

L'HUMIDITÉ DANS LES BÂTIMENTS : PATHOLOGIES ET PARAMÈTRES GOUVERNANTS

Julien BERGER^{1,2}, Sihem TASCA-GUERNOUTI¹, Monika WOLOSZYN², Catherine BUHE²

¹ CETE de l'Ouest, Division Ville et Territoire, Groupe BATEN, Rue René Viviani, BP 46223, 44252 Nantes Cedex
julien.berger@developpement-durable.gouv.fr

² Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE), CNRS-UMR5271,
Université de Savoie, Campus Scientifique, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget-du-Lac Cedex

1. NOMENCLATURE

b	coefficient de variation de la conductivité thermique (W/m.K)	τ	temps (s)
C	critère (-)	φ	humidité relative (%)
e	paramètre d'entrée (unité variable)	w	teneur en eau volumique (kg/m ³)
E	module de young (Pa)	ν	ratio dePoisson (-)
Icl	index de vêtue (clo) (1 Clo = 0.155 W/m ² .K)	σ	tension (N/m ²)
L,	écart dans le bilan thermique entre chaleur produite et perdue (W/m ²)	β	coefficient de dilatation (mm/m)
M	index de développement de moisissures ()	ε	tension apparente (Pa)
Met	production métabolique (Met) (1 Met = 58W/m ²)	λ	conductivité thermique (W/m.K)
N, n	nombres de cycles (-)	Indices	
P	Pression statique (Pa)	w	eau
T	temperature (K)	a	air
Trm	Température radiante (K)	0	effectif
R _{frost}	résistance au froid (-)	comf	confort
R _{meca}	resistance mécanique(Pa)	corr	corrosion
U	coefficient d'échanges thermiques surfaciques (W/m ² .K)	crit	critique
X	facteur clé ou gouvernant (unité variable)	dew	point de saturation
v	vitesse de l'air (m/s)	ext	exterieur
Σ	tension de surface (N/m)	freez	point de gel
		hlosses	pertes thermiques
		IAQ	qualité de l'air intérieur
		int	intérieur
		mec	mecanique
		sint	surface intérieur

2. PRÉAMBULE

L'**air humide** est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. Les proportions d'eau et d'air sont variables. Le terme humidité désigne donc l'eau sous forme vapeur ou liquide contenue dans l'air ainsi que dans les matériaux poreux.

La plupart des matériaux utilisés dans la construction sont des matériaux poreux. Si leurs pores sont ouverts, ils sont perméables à l'air et à la vapeur d'eau. Les matériaux dits hygroscopiques ont la capacité de fixer par adsorption ou condensation, une quantité importante d'humidité, qui peut être sous forme liquide.

Le transport d'humidité en milieu poreux est la combinaison de différents phénomènes physiques régissant le mouvement de chacune des phases présentes (liquide et vapeur). La part de chacun des mécanismes dépend des propriétés des matériaux, des conditions climatiques ambiantes et des proportions liquide/vapeur de la phase fluide.

Ces transferts peuvent être modélisés à partir des différentes équations de transport de masse et de diffusion de chaleur. Ces **modèles de simulation** permettent de déterminer la température et la teneur en eau dans les matériaux.

3. INTRODUCTION

La présence anormale d'humidité dans les bâtiments peut altérer la qualité des constructions. L'humidité a aussi une incidence sur la qualité des ambiances et le confort thermique des occupants. L'humidité peut donc être potentiellement une source d'apparition de pathologies dans les bâtiments.

La littérature recense de nombreuses méthodologies d'enquêtes ou de diagnostics pour apprécier les dégradations des enveloppes de bâtiments ([ROD 11], [AGE 89]). L'ouvrage de COIGNET [COI 06] présente une approche très pragmatique du diagnostic des pathologies liées à l'humidité dans les maisons anciennes. Ces ouvrages sont souvent destinés aux professionnels de la construction et le lien entre le diagnostic pathologies et les transferts de température et d'eau à travers la paroi n'est souvent pas fait. Par ailleurs, de nombreux travaux ont été réalisés sur différentes pathologies rencontrées dans le bâtiment pour élaborer des outils de modélisation du développement d'une pathologie particulière. Par exemple, VERRECKEN [VER 11] recense l'ensemble des modèles existants de développement des moisissures sur une paroi. De tels outils, permettant de modéliser l'apparition de certaines altérations, existent mais ils ne concernent en général qu'un type d'altération. Les modélisations restent à l'échelle de la paroi et ne sont pas couplés avec des modèles à l'échelle du bâtiment. Nous pouvons remarquer que nous avons d'un côté des ouvrages pragmatiques sur les règles de l'art pour éviter les pathologies liées à l'humidité en rénovation. Et d'autre part, nous avons des outils non exhaustif, limités à la modélisation d'une pathologie à l'échelle paroi.

L'un des objectifs du projet ANR HUMIBATex (2012-2015) est de répondre à ces enjeux. En effet, ce projet vise, entre autres, à réaliser un couplage des modèles de simulation existants afin d'être capable de prédire les consommations

énergétiques, le confort des occupants et les risques de pathologies liés à l'humidité après une rénovation. Des outils de ce type sont très attendus par les concepteurs. Ils permettront d'éviter des choix nuisibles à la pérennité du bâtiment lors de sa construction ou sa rénovation.

L'élaboration d'un tel outil nécessite en premier lieu de dresser, à travers ce présent article, une liste exhaustive des pathologies liées à l'humidité. Dans le cadre de ce travail, les pathologies ont été regroupées en 4 catégories en fonction du rôle de l'humidité [AGE 89]:



ACTION PROPRE
DE L'HUMIDITÉ

- **Les altérations dues à l'action propre de l'humidité.**

Ici l'action directe de l'eau sur les caractéristiques thermo-physiques des matériaux est prise en compte.



MIGRATION DE
L'HUMIDITÉ

- **Les altérations dont l'humidité est le vecteur.**

À travers les matériaux poreux, nous pouvons observer la migration et la variation de l'humidité. En fonction du sens de migration et de l'importance de la variation, certaines pathologies peuvent apparaître. Dans cette catégorie de pathologie, l'humidité est donc considérée comme un vecteur.



MILIEUX
HUMIDES

- **Les altérations se développant en milieu humide.**

Ces pathologies dépendent directement du niveau d'humidité présente dans le milieu. Contrairement à la précédente catégorie, ces altérations ne dépendent pas du profil d'humidité dans les matériaux.



DÉGRADATION
DES AMBIANCES
INTÉRIEURES

- **La dégradation des ambiances intérieures.**

Dans cette catégorie, sont considérées les pathologies liées à l'humidité dans les pièces et non pas dans les matériaux.

Pour chacune des pathologies rencontrées dans les bâtiments, une proposition de facteurs gouvernant leur apparition complète ce travail. Nous appelons facteur gouvernant ou facteur clé X, un paramètre important des champs hygrothermiques ou des propriétés thermophysiques du matériau qui influence l'apparition d'une pathologie. Généralement ce facteur dépend d'autres paramètres, appelés paramètres d'entrée e_i . Enfin ce facteur est associé à un critère C qui détermine s'il y a risque potentiel pour le bâtiment d'appa-

rition d'une pathologie. L'ensemble {facteurs gouvernants, critères} constitue un indicateur d'apparition de pathologie. Le schéma suivant explicite ces notions :

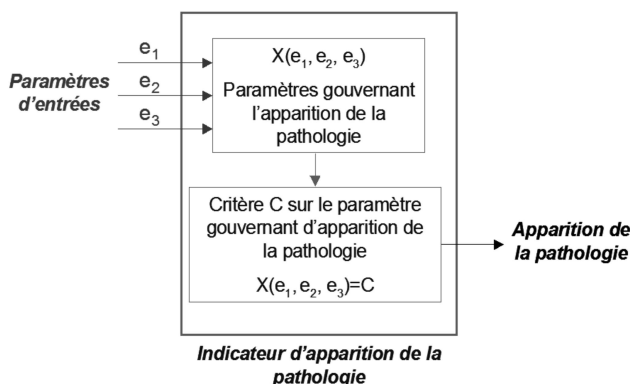


Figure 1 : Notion d'indicateur d'apparition de pathologie

4. LES PATHOLOGIES LIÉES À L'ACTION PROPRE DE L'HUMIDITÉ

Les quantités de vapeur d'eau ou d'eau liquide à travers la paroi entraînent des modifications des caractéristiques thermo-physiques des matériaux. Ces modifications concernent les propriétés thermiques, les propriétés mécaniques et les variations dimensionnelles des matériaux.

4.1. Modifications des propriétés mécaniques

La résistance mécanique des matériaux est inversement proportionnelle à leur teneur en eau [COI 06]. Les courbes de résistances mécaniques en fonction de la teneur en eau permettent de caractériser cette variation. BECK [BEC 03] caractérise l'influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression d'une pierre tuffeau. Il montre que la résistance à la compression diminue de 55% entre l'état sec et l'état de saturation. La figure suivante donne un autre exemple de diminution de la résistance mécanique pour la pierre calcaire :

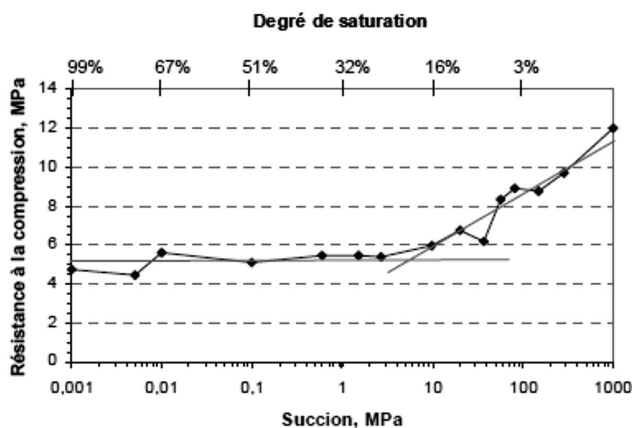


Figure 2 : Diminution de la résistance à la compression avec augmentation de la teneur en eau pour la pierre calcaire (Beck 2006)

Si la teneur en eau du matériau atteint une valeur critique, la structure du mur peut être compromise. Les avis techniques du CSTB sur les matériaux donnent les résistances minimales à la compression R_{crit} .

Pour prévenir l'apparition de ce genre de pathologie, il s'agit de comparer la valeur de la résistance mécanique R_{meca} en fonction de la teneur en eau w du matériau par rapport à la résistance minimale ou critique à la compression défini par les avis techniques (cf. Figure 3). Si cette résistance mécanique atteint la valeur seuil R_{crit} définie pour l'usage convenu, alors il y a risque de dégradation de la structure du matériau. Le critère d'apparition de la pathologie est donc le suivant :

$$R_{mec}(w) > R_{crit}$$

Résistance mécanique

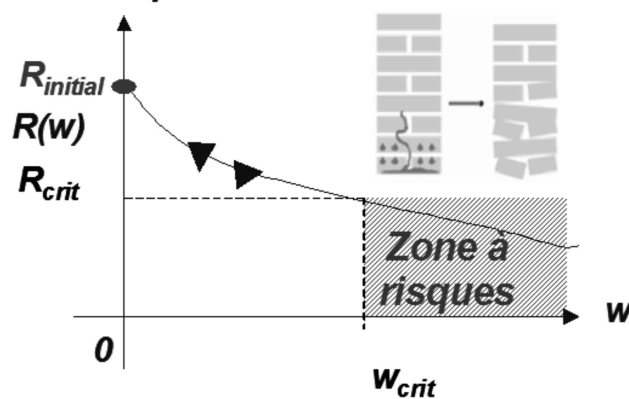


Figure 3 : Définition de la résistance mécanique critique pour prévenir de pathologies

4.2. Modification des propriétés thermiques

Lorsqu'un matériau est placé dans un air où l'humidité relative augmente, ses pores se remplissent d'eau au lieu de l'air. La conductivité thermique de l'eau est 25 fois supérieure à celle de l'air ($\lambda_{eau} = 0.6 \text{ W/m.K}$, $\lambda_{air} = 0.024 \text{ W/m.K}$). Il en résulte que, pour des matériaux hygroscopiques, des excès d'humidité relative dans un bâtiment accentuent les déperditions thermiques au niveau d'une paroi. Ces déperditions sont aussi influencées par la chaleur latente. La figure suivante donne un exemple d'évolution de la conductivité thermique pour le béton cellulaire et la brique.

La variation de la conductivité thermique d'un matériau en fonction de l'humidité peut être modélisée ainsi [KÜN 96] :

$$\lambda(w) = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot w)$$

où λ_0 est la conductivité thermique du matériau sec [W/m.K], w est la teneur en eau volumique du matériau [kg/m³] et b est un coefficient spécifique à chaque matériau, caractérisé expérimentalement. KÜNZEL et KIESSL [KÜN 96] donnent les courbes de variations de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau pour quelques matériaux.

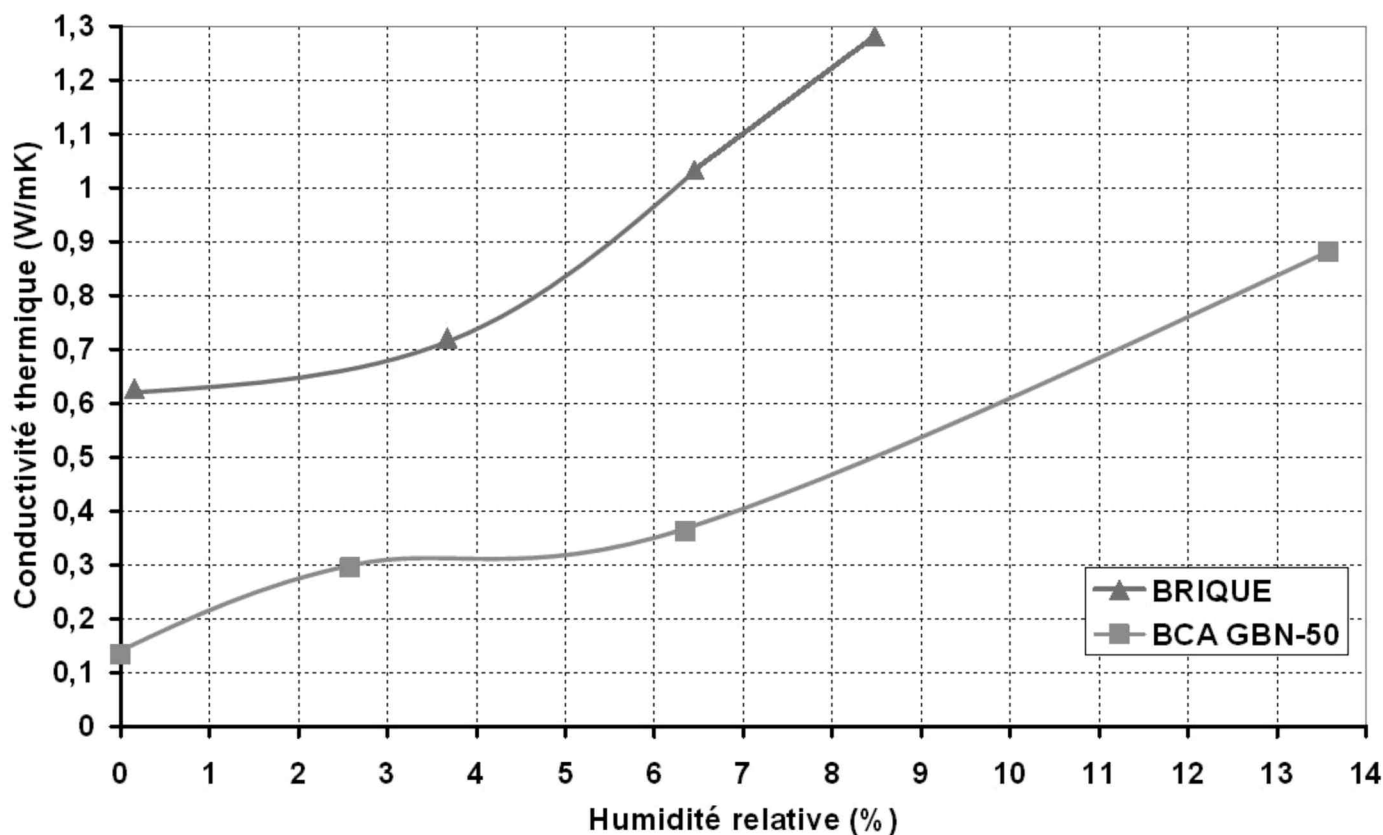


Figure 4 : Evolution de la conductivité thermique avec l'humidité relative pour la brique et le béton cellulaire pour $T=35^{\circ}\text{C}$ (Cherches 2008)

Même si la variation des propriétés thermique n'est pas une source de pathologies physiques, nous proposons d'étudier la sensibilité de la paroi à l'humidité. Nous proposons de comparer son coefficient moyen de déperdition thermique surfacique U ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) de la paroi calculé à partir de $\lambda(w)$ (à l'état humide) et celui calculé à partir de λ_0 conductivité effective. Les conductivités thermiques effectives, définies par la réglementation thermique française, sont des valeurs moyennes intégrant la variation de ce paramètre avec l'humidité. Elles ont une incertitude de 5%.

Lorsque le coefficient calculé à l'état humide dépasse un seuil, nous pouvons considérer que la dégradation de la performance thermique de la paroi est pathogène. Nous proposons comme critère d'apparition de pathologie de compter le temps cumulé $\tau_{\text{dep.th.}}$ où $U(w) \geq 0,05 \times U_0$ traduit par la formule :

$$\tau_{\text{hlosses}} = \int_t dt, U(w, t) > 0,05 \cdot U_0$$

4.3. Variations dimensionnelles

Lorsque le taux d'humidité d'un matériau augmente, son volume augmente. Les matériaux poreux tels que les pierres, les terres crues, les terres cuites et les bois subissent ainsi successivement des gonflements et retraites. Le coefficient de dilatation ou de variations dimensionnelles

traduit ce phénomène. Il est généralement exprimé en mm de dilatation par pourcentage de variation d'humidité relative (HR) (cf. Figure 5).

Une approche intéressante et simple est proposée dans [GONZ 04] pour évaluer les dommages causés par les variations dimensionnelles expliquée par la figure suivante :

Quand le block sec est mouillé, la partie humide a tendance à gonfler. Cette expansion est restreinte et la couche humide est soumise à la compression. La contrainte σ peut être calculée par la formule suivante, en négligeant les effets visco-élastiques :

$$\sigma = - \frac{E(w) \cdot \beta}{1 - \nu(w)}$$

où E est le module de Young, ν le coefficient de Poisson de la pierre et β le coefficient de variations dimensionnelles. Le module de Young et le coefficient de poisson varient en fonction de la teneur en eau.

Bien entendu, les phénomènes similaires apparaissent lors du séchage de cette couche de matériau. Lors de l'humidification, les pathologies sont attendues lorsque la contrainte de compression dépasse la résistance à la compression du matériau, soit $\sigma > R_{\text{compression}}$. Et lors du séchage, les pathologies apparaissent lorsque la contrainte de tension dépasse la résistance à la traction, soit $\sigma > R_{\text{traction}}$. L'indicateur d'apparition de cette pathologie sera donc la comparaison de la contrainte σ , fonction de la teneur en

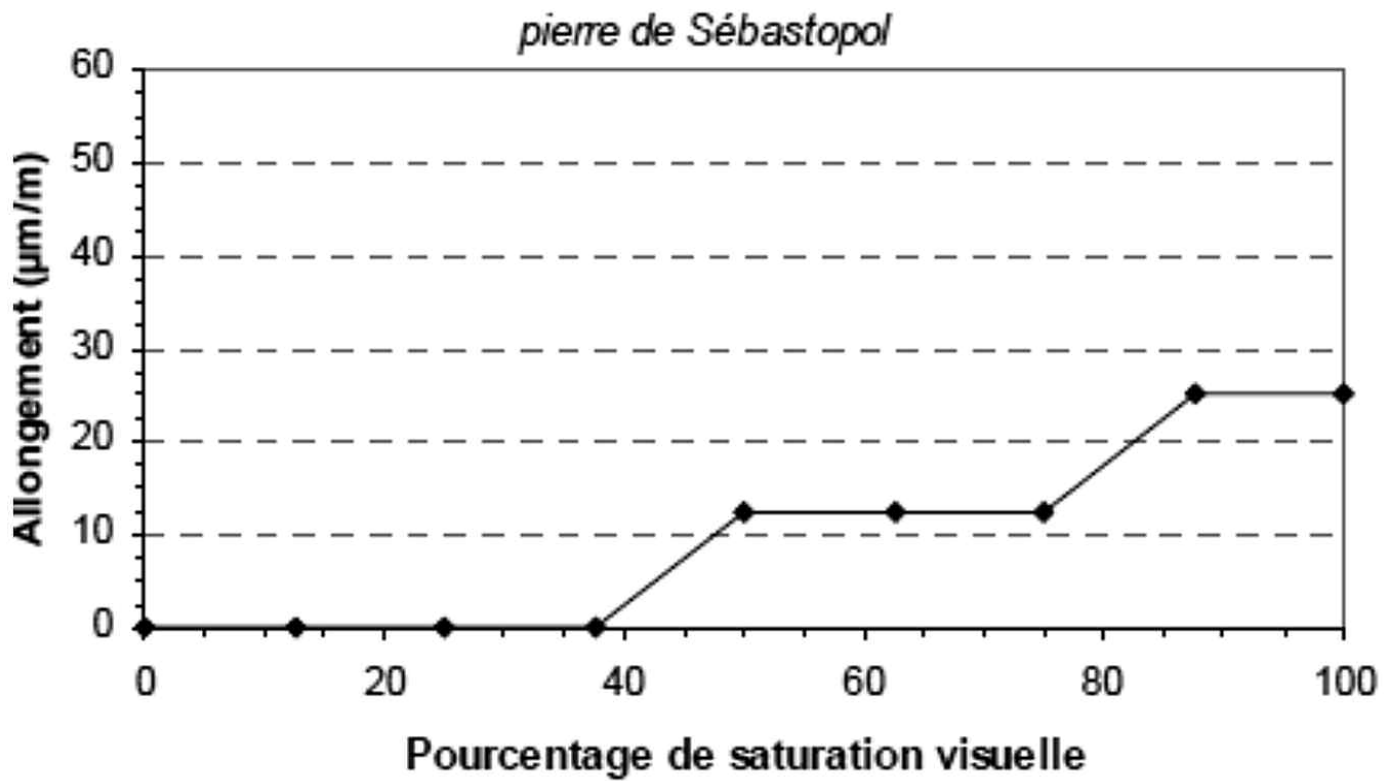


Figure 5 : Dilatation hydrique de la pierre de Sébastopol (Beck 2006)

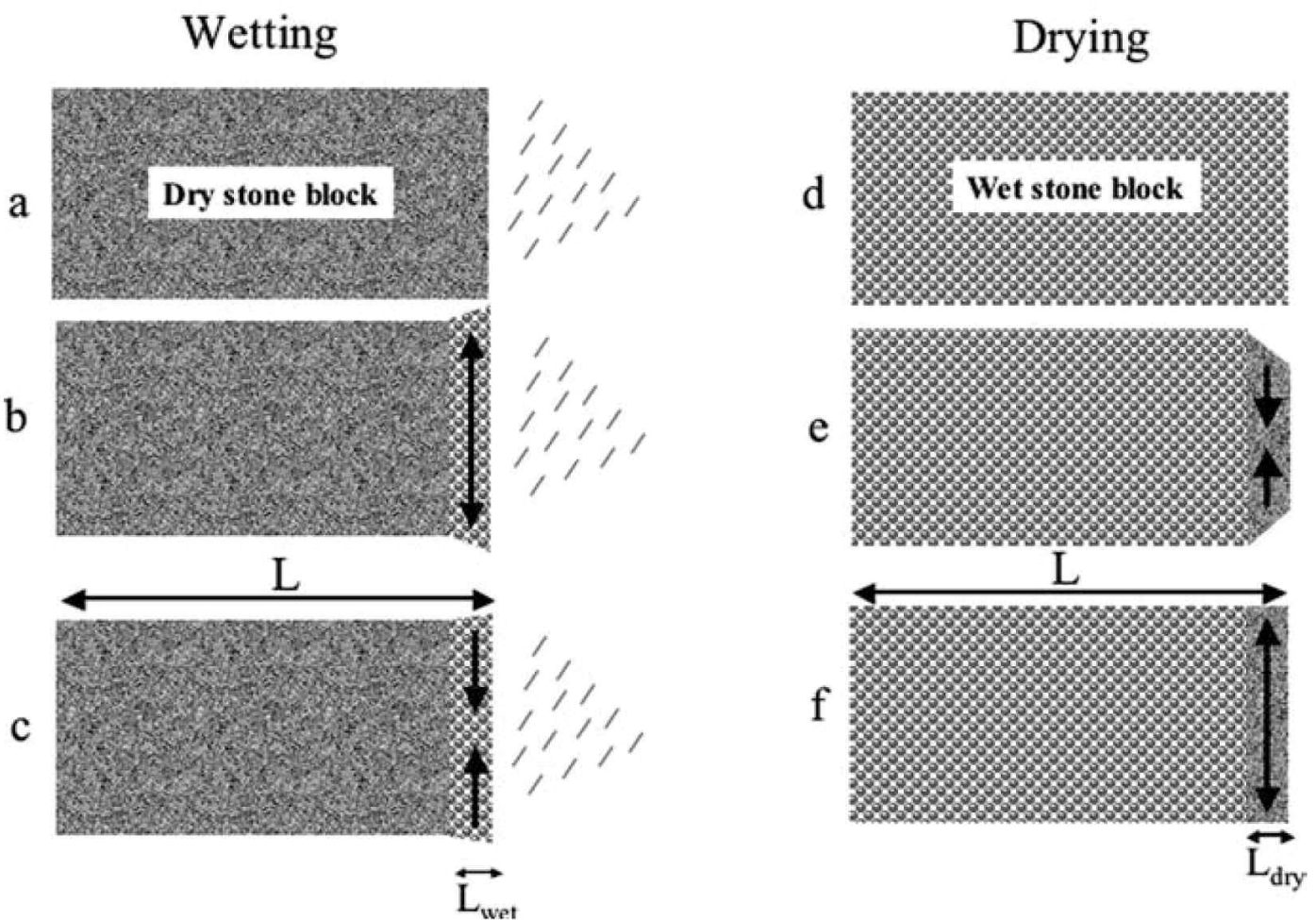


Figure 6 : Illustration des tensions développées durant les cycles d'humidification (a, b, c) et de séchage (d, e, f) [GONZ 04]

eau, avec la résistance à la traction lors des séchages et la résistance à la compression lors des mouillages.

D'autres approches plus complexes existent couplant des modèles mécaniques et des modèles thermohygroliques

5. LES ALTÉRATIONS DONT L'HUMIDITÉ EST LE VECTEUR

5.1. Le gel des matériaux

L'action du gel peut provoquer la dégradation des matériaux poreux. Si la température est abaissée sous 0°C , l'eau présente dans les pores se transforme en glace et son volume augmente de 9%. S'il n'existe pas suffisamment d'espace vide dans les capillaires pour permettre son expansion, la glace exerce alors une pression destructrice sur la matrice poreuse. Il existe une teneur en eau critique pour laquelle le gel entraîne des altérations du matériau. Cette teneur est différente suivant les caractéristiques des matériaux. Les matériaux constitués de pores fin ($1\mu\text{m}$) ouverts ont une teneur en eau critique plus faible que les matériaux à gros pores ($>50\mu\text{m}$) [MAM 94].

Les facteurs qui interviennent dans la dégradation des matériaux poreux par le gel sont : les propriétés notamment la constitution de la matrice poreuse et le taux de sels dissous dans l'eau.

Pour évaluer les risques d'apparition de cette pathologie, il est possible de recenser le nombre d'occurrences N_{gel} sur la durée de simulation où les conditions en température de gel de l'eau sont atteintes.

Ce nombre de cycle est à comparer à la valeur de la résistance au gel des matériaux R_{gel} , caractérisée par la norme EN 12371. Cette norme définit un nombre de cycle de gel/dégel maximal pour un matériau au-delà duquel des altérations apparaissent.

5.2. Les phénomènes d'origine chimique : la cristallisation des sels

Les solutions aqueuses qui transitent dans la paroi sont chargées en sel. Les plus fréquents sont : les chlorures de sodium et les sulfates de magnésium, de sodium et de calcium.

Les sels présents dans ces solutions ont plusieurs origines [SCHE 04]. Ils peuvent naturellement être présents dans les sols souterrains des bâtiments ou apportés par voie éolienne, par le traitement des chaussées enneigées en hiver ou par les gaz polluants l'atmosphère (SO_2 ,...etc.) ou encore par contamination biologique du matériau. Les sels peuvent aussi être inhérents aux matériaux.

Lorsque l'eau présente dans la paroi s'évapore, la concentration en ions augmente et la solution arrive à saturation [VERA 11]. Il y a alors précipitation de sels et donc formation de cristaux. De même, une baisse de température induit une diminution de la solubilité des sels. La Figure 7 présente ce phénomène :

La cristallisation peut avoir lieu soit à la surface (efflorescence) soit dans la paroi (subflorescence) [VERA 11]. Les cristallisations internes exercent des contraintes sur la matrice poreuse pouvant engendrer des dégradations du matériau (effritements, décrochements de blocs). Les efflorescences altèrent seulement l'aspect esthétique du matériau.

Afin de prédire si la cristallisation interne peut endommager le matériau, deux approches sont possibles. Une première est physique, avec l'existence d'une pression de cristallisation dans les pores ([SCHE 04], [VERA 11]). La pression de cristallisation peut être comparée au module d'élasticité du matériau. La deuxième approche est chimique et compare la variation du volume molaire de la réaction de cristallisation par rapport au volume moyen des pores [KÜH 04]. Il est alors nécessaire de caractériser les matériaux avec un histogramme de répartition des pores. Il est aussi important de savoir si l'eau présente dans la paroi peut amener des sels. Le type de sels sera alors déterminant dans cette approche. Pour l'instant, ce processus étant complexe et la présence de sels impactant

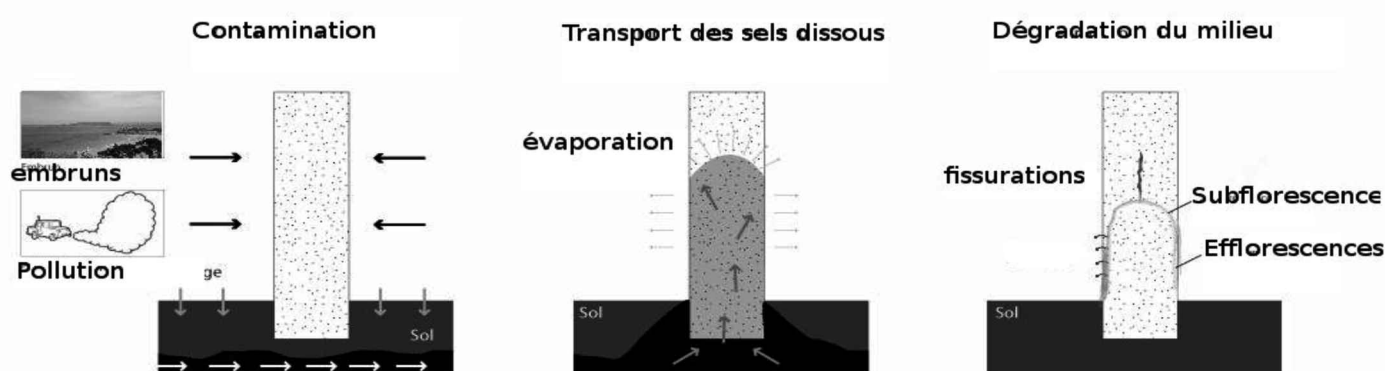


Figure 7. Phénomène de cristallisation des sels au sein d'une paroi [Ver 11].

fortement l'apparition d'autres pathologies (gel, moisissures, corrosion), nous souhaitons poursuivre nos recherches avant de proposer un indicateur d'apparition de cette pathologie.

6. LES ALTÉRATIONS SE DÉVELOPPANT EN MILIEU HUMIDE

6.1. Les dégradations biologiques

Les phénomènes de dégradation biologique apparaissent au travers de différents organismes : bactéries, champignons, insectes... On les regroupe sous le terme de moisissures. Les facteurs abiotiques principaux intervenant dans leurs proliférations sont l'apport en eau, la température, la qualité du substrat (pH, sels nutritifs, perméabilité à l'eau), la luminosité et le temps d'exposition.

Ces processus de dégradation accentuent le vieillissement des matériaux de construction. En étant une source d'acides organiques importante, ils peuvent dégrader les matériaux par réactions chimiques. Ces proliférations biologiques peuvent être néfastes pour la santé de l'homme (cf. 7.2) et peuvent provoquer des allergies, des maladies, des infections, etc.

Plusieurs modèles de développement de moisissures sont recensés par VEREECKEN [VER 11] et peuvent être utilisés pour prédire l'apparition d'une telle pathologie. Nous notons l'existence de 2 modèles statiques (en régime permanent), basés sur la température et l'humidité relative comme données d'entrées. Trois modèles dynamiques existent, dont deux sont basés sur la température et l'humidité relative et l'autre sur le bilan hydrique des spores. Le tableau 1 recense ces différents modèles et propose une comparaison.

Le modèle VTT semble le mieux intégrer le développement de moisissures en régime dynamique. Son indicateur de moisissure M semble adapté pour la prévision des proliférations biologiques. Pour l'apparition de cette altération, nous retiendrons donc cet indicateur pour l'apparition de cette pathologies.

6.2. La corrosion des métaux

La corrosion est le phénomène par lequel les métaux ont tendance à retourner à leur état originel d'oxydes [COI 06]. Dans le domaine du bâtiment, les dommages sont multiples des salissures de façades à la destruction totale de certaines parties d'ouvrage se produisant la plupart du temps par éclatement des matériaux enrobant des métaux corrodés.

La corrosion se produit lorsque la température de surface atteint le point de rosée. La vapeur contenue dans l'atmosphère se condense en fines gouttelettes enrobant le métal d'une mince pellicule liquide qui dissout les gaz oxydant présents dans l'atmosphère (O_2 , CO_2 , SO_2 etc.). Le Fer par exemple réagit avec le dioxygène et l'eau pour former des oxydes de fer, connus sous le nom de rouille.

Les facteurs influents sont : la nature du métal, l'état de sa surface, la composition de l'atmosphère, la température et l'hygrométrie ambiantes, les caractéristiques des vents et des pluies et l'exposition de l'élément métallique concerné.

Une approche simple d'indication d'apparition de la corrosion atmosphérique serait de stipuler que lorsque la température de surface d'un métal est égale à la température de rosée de l'air, il y a une forte probabilité que le métal se corrode. Le temps cumulé τ_{corr} où ces conditions sont atteintes sera comptabilisé pour la prédiction de cette altération.

Les phénomènes complexes de corrosion du béton par carbonatation ou par ions chlorures ne sont pas étudiés dans notre approche.

Modèle	AIE Annexe 14	Time of Wetness	Modèle VTT	Courbes isoplèthes	Bio-hyothermal
Influence de T	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Influence de HR	Indirectement	Oui	Oui	Oui	Oui
Prise en compte des matériaux	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Statique (S) ou Dynamique (D)	S	S	D	D (modéré)	D
Paramètres d'entrées	$T_{\text{int}}, T_{\text{ext}}, T_{\text{sint}}$	φ_{int}	$T_{\text{int}}, \varphi_{\text{int}}$	$T_{\text{int}}, \varphi_{\text{int}}$	$T_{\text{int}}, \varphi_{\text{int}}$ & bilan hydrique des spores
Indicateurs	$\tau = \frac{T_{\text{min}} - T_c}{T_i - T_c} \geq 0.7$	Ratio de temps où $\varphi_{\text{int}} > 80\%$	Index de moisissure M	Courbes isoplèthes	Teneur en eau minimale du spore
Couplage avec un modèle Bâtiment	Non	Non	Oui	ESP-r	Wufi-bio

Tableau 1. Principaux paramètres utilisés par les modèles de développement de moisissures (d'après [Ver 11])

7. LA DÉGRADATION DES AMBIANCES INTÉRIEURES

L'humidité de l'air est un élément important pour la qualité des ambiances intérieures des bâtiments. Elle peut avoir une action directe sur l'homme en étant un paramètre clé du confort thermique et peut agir indirectement sur la qualité de l'air intérieur en favorisant le développement d'agents nocifs.

7.1. Les actions directes : le confort hygro-thermique des occupants

Le premier des enjeux du confort thermique est d'assurer le bien-être de l'occupant dans son cadre bâti. La société américaine ASHRAE définit le confort thermique comme l'ensemble des conditions requises pour que les occupants d'un bâtiment soient satisfaits de l'ambiance thermique.

À l'heure actuelle, il existe deux approches pour la définition du confort thermique. L'approche statique ou d'équilibre thermique de l'homme et l'approche adaptative ([DJO 10],[MOU 07]).

L'approche statique est basée sur le modèle expérimental de FANGER. Les indicateurs PMV (Predicted Mean Vote) et PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) permettent de qualifier les ambiances thermiques ressenties par les occupants. La norme NF ISO 7730 se base sur cette approche. BRAGER définit l'approche adaptative en s'appuyant sur le fait que l'être humain n'est pas passif face à son environnement. Il intervient activement pour créer ses conditions de confort. La norme NF EN 15251 a basé des limites de températures opératives sur cette approche.

Pour l'approche adaptative, l'humidité relative n'est pas un paramètre intrinsèque du modèle. Le modèle empirique de FANGER intègre l'humidité comme paramètre de calcul du PMV/PPD où le PMV se calcule selon la formule :

$$PMV = [0.303 \cdot \exp(-0.036 \cdot Met) + 0.028] \cdot L$$

Où Met (W/m^2) est la production métabolique du corps et L l'écart dans le bilan thermique entre chaleur produite et perdue (W/m^2), dépendant de T , ϕ_{int} , Met , Clo , v_a .

Les occupants sont insatisfaits de l'ambiance lorsque le PMV n'est pas dans la plage $[-1;1]$. Comme critère de mauvaise ambiance thermique pour l'occupant, nous proposons d'utiliser le modèle de Fanger et de comptabiliser le temps cumulé τ_{conf} de période d'insatisfaction soit :

$$\tau_{conf} = \int_t dt, PMV \notin [-1;1]$$

7.2. Les actions indirectes : la qualité de l'air intérieur

BAUGHMAN et ARENS [BAU 96], dressent un état de l'art des polluants intérieurs dégradant la qualité de l'air intérieur (QAI) et ayant un impact sur la santé de l'homme à cause de l'humidité intérieure. Seul les effets des humidités importantes sur la santé sont pris en compte dans ces travaux.

Ces effets sont soit liés au développement d'agents biologiques (moisissures, champignons..., etc.) en milieu humide, soit liés à l'interaction de l'humidité avec des polluants abiotiques (particules).

Il peut y avoir 5 catégories de polluants, ayant diverses formes de manifestation sur l'homme : bactéries, virus, champignons, particules et acariens.

Les conditions d'apparition des champignons et moisissures ont déjà été abordés au paragraphe 6.1. Elles ne seront pas reprises.

L'humidité relative est un paramètre influent sur la qualité de l'air intérieur car elle peut favoriser la prolifération d'acariens, la survie des virus et bactéries ou diminuer la concentrations de particules polluantes telles que l'ozone. À ce jour, aucune étude ne modélise l'interaction entre l'humidité et ces polluant. Toutefois, une plage d'humidité optimale pour une qualité de l'air intérieur saine est admise et rappelée sur la figure suivante :

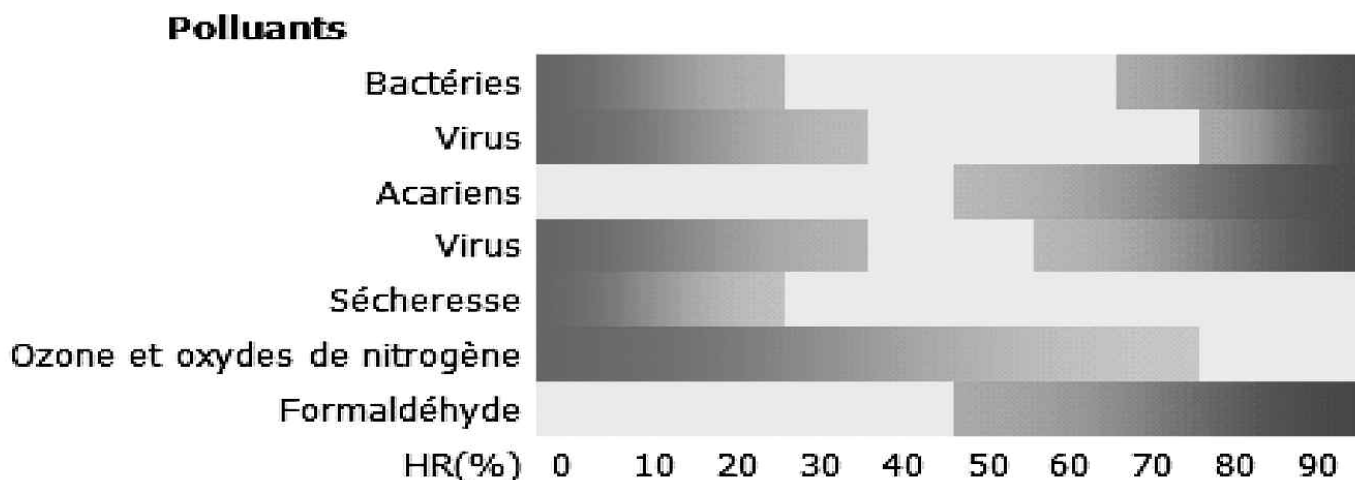


Figure 8 : Plages d'humidité favorable à la croissance de polluants [ROU 04]

Les zones bleues et rouges correspondent respectivement aux zones de faibles et fortes humidité relative favorables à la croissance de polluants. La plage d'humidité de 40-60% est une plage favorable à une qualité de l'air intérieur saine. Pour qualifier l'apparition de pathologies sur la qualité de l'air, nous proposons donc d'évaluer le temps τ_{QAI} où l'humidité relative sort de cette plage, traduit par la formule :

$$\tau_{IAQ} = \int_t dt, \varphi \notin [0.4; 0.6]$$

8. PROPOSITION DE FACTEURS INFLUENÇANT L'APPARITION DE PATHOLOGIES

Une liste exhaustive des pathologies liées à l'humidité a été réalisée. L'apparition d'une altération dépend de la satisfaction d'un critère qualifié par un facteur gouvernant. Ce dernier est assujéti à plusieurs paramètres d'entrée, dont les caractéristiques physiques du matériau.

L'ensemble de ces paramètres d'entrée, facteurs gouvernant et critères ont été synthétisés dans le tableau 2. Ils forment des indicateurs d'apparition de pathologies qui dépendent fortement des champs hygrothermiques des matériaux de l'enveloppe ou de l'ambiance du bâtiment.

9. CONCLUSION

Ce travail a permis de dresser un état de l'art et des connaissances des problèmes liés à l'humidité rencontrés dans le bâtiment pouvant avoir un impact sur l'enveloppe, la qualité de l'ambiance intérieure et la santé de l'occupant. Ce travail a cherché à être le plus exhaustif possible au tra-

vers des différents domaines abordés pour établir des indicateurs adaptés qui pourront être regroupé dans un outil global. L'objectif étant, dans une première approche, de prédire les conditions de risque et non de modéliser précisément l'apparition d'une pathologie.

Nous avons donc constaté que l'ensemble des indicateurs dépend fortement des champs hygrothermiques des matériaux de l'enveloppe ou des ambiances. Il est donc nécessaire de les associer à des modèles de simulation thermo-hygro-aéraulique des bâtiments pour constituer un outil global de prédiction des pathologies.

Les prochains travaux se concentreront sur le choix et la précision des modèles de simulations. En effet, il est important qu'ils prennent en compte les points sensibles, tels que les ponts thermiques, où les déperditions sont augmentées et les risques d'apparition de pathologies accrus. Une fois le modèle réalisé, une étude de sensibilité pourra être menée sur les facteurs gouvernants proposés dans cet article afin de les valider. Nous travaillerons aussi sur la combinaison des modes constructifs et aux durées d'exposition pour affiner les critères proposés dans le tableau 2.

La réalisation de cet outil global de prévention des pathologies liées à l'humidité dans les bâtiments s'inscrit dans le cadre du programme de recherche ANR Humibatex (2012-2014). Celui-ci sera accompagné d'un guide d'aide à la réhabilitation des bâtiments à destination des professionnels de la construction, alimenté par un certain nombre de retour d'expérience sur des opérations.

10. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été en partie financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au travers du programme Bâtiments et Villes Durables (projet HUMIBATex n°ANR-11-BVD).

Pathologies	Données d'entrée	Propriété des matériaux	Paramètres gouvernant	Critère
Altérations des propriétés mécaniques	$R_{initial}, w, R_{crit}$	Variations $R_{mec} = f(w)$	R_{mec}	$R_{mec}(w) < R_{crit}$
Altérations des propriétés thermiques	λ_0, w, b	Variations $\lambda = f(w)$	$\tau_{dep.th.}$	$U(w) < 0.05 \cdot U_0$
Variations dimensionnelles	$E_{initial}, v_{initial}, \beta, w$	Variation $E(w)$, et $v(w)$	σ	$\sigma > R_{compression}$ ou $\sigma > R_{traction}$
Gel	T and w	R_{gel}	N_{gel} nombre de cycle de gel	$N_{gel} < R_{gel}$
Corrosion	T dans le matériau	—	τ_{corr}	$T = T_{rosée}$
Moisissures	T, φ dans le matériau	sensibilité aux proliférations biologiques	index de moisissures M	$M > 3$, moisissures observables visuellement
Polluant	φ_{int}	—	τ_{QAI}	$\varphi_{int} \notin [0.4; 0.6]$
Confort hygrothermique	T, φ_{int} , Met, Clo, v_a	—	τ_{conf}	$PMV \notin [-1; 1]$

Tableau 2. Synthèse des facteurs d'apparition de pathologie

11. BIBLIOGRAPHIE

- [AGE 89] Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat. & Collombet, R., 1989. *L'Humidité des bâtiments anciens : causes et effets, diagnostic et remèdes* 2^e éd. mise à jour /., Paris : Éditions du Moniteur.
- Baughman, A.V. & Arens, E.A., 1996. Indoor Humidity and Human Health - Part I: Literature review of health effects of humidity-influenced indoor Pollutants. *ASHRAE transactions : Research*, 102(Part 1.).
- Beck, K. et al., 2003. Characterization, water transfer properties and deterioration in tuffeau: building material in the Loire valley—France. *Building and Environment*, 38(9–10), p.1151–1162.
- Beck, K., 2006. *Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*. Orléans : Université d'Orléans.
- Chereches, M., 2008. Étude expérimentale sur la conductivité thermique des matériaux humides. In XXVI^e rencontres universitaires de Génie Civil. Nancy.
- Coignet, J., 2006. *La maison ancienne* Nouvelle édition, Paris : Eyrolles.
- Djongyang, N., Tchinda, R. & Njomo, D., 2010. Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), p.2626–2640.
- Gonzalez, I.J. & Scherer, George W., 2004. Effect of swelling inhibitors on the swelling and stress relaxation of clay bearing stones. *Environmental Geology*, 46:364–377(DOI 10.1007).
- Kühnel, 2004. Cause and consequence: volume changes behind building material deterioration. *Materials Characterization*, 53(2–4), p.171–180.
- KÜNZEL, H.M. & KIESSL, K., 1996. Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(1), p.159–167.
- Mamillan, M., 1994. *Restauration des bâtiments en pierre*, Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics).
- Moujalled, B., 2007. *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés*. Lyon : Institut des Sciences appliquées de Lyon.
- Rodrigues, M.F.S., Teixeira, J.M.C. & Cardoso, J.C.P., 2011. Buildings envelope anomalies: A visual survey methodology. *Construction and Building Materials*, 25(5), p.2741–2750.
- Scherer, Georges W., 2004. Stress from crystallization of salt. *Cement and Concrete Research*, 34(9), p.1613–1624.
- Veran-Tissoires, S., 2011. *Cristallisation discrète à la surface ou à l'intérieur d'un milieu poreux*. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Vereecken, E., 2011. Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Building and Environment*.