

MODELISATION DU RISQUE D'APPARITION ET DE DEVELOPPEMENT DE MOISSISSURES DANS LES BATIMENTS RENOVES

*REVUE BIBLIOGRAPHIQUE PREALABLE A
L'EXPLOITATION DES DONNEES RELATIVES
A L'HUMIDITE*

MAI 2022



Rédaction

Lucile SOUDANI, CSTB, Ingénieure
Mickaël DERBEZ, CSTB, Ingénieur

Coordination

Corinne MANDIN, CSTB, Chef de Division
Stéphanie DEROUINEAU, 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	4
1. Normes existantes en France et à l'international	5
1.1. Norme internationale ISO 137881.1 [1]	5
1.2. Norme américaine ASHRAE 160 [2]	5
1.3. Guide SimHuBat en France [3]	6
2. Modèles proposés dans la littérature	7
2.1. Annexe 14 de l'International Energy Agency (IEA) [8]	7
2.2. Time of wetness (TOW) [9]	8
2.3. Modèle VTT [10][11]	8
2.4. Modèle bio-hygrothermique WUFI-Bio [12][13]	9
3. Normes existantes en France et à l'international	10
3.1. Norme internationale ISO 137881.1 [1]	10
3.2. Norme américaine ASHRAE 160 [2]	10
3.3. Guide SimHuBat en France [3]	11
4. Modèles proposés dans la littérature	12
4.1. Annexe 14 de l'International Energy Agency (IEA) [8]	12
4.2. Time of wetness (TOW) [9]	13
4.3. Modèle VTT [10][11]	13
4.4. Modèle bio-hygrothermique WUFI-Bio [12][13]	14
5. Conclusions	15
5.1. Tableau récapitulatif des normes et modèles	15
5.2. Synthèse des observations	16
6. Application aux bâtiments instrumentés dans le projet QSE	18
6.1. Campagne expérimentale	18
6.2. Exploitation des données expérimentales	18
Bibliographie	19



INTRODUCTION

Cette revue bibliographique s'intègre dans les travaux du projet Qualité Sanitaire et Energétique des rénovations (QSE) qui propose d'élaborer, d'évaluer et de tester des méthodes de mesure de la performance globale des bâtiments dans le cadre de rénovation. 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 encore moins de la santé des occupants. Ce triptyque Santé-Confort-Energie est désigné par l'appellation « Performance Globale ».

L'aspect sanitaire est évalué par les mesures de la qualité de l'air intérieur et du risque de développement fongique, ainsi que de la recherche des facteurs responsables des désordres observés. Ce document rassemble les différentes méthodes rencontrées dans les normes et la littérature, ayant pour objectif de prédire le risque d'apparition de moisissures et/ou d'évaluer leur éventuel développement. Dans un second temps, le cadre expérimental de l'étude menée au sein du projet QSE est décrit plus en détails et les objectifs précisés à lumière des enseignements de la première partie.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

*Livrable : Modélisation du risque d'apparition et de développement de moisissures
Revue bibliographique*

1. NORMES EXISTANTES EN FRANCE ET A L'INTERNATIONAL

1.1. Norme internationale ISO 137881.1 [1]

Cette norme traite de « la performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments » et plus précisément de « la température superficielle intérieure permettant d'éviter l'humidité superficielle critique et la condensation dans la masse ». Elle propose une méthode simplifiée pour calculer l'humidité relative superficielle et stipule que des moisissures sont susceptibles d'apparaître si la moyenne mensuelle de cette humidité est supérieure à un seuil critique, considéré égal à 80 % en l'absence d'informations spécifiques disponibles dans les réglementations (liées notamment au climat ou au matériau).

Cette méthode apporte une évaluation du risque en utilisant les données climatiques mensuelles et en considérant que le transfert d'humidité se fait uniquement par diffusion de vapeur d'eau. Cette méthode ne considère pas les autres aspects de l'humidité, tels que l'eau du sol et les précipitations, ce qui constitue une limite à l'évaluation menée selon cette norme.

1.2. Norme américaine ASHRAE 160 [2]

Il s'agit d'une norme américaine dont la dernière version date de 2016 et qui traite de critères pour le contrôle de l'humidité dans la conception de bâtiments. Elle établit des conditions nécessaires pour minimiser le risque de développement fongique et s'applique à tous les matériaux et surfaces, à l'exception des surfaces extérieures de l'enveloppe des bâtiments.

La surface intérieure du matériau étudié est incluse dans l'une des quatre catégories suivantes : très sensible, sensible, moyennement résistant, résistant au développement fongique. L'indice de moisissure M_t est initialement fixé à 0 et augmente chaque heure selon l'équation suivante :

$$M_t = M_{t-1} + \Delta M$$

Avec M_t indice de moisissure à l'heure t, M_{t-1} indice de moisissure à l'heure t-1, et ΔM variation de l'indice de moisissure, différente pour les quatre classes de sensibilité énoncées plus haut.



Cette variation est calculée en utilisant la température et l'humidité relative à la surface de la paroi étudiée ainsi que des paramètres dépendants de la classe de sensibilité du matériau.

1.3. Guide SimHuBat en France [3]

Le document SimHuBat propose différents critères dépendant du matériau selon qu'il contribue ou non à la tenue mécanique du bâtiment.

En ce qui concernent les éléments en bois ou à base de bois intervenant dans la stabilité de l'ouvrage (charpente, solives, montants, etc.), les teneurs en eau en masse en tout point ne doivent pas être supérieures à 20 % pendant plus de 8 semaines cumulées par an, et ce en ne comptabilisant que les périodes supérieures à 7 jours.

En ce qui concerne les matériaux biosourcés, principalement des isolants, qui n'interviennent pas dans la stabilité de l'ouvrage, une teneur en eau de 23 % ne doit pas être dépassée suivant les mêmes conditions. Si le matériau ne remplit pas ce critère, il convient de se référer au CPT 3713 [15].

Comme indiqué dans le document, « ces critères utilisés à l'heure actuelle pour évaluer le risque de développement fongique dans les matériaux biosourcés ne donnent pas entière satisfaction, c'est la raison pour laquelle des actions de recherche sont en cours pour améliorer leur fiabilité. »



2. MODELES PROPOSES DANS LA LITTERATURE

Deux types de modèles empiriques sont proposés dans la littérature. Certains fixent un seuil critique en température et/ou en humidité relative au-delà duquel le risque de développement fongique est avéré. D'autres proposent des modèles de croissance d'un indice caractéristique en fonction de divers paramètres.

A noter que de nombreuses publications ont regroupé les différents modèles existants et ont comparé leur fiabilité [4][5][6][7]. Il en ressort que ces modèles empiriques sont adaptés aux conditions particulières de matériaux ou d'environnement pour lesquelles ils ont été développés, mais manquent de robustesse pour être tout aussi fiables lorsque celles-ci sont modifiées. Les modèles sélectionnés ci-après montrent la diversité des approches développées tout en tirant partie du travail d'analyse critique déjà opéré dans les publications citées précédemment. La liste présentée n'est donc pas exhaustive, mais permet de cibler les modèles les plus pertinents à utiliser dans le cadre de notre étude.

2.1. Annexe 14 de l'International Energy Agency (IEA) [8]

Afin d'évaluer le risque d'apparition de moisissures, cette annexe propose un critère calculé à partir du rapport de différentes températures :

$$\tau = \frac{T_{s,min} - T_{ext}}{T_{int} - T_{ext}} \geq 0,7$$

Où $T_{s,min}$ [°C] est la température de surface intérieure minimale, et T_{ext} [°C] et T_{int} [°C] sont respectivement les températures extérieure et intérieure. Un rapport supérieur ou égal à 0,7 correspond à un risque de développement fongique inférieur à 5 %, alors qu'une valeur inférieure conduit à un risque élevé de développement de moisissures.

Ce critère a été élaboré en considérant les courbes de niveau de l'espèce *Aspergillus versicolor* sur de la gélose avec des expositions à 80 %, 89 % et 100 % d'humidité relative respectivement pendant 1 mois, 1 semaine et 1 jour. D'autre part, il considère le climat en Belgique, et des réserves sont exprimées sur la pertinence de cette valeur seuil de 0,7 pour les autres climats.

Ce critère présente l'inconvénient premier de ne considérer l'influence de l'humidité relative qu'indirectement. Cette méthode indique si les conditions sont favorables pour un développement fongique mais n'est cependant pas un outil de prédiction précis d'apparition de moisissures.



2.2. Time of wetness (TOW) [9]

Ce critère évalue la durée de persistance de l'humidité relative au-delà d'un seuil critique. Il se présente sous la forme d'un rapport de temps :

$$TOW = \frac{\text{période d'HR} > 80\%}{\text{période totale}}$$

Il a été élaboré en étudiant le développement de l'espèce *Penicillium chrysogenum* sur des panneaux de gypse. Cette étude a conclu que pour un TOW inférieur à 0,5, l'apparition de moisissures est considérablement retardée. Dans le cas contraire, on en déduit qu'elle devient non négligeable.

Ce critère présente l'intérêt de prendre en considération de courts épisodes de fortes humidités, mais ne constitue pas un critère fiable indépendamment d'autres considérations. D'autre part, la généralisation à d'autres espèces fongiques et matériaux demande des études complémentaires.

2.3. Modèle VTT [10][11]

Le modèle du VTT, Centre de recherche technique de Finlande ou Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus en finnois, est une loi empirique décrivant la variation d'un indice M oscillant entre 0 et 6 et caractérisant un risque d'apparition, puis une surface de contamination des moisissures plus ou moins grande. Les valeurs seuil M=1 (apparition des moisissures) et M=3 (moisissures visibles à l'œil nu) sont particulièrement intéressantes. En effet, l'apparition de moisissure présente un point de départ à leur développement alors que leur visibilité à l'œil nu est utile dans le cadre d'un diagnostic *in situ*.

Ce modèle utilise les variations d'humidité relative et de température mais établit également des variations différentes de l'indice suivant des périodes favorables ou défavorables à la prolifération fongique. La méthode prend également en compte un « retard » dans la prolifération lorsque les conditions défavorables se prolongent sur des périodes plus longues.

Ce modèle a été élaboré grâce à des expérimentations en laboratoire sur du bois, et plus précisément sur de l'aubier de pin et d'épicéa. Une mise à jour du modèle dans [11] a élargi les expérimentations et a permis un affinage du modèle. Cependant, elle n'a pas permis la confrontation de ce modèle à de véritables conditions extérieures, ni à des températures négatives ou au-delà de 20°C.



2.4. Modèle bio-hygrothermique WUFI-Bio [12][13]

Ce modèle est implémenté dans le logiciel WUFI-bio [14] et permet la prédiction de la prolifération de moisissures, en considérant un équilibre hygroscopique à l'échelle d'une spore. Cette dernière est caractérisée, entre autres paramètres, par sa propre courbe de sorption et les conditions aux limites en régime transitoire de l'environnement qui peuvent lui être appliquées. La germination est supposée lorsque la spore atteint une certaine teneur en eau critique.

Cette simplification permet de ramener le problème à des modèles hygrothermiques classiques, mais comporte néanmoins quelques inconvénients : la teneur en eau critique est déterminée à partir de mesures en laboratoire sur des substrats spécifiques qui dépendent des espèces fongiques présentes et dans des conditions d'incubation différentes de celles rencontrées sur site. D'autre part, des difficultés subsistent dans la détermination de certains paramètres d'entrée (humidité relative initiale de la spore notamment), ce qui conduit à des écarts entre les prédictions théoriques et les mesures sur site.



3. NORMES EXISTANTES EN FRANCE ET A L'INTERNATIONAL

3.1. Norme internationale ISO 137881.1 [1]

Cette norme traite de « la performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments » et plus précisément de « la température superficielle intérieure permettant d'éviter l'humidité superficielle critique et la condensation dans la masse ». Elle propose une méthode simplifiée pour calculer l'humidité relative superficielle et stipule que des moisissures sont susceptibles d'apparaître si la moyenne mensuelle de cette humidité est supérieure à un seuil critique, considéré égal à 80 % en l'absence d'informations spécifiques disponibles dans les réglementations (liées notamment au climat ou au matériau).

Cette méthode apporte une évaluation du risque en utilisant les données climatiques mensuelles et en considérant que le transfert d'humidité se fait uniquement par diffusion de vapeur d'eau. Cette méthode ne considère pas les autres aspects de l'humidité, tels que l'eau du sol et les précipitations, ce qui constitue une limite à l'évaluation menée selon cette norme.

3.2. Norme américaine ASHRAE 160 [2]

Il s'agit d'une norme américaine dont la dernière version date de 2016 et qui traite de critères pour le contrôle de l'humidité dans la conception de bâtiments. Elle établit des conditions nécessaires pour minimiser le risque de développement fongique et s'applique à tous les matériaux et surfaces, à l'exception des surfaces extérieures de l'enveloppe des bâtiments.

La surface intérieure du matériau étudié est incluse dans l'une des quatre catégories suivantes : très sensible, sensible, moyennement résistant, résistant au développement fongique. L'indice de moisissure M_t est initialement fixé à 0 et augmente chaque heure selon l'équation suivante :

$$M_t = M_{t-1} + \Delta M$$

Avec M_t indice de moisissure à l'heure t , M_{t-1} indice de moisissure à l'heure $t-1$, et ΔM variation de l'indice de moisissure, différente pour les quatre classes de sensibilité énoncées plus haut.



Cette variation est calculée en utilisant la température et l'humidité relative à la surface de la paroi étudiée ainsi que des paramètres dépendants de la classe de sensibilité du matériau.

3.3. Guide SimHuBat en France [3]

Le document SimHuBat propose différents critères dépendant du matériau selon qu'il contribue ou non à la tenue mécanique du bâtiment.

En ce qui concerne les éléments en bois ou à base de bois intervenant dans la stabilité de l'ouvrage (charpente, solives, montants, etc.), les teneurs en eau en masse en tout point ne doivent pas être supérieures à 20 % pendant plus de 8 semaines cumulées par an, et ce en ne comptabilisant que les périodes supérieures à 7 jours.

En ce qui concerne les matériaux biosourcés, principalement des isolants, qui n'interviennent pas dans la stabilité de l'ouvrage, une teneur en eau de 23 % ne doit pas être dépassée suivant les mêmes conditions. Si le matériau ne remplit pas ce critère, il convient de se référer au CPT 3713 [15].

Comme indiqué dans le document, « ces critères utilisés à l'heure actuelle pour évaluer le risque de développement fongique dans les matériaux biosourcés ne donnent pas entière satisfaction, c'est la raison pour laquelle des actions de recherche sont en cours pour améliorer leur fiabilité. »



4. MODELES PROPOSES DANS LA LITTERATURE

Deux types de modèles empiriques sont proposés dans la littérature. Certains fixent un seuil critique en température et/ou en humidité relative au-delà duquel le risque de développement fongique est avéré. D'autres proposent des modèles de croissance d'un indice caractéristique en fonction de divers paramètres.

A noter que de nombreuses publications ont regroupé les différents modèles existants et ont comparé leur fiabilité [4][5][6][7]. Il en ressort que ces modèles empiriques sont adaptés aux conditions particulières de matériaux ou d'environnement pour lesquelles ils ont été développés, mais manquent de robustesse pour être tout aussi fiables lorsque celles-ci sont modifiées. Les modèles sélectionnés ci-après montrent la diversité des approches développées tout en tirant partie du travail d'analyse critique déjà opéré dans les publications citées précédemment. La liste présentée n'est donc pas exhaustive, mais permet de cibler les modèles les plus pertinents à utiliser dans le cadre de notre étude.

4.1. Annexe 14 de l'International Energy Agency (IEA) [8]

Afin d'évaluer le risque d'apparition de moisissures, cette annexe propose un critère calculé à partir du rapport de différentes températures :

$$\tau = \frac{T_{s,min} - T_{ext}}{T_{int} - T_{ext}} \geq 0,7$$

Où $T_{s,min}$ [°C] est la température de surface intérieure minimale, et T_{ext} [°C] et T_{int} [°C] sont respectivement les températures extérieure et intérieure. Un rapport supérieur ou égal à 0,7 correspond à un risque de développement fongique inférieur à 5 %, alors qu'une valeur inférieure conduit à un risque élevé de développement de moisissures.

Ce critère a été élaboré en considérant les courbes de niveau de l'espèce *Aspergillus versicolor* sur de la gélose avec des expositions à 80 %, 89 % et 100 % d'humidité relative respectivement pendant 1 mois, 1 semaine et 1 jour. D'autre part, il considère le climat en Belgique, et des réserves sont exprimées sur la pertinence de cette valeur seuil de 0,7 pour les autres climats.

Ce critère présente l'inconvénient premier de ne considérer l'influence de l'humidité relative qu'indirectement. Cette méthode indique si les conditions sont favorables pour un développement fongique mais n'est cependant pas un outil de prédiction précis d'apparition de moisissures.



4.2. Time of wetness (TOW) [9]

Ce critère évalue la durée de persistance de l'humidité relative au-delà d'un seuil critique. Il se présente sous la forme d'un rapport de temps :

$$TOW = \frac{\text{période d'HR} > 80\%}{\text{période totale}}$$

Il a été élaboré en étudiant le développement de l'espèce *Penicillium chrysogenum* sur des panneaux de gypse. Cette étude a conclu que pour un TOW inférieur à 0,5, l'apparition de moisissures est considérablement retardée. Dans le cas contraire, on en déduit qu'elle devient non négligeable.

Ce critère présente l'intérêt de prendre en considération de courts épisodes de fortes humidités, mais ne constitue pas un critère fiable indépendamment d'autres considérations. D'autre part, la généralisation à d'autres espèces fongiques et matériaux demande des études complémentaires.

4.3. Modèle VTT [10][11]

Le modèle du VTT, Centre de recherche technique de Finlande ou Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus en finnois, est une loi empirique décrivant la variation d'un indice M oscillant entre 0 et 6 et caractérisant un risque d'apparition, puis une surface de contamination des moisissures plus ou moins grande. Les valeurs seuil M=1 (apparition des moisissures) et M=3 (moisissures visibles à l'œil nu) sont particulièrement intéressantes. En effet, l'apparition de moisissure présente un point de départ à leur développement alors que leur visibilité à l'œil nu est utile dans le cadre d'un diagnostic *in situ*.

Ce modèle utilise les variations d'humidité relative et de température mais établit également des variations différentes de l'indice suivant des périodes favorables ou défavorables à la prolifération fongique. La méthode prend également en compte un « retard » dans la prolifération lorsque les conditions défavorables se prolongent sur des périodes plus longues.

Ce modèle a été élaboré grâce à des expérimentations en laboratoire sur du bois, et plus précisément sur de l'aubier de pin et d'épicéa. Une mise à jour du modèle dans [11] a élargi les expérimentations et a permis un affinage du modèle. Cependant, elle n'a pas permis la confrontation de ce modèle à de véritables conditions extérieures, ni à des températures négatives ou au-delà de 20°C.



4.4. Modèle bio-hygrothermique WUFI-Bio [12][13]

Ce modèle est implémenté dans le logiciel WUFI-bio [14] et permet la prédiction de la prolifération de moisissures, en considérant un équilibre hygroscopique à l'échelle d'une spore. Cette dernière est caractérisée, entre autres paramètres, par sa propre courbe de sorption et les conditions aux limites en régime transitoire de l'environnement qui peuvent lui être appliquées. La germination est supposée lorsque la spore atteint une certaine teneur en eau critique.

Cette simplification permet de ramener le problème à des modèles hygrothermiques classiques, mais comporte néanmoins quelques inconvénients : la teneur en eau critique est déterminée à partir de mesures en laboratoire sur des substrats spécifiques qui dépendent des espèces fongiques présentes et dans des conditions d'incubation différentes de celles rencontrées sur site. D'autre part, des difficultés subsistent dans la détermination de certains paramètres d'entrée (humidité relative initiale de la spore notamment), ce qui conduit à des écarts entre les prédictions théoriques et les mesures sur site.



5. CONCLUSIONS

5.1. Tableau récapitulatif des normes et modèles

Le Tableau 1 regroupe les normes et modèles traitant des risques de développement fongique à travers des indicateurs qualitatifs (présence ou non de risques de moisissures) ou quantitatifs (risques de 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.

Tableau 1 – Récapitulatif des normes et modèles sélectionnés

	Indicateurs		Données d'entrée		Remarques
	Qualitatif	Quantitatif	Température	Humidité relative	
ISO137881.1	HR moyenne mensuelle		X	X	Ne tient pas compte de la nature des matériaux ni de la variété d'espèces de moisissures, ni du climat intérieur Ne prend pas en compte les apports d'eau autres que ceux issus de la diffusion de vapeur d'eau
ASHRAE 160		Indice M défini pour chaque matériau en 4 classes de sensibilité	X	X	Ne tient pas compte de la variété d'espèces de moisissures, ni des climats intérieur et extérieur
SimHuBat	Seuil de teneur en eau		X	X	Valable uniquement pour les matériaux en bois, à base de bois ou biosourcés Ne tient pas compte de la variété d'espèces de moisissures
Annexe 14 IEA	Rapport de T		X		Valable uniquement pour <i>Aspergillus versicolor</i> Essais de développement de cette souche sur de la gélose (milieu nutritif) Adapté au climat belge
TOW	Rapport de temps			X	Valable uniquement pour des panneaux de gypse ensemencés de <i>Penicillium chrysogenum</i>



Indicateurs		Données d'entrée		Remarques
Qualitatif	Quantitatif	Température	Humidité relative	
				Prise en compte de périodes de fortes humidités relatives
VTT	Indice M entre 0 et 6 pour les matériaux en bois	X	X	Valable uniquement pour du bois à des températures entre 0°C et 20°C Prise en compte d'un retard de développement Ne tient pas compte de la variété des espèces de moisissures ni des conditions climatiques réelles
WUFI Bio	Hygrothermie des spores	X	X	Conditions initiales des spores difficiles à définir Utilisation d'isopleths obtenues empiriquement, difficiles à généraliser

5.2. Synthèse des observations

La revue bibliographique a montré la multitude des approches employées pour la modélisation d'un environnement favorable au développement fongique, ainsi que leur domaine respectif de validité. Elle a montré l'importance de considérer simultanément les influences de l'humidité et de la température pour prévoir le risque de développement fongique et à ne pas les examiner isolément. Il faut toutefois souligner que d'autres facteurs déterminants tels que l'eau disponible pour les moisissures, en surface ou dans le support, ne sont jamais pris en compte. De plus, les modèles ont été développés pour une seule espèce de moisissures, ce qui ne se présente jamais dans la réalité et les essais de développement réalisés sur une gélose ne reflètent pas la disponibilité de l'eau qui est différente sur un support réel.

Les modèles inventoriés ont été développés de manière empirique pour beaucoup et sont donc applicables à un nombre restreint d'espèces fongiques et de matériaux de construction (principalement bois et gypse). L'idée de les regrouper selon des classes de sensibilité est intéressante et permet une première généralisation de ces résultats. Cependant, cela ne réduit pas totalement les disparités observées. Le développement de modèles différents pour chacune des classes citées précédemment pourrait être une piste d'étude.



La difficulté à prendre en compte l'influence des périodes défavorables au développement fongique et à modéliser le retard sur le développement que génère de telles périodes a été formulée à plusieurs reprises.

Les observations de temps de développement des espèces fongiques sont faites sur des substrats nutritifs, ce qui constitue un milieu très favorable à leur développement. Les conditions d'incubation sont donc différentes de celles rencontrées sur les revêtements des parois et cette généralisation a une influence sur les résultats.

Les modèles numériques utilisent des conditions d'incubation (humidité relative et température) qui correspondent aux mesures des ambiances et non à la surface du mur.

Enfin, beaucoup d'expérimentations utilisées pour évaluer la robustesse des modèles sont réalisées en laboratoire et considèrent des régimes stationnaires. Il n'y a que peu, voire pas, de comparaison avec des mesures en conditions réelles sur site



6. APPLICATION AUX BATIMENTS INSTRUMENTES DANS LE PROJET QSE

6.1. Campagne expérimentale

Le programme de mesures du projet QSE intègre le suivi sur le long terme de bâtiments avant et après rénovation, qu'il s'agisse de maisons individuelles, appartements, bureaux et salles de classe.

Des mesures intérieures et extérieures (température et humidité relative) sont réalisées. Des questionnaires distribués aux occupants et d'autres complétés par les enquêteurs permettent de collecter les données sur les bâtiments et les habitudes de vie des occupants. Chaque bâtiment fait en outre l'objet d'un diagnostic visuel permettant d'identifier la présence de moisissures. Enfin, une mesure des composés organiques volatils microbiens [16] permet le calcul de l'indice de contamination fongique, marqueur d'un développement de moisissures visibles ou cachées.

6.2. Exploitation des données expérimentales

L'un des objectifs du projet QSE est de développer une méthode simplifiée permettant d'évaluer la performance globale 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. Le développement de cette méthode passe par la réalisation d'expérimentations sur un grand nombre de bâtiments avec des méthodes de référence.

S'agissant du volet humidité et développement fongique au sein du projet QSE, il est proposé, pour un échantillon d'une vingtaine de bâtiments, de **confronter les résultats du diagnostic visuel de moisissures et du calcul de l'indice de contamination fongique avec ceux des normes et modèles empiriques de développement fongique issus de la revue bibliographique.**

La confrontation des différentes approches d'évaluation de l'apparition et du développement de la contamination fongique constituera la première étape du travail. La deuxième étape consistera à expliquer les différences observées, à réaliser des études de sensibilité puis à sélectionner et affiner la norme ou le modèle le plus pertinent. La dernière étape consistera à développer un outil simple permettant d'utiliser la norme ou le modèle sélectionné et optimisé (macro Excel, logiciel ou application) si cela paraît pertinent en l'état actuel des connaissances.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

*Livrable : Modélisation du risque d'apparition et de développement de moisissures
Revue bibliographique*

BIBLIOGRAPHIE

- [1] EN ISO 13788 : Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments - Température superficielle intérieurs permettant d'éviter l'humidité superficielle critique et la condensation dans la masse - Méthode de calcul, 2013
- [2] Standard 160-2016 : Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings, ASHRAE, 2016
- [3] Guide de recommandations techniques HUMIBATex - Prise en compte des risques hygrothermiques en réhabilitation du bâti existant, *CSTB Editions*, 2020
- [4] VEREECKEN, Evy et ROELS, Staf. Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Building and Environment*, 2012, vol. 51, p. 296-310.
- [5] VEREECKEN, Evy, VANOIRBEEK, Kristof, et ROELS, Staf. Towards a more thoughtful use of mould prediction models: A critical view on experimental mould growth research. *Journal of Building Physics*, 2015, vol. 39, no 2, p. 102-123.
- [6] VEREECKEN, Evy, VANOIRBEEK, Kristof, et ROELS, Staf. A preliminary evaluation of mould prediction models based on laboratory experiments. *Energy procedia*, 2015, vol. 78, p. 1407-1412.
- [7] COLINART, Thibaut, BENDOUA, Mathieu, et GLOUANNEC, Patrick. Indicateurs de pathologies liées à l'humidité: analyse des modèles et influence de l'hystérésis des isothermes de sorption. Conférence IBPSA France 2016
- [8] IEA Annex 14. Condensation and energy. Guidelines and practice. Leuven Acco, 1990
- [9] ADAN, Olaf Clemens Gerardus. On the fungal defacement of interior finishes. PhD Thesis, TU Eindhoven, Department of the Built Environment, 1994.
- [10] HUKKA, Antti et VIITANEN, H. A. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology*, 1999, vol. 33, no 6, p. 475-485.
- [11] OJANEN, Tuomo, PEUHKURI, Ruut, VIITANEN, Hannu, *et al.* Classification of material sensitivity–new approach for mould growth modeling. In : *9th Nordic symposium on building physics*. 2011. p. 867-874.
- [12] SEDLBAUER S, MARTIN, K. US 2003/0187579 A1 : Method for predicting the formation of mould fungi. United States Patent Application Publication. Oct 2, 2003.
- [13] KRUS, M., KILIAN, R., et SEDLBAUER, K. Mould growth prediction by computational simulation on historic buildings. In Padfield T, Borchersen, K, editors. *Museum microclimates*. National Museum of Denmark, 2007.
- [14] WUFI, 2005, WUFI-Bio. Available from : http://www.hoki.ibp.fhg.de/wufi/downloads_e.html
- [15] Cahier du CSTB 3713 "Isolants à base de fibres végétales ou animales », Guide technique spécialisé pour la constitution d'un dossier de demande d'Avis Techniques, GS du 13 mars 2018



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

Livrable : Modélisation du risque d'apparition et de développement de moisissures
Revue bibliographique

[16] Moularat S, Robine E, Ramalho O, Oturan MA (2008). Detection of fungal development in closed spaces through the determination of specific chemical targets. *Chemosphere*, 72: 224-232.



QSE : Qualité sanitaire et énergétique des rénovations

*Livrable : Modélisation du risque d'apparition et de développement de moisissures
Revue bibliographique*