

19<sup>e</sup> Edition des Journées scientifiques  
du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton  
(RF)<sup>2</sup>B

---

SIAME, Anglet, France  
12 et 13 juillet 2018

## **Interactions microorganismes-matériaux de construction : aperçu et perspectives de recherche.**

T. Verdier<sup>A</sup>, A. Bertron<sup>A</sup>

<sup>A</sup> LMDC, Université de Toulouse, INSA/UPS Génie Civil, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 04 France.

**RÉSUMÉ** : Dans certains environnements, les microorganismes sont susceptibles d'altérer significativement la durabilité et/ou les propriétés de service des matériaux et structures. Certaines espèces microbiennes sont capables de produire des métabolites particulièrement agressifs pour les matériaux, cimentaires notamment, et dégrader leurs caractéristiques physico-chimiques et mécaniques. La prolifération de micro-algues et champignons sur les façades extérieures des bâtiments entraîne également des désordres esthétiques. Dans l'environnement intérieur, bactéries et champignons peuvent produire des toxines aérotransportables dangereuses pour la santé humaine. Les conditions favorables à leur développement, principalement humidité et source nutritive, sont satisfaites dans des contextes très variés. Ces problématiques font l'objet d'un nombre croissant de travaux de recherche à l'échelle mondiale. Cet article vise à présenter une vue d'ensemble succincte des différents sujets d'intérêt en considérant plus particulièrement celui de la prolifération microbienne à l'intérieur des bâtiments.

### **1. INTRODUCTION**

Les matériaux de constructions sont exposés aux microorganismes dans différents contextes, et plus particulièrement les environnements dans lesquels les taux d'humidité sont élevés. La prolifération et/ou l'activité bactérienne des microorganismes peut entraîner des effets néfastes sur les propriétés physico-chimiques, mécaniques (biodétérioration) et esthétiques des matériaux. En conditions intérieures, l'aérosolisation de contaminants aériens (bioaérosols) peut être dangereuse pour la santé humaine (Verdier et al., 2016). Dans certains cas, en revanche les microorganismes peuvent avoir des effets bénéfiques sur les matériaux cimentaires. Ils peuvent par exemple être utilisés comme moyen de protection ou de réparation des bétons (Jonkers et al., 2010; Wiktor and Jonkers, 2011). Par ailleurs, la prolifération des microorganismes à la surface des bétons peut être recherchée (murs végétaux, bétons pour récifs artificiels ou infrastructures marines, par exemple) pour des raisons esthétiques (avec d'autres avantages, notamment en termes de comportement hygrothermique des bâtiments) ou pour réduire l'impact environnemental de la construction de structures. Cette thématique des bétons à bio-réceptivité améliorée ou « bétons biogènes » correspond à des enjeux récents de recherche et constitue un point d'intérêt fort des chercheurs et industriels (Bertron, 2014; Bertron and Jonkers, 2018). Quel que soit le contexte, leur prolifération sur les matériaux de

construction préoccupe de plus en plus la communauté scientifique. Le présent papier se propose de donner un aperçu des différentes problématiques liées au développement des microorganismes sur les matériaux de construction et leur effet néfaste. Une attention particulière est portée sur le contexte de l'environnement intérieur, incluant (i) une présentation et discussion des méthodologies d'échantillonnage et d'analyse pour la caractérisation des microorganismes sur support et notamment sur matériaux de construction, (ii) un recensement des microorganismes les plus souvent identifiés et (iii) une synthèse des facteurs déterminant de leur croissance. Les manques actuels de la littérature scientifique et les perspectives de recherche sont également présentés.

## 2. LA BIODÉTÉRIORATION

Le phénomène de biodétérioration touche de nombreux ouvrages dans une grande variété de contextes. C'est le cas des structures au contact de milieux aqueux agressifs contenant des microorganismes tels que les eaux usées, les eaux de mers, les environnements agricoles ou de l'agro-industrie, et les effluents de l'industrie (Bertron, 2014), des bâtiments très humides ou ayant subi des dégâts des eaux (Johansson et al., 2012; Pasanen, 2001), des monuments historiques (Warscheid and Braams, 2000), etc. Les structures sont soumises à des phénomènes de détérioration chimique et physique induites par l'activité de microorganismes. Une grande variété d'espèces peut produire des métabolites qui sont particulièrement agressifs pour les matériaux, notamment pour les matériaux cimentaires (acides organiques, CO<sub>2</sub>, composés soufrés, etc.) (Bertron et al., 2005; Grengg et al., 2015; Larreur-Cayol et al., 2011; Peyre Lavigne et al., 2015; Voegel et al., 2016). D'autres organismes, parmi les mycètes notamment, sécrètent des enzymes spécifiques qui détruisent les matériaux à base de cellulose ou de pectine (papier peint, bois, Placoplatre...) (Olsson et al., 2003). Il a également été montré que certains acides organiques produits par les microorganismes faisaient partie des principaux agents de biodétérioration de la pierre, des roches et des minéraux (Warscheid and Braams, 2000). Par ailleurs, le mode de croissance le plus répandu des microorganismes, le biofilm, génère localement de hautes concentration en composés agressifs pour les matériaux (Magniont et al., 2011; Prescott et al., 2010). Certaines espèces de mycètes filamenteux se développent par propagation des hyphes qui peuvent pénétrer dans la matrice cimentaire via les macro- et microfissures et accentuer les contraintes dans le matériau (Gu et al., 1998; Wiktor et al., 2010). Les conséquences de la biodétérioration des matériaux par l'action des microorganismes sont variés : diminution de l'alcalinité, érosion, décalcification, corrosion des armatures, diminution de l'étanchéité à l'eau et/ou à l'air, effondrement, etc. et conduisent à une augmentation significative des coûts de maintenance et/ou réparation (Bertron, 2014).

La prolifération de microorganismes sur les façades de bâtiments et de monuments engendre des problèmes d'ordre esthétique, via le développement de salissures d'aspect et de couleur variées (rouge, verte, noire...). Les coûts associés en entretien et nettoyage des ouvrages sont là aussi significatifs. Les organismes photo-litho-autotrophes, notamment les algues et les cyanobactéries, sont généralement les premiers colonisateurs (Warscheid and Braams, 2000). Ils utilisent le rayonnement solaire comme source d'énergie et le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère pour leur besoin en carbone et se développent sur toutes les surfaces minérales (pierre, tuiles, béton, mortier...) exposées à une humidité élevée (ruissellement, par exemple). D'autres organismes peuvent ensuite coloniser le substrat, tels que des mycètes ou des lichens, qui sont des associations symbiotiques entre un mycète et une algue ou cyanobactérie, et induire des dommages minéralogiques et micro-structuraux (Bertron, 2014). Les recherches portent aujourd'hui sur l'étude des mécanismes de colonisation (Dubosc et al., 2001; Escadeillas et al., 2009; Giovannacci et al., 2013; Tran et al., 2012) et sur le développement de solutions pour la protection des façades contre ces proliférations (Martinez et al., 2014; Maury-Ramirez et al., 2013; Urzi and De Leo, 2007).

### **3. PROLIFÉRATION MICROBIENNE SUR MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION À L'INTÉRIEUR DES BATIMENTS**

#### **3.1 Contexte**

La dégradation de la qualité de l'air intérieur (QAI) est une préoccupation grandissante des organisations de santé dans le monde entier et les microorganismes ou leurs composants sont classés parmi les trois agents polluants majeurs (Verdier et al., 2014a; WHO, 2009). Leur contribution au syndrome du bâtiment malsain (SBS – Sick Building Syndrome) et aux BRI – Building-Related Illnesses (sans équivalent français) est souvent rapportée dans la littérature (Flannigan et al., 2011; Samson et al., 1994). Certains microorganismes sont capables de libérer des particules aérotransportables qui peuvent être dangereux pour la santé humaine (Andersson et al., 1997; Lacaze, 2016; Samson et al., 1994; Sharpe et al., 2016; Torvinen et al., 2006). Une fois aérosolisées, l'ensemble de ces contaminants microbiens est qualifié de bioaérosol. Les bioaérosols regroupent toutes les particules aériennes vivantes ou produites par des organismes vivants telles que les microorganismes (bactéries, mycètes, virus, etc.), les fragments microbiens, les spores, les sous-produits du métabolisme microbien (allergènes, toxines), etc (Fröhlich-Nowoisky et al., 2016). L'inhalation est une voie possible de transmission aux humains. En fonction de leur taille, les particules peuvent atteindre des zones différentes du système respiratoire. Les particules respirables sont en dessous de 5 µm (taille de la plupart des microorganismes et des spores) et les plus dangereuses pour la santé humaine sont inférieures à 2,5 µm (mycotoxines, mVOC, fragments...) (Burrell, 1991; Górný, 2004). De sérieux troubles de la santé incluant irritations, infections, allergies, etc. ont été observés chez des occupants fréquemment exposés à des bioaérosols (Flannigan et al., 2011; Parat et al., 1995). Les impacts économiques et sociaux qui en résultent sont importants (Gutarowska and Piotrowska, 2007; Mudarri and Fisk, 2007). De nombreuses études ont déjà montré que les matériaux de construction de l'environnement intérieur pouvaient devenir des sites de prolifération microbienne (Flannigan et al., 2011; Lacaze, 2016; Spilak et al., 2015). Les conditions favorables à leur croissance sont facilement réunies dans les environnements humides ou ayant subi un accident hydrique et les matériaux de construction deviennent ainsi de véritables foyers de particules microbiennes susceptibles d'être aérosolisées. La littérature souligne l'importance d'étudier la prolifération microbienne sur matériaux en complémentarité des prélèvements aériens (Madsen et al., 2005; Raw et al., 1999). Ces études ont montré que l'identification des microorganismes issus de prélèvements directs sur matériaux permettait de fournir des informations pertinentes sur les sources potentielles de bioaérosols. Cependant, même si l'association entre les troubles de la santé des occupants et la présence de microorganismes sur les surfaces intérieures est reconnue, aucune relation de cause à effet n'a encore été établie (Verdier et al., 2016). Des études doivent encore être menées, notamment sur les mécanismes de l'aérosolisation des particules microbiennes. Il s'agit d'un phénomène complexe, régi par de nombreux paramètres tels que la nature des particules libérées (taille, forme...), le substrat de colonisation, les conditions hygrométriques, le type et l'âge des microorganismes, l'activité du bâtiment, etc.

#### **3.2 Méthodologies de caractérisation des communautés microbiennes sur matériaux de construction**

Il existe de nombreuses méthodes de prélèvement de populations microbiennes sur surface solide. Les principales retrouvées dans la littérature sont l'écouvillonnage, l'échantillonnage en vrac, le prélèvement par adhésif et le prélèvement par gélose de contact. Bien que plusieurs de ces méthodes aient été testées afin d'évaluer leur rendement de collecte sur matériaux inertes et non poreux (verre, acier, plastique, etc.), peu d'études se focalisent sur les matériaux de construction, plus poreux et rugueux comme le béton, les enduits, les mortiers, les plaques de plâtre. En France, un premier consensus avait été établi en 2006 par le Conseil Supérieur de l'Hygiène Publique de France sur la méthodologie des prélèvements, qui préconisait l'utilisation, lors d'investigations microbiologiques sur les surfaces de l'environnement intérieur, d'au moins deux des techniques d'échantillonnage suivantes : écouvillon, échantillonnage en vrac, adhésif, impression (gélose contact) (CSHPF, 2006). De nombreux auteurs soulignaient le besoin de normaliser les protocoles de prélèvement et d'analyse des microorganismes sur les matériaux de construction. En février 2014 est apparu la norme (ISO 16000-21, 2014), relative à l'air intérieur, pour la détection et le dénombrement des moisissures par échantillonnage à partir de matériaux. La norme précise que les méthodes d'échantillonnage

préconisées (écouvillon, adhésif, boîte de contact ou échantillonnage global) doivent être choisies en fonction de l'objectif de l'étude. Selon un rapport récent de l'Anses, les systèmes de prélèvement en surface n'ont pas évolué sur les 10 dernières années et se limitent à une caractérisation ponctuelle sur la zone de prélèvement (Anses, 2016). En outre, la littérature ne montre que peu d'études comparatives des différentes méthodes de prélèvement sur matériaux de construction et peu de travaux sur l'influence du type de surface sur l'efficacité du prélèvement. L'influence de l'espèce, du stade d'adhésion et du processus de formation de biofilm des microorganismes sur le rendement de collecte n'ont également été que peu étudiés. Concernant l'analyse, là encore, le choix d'une méthode dépend essentiellement du but de l'étude. Différents types de méthode sont utilisés dans la littérature : les méthodes basées sur la culture des microorganismes, les méthodes d'observation, les méthodes chimiques et les méthodes moléculaires (Verdier et al., 2014a). Chaque méthode présente des avantages (rapidité, simplicité d'exécution, coût...) et des inconvénients (limite de détection, temps d'exécution, représentativité...). La culture des microorganismes, par exemple, est beaucoup utilisée dans la recherche. Elle est relativement simple à mettre en place et facilite la comparaison des résultats. Cependant, ces méthodes sont souvent très chronophages (dans le cas des mycètes par exemple), elles ne permettent de détecter qu'une fraction des microorganismes (viables ET cultivables) et des biais existent dus à l'opérateur et au choix des milieux de culture (Verdier et al., 2014a). Plusieurs auteurs soulignent la nécessité de combiner les méthodes d'analyse pour donner une vue la plus précise possible des communautés microbiennes présentes sur les matériaux de construction (Verdier et al., 2014a).

### 3.3 Synthèse des microorganismes identifiés sur les matériaux de construction

Une grande variété de microorganismes a été identifiée sur les matériaux de construction depuis une trentaine d'années. Bien qu'il soit difficile d'établir une corrélation directe entre la prolifération en surface et les maladies constatées chez les occupants, plusieurs auteurs ont indiqué que l'estimation du niveau de contamination des matériaux fournit une bonne image des sources de danger potentiel pour les personnes exposées, que ce soit par l'identification ou par la quantification des espèces, des genres et des contaminants microbiens (Andersson et al., 1997; Hyvärinen et al., 2002; Lappalainen et al., 2001). Selon la littérature, les genres fongiques les plus souvent détectés sur matériaux de construction sont *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium* et *Stachybotrys*. Les espèces associées sont *Aspergillus versicolor*, *A. niger*, *A. fumigatus*, *Cladosporium herbarum*, *C. shpaerospermum*, *C. cladosporioides*, *Penicillium chrysogenum*, *Stachybotrys chartarum*. Des levures sont également détectées dans de nombreuses études ainsi que des Streptomyces (bactéries) (Verdier et al., 2016). Il convient de noter que ces résultats présentent seulement les genres identifiés le plus souvent mais pas la fréquence de détection. Par exemple, le genre *Stachybotrys* est retrouvé dans de nombreuses études mais dans seulement 20% des échantillons. Toutefois, on constate généralement que l'occurrence des genres les plus retrouvés est plus élevée que pour les autres microorganismes. Par exemple, le genre *Penicillium* est retrouvé dans plus de 20% des échantillons, jusqu'à 98%. On notera également que les genres les plus retrouvés (*Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, etc.) sont également les genres les plus recherchés... Des similarités peuvent également être observées entre les microorganismes trouvés sur les matériaux et ceux issus de prélèvements de l'air intérieur. Les genres *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Alternaria*, ainsi que des levures sont les plus souvent détectés dans l'air intérieur (Bellanger et al., 2009; Duchaine and Mériaux, 2001). Certaines espèces rencontrées, de par leur rôle allergisant et toxique reconnu, font notamment partie des espèces potentiellement pathogènes listées par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France et par l'Association Santé Environnement France (ASEF, 2012; CSHPF, 2006; Reboux et al., 2010) et contribuent au syndrome du bâtiment malsain (Li and Yang, 2004).

Divers travaux ont été menés sur les corrélations entre le type de matériau substrat et les microorganismes colonisateurs. En mettant de côté des facteurs ambiants tel que l'humidité et la température, la prévalence de certaines populations dépend de ses besoins nutritifs et de la nature du matériau. L'étude de la littérature révèle cependant que les genres *Penicillium* et *Aspergillus* sont les

plus souvent identifiés, tous types de matériau confondus : isolant, plaque de plâtre, bois, faux-plafond, surface peinte, béton, etc. Des auteurs ont observés que les espèces *P. chrysogenum* et *A. versicolor* sont les plus rencontrées dans les bâtiments ayant subi des accidents hydriques (Andersen et al., 2011). Majoritairement, les matériaux celluloseux sont les plus sensibles à la contamination microbienne car ils contiennent des polymères organiques susceptibles d'être utilisés et dégradés par les microorganismes (amidon, cellulose, pectine, lignine, etc.). Un grand nombre d'espèces est capable de dégrader les matériaux à base de cellulose (Gutarowska et al., 2010; Hoang et al., 2010; Lacaze, 2016). Les plaques de plâtre et de gypse sont composées de carton et de colle. Ils contiennent donc de la cellulose qui fournit une grande source de carbone pour les microorganismes. Ils sont également reconnus pour leur capacité à retenir l'humidité. En plus de *Penicillium* et *Aspergillus*, les genres *Chaetomium*, *Eurotium* et *Stachybotrys* ont également été retrouvés sur ce type de matériau (Flannigan et al., 2011). Des mycobactéries et des Streptomyces sont aussi souvent identifiés sur les plaques à base de gypse (Andersson et al., 1997; Rintala et al., 2008; Torvinen et al., 2006). En mettant de côté les environnements particuliers (réseaux d'assainissement, méthaniseurs...), les matériaux minéraux tels que la brique, le mortier ou le béton sont naturellement colonisés par un petit nombre d'espèces différentes. Le genre *Aspergillus* a été identifié sur ces matériaux, ainsi que les espèces *A. versicolor*, *Penicillium chrysogenum* et *Eurotium herbariorum* (Andersen et al., 2011; Doll, 2002; Hyvärinen et al., 2002; Prezant, 2008). Concernant les autres types de matériau (plastiques, joints, résines, formaldéhyde d'isolation, etc.) on retrouve majoritairement les genres *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Alternaria* et *Penicillium* (Bissett, 1987; Caneva et al., 2003). Selon Flannigan et al., tous les matériaux sont susceptibles d'être les cibles d'une prolifération microbienne, s'il y a suffisamment d'eau disponible (Flannigan et al., 2011).

### 3.4 Facteurs de croissance

#### 3.4.1 Eau

Le rôle déterminant de l'eau sur le développement microbien fait l'unanimité dans la littérature. Il s'agit du premier facteur limitant ou favorisant la prolifération des microorganismes sur les matériaux de construction. Dans le domaine de la microbiologie, l'activité de l'eau ( $a_w$ ) est l'indicateur utilisé pour renseigner sur la quantité d'eau d'un milieu - liquide ou solide - qui est disponible pour les microorganismes. Elle est liée au potentiel hydrique, impactant la pression osmotique qui agit sur les cellules. Dans un environnement clos, lorsque l'équilibre hydrique est atteint entre l'air ambiant et un matériau, l'activité de l'eau du matériau est égale au 1/100 de l'humidité relative d'équilibre. Ainsi, selon le domaine de recherche, on trouvera les notations  $a_w$  ou ERH (Equilibrium Relative Humidity) pour parler de l'eau « libre », disponible pour les microorganismes. En outre, plusieurs études ont montré que l'humidité relative à l'équilibre était un meilleur indicateur de prolifération microbienne que la teneur en eau d'un matériau (Flannigan et al., 2011; Pasanen, 2001). Pour la plupart des microorganismes, l'activité de l'eau optimale est située entre 0,9 et 0,99 (Ayerst, 1969). Cependant, le minimum requis pour un développement peut être bien inférieur. La croissance n'est généralement plus limitée par  $a_w$  pour des valeurs supérieures à 0,7 pour la plupart des espèces (Brown, 1976; IEA, 1991). L'activité de l'eau requise pour la croissance est dépendante de paramètres tels que la présence de nutriments et la température. Selon le type de matériau, la quantité d'eau disponible nécessaire à la croissance peut diminuer. Afin de définir des indicateurs fiables de développement microbien sur les matériaux de construction de l'environnement intérieur, des auteurs ont étudié les conditions d'humidité critiques, c'est-à-dire les humidités relatives minimales permettant le développement microbien pour divers type de matériaux (Johansson, 2013; Johansson et al., 2013, 2012). L'étude de la littérature montre que les matériaux de construction deviennent la cible de développement microbien pour des humidités relatives d'équilibre proches de 75 % pour les matériaux à base de bois, 80 % pour les matériaux de type plaque de plâtre et 90 % pour les matériaux cimentaires et les matériaux d'isolation. La plupart des auteurs soulignent l'intérêt des mesures de l'humidité relative critique et le développement de modèles de prolifération basés sur son évolution (Adan, 1994; Thelandersson and Isaksson, 2013). Des études ont toutefois rapporté que la croissance

fongique était minimale sous les 85-95 % HRE sans conditions mouillantes (présence d'eau liquide dans le matériau) et que les événements mouillants (accidents hydriques) favorisaient la germination, la prolifération et la diversité microbienne sur les matériaux de construction (Black and Straube, 2007; Pasanen et al., 1991). En plus d'affecter la croissance microbienne, l'eau disponible impacte également la production de contaminants microbiens et, selon Cabral, une humidité élevée pourrait conduire au relargage de particules de taille plus petite dans l'air intérieur (Cabral, 2010). Certains auteurs suggèrent que le potentiel de toxicité pourrait par ailleurs être estimé par des mesures de  $a_w$  (Flannigan et al., 2011). Cependant, beaucoup de travaux sont encore nécessaires, surtout concernant l'aspect du processus d'aérosolisation des contaminants microbiens.

### 3.4.2 Matériaux et pH

La disponibilité en nutriment serait le deuxième facteur déterminant de la diversité fongique retrouvée sur les plaques de plâtre humides (Prezant, 2008). En effet, les substrats colonisés peuvent contenir des composés chimiques qui constituent une source nutritive pour les microorganismes, favorisant leur développement. Comme mentionné précédemment, les matériaux à base de cellulose sont plus sensibles à la prolifération que les matériaux inorganiques, car la cellulose et ses dérivés peuvent être utilisés par une grande variété de microorganismes. Outre la composition chimique, l'apport externe de poussière ou de substance organique peut également fournir des nutriments et augmenter le risque d'un développement microbien, même sur des matériaux qui ne sont pas naturellement sensibles à la biodégradation (Hoang et al., 2010). Une étude de Vacher et al. (Vacher et al., 2010) a montré qu'un substrat en aluminium, qui est un matériau non biodégradable, peut être la cible d'une croissance fongique soutenue lorsqu'il est recouvert d'une substance organique à une humidité relative élevée. Plusieurs études ont démontré que les sources de carbone ou les peintures peuvent également fournir des nutriments favorisant la croissance microbienne (Grant et al., 1989; Karunasena et al., 2001).

L'activité des ions hydrogène d'un substrat, traduit par le pH, a également un impact sur les microorganismes. La plupart des microorganismes connus se développent dans des environnements dont le pH est inférieur à 12. Les matériaux de construction avec des niveaux de pH dans la gamme 6-8 sont plus sensibles à la contamination et à la prolifération microbienne que les matériaux cimentaires, qui sont très alcalins (pH autour de 13) et donc relativement immunisés aux jeunes âges. Néanmoins, le phénomène de carbonatation conduit à la diminution du pH (de surface notamment) à des valeurs autour de 8-9, acceptables pour de nombreuses espèces. Plusieurs études ont montré que la bioréceptivité des matériaux cimentaires est significativement augmentée lorsque ceux-ci subissent une étape de carbonatation (Shirakawa et al., 2003; Wiktor et al., 2009).

### 3.4.3 Propriétés de surface

La croissance des microorganismes sur les matériaux de construction est largement impactée par la présence d'eau et de nutriments disponibles. Comme la plupart des matériaux de construction sont relativement rugueux et caractérisés par une porosité élevée, ils ont un comportement spécifique vis-à-vis de l'absorption d'eau. En outre, la rugosité et la porosité peuvent favoriser la fixation des nutriments contenus dans la poussière et les substances organiques résultant de l'activité d'un bâtiment. Plusieurs études ont mis en évidence que des matériaux poreux et rugueux sont plus sensibles à la croissance microbienne que des matériaux plus lisse (Becker et al., 1986; Tran et al., 2012). Des résultats sensiblement différents ont été observés par Adan : une diminution de la rugosité de surface accélère la croissance fongique sur des finitions à base de gypse (Adan, 1994). Selon l'étude, les processus interactifs entre les cellules sont promus par un élargissement des zones interfaciales des structures fongiques. De manière générale, la littérature supporte l'idée d'une influence de la porosité des substrats sur la croissance microbienne. Cependant, aucune corrélation claire n'a encore été établie. Les études abondent sur les mécanismes d'adhésion des

microorganismes aux substrats, sur l'influence de l'énergie de surface ou des interactions physico-électrochimiques, mais elles se concentrent principalement sur des matériaux non poreux tels que les métaux, les verres, les plastiques, etc. (Allion, 2004). Trop peu d'études ont été menées sur les matériaux de construction. Sans doute en raison de leur nature poreuse et de leur comportement vis-à-vis de l'eau, qui rendent les analyses d'autant plus complexes. Ce manque de connaissance fait obstruction à notre compréhension des mécanismes de croissance microbienne sur ces matériaux. Par conséquent, les interprétations et la prédiction de la croissance microbienne sont encore relativement difficiles et fragmentaires.

#### **4. PERSPECTIVES**

L'apparition de la norme ISO 16000-21 en février 2014 et du rapport de l'Anses en 2016 met en avant la prise de conscience et la volonté des pouvoirs publics de répondre aux problématiques soulevées par de nombreux chercheurs, en partie liées à l'uniformisation des méthodologies de prélèvement et d'analyse des surfaces. D'autres problématiques nécessitent également des travaux pour améliorer les connaissances sur les phénomènes qui relient la prolifération microbienne avec la dégradation des matériaux de construction et de la qualité de l'air intérieur. L'aérosolisation des biocontaminants par exemple, qui est un phénomène très complexe et dépend de nombreux facteurs. Des travaux ont notamment été réalisés sur l'influence de l'humidité, du flux d'air, du type de particules (Aleksic et al., 2017; Kanaani et al., 2009; Madsen, 2012) et sur le développement de modèles mathématiques (Gopalakrishnan et al., 2016). Cependant, l'intérêt suscité par le phénomène est relativement récent et d'autres études sont nécessaires pour appréhender l'ensemble des interactions qui le régissent. Ces travaux futurs permettraient d'observer les éventuelles corrélations entre bioaérosols et microorganismes présents sur les matériaux de construction.

L'étude de la prolifération microbienne sur les matériaux biosourcés fait également partie des problématiques émergentes. Dans un contexte de construction durable et à faible impact environnemental, la recherche sur la valorisation de matières végétales et/ou de sous-produits de l'agriculture (tige de tournesol, rafle de maïs, algue, chanvre...) dans les matériaux de construction s'est significativement développée ces 15 dernières années. En raison de la proportion élevée de matière organique qu'ils peuvent contenir, ces matériaux paraissent naturellement sensibles à la prolifération microbienne. À l'heure actuelle, relativement peu d'études ont été menées sur ce type de matériaux. Les travaux de Hoang et al. ont montré que la teneur en matière organique et en eau sont de bons indicateurs de prolifération pour ces matériaux (Hoang et al., 2010). Étonnamment, des études menées au cours du projet BIOTERRA, pour maîtriser la prolifération microbienne dans des produits biosourcés, ont montré que des matériaux biosourcés à base de terre crue et de matières végétales étaient sensibles à la prolifération fongique uniquement dans des conditions hygrométriques extrêmes, favorisant la croissance (93 %HR et 30 °C) (Laborel-Préneron, 2017; Laborel-Préneron et al., 2018). Les auteurs suggèrent que la prolifération fongique est activée par un événement mouillant (présence d'eau liquide pendant l'inoculation) plutôt que par la forte humidité relative. Ces constatations sont encourageantes vis-à-vis de l'utilisation de ces matériaux dans les bâtiments. Toutefois, leur nature est soumise à une grande variabilité selon les matières premières utilisées. Il est donc essentiel de développer des outils méthodologiques efficaces et adaptables aux ressources qui permettraient d'identifier les paramètres critiques du développement microbien sur ces matériaux (HR, température, temps d'exposition, etc.).

Depuis la prise de conscience de l'impact des microorganismes sur la dégradation de la QAI par les instances sanitaires, des stratégies et des recommandations pour des bonnes pratiques ont été émises afin de limiter la prolifération microbienne dans les bâtiments, telles que l'aération quotidienne, la mise en place d'épurateur d'air, etc. Néanmoins, ces solutions ne sont pas adaptées à tous les logements ou sont parfois onéreuses. Dans ce contexte, la fonctionnalisation des matériaux de construction pour limiter voire inhiber la prolifération microbienne est une solution envisageable. Depuis quelques années, diverses techniques ont été développées pour les matériaux de

construction, incluant des traitements dans la masse ou des revêtements à appliquer à la surface des matériaux. Les recherches se concentrent sur le développement de produits biocides (Shirakawa et al., 2010; Urzi and De Leo, 2007), de produits à base de nanoparticules d'oxydes métalliques (Ag, Cu...) (de Niederhåusern et al., 2013; Gutarowska et al., 2014; Shirakawa et al., 2013) ou encore de produits photocatalytiques, qui sont activés par la lumière (La Russa et al., 2014; Martinez et al., 2014; Maury-Ramirez et al., 2013, p. 2; Verdier et al., 2018, 2014b). De récents travaux explorent également le potentiel de solutions plus « vertes », respectueuses de l'environnement (Verdier et al., 2017). Les recherches sur ces solutions sont relativement récentes. Il est essentiel de poursuivre les travaux pour compléter nos connaissances des mécanismes d'action et des paramètres qui régissent leur efficacité antimicrobienne.

## 5. CONCLUSION

La prolifération microbienne sur les matériaux de construction est une thématique de recherche transversale, qui couvre des contextes variés. Leur développement sur les matériaux de construction a un impact significatif sur la durabilité des structures et sur la santé des usagers. Des projets de recherche sont en cours sur les phénomènes de biodétérioration dans les environnements agressifs et les études dans l'environnement intérieur doivent être poursuivies sur les aspects présentés dans cet article. En 2014, un comité technique international RILEM a été mis en place sur la thématique des interactions entre les matériaux de construction et les microorganismes (RILEM TC-253 MCI). Il est divisé en 4 groupes de travail : (i) détérioration des matériaux cimentaires dans différents contextes, (ii) colonisation des façades par les algues, (iii) prolifération microbienne dans l'environnement intérieur et (iv) matériaux cimentaires auto-réparant formulés à base de bactéries. Ce comité regroupe, à l'échelle mondiale, des chercheurs issus de domaines variés (génie civil, matériaux, chimie, microbiologie, procédés, etc.) qui ont pour objectif d'améliorer les connaissances sur les interactions entre les matériaux de construction et les microorganismes et de rédiger des recommandations adaptés à chaque environnement particulier. A l'échelle nationale, le groupe de travail AFGC Bétons et Microorganismes a vu le jour en 2018 et vise à fédérer la communauté française, académique et industrielle, sur ces sujets, afin, entre autres, de rédiger un ou plusieurs documents de synthèse présentant une vue d'ensemble des phénomènes, les recommandations sur les méthodes d'essais et sur les bonnes pratiques. Ces initiatives devraient contribuer à lever un certain nombre de verrous scientifiques liés à cette thématique.

## 6. RÉFÉRENCES

- Adan, O.C.G., 1994. On the fungal defacement of interior finishes. Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
- Aleksic, B., Draghi, M., Ritoux, S., Bailly, S., Lacroix, M., Oswald, I.P., Bailly, J.-D., Robine, E., 2017. Aerosolization of Mycotoxins after Growth of Toxinogenic Fungi on Wallpaper. *Appl. Environ. Microbiol.* 83, UNSP e01001-17.
- Allion, A., 2004. Environnement des bactéries et sensibilité aux biocides : mise au point d'une technique rapide pour déterminer in situ l'efficacité bactéricide d'agents antimicrobiens. ENSIA (AgroParisTech).
- Andersen, B., Frisvad, J.C., Søndergaard, I., Rasmussen, I.S., Larsen, L.S., 2011. Associations between Fungal Species and Water-Damaged Building Materials. *Appl. Environ. Microbiol.* 77, 4180–4188.
- Andersson, M.A., Nikulin, M., Kõljalg, U., Andersson, M.C., Rainey, F., Reijula, K., Hintikka, E.L., Salkinoja-Salonen, M., 1997. Bacteria, molds, and toxins in water-damaged building materials. *Appl. Environ. Microbiol.* 63, 387–393.
- Anses, 2016. Moisissure dans le bâti. Avis de l'anses et rapport d'expertise du comité spécialisé « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » (No. 2014- SA-0016).

- ASEF, 2012. Pollution de l'air intérieur de l'habitat [WWW Document]. Assoc. Santé Environ. Fr. URL [http://www.asef-asso.fr/attachments/1141\\_Guide\\_air%20int%C3%A9rieur.pdf](http://www.asef-asso.fr/attachments/1141_Guide_air%20int%C3%A9rieur.pdf).
- Ayerst, G., 1969. The effects of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi. *J. Stored Prod. Res.* 5, 127–141.
- Becker, R., Puterman, M., Laks, J., 1986. The effect of porosity of emulsion paints on mould growth. *Durab. Build. Mater.* 3, 369–380.
- Bellanger, A.-P., Reboux, G., Roussel, S., Grenouillet, F., Didier-Scherer, E., Dalphin, J.-C., Millon, L., 2009. Indoor fungal contamination of moisture-damaged and allergic patient housing analysed using real-time PCR. *Lett. Appl. Microbiol.* 49, 260–266.
- Bertron, A., 2014. Understanding interactions between cementitious materials and microorganisms: a key to sustainable and safe concrete structures in various contexts. *Mater. Struct.* 47, 1787–1806.
- Bertron, A., Duchesne, J., Escadeillas, G., 2005. Accelerated tests of hardened cement pastes alteration by organic acids: analysis of the pH effect. *Cem. Concr. Res.* 35, 155–166.
- Bertron, A., Jonkers, H., 2018. Proceedings of RILEM TC 253-MCI International Conference Microorganisms-Cementitious Materials Interactions, Toulouse, France, RILEM. ed. Toulouse, France.
- Bissett, J., 1987. Fungi associated with urea-formaldehyde foam insulation in Canada. *Mycopathologia* 99, 47–56.
- Black, C., Straube, J., 2007. Mould Growth Experiments of Full Scale Wood Frame Wall Assemblies. Presented at the 11th Building Science and Technology Conference, Banff, Calgary, Banff, Calgary.
- Brown, A.D., 1976. Microbial water stress. *Bacteriol. Rev.* 40, 803–846.
- Burrell, R., 1991. Microbiological agents as health risks in indoor air. *Environ. Health Perspect.* 95, 29–34.
- Cabral, J.P.S., 2010. Can we use indoor fungi as bioindicators of indoor air quality? Historical perspectives and open questions. *Sci. Total Environ.* 408, 4285–95.
- Caneva, G., Maggi, O., Nugari, M.P., Pietrini, A.M., Piervittori, R., Ricci, S., Roccardi, A., 2003. The Biological Aerosol as a Factor of Biodeterioration, in: Mandrioli, P., Caneva, G., Sabbioni, C. (Eds.), *Cultural Heritage and Aerobiology*. Springer Netherlands, pp. 3–29.
- CSHPF, 2006. Contaminations fongiques en milieux intérieurs. Diagnostic, effet sur la santé respiratoire, conduite à tenir. (Santé). Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France.
- de Niederhäusern, S., Bondi, M., Bondioli, F., 2013. Self-Cleaning and Antibacteric Ceramic Tile Surface. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 10, 949–956.
- Doll, S.C., 2002. Determination of limiting conditions for fungal growth in the built environment. (Science). Harvard School of Public Health, Harvard School.
- Dubosc, A., Escadeillas, G., Blanc, P.J., 2001. Characterization of biological stains on external concrete walls and influence of concrete as underlying material. *Cem. Concr. Res.* 31, 1613–1617.
- Duchaine, C., Mériaux, A., 2001. The importance of combining air sampling and surface analysis when studying problematic houses for mold biodiversity determination. *Aerobiologia* 17, 121–125.
- Escadeillas, G., Bertron, A., Ringot, E., Blanc, P.J., Dubosc, A., 2009. Accelerated testing of biological stain growth on external concrete walls. Part 2: Quantification of growths. *Mater. Struct.* 42, 937.
- Flannigan, B., Samson, R.A., Miller, J.D., 2011. *Microorganisms in Home and Indoor Work Environments: Diversity, Health Impacts, Investigation and Control*, Second Edition. CRC Press.
- Fröhlich-Nowoisky, J., Kampf, C.J., Weber, B., Huffman, J.A., Pöhlker, C., Andreae, M.O., Lang-Yona, N., Burrows, S.M., Gunthe, S.S., Elbert, W., Su, H., Hoor, P., Thines, E., Hoffmann, T., Després, V.R., Pöschl, U., 2016. Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions. *Atmospheric Res.* 182, 346–376.

- Giovannacci, D., Leclaire, C., Horgnies, M., Ellmer, M., Mertz, J.D., Orial, G., Chen, J., Bousta, F., 2013. Algal colonization kinetics on roofing and façade tiles: Influence of physical parameters. *Constr. Build. Mater.* 48, 670–676.
- Gopalakrishnan, S., Devassikutty, A.K., Mathew, M., Ayyappan, D., Thiagarajan, S., Raghunathan, R., 2016. Passive Release of Fungal Spores from Synthetic Solid Waste Surfaces. *Aerosol Air Qual. Res.* 16, 1441–1451.
- Górny, R.L., 2004. Filamentous microorganisms and their fragments in indoor air—a review. *Ann Agric Env. Med* 11, 185–197.
- Grant, C., Hunter, C.A., Flannigan, B., Bravery, A.F., 1989. The moisture requirements of moulds isolated from domestic dwellings. *Int. Biodeterior.* 25, 259–284.
- Grengg, C., Mittermayr, F., Baldermann, A., Böttcher, M.E., Leis, A., Koraimann, G., Grunert, P., Dietzel, M., 2015. Microbiologically induced concrete corrosion: A case study from a combined sewer network. *Cem. Concr. Res.* 77, 16–25.
- Gu, J.-D., Ford, T.E., Berke, N.S., Mitchell, R., 1998. Biodeterioration of concrete by the fungus *Fusarium*. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 41, 101–109.
- Gutarowska, B., Pietrzak, K., Machnowski, W., Danielewicz, D., Szykowska, M., Konca, P., Surma-Slusarska, B., 2014. Application of Silver Nanoparticles for Disinfection of Materials to Protect Historical Objects. *Curr. Nanosci.* 10, 277–286.
- Gutarowska, B., Piotrowska, M., 2007. Methods of mycological analysis in buildings. *Build. Environ.* 42, 1843–1850.
- Gutarowska, B., Sulyok, M., Krska, R., 2010. A Study of the Toxicity of Moulds Isolated from Dwellings. *Indoor Built Environ.* 19, 668–675.
- Hoang, C.P., Kinney, K.A., Corsi, R.L., Szaniszló, P.J., 2010. Resistance of green building materials to fungal growth. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 64, 104–113.
- Hyvärinen, A., Meklin, T., Vepsäläinen, A., Nevalainen, A., 2002. Fungi and actinobacteria in moisture-damaged building materials — concentrations and diversity. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 49, 27–37.
- IEA, 1991. Condensation and Energy: Sourcebook. Report Annex XIV, chap 2: Mould (No. 1). International Energy Agency.
- ISO 16000-21, 2014. Air intérieur - Partie 21 : Détection et dénombrement des moisissures - Échantillonnage à partir de matériaux.
- Johansson, P., 2013. Determination of the Critical Moisture Level for Mould Growth on Building Materials. Lund University.
- Johansson, P., Ekstrand-Tobin, A., Svensson, T., Bok, G., 2012. Laboratory study to determine the critical moisture level for mould growth on building materials. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 73, 23–32.
- Johansson, P., Svensson, T., Ekstrand-Tobin, A., 2013. Validation of critical moisture conditions for mould growth on building materials. *Build. Environ.* 62, 201–209.
- Jonkers, H.M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., Schlangen, E., 2010. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecol. Eng., Special Issue: BioGeoCivil Engineering* 36, 230–235.
- Kanaani, H., Hargreaves, M., Ristovski, Z., Morawska, L., 2009. Fungal spore fragmentation as a function of airflow rates and fungal generation methods. *Atmos. Environ.* 43, 3725–3735.
- Karunasena, E., Markham, N., Brasel, T., Cooley, J.D., Straus, D.C., 2001. Evaluation of fungal growth on cellulose-containing and inorganic ceiling tile. *Mycopathologia* 150, 91–95.
- La Russa, M.F., Macchia, A., Ruffolo, S.A., De Leo, F., Barberio, M., Barone, P., Crisci, G.M., Urzì, C., 2014. Testing the antibacterial activity of doped TiO<sub>2</sub> for preventing biodeterioration of cultural heritage building materials. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 96, 87–96.
- Laborel-Préneron, A., 2017. Formulation and characterization of unfired clay bricks with plant aggregates. Université de Toulouse, Toulouse, France.

- Laborel-Préneron, A., Ouédraogo, K., Simons, A., Labat, M., Bertron, A., Magniont, C., Roques, C., Roux, C., Aubert, J.-E., 2018. Laboratory test to assess sensitivity of bio-based earth materials to fungal growth. *Build. Environ.* 142, 11–21.
- Lacaze, I., 2016. Etude des mécanismes de colonisation des produits de construction par les micromycètes (Microbiologie procaryote et eucaryote). Université Paris-Diderot, Paris.
- Lappalainen, S., Kähkönen, E., Loikkanen, P., Palomäki, E., Lindroos, O., Reijula, K., 2001. Evaluation of priorities for repairing in moisture-damaged school buildings in Finland. *Build. Environ.* 36, 981–986.
- Larreur-Cayol, S., Bertron, A., Escadeillas, G., 2011. Degradation of cement-based materials by various organic acids in agro-industrial waste-waters. *Cem. Concr. Res.* 41, 882–892.
- Li, D.-W., Yang, C.S., 2004. Fungal Contamination as a Major Contributor to Sick Building Syndrome. *Advanvec Appl. Microbiol.* 31–112.
- Madsen, A.M., 2012. Effects of Airflow and Changing Humidity on the Aerosolization of Respirable Fungal Fragments and Conidia of *Botrytis cinerea*. *Appl. Environ. Microbiol.* 78, 3999–4007.
- Madsen, A.M., Kruse, P., Schneider, T., 2005. Characterization of Microbial Particle Release from Biomass and Building Material Surfaces for Inhalation Exposure Risk Assessment. *Ann. Occup. Hyg.* 50, 175–187.
- Magniont, C., Coutand, M., Bertron, A., Cameleyre, X., Lafforgue, C., Beaufort, S., Escadeillas, G., 2011. A new test method to assess the bacterial deterioration of cementitious materials. *Cem. Concr. Res.* 41, 429–438.
- Martinez, T., Bertron, A., Escadeillas, G., Ringot, E., 2014. Algal growth inhibition on cement mortar: Efficiency of water repellent and photocatalytic treatments under UV/VIS illumination. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 89, 115–125.
- Maury-Ramirez, A., De Muynck, W., Stevens, R., Demeestere, K., De Belie, N., 2013. Titanium dioxide based strategies to prevent algal fouling on cementitious materials. *Cem. Concr. Compos.* 36, 93–100.
- Mudarri, D., Fisk, W.J., 2007. Public health and economic impact of dampness and mold. *Indoor Air* 17, 226–235.
- Olsson, L., Christensen, T.M.I.E., Hansen, K.P., Palmqvist, E.A., 2003. Influence of the carbon source on production of cellulases, hemicellulases and pectinases by *Trichoderma reesei* Rut C-30. *Enzyme Microb. Technol.* 33, 612–619.
- Parat, S., Perdrix, A., Mann, S., Cochet, C., 1995. A study of the relationship between airborne microbiological concentrations and symptoms in office in buildings, in: *Healthy Buildings*. Presented at the Healthy Buildings, Milan, pp. 1481–1486.
- Pasanen, A.-L., 2001. A Review: Fungal Exposure Assessment in Indoor Environments. *Indoor Air* 11, 87–98.
- Pasanen, A.-L., Kalliokoski, P., Pasanen, P., Jantunen, M.J., Nevalainen, A., 1991. Laboratory studies on the relationship between fungal growth and atmospheric temperature and humidity. *Environ. Int.* 17, 225–228.
- Peyre Lavigne, M., Bertron, A., Auer, L., Hernandez-Raquet, G., Foussard, J.-N., Escadeillas, G., Cockx, A., Paul, E., 2015. An innovative approach to reproduce the biodeterioration of industrial cementitious products in a sewer environment. Part I: Test design. *Cem. Concr. Res.* 73, 246–256.
- Prescott, L.M., Harley, J.P., Klein, D.A., Willey, J.M., Sherwood, L.M., Woolverton, C.J., 2010. *Microbiologie*. De Boeck Supérieur.
- Prezant, B., 2008. Recognition, Evaluation, and Control of Indoor Mold.
- Raw, G., Aizlewood, C., Warren, P., 1999. Indoor Air Quality Proceedings concentrations in the home of allergic patients. Presented at the Indoor Air 99 : proceedings of the 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Construction Research Communications Ltd., Edinburgh, Scotland, pp. 914–919.
- Reboux, G., Bellanger, A.-P., Roussel, S., Grenouillet, F., Millon, L., 2010. Moisissures et habitat : risques pour la santé et espèces impliquées. *Rev. Fr. Allergol.* 50, 611–620.

- Rintala, H., Pitkäranta, M., Toivola, M., Paulin, L., Nevalainen, A., 2008. Diversity and seasonal dynamics of bacterial community in indoor environment. *BMC Microbiol.* 8, 56.
- Samson, R.A., Flannigan, B., Flannigan, M.E., Verhoeff, A.P., Adan, O.C.G., Hoekstra, E.S. (Eds.), 1994. Health implications of fungi in indoor environments.
- Sharpe, R.A., Cocq, K.L., Nikolaou, V., Osborne, N.J., Thornton, C.R., 2016. Identifying risk factors for exposure to culturable allergenic moulds in energy efficient homes by using highly specific monoclonal antibodies. *Environ. Res.* 144, Part A, 32–42.
- Shirakawa, M.A., Beech, I.B., Tapper, R., Cincotto, M.A., Gambale, W., 2003. The development of a method to evaluate bioreceptivity of indoor mortar plastering to fungal growth. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 51, 83–92.
- Shirakawa, M.A., Gaylarde, C.C., Sahão, H.D., Lima, J.R.B., 2013. Inhibition of *Cladosporium* growth on gypsum panels treated with nanosilver particles. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 85, 57–61.
- Shirakawa, M.A., Tavares, R.G., Gaylarde, C.C., Taqueda, M.E.S., Loh, K., John, V.M., 2010. Climate as the most important factor determining anti-fungal biocide performance in paint films. *Sci. Total Environ., Special Section: Integrating Water and Agricultural Management Under Climate Change 408*, 5878–5886.
- Spilak, M.P., Madsen, A.M., Knudsen, S.M., Kolarik, B., Hansen, E.W., Frederiksen, M., Gunnarsen, L., 2015. Impact of dwelling characteristics on concentrations of bacteria, fungi, endotoxin and total inflammatory potential in settled dust. *Build. Environ.* 93, Part 1, 64–71.
- Thelandersson, S., Isaksson, T., 2013. Mould resistance design (MRD) model for evaluation of risk for microbial growth under varying climate conditions. *Build. Environ.* 65, 18–25.
- Torvinen, E., Meklin, T., Torkko, P., Suomalainen, S., Reiman, M., Katila, M.-L., Paulin, L., Nevalainen, A., 2006. Mycobacteria and Fungi in Moisture-Damaged Building Materials. *Appl. Environ. Microbiol.* 72, 6822–6824.
- Tran, T.H., Govin, A., Guyonnet, R., Grosseau, P., Lors, C., Garcia-Diaz, E., Damidot, D., Devès, O., Ruot, B., 2012. Influence of the intrinsic characteristics of mortars on biofouling by *Klebsormidium flaccidum*. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 70, 31–39.
- Urzi, C., De Leo, F., 2007. Evaluation of the efficiency of water-repellent and biocide compounds against microbial colonization of mortars. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 60, 25–34.
- Vacher, S., Hernandez, C., Bärtschi, C., Poussereau, N., 2010. Impact of paint and wall-paper on mould growth on plasterboards and aluminum. *Build. Environ.* 45, 916–921.
- Verdier, T., Bertron, A., Erable, B., Roques, C., 2018. Bacterial Biofilm Characterization and Microscopic Evaluation of the Antibacterial Properties of a Photocatalytic Coating Protecting Building Material. *Coatings* 8, 93.
- Verdier, T., Bertron, A., Johansson, P., 2016. Overview of Indoor Microbial Growth on Building Materials, in: Session 2 - Proliferation of Microorganisms on Building Materials. Presented at the RILEM TC 253 - MCI Symposium, RILEM, Delft, Netherland.
- Verdier, T., Bertron, A., Valentin, R., Boussambe, G.N.M., Mouloungui, Z., Roques, C., 2017. Monoglyceride to protect building materials against microbial proliferation. *Matér. Tech.* 104.
- Verdier, T., Coutand, M., Bertron, A., Roques, C., 2014a. A review of indoor microbial growth across building materials and sampling and analysis methods. *Build. Environ.* 80, 136–149.
- Verdier, T., Coutand, M., Bertron, A., Roques, C., 2014b. Antibacterial Activity of TiO<sub>2</sub> Photocatalyst Alone or in Coatings on *E. coli*: The Influence of Methodological Aspects. *Coatings* 4, 670–686.
- Voegel, C., Bertron, A., Erable, B., 2016. Mechanisms of cementitious material deterioration in biogas digester. *Sci. Total Environ.* 571, 892–901.
- Warscheid, T., Braams, J., 2000. Biodeterioration of stone: a review. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 46, 343–368.
- WHO, 2009. WHO guidelines for indoor air quality : dampness and mould.

- Wiktor, V., De Leo, F., Urzì, C., Guyonnet, R., Grosseau, P., Garcia-Diaz, E., 2009. Accelerated laboratory test to study fungal biodeterioration of cementitious matrix. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 63, 1061–1065.
- Wiktor, V., Grosseau, P., Guyonnet, R., Garcia-Diaz, E., Lors, C., 2010. Accelerated weathering of cementitious matrix for the development of an accelerated laboratory test of biodeterioration. *Mater. Struct.* 44, 623–640.
- Wiktor, V., Jonkers, H.M., 2011. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cem. Concr. Compos.* 33, 763–770.