



**HAL**  
open science

# La détection précoce des moisissures dans les monuments historiques

Stéphane Moularat

► **To cite this version:**

Stéphane Moularat. La détection précoce des moisissures dans les monuments historiques. Monumental : revue scientifique et technique, 2021. hal-03840130

**HAL Id: hal-03840130**

**<https://cstb.hal.science/hal-03840130v1>**

Submitted on 4 Nov 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## La détection précoce des moisissures dans les monuments historiques

Stéphane Moularat

Ingénieur études et recherches Responsable de la mission patrimoine culturel  
Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB)

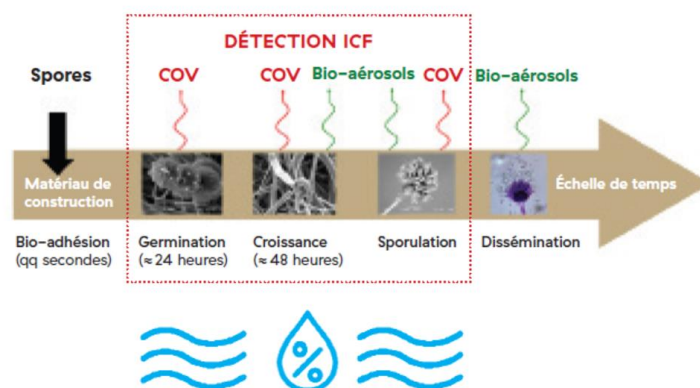
Parmi les polluants microbiologiques des espaces clos figurent les micromycètes – ou moisissures – , des micro-organismes capables de proliférer sur la plupart des revêtements, des matériaux de construction ou de décoration, dès lors qu'ils disposent de conditions environnementales adaptées. Les objets et les sites patrimoniaux en sont régulièrement la proie, subissant des dégâts souvent irréversibles, aggravés par une détection tardive de leur présence.

Traditionnellement, la contamination fongique d'un environnement intérieur est corroborée par un examen visuel, ainsi que par la mesure des particules fongiques dans l'air et sur les surfaces. Les méthodes usuelles associées sont des méthodes culturales, permettant de qualifier et de quantifier la fraction cultivable des micro-organismes collectés, ou des techniques moléculaires, tel que le séquençage haut débit pour l'identification et la Polymerase Chain Reaction en temps réel (PCRq) pour la quantification.

Or, ces méthodes ne permettent pas toujours de détecter les contaminations cachées (croissance derrière une cloison, dans la structure du bâti ou dans des systèmes de ventilation, etc.), ni récentes, pour lesquelles aucun signe de développement n'est apparent. Cela a notamment été observé dans le cadre de missions d'expertise réalisées au CSTB, pour des clients privés, concernant en particulier des contaminations actives derrière des papiers peints, dans des vitrines, sous des dalles au sol, sans émission de spores mesurée dans l'air.

Aussi, des méthodes basées sur la détection de métabolites fongiques, tels que les composés organiques volatils (COV), ont été mises au point afin de compléter la gamme d'outils disponibles. Dans ce contexte, l'objectif de la recherche initiée par le CSTB, en 2001, a consisté à développer une méthodologie adaptée à la surveillance des moisissures dans les sites patrimoniaux.

Figure 1, Emissions, durant le cycle de croissance d'une moisissure et domaine de détection de l'ICF



## La détection précoce des contaminations fongiques dans les environnements intérieurs

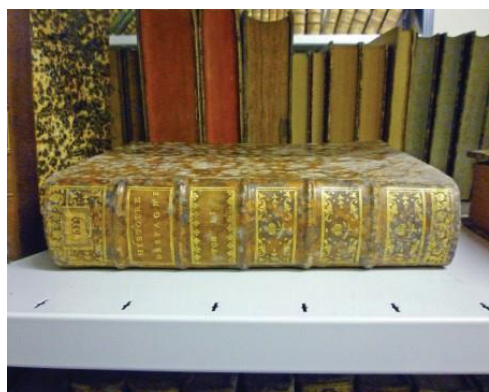
Dès 1988, différents auteurs suggèrent d'utiliser les COV comme traceurs d'une présence fongique dans des bâtiments. Depuis 2001, le CSTB travaille sur cette approche, afin de s'affranchir des contraintes liées à la spécificité des traceurs fongiques et de leurs faibles concentrations. Ainsi, en 2005, un indice est construit sur la base d'un algorithme employant des combinaisons de présence/absence de plusieurs COV. En parallèle, les méthodologies de collecte et d'analyse ont été optimisées pour répondre aux contraintes de rapport signal/bruit. L'approche a été renforcée par des travaux menés sur les phénomènes à l'origine des COV, issus des moisissures (métabolisme, biodégradation des supports) ; les travaux ont abouti, la même année, à la création d'un indice de contamination fongique (ICF) spécifique (fig. 1) des environnements intérieurs.

Contrairement aux spores, les COV ont la particularité de se diffuser dans l'environnement, sans être retenus par les supports. Par conséquent, la mesure de ces composés spécifiques permet, d'une part, la détection d'une contamination précoce et, d'autre part, de mieux appréhender les proliférations « cachées ». La présence et/ou l'absence de différents traceurs sont prises en compte, l'indice s'incrémentant en fonction de leur spécificité vis-à-vis du couple espèce / support. Cet indice qualitatif (présence / absence d'un développement fongique) s'affranchit des limites liées aux faibles concentrations en COV.

Si l'indice a été construit à partir de cinq espèces fongiques fréquemment retrouvées dans les logements (*Aspergillus niger*, *A. versicolor*, *Penicillium brevicompactum*, *Alternaria alternata*, *Cladosporium sphaerospermum*), il a aujourd'hui été éprouvé dans différents environnements intérieurs (logements, écoles, crèches, châteaux, chantiers, musées, bibliothèques, magasins d'archives, archives, monuments, vitrines, grottes ornées...) et sur neuf autres espèces (*A. restrictus*, *A. sydowii*, *Fusarium solani*, *P. chrysogenum*, *P. corylophilum*, *P. solitum*, *Stachybotrys chartarum*, *Trichoderma komingii* et *Ulocladium alternariae*).

En pratique, cette mesure consiste à réaliser un prélèvement gazeux d'une heure, à l'aide d'une pompe fonctionnant à 150 mL/min. Les échantillons sont ensuite acheminés au laboratoire pour analyse et calcul de l'ICF. Ainsi, il est possible, par une mesure simple, de diagnostiquer une croissance fongique dès le début du développement, y compris sans émission de spores dans l'air, ou encore d'assurer la surveillance d'un environnement vis-à-vis du risque de prolifération fongique.

Figures 2 et 3, Cas d'un livre contaminé, retrouvé dans un magasin d'archives



2.



3.

Figure 4, Prélèvement de l'indice de contamination fongique (ICF) dans une bibliothèque privée d'un château



Figure 5, Confirmation, par une mesure ICF, de l'absence d'activité fongique dans un magasin d'archives situé en zone tropicale



Figure 6, Détection d'une contamination naissante, sous des coussins d'un siège public, dans un musée



### Exemples d'application *in situ*

#### Application de l'indice dans les lieux de vie

Cet indice a été mis en œuvre sur plus de 1 300 environnements. Le tableau présente des exemples d'études réalisées dans des lieux de vie (fig. 9).

#### Application de l'indice dans les sites patrimoniaux

Outre ces études réalisées dans les lieux de vie, d'autres travaux ont été menés depuis 2005, en collaboration avec Faisl Boustia (LR M H), puis avec d'autres organismes en charge de la sauvegarde du patrimoine (Archives nationales, BN F, musée du Louvre ou université de Cergy-Pontoise). Ceux-ci ont montré l'intérêt de l'indice, comme outil de détection fongique dans les sites patrimoniaux, comme aide à la conservation préventive par la surveillance et comme moyen de contrôle de remédiation. Cet indice a également été employé lors de missions d'expertises et appliqué dans des musées, châteaux, magasins d'archives, réserves, grottes ornées, tombes, etc.

### **Diagnostic de contaminations fongiques**

Cet indice a été utilisé à des fins de diagnostic pour confirmer la présence de contaminations actives et pour vérifier la présence de développements actifs (moisissures en cours de croissance), pouvant être invisibles. Cette information a permis d'engager la recherche de source d'eau liquide alimentant ce développement avant tout nettoyage.

Cette situation a été constatée dans des musées, où des contaminations pouvaient être cachées et menacer les objets patrimoniaux exposés ; dans des châteaux, avec des contaminations situées sous les planchers ou derrière des revêtements ; dans des magasins d'archives, abritant un ouvrage contaminé parmi les livres entreposés (fig. 2 à 4, 6).

L'indice a également permis d'infirmer des cas de contamination, permettant de rechercher d'autres causes au désordre et de stopper ou d'éviter des traitements inutiles et coûteux. Par exemple, ces cas ont été constatés au sein de tombeaux, qui présentaient un film suspect sur les parois, ainsi que dans des magasins d'archives et des châteaux, avec d'anciennes traces de contamination, aujourd'hui non actives et non dégradantes (fig. 5).

### **Contrôle de remédiation et diagnostic avant travaux**

Au-delà de son utilité pour proposer un diagnostic, l'indice est également employé pour vérifier l'efficacité d'un traitement. Si celui-ci est inefficace (solution n'ayant pas stoppé le développement, existence d'un autre foyer de contamination non traité, étendue de la contamination...), un nouveau traitement peut directement être appliqué en complément de la première intervention ; une fois l'absence de contamination validée par l'indice, les travaux de remédiation pourront être engagés (fig. 7 et 8).

### **Surveillance et conservation préventive**

L'outil étant non destructif, ne nécessitant pas de contact avec les objets ou les parois et permettant une détection précoce, y compris dans les cas de contaminations situées à l'intérieur de supports, il est adapté à une surveillance de zones ou d'objets et permet d'agir au plus tôt, avant que des dégâts n'apparaissent. Il est aussi possible d'adapter l'indice, afin qu'il soit spécifique à chaque problématique. Dans le cadre de ses actions de recherche, le CSTB a pu le valoriser et l'exploiter commercialement, à travers sa filiale Bioguess.

La détection précoce de la contamination fongique dans les matériaux et les ouvrages est un enjeu crucial pour la conservation du patrimoine.

Basée sur l'émission des COV fongiques, l'ICF a été mis au point pour détecter de manière précoce ces micro-organismes et pour surveiller la qualité microbiologique des environnements intérieurs. L'indice développé permet de statuer sur la présence d'une croissance de micromycètes, y compris en l'absence d'aérosols fongiques dans l'environnement, et d'identifier des contaminations récentes et/ou cachées. Il est aussi utile pour évaluer l'efficacité des traitements mis en œuvre.

Aujourd'hui, cet outil de détection précoce peut être intégré aux plans de surveillance de biens patrimoniaux en collaboration entre les acteurs du patrimoine et le CSTB. En effet, ce dernier peut mettre son expérience du suivi de la qualité des environnements intérieurs au service de la conservation préventive et développer des indices dédiés, par exemple, à la détection de la mûrle ou aux insectes nuisibles.



Figures 7 a à 7 c, Exemples d'anciennes contaminations.

Les prélèvements ont été réalisés avant travaux pour vérifier l'activité fongique dans trois châteaux, sur un plafond (fig. 7 a), une charpente consolidée (fig. 7b) et un plancher (fig. 7 c).



7 a.



7 b.



7 c.



Figure 8, Détection de contaminations fongiques cachées dans une salle d'exposition d'un musée, nécessitant un second nettoyage.

Photographies et document : Stéphane Moularat / © CSTB.

Figure 9, Exemples d'études réalisées dans des lieux de vie

ÉTUDES	OBJECTIFS	n	MÉTHODOLOGIE	RÉSULTATS ICF
Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) / Campagne nationale logements (CNL)	Évaluer la qualité de l'air dans les logements en France métropolitaine.	567 (496 avec ICF)	Examen visuel par un technicien enquêteur, analyse du questionnaire par un expert et ICF.	37 % de logements français subissent un développement fongique actif.
Effets sanitaires des moisissures dans l'habitat	Tester la faisabilité d'une enquête épidémiologique en Île-de-France sur la problématique des contaminations fongiques.	150 (70 % avec ICF)	Examen visuel et mesures (méthode culturale surfaces et air ; mycotoxines ; ergostérol : ICF par un technicien formé.	80 % de contaminations actives.

## Bibliographie

Amani Slimen, Rony Barboux, Agnès Mihajlovski, Stéphane Moularat, Johann Leplat, Faisal Bousta, Patrick Di Martino, "High Diversity of Fungi Associated with Altered Wood Materials in the Hunting Lodge of 'La Murette', Saint-Germain-en-Laye, France", *Mycological Progress*, vol. 19, n° 2, 2020, p. 139-146.

Isabelle Lacaze, Rukshala Anton, Stéphane Moularat, « Détection précoce des infestations fongiques et entomologiques dans les environnements intérieurs », *Support/Tracé*, n° 18, 2018, p. 182-186

Yaël Joblin, Stéphane Moularat, Rukshala Anton, Faisal Bousta, Geneviève Oriol, Enric Robine, Odile Picon, Tarik Bourouina, "Detection of Moulds by Volatile Organic Compounds: Application to Heritage Conservation", *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 64, n° 3, 2010, p. 210-217.