcon, sur la barre d'appui d'une fenêtre, etc.) ;
- Ces appareils sont programmés sur un pas de temps de mesure de 30 minutes. Comme pour les HOBO intérieurs, ils ont été envoyés prêts à l'emploi aux partenaires qui ont été chargés de les poser avant rénovation, le jour de leur intervention. A noter que les capteurs sont restés à l'extérieur du bâtiment pendant toute la durée des travaux de rénovation et ont été retirés par les partenaires après rénovation le jour de leur intervention. Ils ont été ensuite renvoyés au CSTB pour récupération des données.

1.1.3. Informations descriptives collectées pour chaque bâtiment

Pour chacun des bâtiments faisant objet du suivi, les informations suivantes ont été collectées :

- Plan de masse du bâtiment (quand c'est possible), surface / volume de la pièce instrumentée et orientation (nord, sud, est, ouest, nord-est, etc.) de la paroi donnant sur l'extérieur du local instrumenté ;
- Définition de l'usage de la pièce instrumentée (cuisine, salon, salle de classe, etc.) ;
- Niveau du local instrumenté (RDC, R+1, etc.) et nombre d'étages du bâtiment ;
- Définition de tous les locaux adjacents (locaux chauffés ou non chauffés, extérieurs, etc.) ;
- Photos des parois du local instrumenté et légende ;
- Source d'humidité récurrente (douche, évier, fontaine, etc.), accidentelle (remontée capillaire, rejaillissement, etc.) et scénario d'occupation prévisionnel (nombre d'occupant & heure de présence, capacité d'accueil si salle de classe, etc.) ;



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

- Si une ventilation mécanique est installée, débit d'air extrait (ou ΔP avec référence de la bouche d'aération) du local (avant / après rénovation) pour ajuster la classe d'humidité du local. Pas de temps maximal : 1 heure.

1.1.4. Diagnostic fongique – Stratégie d'investigation

Chaque bâtiment a fait l'objet d'un diagnostic fongique par un technicien enquêteur formé. Ce diagnostic sera par la suite confronté aux résultats issus de la modélisation. La stratégie d'investigation pour ce diagnostic est présentée ci-dessous.

Ainsi, partant de l'observation selon laquelle 70% des cas de contaminations fongiques des logements ne sont pas directement observables en première approche, une recherche approfondie doit être réalisée. Ainsi, outre le fait de pouvoir déplacer les objets, l'utilisation d'un endoscope est une aide précieuse permettant d'observer dans des endroits inaccessibles et/ou sombres. En pratique, cette caméra est utilisée pour observer au-dessus, en-dessous et derrière les meubles, derrière les convecteurs/radiateurs/chauffe-eau/machine à laver..., dans les placards, derrière des revêtements (lambris, dalles de plenum, plancher, peinture écaillée...), derrière des grilles d'aération...

1.1.4.1. Catégorisation des pièces dans un bâtiment

Deux catégories de pièces ont été retenues pour le diagnostic fongique : les pièces dites « pièces à risques » vis-à-vis d'une contamination fongique, c'est-à-dire si elle répond dans l'affirmative à une des trois questions suivantes :

- Présence d'une trace de surfaces (moisissures, tâches, papier peint décollé, peinture cloquée, enduit dégradé, condensation, salpêtre) au cours des 12 derniers mois avant rénovation ou bien depuis la fin des travaux de rénovations ;
- Infiltrations d'eau (remontées capillaires, murs enterrés, gouttières engorgées ou endommagées, couverture ou étanchéité endommagées, murs poreux, joints défectueux) au cours des 12 derniers mois avant rénovation ou bien depuis la fin des travaux de rénovations ;
- Dégâts d'eau (rupture de canalisation, incendie, inondation, autre catastrophe naturelle...) (moisissures, tâches, papier peint décollé, peinture cloquée, enduit dégradé, condensation, salpêtre) au cours des 12 derniers mois avant rénovation ou bien depuis la fin des travaux de rénovations.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

L'ensemble des autres pièces qui ne présentent pas à priori de risques de développement fongique dites « pièces standards »

1.1.4.2.Sélection des pièces à investiguer

En ce qui concernent les bâtiments d'habitation, du fait de la taille réduite des logements, il n'y a pas de nombre limite de pièces à investiguer. Toutes les pièces de vie et les pièces annexes si communicantes avec le logement telle que cave, garage, buanderie, cellier, combles...) sont à investiguer. Ainsi, l'ensemble des « pièces standards » et des « pièces à risques » sont investiguées.

En ce qui concernent les bâtiments à usage d'école et de bureau, il est proposé d'investiguer :

- Les 3 salles de classe ou les 3 espaces de bureau instrumentées (qui font l'objet de la mesure de la qualité de l'air intérieur. Notons que ces pièces peuvent être « à risques » ou « standards » ;
- Jusqu'à 5 autres pièces définies « pièces à risques », accessibles, quel que soit leur usage (salles de classe, dortoir, espace de bureau, zone de stockage et d'archivage, sanitaires, caves, combles, etc.) et faisant partie du même bâtiment (ou du même niveau dans le cas de bureaux situés à un même étage).

1.1.4.3.Méthode d'investigation

Dans toutes les « pièces standards » investiguées, il a été demandé de procéder à :

- A un examen visuel des zones directement observables (dans les angles, sur les plafonds, les murs, autour des fenêtres) et à l'arrière des émetteurs de chaleur (convecteurs, radiateurs) en utilisant si besoin l'endoscope ;
- Au renseignement de la partie « Diagnostic moisissure » du questionnaire « enquêteur » ;
- La réalisation de photographies en présence de traces de surfaces (parois, mobilier, objets).

Dans les « pièces à risques », il a été demandé de procéder à :



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

- Un examen visuel des zones directement observables (dans les angles, sur les plafonds, les murs, autour des fenêtres) et à l'arrière des émetteurs de chaleur (convecteurs, radiateurs) en utilisant si besoin l'endoscope.
- Un examen derrière les surfaces amovibles (utilisation de l'endoscope si besoin) notamment les meubles, les dalles de plénum, les revêtements décollés, les sommiers, ...
- Un examen au-dessus et à l'intérieur des meubles (buffet, meubles sous évier, placard, armoire, ...)
- Au renseignement de la partie « Diagnostic moisissure » du questionnaire « enquêteur » ;
- La réalisation de photographies en présence de traces de surfaces (parois, mobilier, objets).

Le diagnostic fongique est valable uniquement le jour où il est réalisé.

1.1.5. Mesure de l'indice de contamination fongique

L'indice de contamination Fongique (ICF) est basé sur l'identification de Composés Organiques Volatils (COV) spécifiques, avec pour objectif, le diagnostic précoce et rapide d'un développement fongique. Il a été breveté par les chercheurs du CSTB (France Brevet n° EP2130043B1, 2007). L'ICF permet de statuer sur un développement fongique actif de bâtiments, y compris dans les cas de contaminations précoces et/ou « cachées » (Moularat, Robine, Ramalho, & Oturan, Detection of fungal development in a closed environment through the identification of specific VOC: demonstration of a specific VOC fingerprint for fungal development., 2008) (Moularat, Robine, Ramalho, & Oturan, Detection of fungal development in closed spaces through the determination of specific chemical targets, 2008).

Dans le cadre de cette étude, cette mesure a consisté à réaliser un prélèvement gazeux (COV) par une méthode passive (prélèvement à l'aide d'un corps diffusif déposé durant sept jours dans les logements et cinq jours dans les écoles et les bureaux). Les échantillons sont ensuite acheminés au laboratoire pour analyse et calcul de l'ICF.

L'enjeu est de permettre, par une mesure simple, de diagnostiquer une contamination fongique ou encore d'assurer la surveillance d'un environnement vis-à-vis du risque de prolifération fongique. Cette mesure permet de rendre compte de l'activité ou non des moisissures, en surface ou dans la paroi, uniquement pendant cette période. Il peut arriver que des moisissures soient visibles, mais seulement actives en période de pluie par exemple. Une interprétation fine de ces résultats est donc nécessaire.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Dans le cadre de notre étude, cette mesure d'ICF a permis de consolider les diagnostics visuels réalisés dans les bâtiments et aidé à discerner les cas où les moisissures étaient actives.

Cet indice a été mesuré dans tous les locaux instrumentés : dans la chambre principale des bâtiments à usage d'habitation, dans 3 salles de classe dans le cas des écoles et dans 3 espaces dans le cas des bureaux. Cette mesure a été faite une première fois avant rénovation et une seconde fois, après rénovation. Seuls les résultats de mesure avant rénovation ont été pris en compte dans cette étude, les résultats de la seconde mesure n'étant pas disponibles au moment de l'exploitation des données réalisée dans le cadre de cette étude.

1.1.1. Questionnaire Diagnostic moisissure (méthode simplifiée)

Cette partie reprend les questions transmises aux occupants des différents bâtiments pour une meilleure évaluation des conditions hygrothermiques sur les lieux des mesures.

Tableau 3: Questionnaire pour la description par l'enquêteur des moisissures visibles présentes dans les bâtiments étudiés

Objet	Question	Réponse
Identification de traces visibles ou cachées	Traces de surfaces dans la pièce investiguée ?	Non (absence de traces)
		Oui, traces visibles (directement observables)
		Oui, traces cachées (observées après s'être penché, ou avoir pris de la hauteur, ou avoir déplacé quelque chose, ou visible uniquement avec l'endoscope)
Si OUI ↓		
Description des traces	Type de support où sont situées les traces des murs ? (Réponses multiples)	Absence de traces sur les murs
		Papier peint, papier vinyle, toile de verre
		Textiles
		Carrelage, faïence
		Pierre
		Peinture, résine, toile de verre peinte
		Lambris ou autre revêtement en bois



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Objet	Question	Réponse
		Mur sans revêtement : béton, plâtre, placoplâtre, brique
		Autre type de support
	Type de support où sont situées les traces de sol ? (Réponses multiples)	Absence de traces sur le sol
		Moquettes
		Synthétique (plastique, vinylique, linoléum, caoutchouc)
		Carrelage, pierre, tomette
		Peinture de sol, résine
		Parquet en bois massif
		Parquet flottant, contrecollé ou stratifié
		Sol brut sans revêtement : béton, chape ciment
		Sol en terre
		Autre type de support
	Type de support où sont situées les traces du plafond ? (Réponses multiples)	Absence de traces au plafond
		Papier peint, papier vinyle, toile de verre
		Moquettes
		Peinture
		Projection d'isolant, panneaux isolants, fond de coffrage
		Carrelage, faïence
		Lambris ou autre revêtement en bois
		Faux plafond suspendu ou tendu
Dalles collées au plafond (polystyrène, polyuréthane...)		
Plafond brut sans revêtement : béton, plancher en bois		



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Objet	Question	Réponse
		Autre type de support
	Description des traces (réponses multiples)	Humidité (présence d'auréoles « sans relief »)
		Condensation (présence de gouttelettes d'eau éparses)
		Salpêtre (présence de cristaux blanchâtres ou grisâtres)
		Moisissure (dépôt duveteux ou feutré « en relief »)
		Basidiomycète (mérule)
		Revêtement de surface dégradé (papier peint décollé, peinture cloquée, enduit dégradé)
	Si moisissures, surface cumulée ?	Quelques traces éparses < 50 cm ² (format CB)
		Entre 50 cm ² (CB) et 600 cm ² (feuille A4)
		Entre 600 cm ² (feuille A4) et 0.5 m ²
		Entre 0.5 m ² 1 m ²
		Supérieur à 1 m ²
	Si moisissures et/ou humidité, état du matériau ?	Sec
		Humide (absence d'eau liquide visible mais toucher humide)
		Imbibé d'eau (une pression avec le doigt laisse de l'eau sur ce dernier)
		Si humide ou imbibé d'eau, limité à la trace ?

1.2. Volet numérique

1.2.1. Résumé de la revue bibliographique

La revue bibliographique réalisée dans le cadre de la Tâche 2.3 du projet a permis d'identifier les normes et modèles qui traitent des risques de développement fongique à travers des indicateurs qualitatifs (présence ou non de moisissures) ou quantitatifs (risques de



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

développement et d'étalement plus ou moins important de moisissures). Ces derniers sont calculés grâce à divers paramètres tenant compte de la température et/ou de l'humidité relative. Il faut noter que beaucoup d'expérimentations utilisées pour évaluer la robustesse des modèles sélectionnés sont réalisées en laboratoire et considèrent des régimes stationnaires ; alors que les comparaisons avec des mesures en conditions réelles sur site sont peu fréquentes.

Les critères d'évaluation du risque de développement fongique suivant les différentes normes et modèles sélectionnés sont regroupés dans le Tableau 5. La méthode d'évaluation est indiquée par un code couleur qui mesure l'intensité du risque.

1.2.1. Méthode de simulation numérique

Les modèles décrits précédemment utilisent comme données d'entrée des données non directement mesurées sur site, comme la teneur en eau à l'intérieur de la paroi ou des températures de surface. Pour combler ce manque, il a été décidé de réaliser des simulations des transferts hygrothermiques à l'aide du logiciel WUFI Pro, et d'en extraire les grandeurs nécessaires.

L'évaluation du risque de développement fongique s'est faite au travers de trois types de simulations :

Tableau 4 : Description des différents types de simulations réalisées

Type de simulation	Données d'entrée		Période
	Climat extérieur	Climat intérieur	
Simulations avec climat météo (M)	Mesures réalisées par une station météo la plus proche géographiquement de la localisation réelle du bâtiment considéré	Généré grâce à la connaissance de la classe d'hygrométrie des bâtiments, suivant la méthode du guide SimHuBat (Programme PACTE, Nov. 2021)	Réalisées sur 3 ans
Simulations avec climat réel (R)	Mesures réalisées sur site dans les bâtiments étudiés		Réalisées sur la période de données disponibles
Simulations intermédiaires	Mesures réalisées par une station météo la plus proche géographiquement de la localisation réelle du bâtiment considéré	Mesures réalisées dans les bâtiments étudiés	Réalisées sur la période de données disponibles



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Tableau 5: Résumé des méthodes d'évaluation du risque de développement fongique suivant les normes et modèles sélectionnés

Modèle ou Norme		Méthode d'évaluation du risque		
ISO 137881-1	P_{ISO} : Pourcentage d'heures au cours de la dernière année simulée, pour lesquelles la moyenne mensuelle de l'humidité relative superficielle dépasse 80%.	$P_{ISO} = 0\%$	$0\% < P_{ISO} \leq 1\%$	$P_{ISO} > 1\%$
		Moisissures non susceptibles d'apparaître	Moisissures susceptibles d'apparaître	Moisissures très susceptibles d'apparaître
ASHRAE 160	Pourcentage d'heures sur la dernière année simulée, pour lesquelles l'indice calculé de développement de moisissures atteint le seuil de visibilité à l'œil nu et/ou celui de visibilité uniquement au microscope.	Aucun des deux seuils atteint		Seuil de visibilité au microscope atteint
		Résistant au développement fongique		Très sensible au développement fongique
SIMHUBAT	Nombre d'heures sur la dernière année simulée où les teneurs en eau en masse en tout point de la paroi sont supérieures au seuil, et ce en ne comptabilisant que les périodes supérieures à 7 jours.	Seuil non atteint	Seuil atteint moins de 8 semaines cumulées par an	Seuil atteint plus de 8 semaines cumulées par an
		Absence de risque de développement fongique	Dépassement ponctuel de la limite n'entraînant pas un risque de développement fongique	Risque avéré de développement fongique
Annexe 14 de l'IEA		$\tau \geq 0,7$		$\tau < 0,7$



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Modèle ou Norme		Méthode d'évaluation du risque		
	τ : Rapport de températures de surface intérieure et extérieure.	Risque < 5% de développement de moisissures		Risque élevé de développement de moisissures
TOW	TOW : rapport entre la période de persistance de l'humidité relative au-delà d'un seuil critique (80%) et la période totale d'évaluation.	TOW < 0,5		TOW > 0,5
		Apparition de moisissure retardée Apparition de moisissure retardée		Apparition de moisissure non négligeable
VTT	Risques évalués grâce à l'outil intégré au logiciel de simulation WUFI Pro. Les résultats sont donnés directement sous forme de feu tricolore	Risque inexistant	Risque acceptable	Risque inacceptable
WUFI Bio				



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

1.2.1.1. Simulations avec climat météo

Le premier type utilise comme données climatiques d'entrée les mesures réalisées par une station météo la plus proche géographiquement de la localisation réelle du bâtiment considéré. Le climat intérieur est généré grâce à la connaissance de la classe d'hygrométrie des bâtiments : elle est considérée comme « faible » pour les bureaux et « moyenne » pour les écoles et les logements. Ces simulations sont réalisées sur 3 ans.

Cette démarche est celle adoptée dans le cadre de demande d'étude d'expertise dans le cadre de dossier d'Atex ou d'Avis technique. L'intérêt de ce cas d'étude est de déterminer si la connaissance du lieu et de la classe d'hygrométrie, en plus des données de paroi, permet une bonne évaluation du risque de développement fongique.

1.2.1.2. Simulations avec climat réel mesuré sur site

Le deuxième type utilise comme données climatiques d'entrée les mesures en humidité relative et température réalisées dans les bâtiments étudiés pendant des périodes plus ou moins longues suivant les cas (allant d'environ 2 mois à environ 11 mois). Ces simulations sont au plus près du comportement réel des parois et devraient permettre une évaluation plus juste du risque de développement fongique.

Ces simulations sont réalisées sur la période de données disponibles et certaines n'ont pas permis une évaluation du risque de développement fongique à l'aide de tous les modèles sélectionnés (durée minimale d'un an pour certains modèles).

1.2.1.3. Simulations intermédiaires

Pour 4 logements, les climats extérieurs n'ont pas été mesurés, mais les climats intérieurs sont disponibles pour des durées allant de 9 à 15 mois. Aussi, des simulations dites « intermédiaires » ont été réalisées, avec les climats extérieurs de la station météorologique la plus proche de chaque logement.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

2. RESULTATS

2.1. Résultats des mesures in-situ

Les résultats des diagnostics réalisés sur site sont exprimés selon un code couleur présenté dans le Tableau 6.

Tableau 6: Code couleur utilisé pour les résultats des diagnostics sur site

Méthode	Evaluation du risque	
Diagnostic visuel	Réponse négative des occupants aux questions du questionnaire	Réponse(s) positive(s) des occupants
	Absence de source d'humidité détectée visuellement par les enquêteurs	Présence de source d'humidité détectée visuellement par les enquêteurs
	Absence de contamination fongique active	Contamination fongique active

Le Tableau 7 regroupe les résultats de l'indice de contamination fongique (ICF) ainsi que ceux du diagnostic fongique réalisé sur site.

Pour les bureaux et les écoles, l'ICF a été mesuré dans trois pièces. Pour rappel, dans ce cas et dans le cadre de cette étude, un bâtiment entier (code rouge pour tout le bâtiment dans les sections suivantes du document) est défini comme contaminé actif dès la détection identifiée par l'ICF (code rouge). Pour les logements, l'air est considéré comme réparti de façon homogène pour ne pas avoir à faire de mesure dans plusieurs pièces.

Tableau 7 : Tableau récapitulatif du diagnostic moisissure réalisé sur site : ICF et diagnostic visuel

Type du bâtiment	Code bâtiment	ICF			Date initiale et finale de la mesure	Diagnostic visuel	
		Résultat				Résultat	Date de renseignement du questionnaire
		P1	P2	P3			
Bureaux	QSEB07				21/09/2020 au 25/09/2020		21/09/2020
	QSEB09				08/02/2021 au 12/02/2021		08/02/2021
	QSEB11				12/04/2021 au 16/04/2021		09/04/2021



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Type du bâtiment	Code bâtiment	ICF			Diagnostic visuel		
		Résultat			Date initiale et finale de la mesure	Résultat	Date de renseignement du questionnaire
		P1	P2	P3			
Ecoles	QSEE03				30/11/2020 au 04/12/2020		30/11/2020
	QSEE07				22/06/2020 au 26/06/2020		22/06/2020
	QSEE08				15/06/2020 au 19/06/2020		14/08/2020
	QSEE20				15/03/2021 au 19/03/2021		19/03/2021
Logements	QSEL05				02/07/2020 au 09/07/2020		09/07/2020
	QSEL06				18/06/2020 au 20/06/2020		18/06/2020
	QSEL08				17/01/2020 au 24/01/2020		17/01/2020
	QSEL14				23/11/2020 au 30/11/2020		30/11/2020
	QSEL32				19/08/2020 au 26/08/2020		19/08/2020
	QSEL35				16/04/2021 au 23/04/2021		14/04/2021
	QSEL36				05/01/2021 au 12/01/2021		08/01/2021
	QSEL43				27/01/2021 au 03/02/2021		02/02/2021
	QSEL45				27/01/2021 au 03/02/2021		03/02/2021
	QSEL51				06/01/2021 au 13/01/2021		06/01/2021
	QSEL67				11/01/2021 au 18/01/2021		13/01/2021
	QSEL73				18/02/2021 au 25/02/2021		18/02/2021
							P1 : Première pièce P2 : Deuxième pièce P3 : Troisième pièce

2.2. Résultats des simulations numériques

La partie suivante décrit l'ensemble des résultats obtenus pour l'évaluation numérique du risque de développement fongique, pour chacun des bâtiments et pour les trois types de simulations décrites précédemment : simulations avec climat météo (M), simulations avec climat réel (R) et simulations intermédiaires. Pour des raisons de simplifications, les simulations intermédiaires sont considérées comme simulations avec climat réel et sont désignées dans ce qui suit par (R).



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Dans le Tableau 8, les différents modèles sont repris dans les colonnes ; les simulations utilisent deux types de climats « M » pour météo et « R » pour réel.

Pour chacun des modèles utilisés, les résultats sont donnés suivant le code couleur expliqué selon :

- **ISO 137881-1** : le risque est évalué par le pourcentage d'heures au cours de la dernière année simulée, pour lesquelles le critère est dépassé. Pour un nombre nul, la case est verte ; inférieur à 1%, la case est jaune ; supérieur à 1%, la case est rouge. A noter que ce modèle requiert un minimum d'un an de données ;
- **ASHRAE 160** : le risque est évalué par le pourcentage d'heures sur la dernière année simulée, pour lesquelles l'indice calculé de développement de moisissures atteint le seuil de visibilité à l'œil nu et celui de visibilité uniquement au microscope. Dans notre situation, l'indice n'atteint aucun des deux niveaux et la case est verte ;
- **SIMHUBAT** : le risque est évalué par le nombre d'heures sur la dernière année simulée où le seuil est au moins atteint. Lorsque que ce seuil n'est jamais atteint, la case est verte ; lorsqu'il est atteint moins de 8 semaines par an cumulées avec seulement les périodes d'une semaine ou plus de comptabilisées, la case est jaune ; lorsqu'il est atteint plus souvent, la case est rouge. A noter que les dépassements des seuils sont évalués pour les zones les plus critiques de la paroi, en l'occurrence les interfaces ;
- **Annexe 14 de l'IEA** : le risque est jugé avéré lorsque le seuil est dépassé. Les cases sont seulement vertes ou rouge suivant le dépassement. A noter que ce modèle requiert un minimum d'un an de données ;
- **TOW** : le risque est évalué à travers le dépassement d'un seuil critique. Le risque est jugé inacceptable dès lors que ce seuil est dépassé. Les cases sont vertes lorsque que le TOW est nul, jaunes lorsque le TOW est non nul mais inférieur à la valeur seuil (0,5) ou rouge lorsque le seuil est dépassé ;
- **VTT et WUFI Bio** : les risques sont évalués grâce à l'outil intégré au logiciel de simulation WUFI Pro. Les résultats sont donnés directement sous forme de feu tricolore. Le risque est inexistant lorsque la case est verte ; acceptable lorsqu'elle est jaune ; inacceptable lorsqu'elle est rouge. A noter que ce modèle requiert un minimum d'un an de données.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Tableau 8: Prédiction du risque de développement fongique à l'aide des modèles choisis

Code bâtiment		ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT (interface)		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio	
		M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R
Bureau	QSEB07	Red	White	Green	Green	Green	Green	Red	White	Green	Green	Green	White	Green	White
	QSEB09	Red	White	Green	Green	Green	Green	Red	White	Green	Green	Green	White	Green	White
	QSEB11	Red	White	Green	Green	Green	Green	Red	White	Green	Green	Green	White	Green	White
Ecole	QSEE03	Red	White	Green	Green	Green	Green	Red	White	Yellow	Green	Yellow	White	Yellow	White
	QSEE07	Yellow	White	Green	Green	Green	Green	Green	White	Yellow	Green	Green	White	Yellow	White
	QSEE08	Yellow	White	Green	Green	Green	Green	Red	White	Green	Green	Green	White	Green	White
	QSEE20	Yellow	White	Green	Green	Green	Green	Red	White	Green	Green	Green	White	Green	White
Logement	QSEL05	S	Yellow	White	Green	Green	Green	Red	White	Green	Green	Green	White	Green	White
		C	Yellow	White	Green	Green	Green	Red	White	Green	Green	Green	White	Green	White
	QSEL06	S	Yellow	White	Green	Green	Green	Red	White	Green	Green	Green	White	Green	White
		C	Yellow	White	Green	Green	Green	Red	White	Green	Green	Green	White	Green	White
	QSEL08	S	Red	White	Green	Green	Green	Red	White	Green	Green	Green	White	Green	White
		C	Red	White	Green	Green	Green	Red	White	Green	Green	Green	White	Green	White
	QSEL14	S	Yellow	White	Green	Green	Green	Red	White	Yellow	Yellow	Green	White	Green	White
		C	Yellow	White	Green	Green	Green	Red	White	Yellow	Yellow	Green	White	Green	White
	QSEL32	Yellow	White	Green	Green	Green	Green	Red	White	Red	Yellow	Green	White	Green	White
	QSEL35	S	Yellow	White	Green	Green	Green	Red	White	Green	Green	Green	White	Green	White
C		Yellow	White	Green	Green	Green	Red	White	Green	Green	Green	White	Green	White	
QSEL36	S	Red	White	Green	Green	Green	Red	White	Green	Yellow	Green	White	Green	White	



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Code bâtiment		ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT (interface)		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio	
		M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R
	C	Red		Green	Green	Green	Green	Red		Green	Yellow	Green		Green	
	S	Yellow		Green	Green	Green	Green	Red		Green	Yellow	Green		Green	
QSEL43	C	Yellow		Green	Green	Green	Green	Red		Green	Yellow	Green		Green	
	S	Yellow		Green	Green	Green	Green	Red		Green	Yellow	Green		Green	
QSEL45	C	Yellow		Green	Green	Green	Green	Red		Green	Yellow	Green		Green	
	S	Yellow		Green	Green	Green	Green	Red		Green	Yellow	Green		Green	
QSEL51		Red		Green	Green	Green	Green	Red		Green	Green	Green		Green	
QSEL67	C	Red		Green	Green	Green	Green	Red		Green	Yellow	Green		Green	
	S	Red		Green	Green	Green	Green	Red		Green	Yellow	Green		Green	
QSEL73	C	Yellow		Green	Green	Green	Green	Red		Green	Green	Green		Green	
	S	Yellow		Green	Green	Green	Green	Red		Green	Green	Green		Green	

S : Salon
C : Chambre

N.B. : Une case vide (case blanche) signifie que la simulation n'a pas été réalisée pour manque de données nécessaires pour la réalisation de la simulation en question (cf. livrable T2.3)

2.3. Discussion par bâtiment

La mise en perspective des résultats des modélisations par rapport aux mesures réalisées sur site est présentée ci-après pour les bâtiments considérés individuellement et regroupés par catégories.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

2.3.1. Bureaux

2.3.1.1. QSEB07

Le diagnostic sur site ne laisse apparaître aucune trace de moisissure lors de la visite. La mesure de l'ICF n'a pas montré de développement fongique actif la semaine du test (Tableau 9).

Les réponses aux questionnaires contiennent des valeurs manquantes. Aucune trace visible de moisissures n'a été remarquée par les occupants au cours des 12 derniers mois.

En ce qui concerne les modélisations, les modèles ISO 137881-1 et Annexe 14 IEA prévoient un risque avéré de développement de moisissures lié à la paroi et à son emplacement géographique. Les autres modèles prévoient un risque inexistant.

Il n'y a pas de contradiction entre les estimations du risque de développement de moisissures et les observations faites sur site.

2.3.1.2. QSEB09

Les observations sur site, les prédictions des modèles numériques et la conclusion sont similaires à celles faites pour le bâtiment QSEB07 (Tableau 10).

On remarque ici que ces deux bâtiments sont composés du même type de paroi (béton banché et enduit ciment).

2.3.1.3. QSEB11

Le diagnostic sur site ne laisse apparaître aucune moisissure visible, mais la mesure d'ICF révèle leur présence lors de la semaine de prélèvement (Tableau 11). Au vu des réponses aux questionnaires, le temps était couvert, mais il ne pleuvait pas la semaine de la mesure. Les réponses aux questionnaires révèlent la présence de traces visibles de moisissure lors des 12 derniers mois, ainsi que la présence d'infiltration d'eau.

Dans cette situation, il peut s'agir d'une apparition récente de moisissures, d'une contamination cachée avec par exemple la présence de développement fongique uniquement à l'intérieur d'une paroi.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Tableau 9: Résultats du bâtiment QSEB07

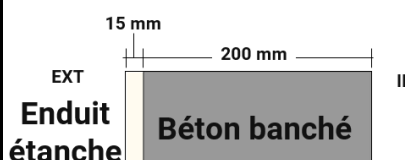
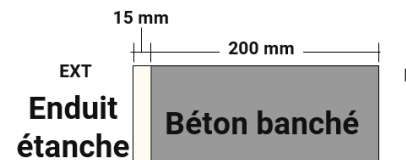
Type de paroi	Numérique														Expérimental	
	ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF
	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R		

Tableau 10: Résultats du bâtiment QSEB09

Type de paroi	Numérique														Expérimental	
	ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF
	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R		



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

En ce qui concerne les modélisations, les mêmes résultats que pour les bureaux précédents sont obtenus. Cela confirme la sensibilité de la paroi à la vue de son emplacement géographique. Le fait que les modélisations avec le climat réel ne semblent pas témoigner d'un risque plus élevé conforte l'hypothèse d'une apparition de moisissure récente liée à la survenue d'un apport d'eau accidentel (infiltration d'eau).

2.3.1. Ecoles

2.3.1.1. QSEE03

Le diagnostic sur site ne laisse apparaître aucune trace de moisissure, que ce soit lors de la visite ou dans la mesure d'ICF.

Les réponses aux questionnaires indiquent qu'aucune trace visible de moisissures n'a été remarquée par les occupants au cours des 12 derniers mois. En revanche, l'enduit ciment extérieur est décrit comme étant fissuré, ce qui peut conduire à des infiltrations d'eau.

En ce qui concerne les modélisations, les modèles ISO 137881-1 et Annexe 14 IEA prévoient un risque avéré de développement de moisissure lié à la paroi et à son emplacement géographique lorsque les climats issus des stations météo sont considérés.

Les modèles TOW, VTT et WUFI Bio prévoient un risque faible mais existant d'apparition de moisissures lorsque les climats issus des stations météo sont considérés, mais ce risque disparaît pour le modèle TOW lorsque les climats mesurés sur site sont considérés.

En comparant les deux jeux de climats (voir Tableau 13), intérieurs et extérieurs et en termes de température et d'humidité relative, nous pouvons constater qu'ils sont assez proches sur les périodes considérées, à l'exception de l'humidité relative intérieure, qui est bien supérieure pour le climat issu des données météo. Cela pourrait expliquer un risque prédis plus élevé pour les simulations avec les climats météo des modèles TOW, VTT et WUFI Bio.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Tableau 11: Résultats du bâtiment QSEB11

Type de paroi	Numérique														Expérimental	
	ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF
	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R		

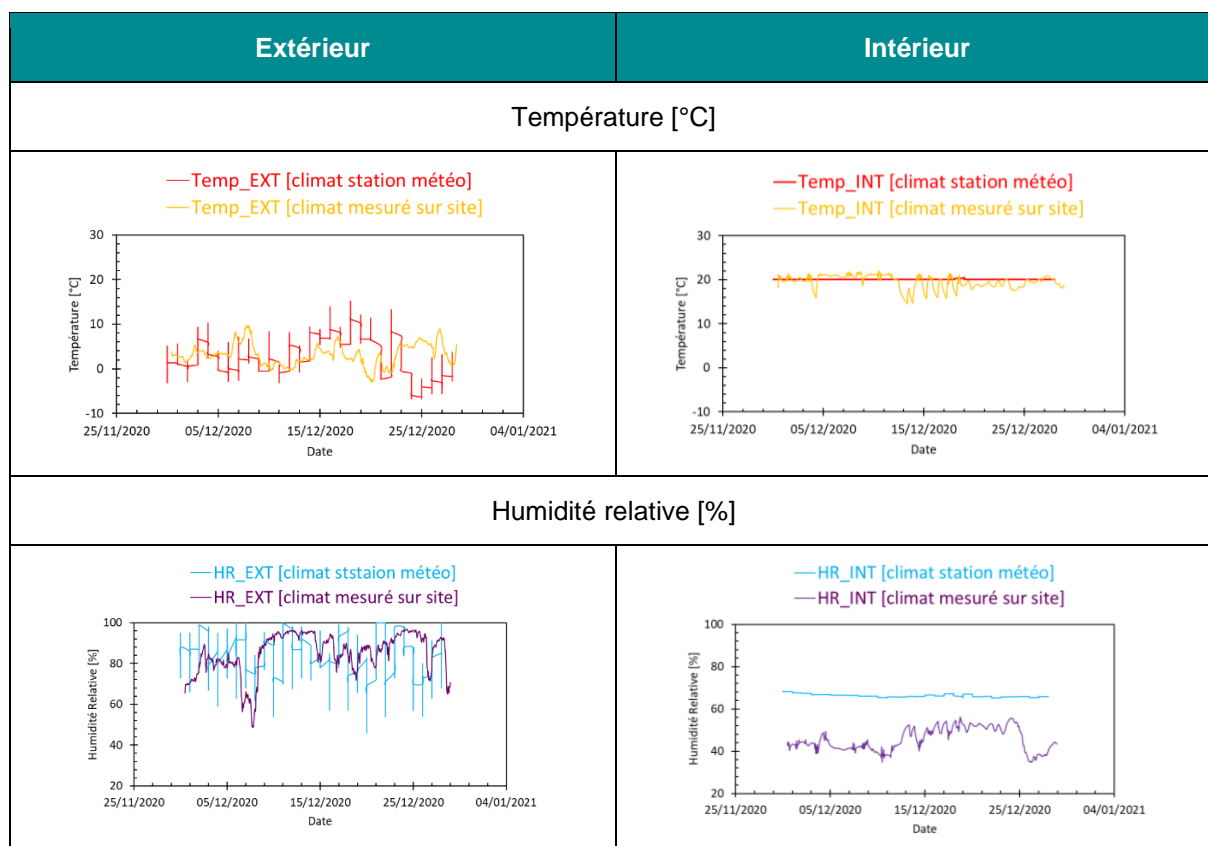
Tableau 12: Résultats du bâtiment QSEE03

Type de paroi	Numérique														Expérimental	
	ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF
	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R		



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Tableau 13 : Comparaison des climats d'entrée pour l'étude du bâtiment QSEE03



2.3.1.2.QSEE07

Le diagnostic sur site révèle que des traces de moisissures sont visibles alors que l'ICF n'a pas révélé de contamination active le jour du test (Tableau 14). Les photos de la Figure 2 permettent de nous assurer qu'il s'agit bien de traces de moisissures.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

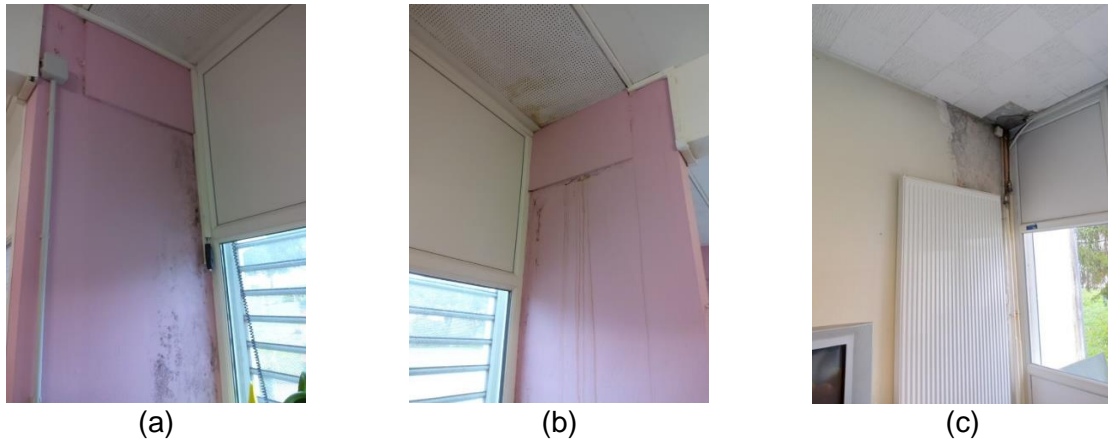


Figure 2 : Photo des moisissures observées dans le bâtiment QSEE07 prise lors de l'enquête sur site

Pour information, les photos précédentes ont été prises au même moment que la campagne de mesure pour le calcul d'ICF. L'explication est qu'il s'agit d'un développement fongique non actif. Ces traces ont dû apparaître par le passé mais n'ayant plus d'apport d'eau liquide, les moisissures sont devenues inactives, ou du moins ont été inactives pendant la période de mesure.

En ce qui concerne les modélisations, les résultats sont différents de ceux obtenus précédemment, alors qu'il s'agit ici aussi d'une paroi en béton banché. Les modélisations concernées utilisant les jeux de climats obtenus par les stations météo, la figure suivante compare les climats des différentes villes utilisés.

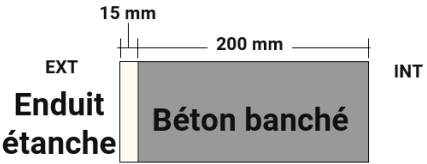
La comparaison des températures intérieures et extérieures ne permet pas de constater de différence notable entre les climats météo utilisés. En termes d'humidité relative, les différences sont un peu plus remarquables, sans être très prononcées : pour le bâtiment QSEE07 qui nous intéresse, les humidités relatives intérieures et extérieures sont légèrement plus élevées que pour les autres villes considérées.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

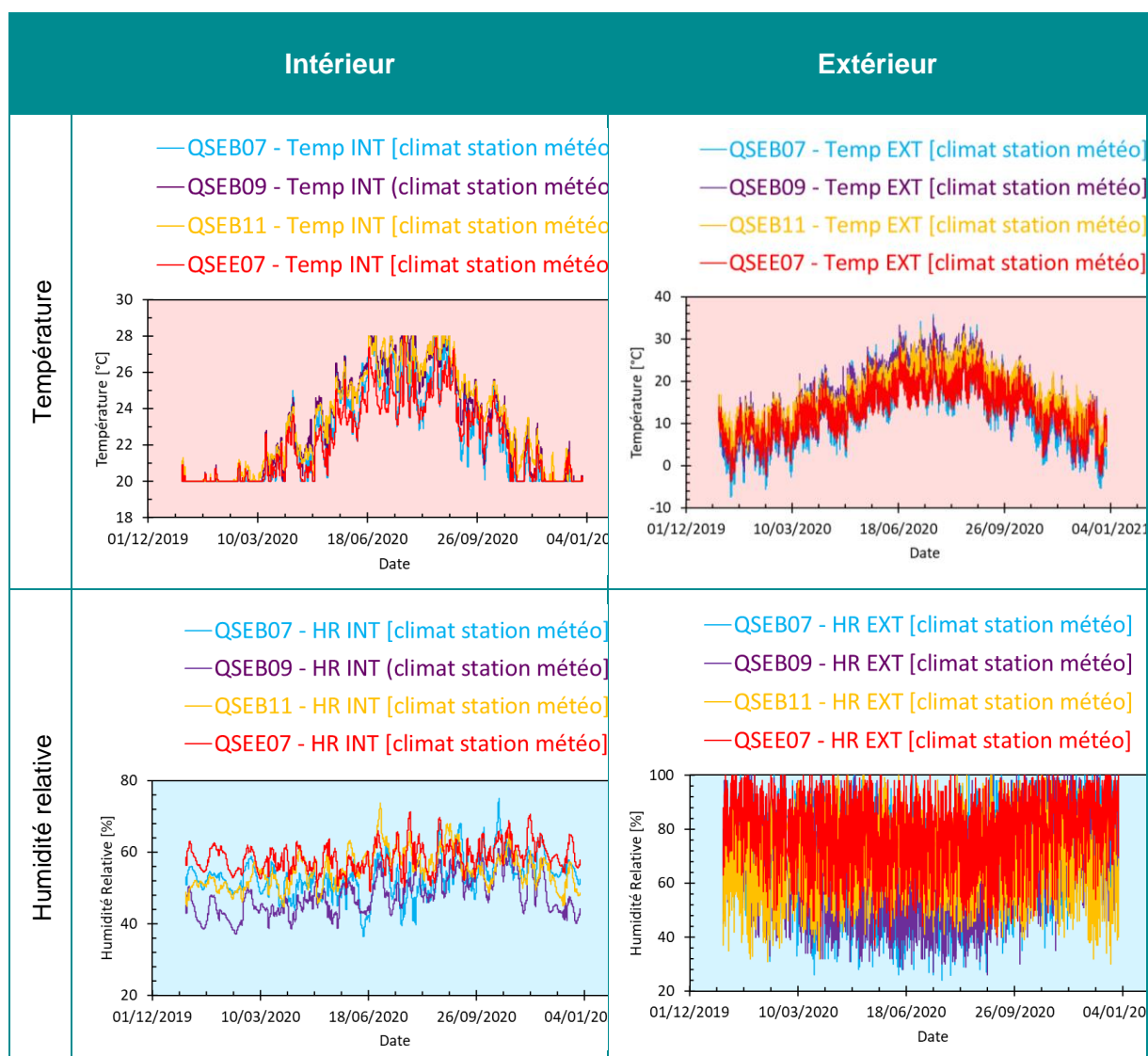
Tableau 14: Résultats du bâtiment QSEE07

Type de paroi		Numérique												Expérimental	
	ISO 137881-1	ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF
		M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R		
		Orange	White	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Orange	Green	Green	White		



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Tableau 15 : Comparaison des climats d'entrée pour l'étude du bâtiment QSEE07



2.3.1.3.QSEE08

Pour ce bâtiment, le calcul de l'ICF a révélé une contamination active au cours de la semaine de prélèvement et des moisissures ont été décelées lors du diagnostic visuel (Tableau 16). En revanche, les occupants ont indiqué ne pas avoir observé de traces de moisissures lors des 12 derniers mois, ni mentionné l'existence de risques liés à des accidents antérieurs.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Concernant les résultats de modélisations, ils sont sensiblement les mêmes que pour les bureaux étudiés précédemment, mais aucune cause accidentelle n'a été répertoriée pouvant expliquer la présence effective de moisissures.

2.3.1.4. QSEE20

Le diagnostic sur site ne laisse apparaître aucune trace de moisissure, que ce soit lors de la visite ou dans la mesure d'ICF lors de la semaine de prélèvement.

Les occupants indiquent la présence de trace de moisissures lors des 12 derniers mois dans l'une des classes. Les photos ne sont pas disponibles pour confirmer l'identification des moisissures.

Les résultats des simulations laissent apparaître un faible risque de la paroi d'apparition de moisissures, mais l'indication d'un enduit fissuré peut expliquer la présence effective constatée.

2.3.2. Logements

2.3.2.1. QSEL32

Le calcul de l'ICF a révélé une contamination active au cours de la semaine de prélèvement tandis qu'aucune trace de moisissure n'a été relevée lors du diagnostic visuel (Tableau 18). En revanche, les occupants ont indiqué la présence de remontées capillaires et d'infiltration d'eaux pluviales.

Il est possible que le développement de moisissures soit effectif depuis peu ou masqué à l'intérieur de la paroi.

En ce qui concerne les modélisations, les modèles ISO 137881-1 et Annexe 14 de l'IEA indiquent une sensibilité de la paroi à la vue de leur emplacement. Le modèle TOW indique également un risque de développement fongique aussi bien dans le cas des climats issus des stations météo que ceux mesurés sur site.

Il est intéressant de comparer les climats donnés par les stations météo et mesurés sur site pour ce bâtiment (Tableau 19).



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Tableau 16: Résultats du bâtiment QSEE08

Type de paroi	Numérique														Expérimental		
	ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF	
	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R			


Tableau 17: Résultats du bâtiment QSEE20

Type de paroi	Numérique														Expérimental		
	ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF	
	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R			



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Tableau 18: Résultats du bâtiment QSEL32

Type de paroi	Numérique														Expérimental	
	ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF
	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R		

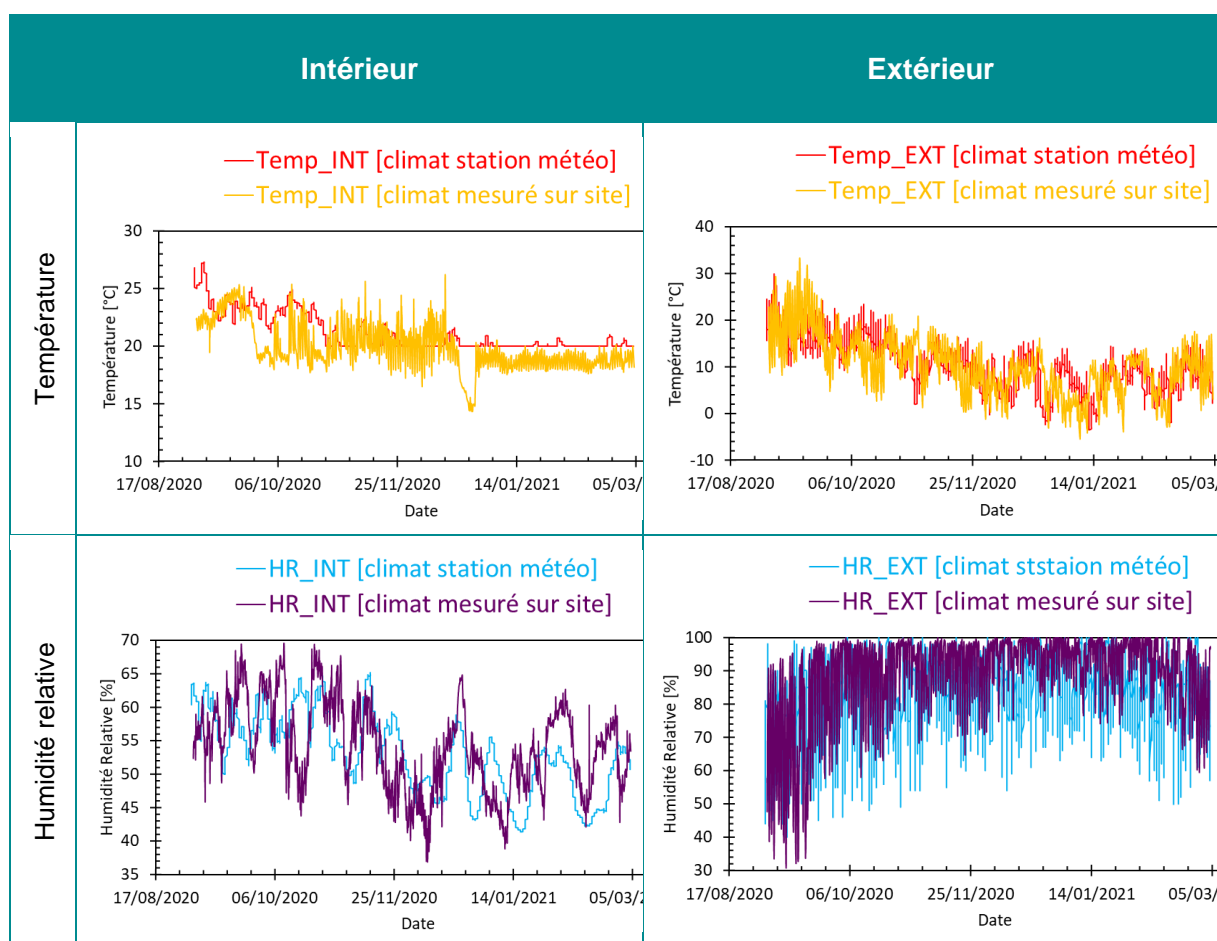


QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Sur la période considérée, les températures extérieures sont sensiblement similaires. En revanche, les températures intérieures mesurées sont un peu plus faibles que celles déduites du climat de station météo. En termes d'humidité relative, les climats intérieurs sont sensiblement similaires. Les humidités relatives mesurées à l'extérieur sont supérieures pour le climat mesuré sur site.

Ces différences conduisent à une répartition différente de l'humidité relative moyenne à l'intérieur de la paroi. Nous pouvons constater que le seuil des 80% est dépassé pour les deux cas, ce qui explique bien la prédiction donnée par le modèle TOW pour les deux jeux de climats.

Tableau 19: Comparaison des climats d'entrée pour l'étude du bâtiment QS3L32



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

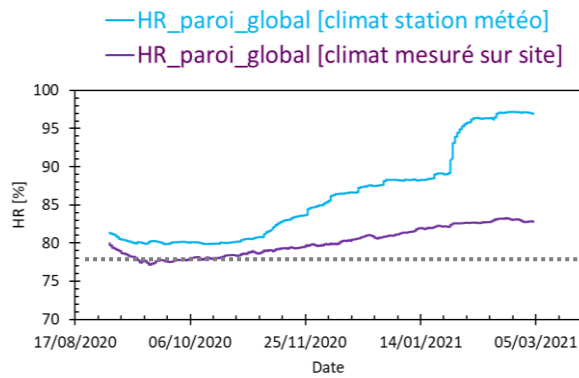


Figure 3 : Comparaison des climats d'entrée pour le bâtiment QSEL32

2.3.2.2. QSEL35

L'ICF n'a pas révélé de contamination fongique lors de la semaine de prélèvement tandis que des traces de moisissures ont été relevées lors du diagnostic visuel. La mesure a été réalisée en été et les photos de la Figure 4 témoignent des traces constatées.



Figure 4: Photos des traces de moisissures prises dans le logement QSEL35 lors du diagnostic visuel

Les prévisions de risque issues des modélisations sont similaires aux cas des bureaux déjà détaillées, sachant que dans ce cas, les parois ont les mêmes compositions (béton banché avec enduit ciment).



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

2.3.2.3.QSEL36

Pour ce bâtiment, le calcul de l'ICF a révélé une contamination active au cours de la semaine de prélèvement et des traces de moisissures ont été décelées lors du diagnostic visuel. En outre, les occupants ont indiqué avoir observé des remontées capillaires ainsi que des traces de moisissures lors des 12 derniers mois.

Les prévisions de risque issues des modélisations sont similaires aux cas des bureaux déjà détaillés, sachant que dans ce cas, les parois ont les mêmes compositions (béton banché avec enduit ciment).

En revanche, pour les climats mesurés sur site, le modèle TOW indique un risque avéré de développement de moisissures. En regardant au plus près les valeurs moyennes d'humidité relative à l'intérieur de la paroi, on remarque que les humidités relatives résultantes des trois simulations (climat météo et climat réel de la chambre et du salon) sont assez similaires, mais se situent de part et d'autre du seuil des 80%. Ceci n'indique donc pas une différence très notable dans l'évaluation du risque de développement de moisissures.

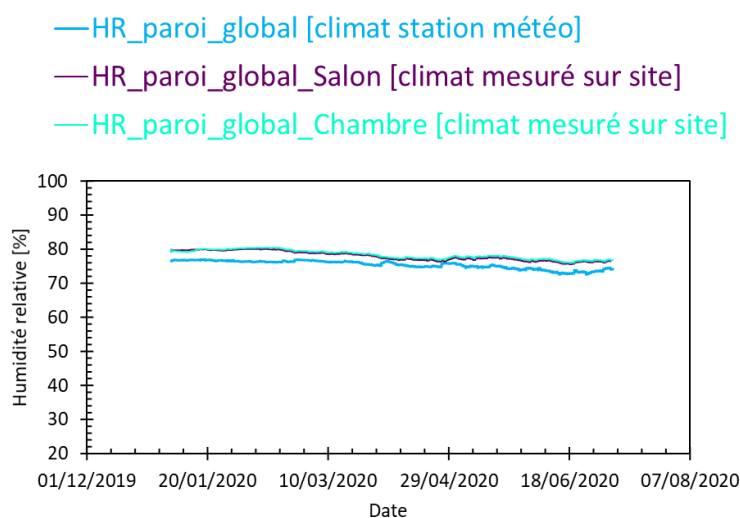


Figure 5 : Comparaison des climats d'entrée pour le bâtiment QSEL36



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Tableau 20: Résultats du bâtiment QSEL35

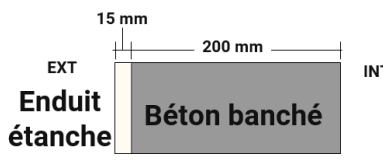
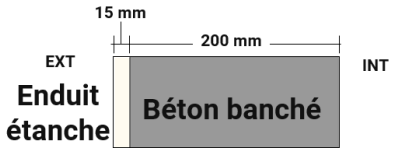
Type de paroi	Numérique														Expérimental	
	ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF
	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R		
	Orange		Green	Green	Green	Green	Red		Green	Green	Green		Green			

Tableau 21: Résultats du bâtiment QSEL36

Type de paroi	Numérique														Expérimental	
	ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF
	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R		
	Red		Green	Green	Green	Green	Red		Green	Orange	Green		Green			



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

2.3.2.4.QSEL43

Pour ce bâtiment, le calcul de l'ICF a révélé une contamination active au cours de la semaine de prélèvement et les traces de moisissures ont été décelées lors du diagnostic visuel, à plusieurs endroits et de manière assez étalée (Tableau 22). Les occupants ont également indiqué la présence de remontées capillaires et de traces visibles lors des 12 derniers mois.

En ce qui concerne les modélisations, le risque est avéré pour les modèles ISO 137881-1 et Annexe 14 de l'IEA, comme cela a été le cas pour les parois en béton avec enduit ciment. Le paramètre TOW indique également un risque pour les modélisations utilisant le climat mesuré sur site. Ici également, les valeurs d'humidité relative moyenne à l'intérieur de la paroi sont situées autour du seuil des 80%, tout en étant sensiblement similaires.

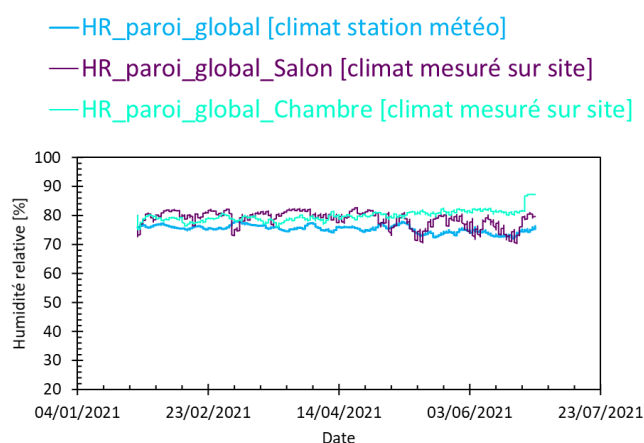


Figure 6 : Comparaison des climats d'entrée pour le bâtiment QSEL43

2.3.2.5.QSEL45

Pour ce bâtiment, l'ICF n'a pas révélé de contamination fongique lors de la semaine de prélèvement tandis que des traces de moisissures ont été relevées lors du diagnostic visuel (Tableau 23). En regardant les photos prises lors du diagnostic (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), nous avons un doute sur le fait qu'il s'agisse réellement de moisissures. Néanmoins, les traces d'ajout de plâtre laissent supposer que ces traces sont anciennes et qu'il n'y a plus d'apport d'eau. Ce constat permet d'expliquer l'absence de moisissures actives mesurées.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Tableau 22: Résultats du bâtiment QSEL43

Type de paroi	Numérique												Expérimental			
	ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF
	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R		

Tableau 23: Résultats du bâtiment QSEL45

Type de paroi	Numérique												Expérimental			
	ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF
	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R		



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations



Figure 7 : Photo des moisissures constatées dans le bâtiment QSEL45

Concernant la modélisation, nous sommes dans le même cas de figure que le logement QSEL43 qui appartient au même immeuble. De plus, les conditions d'humidité relative moyenne à l'intérieur de la paroi sont sensiblement les mêmes.

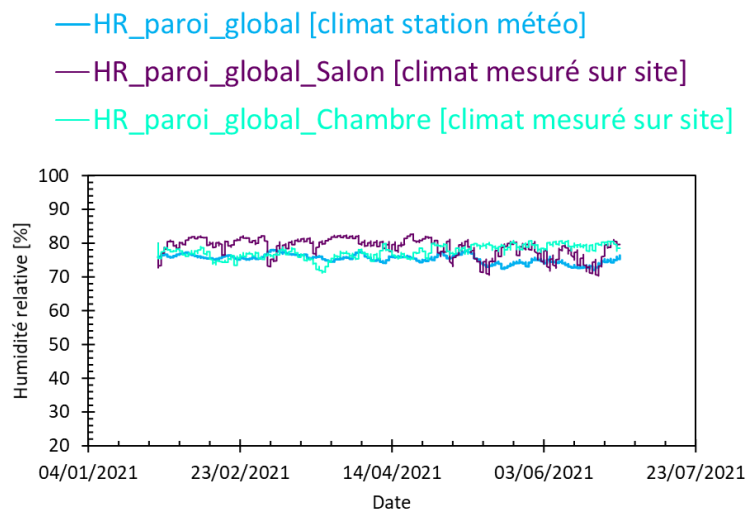


Figure 8 : Comparaison des climats d'entrée pour le bâtiment QSEL45

2.3.2.6.QSEL51

Pour ce bâtiment, le calcul de l'ICF a révélé une contamination active au cours de la semaine de prélèvement et les traces de moisissures ont été décelées lors du diagnostic visuel, à plusieurs endroits et de manière assez étendue (Tableau 24). Les occupants ont également indiqué la présence de ces traces visibles lors des 12 derniers mois.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Concernant les modélisations, les risques sont les mêmes que pour les parois en béton précédemment étudiées. L'apparition de moisissures semble donc également accidentelle sans que la cause ne soit identifiée par les occupants. En regardant l'emplacement de ces traces de moisissures, nous pouvons supposer qu'elles sont dues à la présence de ponts thermiques au niveau des plancher/plafond et des menuiseries.



Figure 9 : Photo des moisissures constatées dans le bâtiment QSEL51

2.3.2.7. QSEL67

Pour ce bâtiment, le calcul de l'ICF a révélé une contamination active au cours de la semaine de prélèvement et les traces de moisissures ont été décelées lors du diagnostic visuel, à plusieurs endroits (Tableau 25). Les occupants ont également indiqué la présence de remontées capillaires et de traces visibles lors des 12 derniers mois.

En ce qui concerne les modélisations, le risque est avéré pour les modèles ISO 137881-1 et Annexe 14 de l'IEA, comme cela a été le cas pour les parois en béton avec enduit ciment (il s'agit de parpaing ici). Le paramètre TOW indique également un risque pour les modélisations utilisant le climat mesuré sur site, et plus particulièrement celui mesuré dans la chambre. Ici également, les valeurs d'humidité relative moyenne à l'intérieur de la paroi sont situées autour du seuil des 80%, tout en étant sensiblement similaires.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Tableau 24: Résultats du bâtiment QSEL51

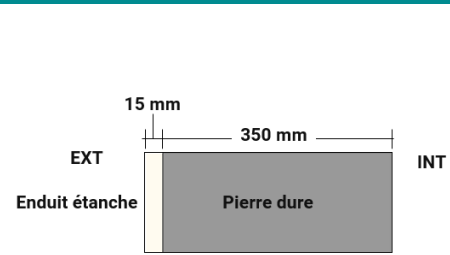
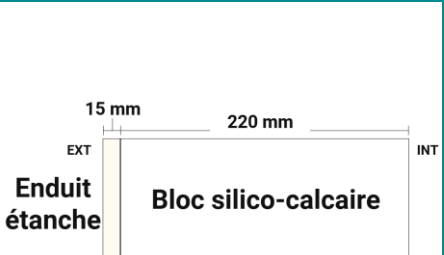
Type de paroi	Numérique														Expérimental	
	ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF
	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R		

Tableau 25: Résultats du bâtiment QSEL67

Type de paroi	Numérique														Expérimental	
	ISO 137881-1		ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF
	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R		



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

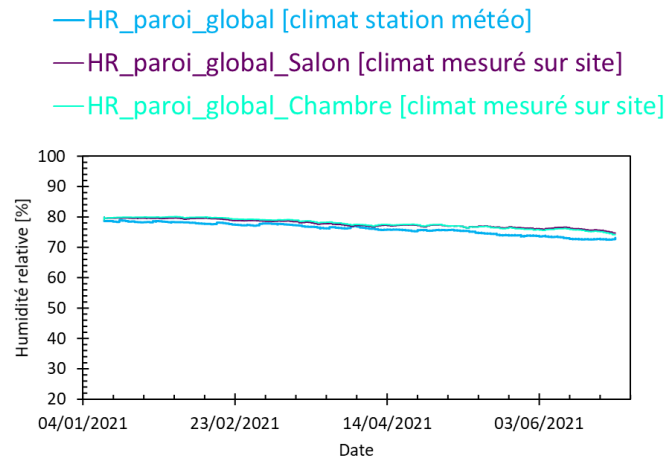


Figure 10 : Comparaison des climats d'entrée pour le bâtiment QSEL67

2.3.2.8. QSEL 73

Pour ce bâtiment, le calcul de l'ICF a révélé une contamination active au cours de la semaine de prélèvement et les traces de moisissures ont été décelées lors du diagnostic visuel, à plusieurs endroits (Tableau 26). Les occupants ont également indiqué la présence de remontées capillaires et de traces visibles lors des 12 derniers mois.

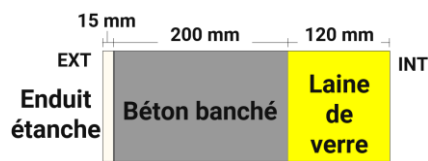
En ce qui concerne les modélisations, le risque est avéré pour les modèles ISO 137881-1 et Annexe 14 de l'IEA, comme cela a été le cas pour les parois en béton avec enduit ciment. La présence effective de moisissures semble ici également être d'origine accidentelle liées aux remontées capillaires.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Tableau 26: Résultats du bâtiment QSEL73

Type de paroi		Numérique														Expéri- mental	
	ISO 137881-1	ASHRAE160		SIMHUBAT		Annexe 14 IEA		TOW		VTT		WUFI Bio		Diagnostic visuel	ICF		
	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M			R	



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

2.4. Synthèse des observations

2.4.1. Bilan des résultats expérimentaux et numériques

La comparaison des prédictions de risque de développement fongique avec les mesures sur terrain nous permet d'établir les statistiques regroupées dans le **Erreur ! Référence non valide pour un signet..**

Tableau 27 : Interrelation entre prédiction du développement fongique et apparition effective de moisissures

Type du modèle	Modèle	Prédit un risque de développement fongique	Diagnostic visuel		ICF	
			Oui	Non	Oui	Non
Statique	ISO 137881-1	Oui	47 %	53 %	42 %	58 %
		Non	-	-	-	-
	SIMHUBAT	Oui	-	-	-	-
		Non	47 %	53 %	42 %	58 %
	Annexe 14 de l'IEA	Oui	42 %	53 %	42 %	53 %
		Non	5 %	-	-	5 %
	TOW	Oui	-	-	-	-
		Non	47 %	53 %	42 %	58 %
Dynamique	ASHRAE 160	Oui	-	-	-	-
		Non	47 %	53 %	42 %	58 %
	VTT	Oui	-	-	-	-
		Non	47 %	53 %	42 %	58 %
	WUFI Bio	Oui	-	-	-	-
		Non	47 %	53 %	42 %	58 %

Ce tableau expose les mêmes résultats que ceux présentés sous forme de code couleur dans le Tableau 8. Il permet de constater que les modèles ne sont pas très discriminants dans la mesure où les prédictions de six d'entre eux sont les mêmes, à savoir la prédiction systématique d'un risque pour le modèle ISO 137881-1, et l'absence systématique d'un risque pour les autres modèles. Seul le modèle Annexe 14 de l'IEA a fourni des prédictions



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

différentes. D'autres part, il permet également de remarquer que la répartition entre les bâtiments dont le diagnostic visuel a été positif et ceux dont le diagnostic a été négatif est équilibrée.

2.4.2. Conclusions

La comparaison des diagnostics réalisés sur site et des prédictions du risque de développement de moisissures à l'aide des modèles sélectionnés dans la revue bibliographique a permis de dresser un certain nombre de constats.

2.4.2.1. Bureaux

Les trois bâtiments à usage de bureau comportent une paroi en béton banché avec enduit ciment non détérioré. Le risque de développement fongique lié à la paroi et à son emplacement est le même dans les trois cas, la présence de moisissures étant avérée dans un seul cas, avec une origine manifestement accidentelle (infiltration d'eau).

Ces observations permettent de confirmer l'absence de contradiction entre l'évaluation du risque de chacun des modèles testés vis-à-vis de la paroi et l'emplacement du bâtiment.

2.4.2.2. Ecoles

Les quatre bâtiments à usage d'école étudiés comportent des parois de types différents. Le risque de développement fongique lié à la paroi et à son emplacement est souvent similaire, grâce à l'indication des modèles ISO 137881-1 et Annexe 14 de l'IEA. La présence effective de moisissures est quasi systématiquement associée à un risque accidentel identifié par les occupants. Dans le cas d'enduit fissuré, les modélisations peuvent en rendre compte. En revanche, les prédictions faites avec les climats mesurés sur site ne permettent pas une exploitation de toutes les modélisations du fait de la durée minimale d'une année nécessaire au calcul de certains modèles.

2.4.2.3. Logements

L'analyse de tous ces logements a permis de mettre en évidence plusieurs points :

- Les modèles ISO 137881-1 et Annexe 14 de l'IEA ont systématiquement mis en évidence un risque avéré de développement fongique, au regard de leur localisation



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

ainsi que des simulations réalisées avec les climats issus de station météo ; les climats réels n'ayant pas pu être utilisés (nécessité d'avoir une année complète de mesures). Il s'agit en effet quasi-systématiquement de parois traditionnelles en béton ou parpaing, souvent non isolée ;

- Ces modèles peuvent être considérés comme très sécuritaires ;
- Le modèle TOW, basé sur un seuil d'humidité relative moyenne à l'intérieur de la paroi, s'est montré très sensible à la moindre fluctuation des valeurs, et affichant un risque ou une absence de risque pour des humidités relatives très proches.

Enfin, dans la quasi-totalité des cas étudiés, la présence de moisissures est à mettre en relation avec une cause accidentelle d'apport d'eau (remontées capillaires, enduit fissuré, mauvaise ventilation, habitudes d'occupation, etc) et non avec des désordres structurels des parois des bâtiments déterminés par les simulations numériques.



3. INVESTIGATION COMPLEMENTAIRE

Une recherche bibliographique a été réalisée pour confronter les conclusions établies avec les expériences publiées dans la littérature, ainsi que les leviers d'amélioration disponibles. Sur cette base, plusieurs axes ont été définis afin d'établir la méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments.

3.1. Etude bibliographique

Il est intéressant de distinguer deux catégories de modèles prédictifs : les modèles dynamiques (VTT, ASHRAE, WUFI Bio) des modèles statiques (SimHuBat, TOW, Annexe 14 de l'IEA, ISO). Ces premiers permettent de calculer à chaque pas de temps un indice qui va augmenter en cas de conditions favorables alors que ces deuxièmes calculent un paramètre qui va être comparé à une valeur seuil.

Plusieurs références dans la littérature (Johansson, Lang, & Capener, How well do mould models predict mould growth in buildings, considering the end-user perspective?, 2021) (Lie, Thiis, Vestol, Hoibo, & Gobakken, 2019) indiquent que les modèles statiques semblent être plus fiables sur les plus longues périodes. En effet, les modèles dynamiques ont tendance à multiplier les « faux négatifs », notamment dû à une proximité avec le seuil fixé.

Les modèles dynamiques font souvent intervenir un grand nombre de paramètres obtenus de manière empirique sur des matériaux et dans des conditions climatiques particulières. Bien que ceux-ci aient déjà fait l'objet de mises à jour (Ojanen, Peuhkuri, Viitanen, Vinha, & Salminen, 2011), il semblerait que de nouveaux ajustements de ces paramètres permettent d'améliorer la prédiction d'apparition de moisissures. Par exemple, dans (Berger, Le Meur, Dutykh, Nguyen, & Grillet, 2018), le modèle VTT est comparé à des données mesurées dans le cadre d'une expérimentation sur des panneaux de fibres en bambou. Il apparaît qu'après une étude inverse, un ajustement des paramètres conduit à une meilleure prédiction. D'autre part, dans (Colinart, Bendouma, & Glouannec, 2017), le modèle, évalué sur des expérimentations sur du bois, il apparaît que le coefficient k_3 du modèle VTT soit déterminant.

Les modèles utilisés font intervenir une classification des matériaux relative à leur sensibilité vis-à-vis des moisissures. Cette classification dépend du niveau critique d'humidité pour lequel un développement fongique se produit pour un matériau donné. L'étude (Johansson, Ekstrand-Tobin, Svensson, & Bok, 2012) avertit de la difficulté de généraliser la classe de sensibilité pour des matériaux proches et conclut qu'une mesure spécifique est nécessaire pour garantir la fiabilité de la prédiction. D'autre part, dans (Johansson, Lang, & Capener, How well do mould models predict mould growth in buildings, considering the end-user



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

perspective?, 2021), un programme d'essais inter laboratoires a mis en évidence l'impact déterminant du choix des paramètres d'entrée dans les évaluations du risque de moisissures.

Enfin, des études ont adopté un protocole de travail qui se rapproche de la démarche choisie pour notre étude, à savoir une utilisation de données expérimentales mesurées sur site, couplée à une évaluation numérique du risque de développement fongique, en passant ou non par une simulation des échanges hygrothermiques dans les parois (Johansson, Lang, & Capener, How well do mould models predict mould growth in buildings, considering the end-user perspective?, 2021) (Lie, Thiis, Vestol, Hoibo, & Gobakken, 2019) (Fedorik & Illikainen, 2013) (Berger, Le Meur, Dutykh, Nguyen, & Grillet, 2018). Ces études ont pu mettre en évidence les limites de l'utilisation des données qui ont été mesurées sur site, du fait des incertitudes de mesure, mais également des grandeurs choisies. Par exemple, il a été remarqué dans (Colinart, Bendouma, & Glouannec, 2017) que, pour cette étude, l'utilisation des données de température et d'humidité relative des ambiances sont moins précises que celle des données de surface, mais qu'elles permettent d'obtenir la borne supérieure de l'indice de développement fongique calculé.

Face à ces nombreux constats, ainsi qu'aux éléments de conclusion établis dans la section précédente, les modèles sont analysés plus finement grâce aux axes d'étude suivants :

- Influence du choix de la classe de sensibilité des matériaux de la paroi ;
- Ajustement des paramètres d'entrée liés aux matériaux, à leur détérioration, etc ;
- Ajustement des seuils de risques pour les modèles statiques.

3.2. Influence de la classe de sensibilité des matériaux de la paroi

3.2.1. Variation du modèle de WUFI Bio

La démarche adoptée dans cette section est d'étudier l'influence du choix de la classe de sensibilité des matériaux dans l'évaluation du risque de développement fongique réalisée à l'aide du module WUFI Bio.

Les trois classes suivantes peuvent être choisies :

- Classe 0 : milieu de culture optimal ; elle représente la croissance maximale possible pour tous les types de moisissures trouvées dans les bâtiments ;
- Classe I : matériaux de construction biodégradables comme le papier peint, le plâtre, etc. ;



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

- Classe II : matériaux de construction biodégradables et poreux, certains bois et les matériaux isolants n'appartenant pas à la classe I.

D'autre part, le logiciel permet la visualisation de la répartition en humidité relative en fonction de la température, pour chaque pas de temps. Ces données correspondent à la valeur moyenne à dans la paroi, à chaque pas de temps. Les couleurs claires correspondent au pas de temps du début du calcul et les couleurs foncées au temps de la fin du calcul. Les courbes de niveau considérées pour les classes I et II sont également représentées. Cette représentation permet d'avoir des informations supplémentaires : elle va au-delà du simple feu tricolore ; elle permet d'étudier la proximité des résultats avec les valeurs seuils ainsi que d'estimer un risque, alors que les données sont mesurées sur une période inférieure à une année.

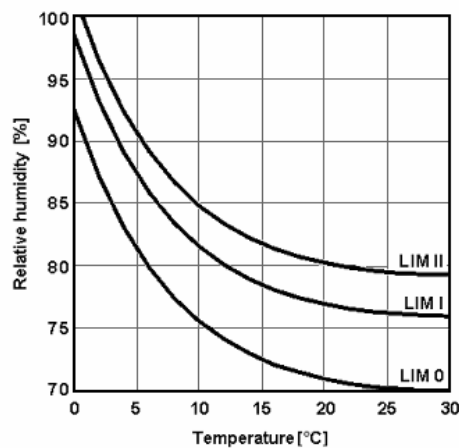


Figure 11: Diagramme température-humidité des courbes de niveau pour les trois classes de sensibilité (source : aide du logiciel WUFI-Bio). Pour chaque température, la courbe de niveau indique l'humidité au-dessus de laquelle la germination est attendue sur les matériaux des classes respectives.

Dans les sections précédentes, la classe de sensibilité du matériau le plus sensible avait été choisi pour l'évaluation du risque dans l'ensemble de la paroi. Elle a été la classe I pour l'ensemble des bâtiments. Dans cette section, nous allons analyser les résultats donnés par le module WUFI Bio pour l'ensemble des classes de sensibilité, ainsi que la répartition en termes d'humidité relative / de température comme illustré dans la Figure 11.

Les résultats de cette analyse pour l'ensemble des bâtiments sont regroupés dans l'Annexe 3.

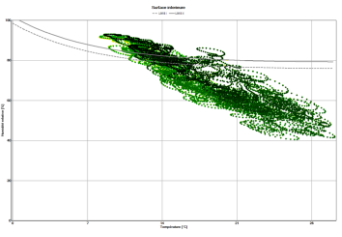
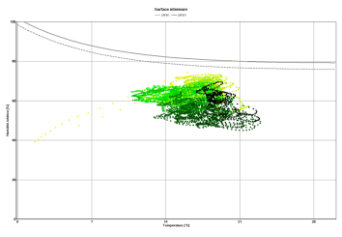
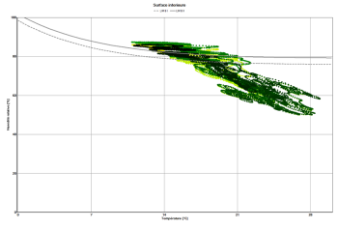
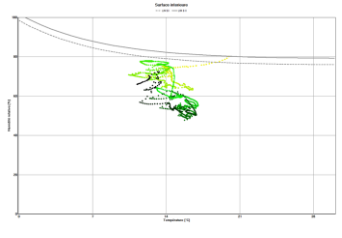
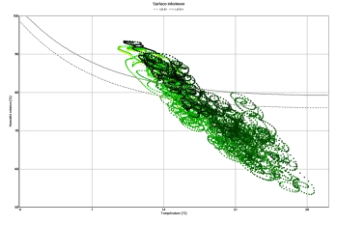
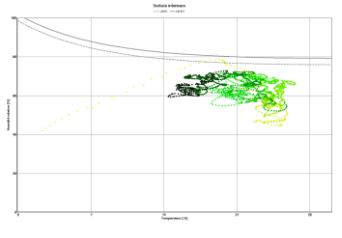
Pour l'ensemble des bâtiments, les résultats pour toutes les classes indiquent une absence de risque (voyant vert), à l'exception des cas regroupés dans le Tableau 28.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

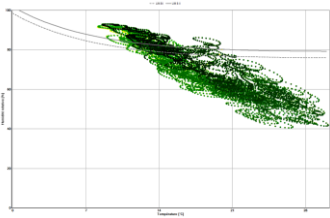
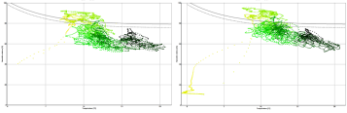
Tableau 28: Prédiction du risque de développement fongique selon le module WUFI Bio pour toutes les classes de sensibilité – sélection des bâtiments pour lesquels le risque est présent

Code bâtiment	Wufi Bio	
	Météo	Réel
QSEB07		
	0	
	I	
	II	
QSEE03		
	0	
	I	
	II	
QSEE07		
	0	
	I	
	II	



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Wufi Bio		
Code bâtiment	Météo	Réal
QSEL36		
	0	
	I	
	II	

En ce qui concerne le bâtiment **QSEB07**, on remarque que pour la classe la plus sensible, le risque de développement de moisissures existe : le feu passe du vert (classe I) au rouge (classe O). En regardant les nuages de points du graphique T/HR pour le cas « météo », on se rend compte qu'une étude plus poussée est nécessaire car le risque n'est pas inexistant. En revanche, le risque peut être écarté pour le cas « réel », car le nuage de points reste bien au-dessous des courbes de niveau.

En ce qui concernent les bâtiments **QSEE03** et **QSEE07**, les situations sont assez semblables, si ce n'est que le dépassement des courbes de niveau dans le cas « météo » semble plus franc, ce qui se traduit par un voyant jaune pour la classe I. Nous sommes dans la même situation que précédemment concernant le cas « réel ». Dans tous les cas, le risque de développement de moisissures est avéré.

Enfin, le bâtiment **QSEL36**, le dépassement des courbes de niveau est visible pour le cas « météo », mais on remarque également que le nuage de points se superpose avec la courbe de niveau pour le cas « réel ». Même si ce sont surtout les points clairs qui sont concernés, sachant que la collecte de données s'est faite sur une période relativement courte, il est nécessaire d'avoir une étude plus poussée car le risque ne peut pas être écarté.

Cette analyse permet de mettre en évidence la difficulté d'attribuer une classe de sensibilité unique à toute la paroi. Afin d'éviter toute fausse prédiction d'absence de risque, la classe de sensibilité la plus faible devrait être choisie. De plus, l'analyse visuelle des graphiques de répartition humidité relative / température permet une première évaluation, très utile notamment dans le cas de données sur une période inférieure à une année.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

3.2.2. Variation du modèle de ASHRAE 160

L'évaluation du risque de développement fongique a été réalisée en considérant les classes suivantes pour les matériaux constitutifs des parois. Pour chaque bâtiment, la classe du matériau le plus sensible a ici été choisie pour l'évaluation sur l'ensemble de la paroi.

Tableau 29: Rappel des classes de sensibilité pour les matériaux de construction pour l'évaluation du risque de développement fongique d'après la norme ASHRAE 160

Classe	Matériaux
Très sensible [TS]	Aubier de pin
Sensible [S]	Bois lamellé-collé, isolation en polyuréthane avec papier à sa surface, épicea
Moyennement résistant [MR]	Béton, béton cellulaire et aéré, laine de verre, laine de polyester
Résistant [R]	Isolation en polyuréthane avec une surface lisse

Pour l'évaluation des risques réalisée précédemment, les classes choisies ont été « sensible » ou « moyennement résistant ». L'objet de l'étude de cette section est d'évaluer le risque en considérant systématiquement la classe de sensibilité « Très sensible », en adoptant la démarche de la section précédente.

Cette étude n'a pas apporté de renseignement supplémentaire : le risque a été évalué comme étant inexistant pour tous les bâtiments.

3.2.3. Variation du modèle VTT

De la même manière que précédemment, nous avons étudié dans cette section l'influence du choix de la classe de sensibilité sur la prédiction de ce modèle. Ainsi, la prédiction du risque de développement fongique dans les bâtiments étudiés a été réalisée pour les quatre classes de sensibilité.

Tous ces résultats sont regroupés dans l'Annexe 3.

Ci-dessous sont repris les bâtiments dont le risque de développement de moisissures est avéré.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Tableau 30: Prédiction du risque de développement fongique selon le module VTT pour toutes les classes de sensibilité – sélection des bâtiments pour lesquels le risque est présent

Code bâtiment	VTT	Risque	
		Météo	Réel
QSEB07	Très sensible	Présent (Rouge)	
	Sensible	Présent (Vert clair)	
	Moyennement résistant	Présent (Vert clair)	
	Résistant	Présent (Vert clair)	
QSEE03	Très sensible	Présent (Rouge)	
	Sensible	Présent (Jaune)	
	Moyennement résistant	Présent (Vert clair)	
	Résistant	Présent (Vert clair)	
QSEE07	Très sensible	Présent (Rouge)	
	Sensible	Présent (Vert clair)	
	Moyennement résistant	Présent (Vert clair)	
	Résistant	Présent (Vert clair)	
QSEL36	Très sensible	Présent (Rouge)	
	Sensible	Présent (Vert clair)	
	Moyennement résistant	Présent (Vert clair)	
	Résistant	Présent (Vert clair)	

Nous retrouvons les quatre bâtiments dont le risque avait déjà été prédit dans les variations des modèles WUFI Bio et ASHRAE 160 présentées précédemment.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

3.3. Influence des autres paramètres d'entrée

3.3.1. Variation du modèle de ASHRAE 160

D'autres paramètres d'entrée peuvent permettre d'affiner l'analyse des résultats obtenus dans la section précédente : considérer une certaine détérioration du matériau, ainsi que la paramétrisation établie pour un matériau spécifique comme le béton. Cette seconde étude a été menée en utilisant le module supplémentaire « VTT » dans WUFI Pro qui intègre les variations selon ces paramètres.

Les résultats sont regroupés dans le Tableau 31.

Cette dernière analyse laisse apparaître plus de nuances dans la prédiction du risque de développement fongique. Nous retrouvons les résultats prédits dans la section précédente avec le modèle WUFI Bio : le risque est inexistant pour la plupart des bâtiments mais présent pour les bâtiments **QSEB07**, **QSEE03**, **QSEE07** et **QSEL36**.

Tableau 31 : Prédiction du risque de développement fongique à l'aide du modèle ASHRAE 160 via le module VTT de WUFI, en considérant la classe de sensibilité « Très sensible »

Type de bâtiment	Code bâtiment	ASHRAE 160	ASHRAE 160	
			Météo	Réel
Bureaux	QSEB07	Très sensible		
	QSEB09	Très sensible		
	QSEB11	Très sensible		
Ecoles	QSEE03	Très sensible		
	QSEE07	Très sensible		
	QSEE08	Très sensible		
	QSEE20	Très sensible		
Logements	QSEL05	Très sensible		
	QSEL06	Très sensible		
	QSEL08	Très sensible		
	QSEL14	Très sensible		
	QSEL32	Très sensible		



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

	QSEL35	Très sensible		
	QSEL36	Très sensible		
	QSEL51	Très sensible		
	QSEL67	Très sensible		
	QSEL73	Très sensible		
	QSEL43	Très sensible		
	QSEL45	Très sensible		

3.3.2. Variation du modèle VTT

Parmi les modèles sélectionnés dans cette étude, le modèle VTT est un de ceux faisant intervenir le plus grand nombre de paramètres différents. Ils sont d'ores-et-déjà regroupés en classes de sensibilité, et la variation des autres paramètres d'entrée n'a pas été étudiée du fait de leur trop grand nombre.

3.4. Ajustement des seuils de risque

3.4.1. Variation du modèle TOW

Ce modèle calcule un nombre d'heures pour lequel l'humidité relative dans la paroi est supérieure à 80%. Lorsque le rapport entre ce nombre d'heures et le nombre d'heures total est inférieur à 0,5, le risque de développement fongique est considérablement retardé (Vereecken & Roels, 2012). Par extension, nous considérons le risque avéré le reste du temps. Alors que le seuil des 80% d'humidité relative peut difficilement être remis en question au vu des nombreuses études citées précédemment, celui des 0,5 est plus contestable.

Dans cette section, nous allons considérer seulement les bâtiments dont le TOW calculé précédemment est non nul.

Dans la colonne « Paroi » se trouvent les résultats présentés précédemment ; dans la colonne « Valeur Max » se trouve l'évaluation du TOW pour la zone de la paroi où l'humidité relative est maximum sur toute la durée de la simulation. Pour plus de discernement, les valeurs calculées du TOW ont été ajoutées, en plus du code couleur qui reste identique.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Tableau 32 : Prédiction du risque de développement fongique à l'aide du modèle TOW – sélection des bâtiments dont le risque est non nul

Type de bâtiment	Code bâtiment		TOW			
			Paroi		Valeur Max	
			Météo	Réel	Météo	Réel
Ecoles	QSEE03		0,4	0,0	0,2	0,4
	QSEE07		0,1	0,0	0,2	0,2
Logements	QSEL14	S	0,2	0,1	0,5	0,5
		C		0,3		0,5
	QSEL32		0,9	0,5	0,9	0,8
	QSEL36	S	0,0	0,1	0,1	0,0
		C		0,2		0,1
	QSEL43	S	0,0	0,4	0,3	1,0
		C		0,0		1,0
	QSEL45	S	0,0	0,4	0,3	0,4
		C		0,1		0,9

Dans le cas du bâtiment **QSEE03** ainsi que **QSEL14**, le calcul du TOW laisse supposer une fragilité de la paroi au regard d'un risque de développement fongique, même si aucune trace n'a été constatée sur site. Au contraire, dans le cas du bâtiment **QSEE07**, alors que les prédictions numériques sont similaires, des traces de moisissures ont été relevées.

Dans le cas du bâtiment **QSEL32**, la sensibilité de la paroi est très élevée.

Dans les cas des appartements **QSEL43** et **QSEL45**, la sensibilité de la paroi existe, mais le calcul du TOW dans des conditions réelles est sans équivoque, conformément au développement fongique actif qui a été constaté sur site.

L'utilisation du modèle TOW en considérant toutes les valeurs non nulles, et non plus uniquement celles supérieures à 0,5, permet plus de discernement dans l'analyse du risque ainsi prédit.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

3.4.2. Variation du modèle SIMHUBAT

Les critères établis dans le Guide SimHuBat sont des critères très sécuritaires de dimensionnement. Ils ont été élaborés dans le cadre de larges campagnes de mesures. Le questionnement des valeurs sélectionnées ne peut donc rentrer dans le cadre de ce travail.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

4. RECOMMANDATIONS SUR LA PREDICTION DU RISQUE DE DEVELOPPEMENT FONGIQUE

4.1. Approche proposée

La méthode décrite ci-après permet une évaluation du risque de développement fongique dans le cadre de la conception d'une paroi de bâtiment, qu'il s'agisse d'une construction neuve ou dans le cadre d'une rénovation.

Dans ce cadre, les objectifs de l'évaluation du risque de développement fongique peuvent être doubles : comparer plusieurs configurations de paroi afin d'être en mesure de choisir la plus adaptée, ou de vérifier qu'une paroi donnée est adaptée à un climat précis.

Le résultat fourni par la méthode sera une quantification d'un risque de développement fongique, pour une paroi et un lieu donnés, en l'absence de tout accident ou mauvaise utilisation du bâtiment.

Les étapes suivantes sont nécessaires :

- *Localisation* : suivant le lieu du bâtiment étudié, utiliser les fichiers de climat de la ville la plus proche ;
- *Evaluation numérique de l'état hydrique* : simuler les transferts d'humidité et de chaleur selon le guide SimHuBat ;
- *Développement fongique* : évaluation des risques de développement fongique suivant l'arbre décisionnel de la Figure 12.

L'arbre décisionnel permet une comparaison du risque suivant les différents cas de paroi ou de localisation simulées. Les différentes étapes présentées dans le schéma de la Figure 12 réalisées dans l'ordre permettent de fiabiliser la prédiction du risque



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

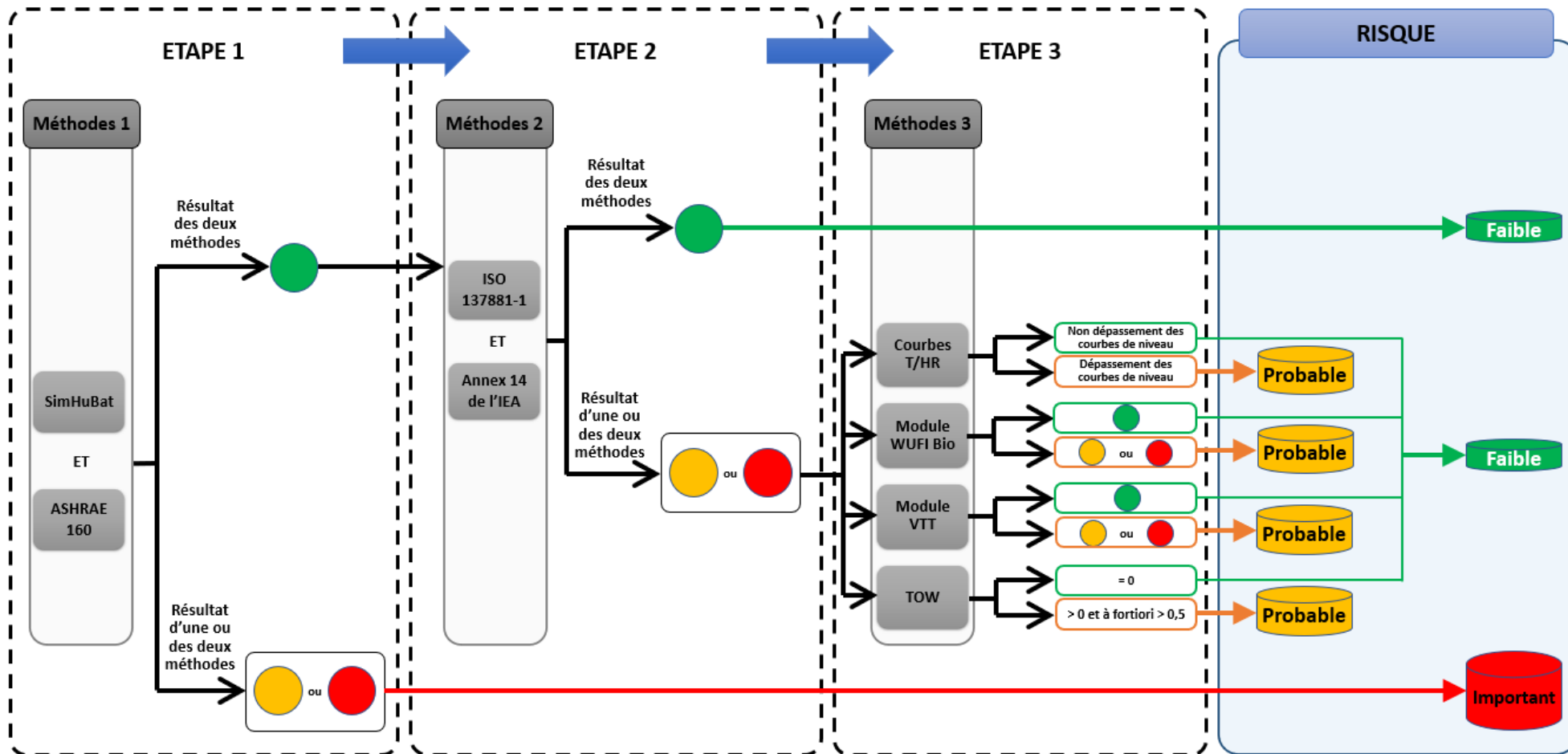


Figure 12: Arbre décisionnel pour l'évaluation du risque de développement fongique et sa fiabilisation par étapes de prédiction du risque



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

4.2. Application pratique

Dans ce paragraphe, nous avons appliqué la méthode proposée aux bâtiments étudiés dans le projet. Cette dernière étape consiste à évaluer le risque de développement fongique en fonction des éléments de la paroi et de la localisation du bâtiment.

Lorsque l'on considère l'arbre décisionnel de la Figure 12, ainsi que les tableaux de résultats détaillés dans le corps de ce rapport, nous constatons, que pour tous les bâtiments, l'évaluation du risque avec les modèles SIMHUBAT et ASHRAE 160 conduit à un feu VERT, tandis que l'évaluation avec les modèles ISO 377881 et Annexe 14 de l'IEA conduit à un feu JAUNE ou ROUGE. Le tableau suivant détaille les dépassements ou non des critères pour les quatre derniers modèles, ainsi que l'évaluation finale pour chacun des bâtiments.

Tableau 33 : Tableau récapitulatif des résultats de l'application de la méthode globale

Type de bâtiment	Code bâtiment	Etape 1	Etape 2	Etape 3				BILAN du RISQUE
				Courb _{as}	WUFI _{Ric}	VTT	TOW	
Bureau	QSEB07	●	● ou ●	●	●	●	●	Probable
	QSEB09	●	● ou ●	●	●	●	●	Faible
	QSEB11	●	● ou ●	●	●	●	●	Faible
Ecole	QSEE03	●	● ou ●	●	●	●	●	Probable
	QSEE07	●	● ou ●	●	●	●	●	Probable
	QSEE08	●	● ou ●	●	●	●	●	Faible
	QSEE20	●	● ou ●	●	●	●	●	Faible
Logement	QSEL05	●	● ou ●	●	●	●	●	Faible
	QSEL06	●	● ou ●	●	●	●	●	Faible
	QSEL08	●	● ou ●	●	●	●	●	Faible
	QSEL14	●	● ou ●	●	●	●	●	Probable
	QSEL32	●	● ou ●	●	●	●	●	Probable
	QSEL35	●	● ou ●	●	●	●	●	Probable



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

Type de bâtiment	Code bâtiment	Etape 1	Etape 2	Etape 3				BILAN du RISQUE
				Courb as	WUFI Ri/c	VTT	TOW	
	QSEL36	●	● ou ●	●	●	●	●	Probable
	QSEL43	●	● ou ●	●	●	●	●	Probable
	QSEL45	●	● ou ●	●	●	●	●	Probable
	QSEL51	●	● ou ●	●	●	●	●	Probable
	QSEL67	●	● ou ●	●	●	●	●	Faible
	QSEL73	●	● ou ●	●	●	●	●	Faible

NB : les ronds rouges représentent les cas où le critère du modèle est dépassé ; les ronds verts où le critère n'est pas dépassé.

Dans le cas des bâtiments **QSEB07**, **QSEE03**, **QSEL14**, nous pouvons en conclure que la conception et la localisation de la paroi conduisent à un risque probable de développement fongique, bien qu'aucun constat n'ait été dressé en ce sens sur le terrain.

Dans les cas des bâtiments **QSEB11**, **QSEE08**, **QSEL67** et **QSEL73**, l'évaluation du risque numérique a conduit à un faible risque de développement fongique alors que des moisissures ont été relevées sur le terrain. En revanche, les enquêtes de terrain ont révélé la présence dans trois des quatre cas précédents la présence d'infiltrations d'eau ou de remontées capillaires.

Pour les bâtiments restants, un faible risque de développement fongique a été prédit numériquement tandis que les mesures de terrain n'ont pas révélé la présence de moisissures.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de consolider les méthodes d'évaluation du risque de développement fongique en fiabilisant les prédictions, à l'aide d'une importante campagne de mesures sur site tant sur le plan sanitaire (diagnostics moisissures poussés et mesures de l'indice de contamination fongique) qu'hygrothermique (mesures des climats intérieurs et extérieurs) sur 19 bâtiments servant aussi bien d'habitation, d'école ou de bureaux.

Pour ce faire, les prédictions des modèles calculés numériquement à partir des données hygrothermiques récoltées, ont été confrontées aux observations et mesures réalisées sur site attestant ou non la présence de moisissures.

Nous avons pu mettre en évidence les caractères trop ou trop peu sécuritaires des modèles sélectionnés ainsi que la difficulté à confronter les résultats de leur prédictions souvent différentes. Une analyse plus fine de l'influence du choix des paramètres d'entrée des modèles a également été menée, permettant d'apporter des précisions supplémentaires.

La méthode consolidée à laquelle nous avons pu aboutir permet de hiérarchiser la prédiction des différents modèles, sur la base du parc d'étude à disposition. Ainsi, l'évaluation du risque peut se faire de manière plus globale, en considérant la contribution de chacun des modèles.

Les conclusions tirées de cette étude sont très instructives et la méthode développée gagne à être éprouvée à plus large échelle. Il est cependant essentiel de garder à l'esprit que les outils développés dans cette étude permettent d'identifier ou non un *risque* et non pas une *contamination*. Ils aident à comparer entre elles des parois de bâtiment durant la phase de conception, aussi bien dans le cas de bâtiments neufs que dans la rénovation, et ainsi de favoriser les configurations où les risques sont les plus faibles. En revanche, ils ne peuvent pas permettre d'assurer à 100% qu'aucun développement fongique n'est possible. Il est important d'appliquer les modèles et les méthodes recommandées avec circonspection et de ne pas se limiter à une utilisation à l'aveugle.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments

BIBLIOGRAPHIE

- Berger, J., Le Meur, H., Dutykh, D., Nguyen, D., & Grillet, A.-C. (2018). Analysis and improvement of the VTT mold growth model: Application to bamboo fiberboard. *Building and Environment*, 138, 262-274.
- Colinart, T., Bendouma, M., & Glouannec, P. (2017). Analysis of mould growth models and influence of the hygrothermal properties. Gent, Bergique: 14th International Conference on Durability of Building materials and components.
- Fedorik, F., & Illikainen, K. (2013). HAM and mould growth analysis of a wooden wall. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(1), 19-26.
- Johansson, P., Ekstrand-Tobin, A., Svensson, T., & Bok, G. (2012). Laboratory study to determine the critical moisture level for mould growth on building materials. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 73, 23-32.
- Johansson, P., Lang, L., & Capener, C.-M. (2021). How well do mould models predict mould growth in buildings, considering the end-user perspective? *Journal of Building Engineering*, 102301.
- Lie, S., Thiis, T., Vestol, G., Hoibo, O., & Gobakken, L. (2019). Can existing mould growth models be used to predict mould growth on wooden claddings exposed to transient wetting? *Building and Environment*, 152, 192-203.
- Moularat, S. (2007). *France Brevet n° EP2130043B1*.
- Moularat, S., Robine, E., Ramalho, O., & Oturan, M. A. (2008). Detection of fungal development in a closed environment through the identification of specific VOC: demonstration of a specific VOC fingerprint for fungal development. *Science of the total environment*, 407(1), 139-146.
- Moularat, S., Robine, E., Ramalho, O., & Oturan, M. A. (2008). Detection of fungal development in closed spaces through the determination of specific chemical targets. *Chemosphere*, 72(2), 2234-232.
- Ojanen, T., Peuhkuri, R., Viitanen, H., Vinha, J., & Salminen, K. (2011). Classification of material sensitivity – New approach for mould growth modeling. 9th Nordic Symposium on Building Physics.
- Programme PACTE. (Nov. 2021). Guide SimHuBat : Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température / humidité dans les parois de bâtiment . Récupéré sur https://www.programmepacte.fr/determination-des-hypotheses-pour-les-simulations-de-transferts-couples-temperature-humidite-dans?fbclid=IwAR3qDsVokA3HQCL1xT3zG_rEfFmXVHXwMhEg7CexmCnJYDNJyJNxsyuPkLg
- Vereecken, E., & Roels, S. (2012). Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Building and Environment*, 51, 296-310.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Méthode de prédiction du risque de développement fongique dans les parois des bâtiments