

# LE TRAITEMENT DES MOISSURES DANS LES PASTELS : ÉTUDE COMPARATIVE DE DIFFÉRENTS TRAITEMENTS PAR FUMIGATION ET DE LEURS PROPRIÉTÉS FONGISTATIQUES ET FONGICIDES

Mathilde Bezon

## Résumé

Les œuvres réalisées avec des pastels sont particulièrement vulnérables à diverses problématiques de conservation, notamment aux infestations fongiques. Les options de traitements curatifs sont limitées en raison de la sensibilité de la couche picturale à l'abrasion et aux solvants. Le nettoyage à sec à l'aspirateur muséal est une méthode essentielle pour traiter les moisissures dans les pastels, mais il comporte des limites en matière d'effet résiduel comme l'action est menée de manière très localisée. La fumigation avec des produits fungitoxiques était autrefois courante, mais est désormais prohibée à cause de la toxicité des fumigants traditionnellement employés pour l'être humain, l'environnement et les œuvres. Cependant, elle reste une mise en œuvre intéressante à explorer pour le traitement des moisissures dans les pastels car elle permet une approche indirecte qui peut être appliquée de façon simple par des conservateurs-restaurateurs indépendants et des institutions modestes. L'objectif principal de cette recherche était ainsi de trouver des fumigants alternatifs à l'oxyde d'éthylène ou au thymol pour compléter les méthodes de nettoyage à sec, qui soient inoffensifs pour les œuvres, l'être humain et l'environnement.

**Abstract** Works executed in pastel are particularly vulnerable to various conservation issues, notably fungal infestations. Curative treatment options are limited due to the sensitivity of the pictorial layer to abrasion and solvents. Dry cleaning using a museum vacuum is an essential method for addressing mould in pastels, yet it has limitations in terms of residual effect, as the action is conducted in a very localised manner. Fumigation with fungitoxic products was once common practice but is now prohibited because of the toxicity of the fumigants traditionally employed for humans, the environment, and the artworks. Nonetheless, it remains an interesting approach to explore for the treatment of mould in pastels as it allows for an indirect method that can be readily applied by independent conservators-restorers and smaller institutions. The primary objective of this research was, therefore, to identify alternative fumigants to ethylene oxide or thymol to complement dry cleaning methods, ensuring they are harmless to the artworks, human beings, and the environment.

**Resumen** Las obras producidas con pasteles son particularmente vulnerables a diversos problemas de conservación, en particular a las infestaciones fúngicas. Las opciones de tratamiento curativas son limitadas debido a la sensibilidad de la capa pictórica a la abrasión y los solventes. La limpieza a seco con la aspiradora del museo es un método esencial para tratar los mohos en pasteles, pero tiene límites en el efecto residual a medida que la acción se lleva a cabo de una manera muy localizada. La fumigación con productos fungitóxicos fue una vez común, pero ahora está prohibida debido a la toxicidad de los fumigantes utilizados tradicionalmente para los humanos, el medio ambiente y las obras. Sin embargo, sigue siendo una implementación interesante para explorar el tratamiento de los mohos en pasteles porque permite un enfoque indirecto que

puede aplicarse de manera simple por conservadores-restauradores independientes e instituciones modestas. El objetivo principal de esta investigación era encontrar fumigantes alternativos al óxido de etileno o timol para completar los métodos de limpieza en seco, que sean inofensivos para obras, seres humanos y el medio ambiente.

**Mots-clés** traitement, pastel, infestation, moisissure, fumigation, fongicide, huile essentielle, alcool

## Le développement et le traitement des moisissures dans les pastels

Les œuvres créées avec des pastels secs présentent des couches picturales composées de particules de pigments faiblement liées entre elles. Cette particularité leur confère des propriétés optiques spécifiques de diffusion de la lumière et leur apporte leur aspect mat et velouté si caractéristique. Cependant, leur composition et leur structure les rendent aussi vulnérables à diverses problématiques de conservation, notamment aux infestations fongiques.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer que les couches picturales des pastels constituent des milieux propices à la croissance des colonies de *fungi*. Les multiples anfractuosités qu'elles présentent et leur caractère hygroscopique offrent de nombreuses zones d'accroche aux spores et l'humidité nécessaire à leur développement. Ce sont également des milieux riches en ressources nutritives pour les *fungi* en raison de la diversité de matières organiques présentes dans la stratigraphie de ce type d'œuvre (au sein des liants des *media*, des éventuels fixatifs, des supports papier et leur encollage, etc.) (Szczepanowska, Cavaliere, 2003, p. 128). Des microclimats peuvent aussi se former dans les encadrements en cas de variations hygrométriques importantes (Padfield *et al.*, 2002). Les taux d'activité en eau nécessaires au développement des moisissures peuvent alors être rapidement atteints.



**Figure 1** Anonyme, *Cecil Girl*, 1973, pastel sur papier pumicif marouflé sur carton, collection privée. Détail des infestations fongiques localisées sur les tracés bruns (d'après Szczepanowska, Cavaliere, 2003, p. 138).

Les colonies de micromycètes vont souvent croître de façon préférentielle sur les tracés des pastels en fonction des pigments présents (Szczepanowska, Cavaliere, 2003, p. 128) ; certains sont en effet caractérisés par une bioréceptivité importante, notamment ceux riches en carbone, en azote et en fer (Cantigniau, 1998, p. 42). Cela concerne principalement les laques organiques mais, surtout, les pigments noirs, les ocres et les terres. Ce phénomène est assez bien illustré dans cet exemple, tiré de la littérature, d'un pastel sur papier pumicif marouflé sur carton, de 1973, d'auteur anonyme, titré *Cecil Girl*, où l'on remarque que les micromycètes se sont développés de manière significative sur les tracés contenant très probablement du noir ou des terres (**fig. 1**).

La biodétérioration par les microorganismes est de manière générale un défi majeur dans la préservation des biens culturels à base de matières organiques. La conservation préventive est universellement reconnue comme étant le moyen le plus efficace de prévenir et de contrôler les infestations fongiques mais cela n'empêche malheureusement

pas toujours les infestations fongiques de survenir. Celles-ci peuvent causer d'importants dégâts et les options de traitements curatifs efficaces et sûrs sont encore relativement limitées. Dans le cas des pastels, ces options sont encore plus réduites en raison des nombreuses limites qu'impose la sensibilité de leur couche picturale, notamment à l'abrasion et à l'application directe de solvants. En cas d'infestation, le traitement se concentre en général sur un nettoyage à sec à l'aide d'un aspirateur muséal muni d'un embout de précision sous la forme de pipette Pasteur en verre ou en plastique (fig. 2, 3). Il permet de retirer la majorité des hyphes et des spores et de rétablir l'intégrité esthétique des œuvres mais il n'apporte théoriquement pas d'efficacité résiduelle. En effet, comme cette action est très localisée, le risque que des spores demeurent dans la couche picturale et que l'infestation reprenne si des conditions favorables sont de nouveau réunies est important. La mise en œuvre de traitements de désinfection en complément du nettoyage à sec est donc recommandée, surtout dans le cas où des prélèvements auraient révélé que les colonies présentes étaient toujours viables.



**Figure 2** Visuel de la mise en œuvre d'un traitement de nettoyage à sec de moisissures sur un pastel sec à l'aide d'un aspirateur muséal. © Mathilde Bezon.



**Figure 3** Détail de l'embout de précision utilisé pour ce type de traitement. © Mathilde Bezon.

La fumigation est une mise en œuvre adaptée au traitement des pastels infestés car elle permet de procéder de manière totalement indirecte par l'exposition à des vapeurs de produits fongitoxiques dans des enceintes hermétiques. Cependant, les composés fongitoxiques les plus employés par le passé — l'oxyde d'éthylène et le thymol — sont toxiques pour l'homme et l'environnement et peuvent avoir des effets néfastes à long terme sur les supports papier et les *media*. Leur utilisation est donc désormais majoritairement prohibée. Malgré cela, la fumigation demeure une option intéressante à explorer pour le traitement des moisissures dans les pastels secs. Il s'agit en effet d'une mise en œuvre accessible pour des institutions modestes ou des conservateurs-restaurateurs indépendants, ce qui la distingue des méthodes nécessitant un appareillage plus conséquent, telle que l'irradiation aux rayonnements gamma. L'objectif de la partie expérimentale de cette recherche était donc de trouver des fumigants alternatifs à l'oxyde d'éthylène et au thymol, non-toxiques pour l'être humain et l'environnement, possédant une activité fongicide élevée et qui pourraient être utilisés en complément du nettoyage à sec à l'aspirateur muséal.

## Protocole expérimental

Les critères établis pour la recherche des fumigants à tester ont été les suivants :

- large spectre d'activité antifongique ;
- bonne stabilité chimique ;
- haute volatilité ;
- faible coût ;
- non toxique pour l'homme ;
- non toxique pour l'environnement ;
- pas d'effet indésirable connu sur le papier et les *media*

Après consultation de la littérature, deux familles de produits antifongiques sont apparues comme répondant à la majorité des critères : les alcools et les huiles essentielles.

Les alcools sont des microbiocides dont les effets délétères se concentrent sur la membrane cellulaire, dont ils sont capables de dénaturer les protéines et les lipides (Paulus, 2004, p. 22). Deux alcools sont particulièrement efficaces contre les micromycètes : l'éthanol et le butanol (Bacílková, 2006, p. 187). Les solutions aqueuses d'alcool sont en général plus efficaces que les alcools purs. Pour l'éthanol, la concentration optimale pour un effet biocide est 70 % ; pour le butanol, la concentration recommandée est 90 % (Bacílková, 2006). Il n'a pas été démontré à ce jour de diminution significative des propriétés mécaniques du papier après l'application d'éthanol ou de butanol. Ces deux alcools sont donc des candidats prometteurs dans la recherche de fumigants alternatifs au thymol et à l'oxyde d'éthylène. Leur usage est déjà relativement démocratisé dans la pratique des conservateurs-restaurateurs, en particulier celui de l'éthanol, et leurs effets sur la cellulose et les *media* sont relativement bien étudiés.

Les huiles essentielles sont des métabolites secondaires produits par les végétaux, principalement constitués de terpènes et terpénoïdes qui sont capables d'agir sur les parties lipidiques des membranes cellulaires des *fungi* et d'affecter la fonction de diverses structures moléculaires (Saad *et al.*, 20). Les terpénoïdes phénoliques, comme le thymol, sont les plus efficaces, mais ils peuvent être nocifs pour le foie, irritants pour la peau et les muqueuses et néfastes pour les supports papier à long terme. Il a pu être constaté que certains alcools terpéniques comme le géraniol possédaient une activité antifongique équivalente à celle des phénols (Natu, 2019, p. 60) tout en démontrant une toxicité beaucoup plus réduite (Clarke, 2008).

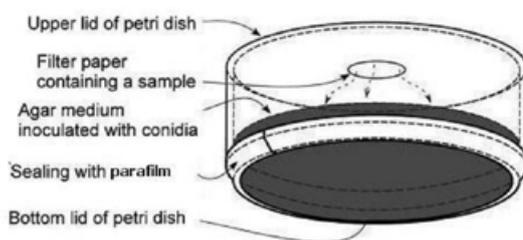
Dans le contexte de cette recherche, il a donc été décidé de se concentrer sur deux huiles essentielles dont le principe actif antifongique principal était le géraniol : l'huile essentielle de citronnelle de Java et l'huile essentielle de palmarosa – et d'éviter au maximum celles contenant des phénols. Ces deux huiles se sont avérées également être celles possédant le meilleur pouvoir antifongique en phase gazeuse dans le *screening* de Delespaul, réalisé en 2001 (Delespaul *et al.*, 2000). Bien que largement utilisées dans l'industrie alimentaire et cosmétique pour leurs propriétés microbiocides, les huiles essentielles ne sont pas encore couramment employées dans le cadre de traitement de désinfection de biens culturels (Drábková *et al.*, 2021). Leur utilisation dans ce domaine suscite cependant un intérêt croissant (Menicucci *et al.*, 2023). Les effets à long terme sur les supports papier sont cependant moins étudiés que ceux des alcools ; leur usage fait également davantage débat car certaines études ont déjà signalé que le linalol, par exemple, pouvait provoquer des altérations de la couleur du papier et une perte de résistance mécanique (Rakotonirainy *et al.*, 2007).

Les souches sélectionnées pour tester les propriétés des fumigants ont été *Aspergillus niger* et *Penicillium pinophilum*. Celles-ci font partie des genres les plus fréquemment rencontrés lors d'infestations fongiques sur des œuvres graphiques (Pinheiro *et al.*, 2019). Il s'agissait de plus d'espèces à la croissance rapide et à la sporulation importante, ce qui permettait d'avoir des résultats probants en peu de temps.

La phase expérimentale a été divisée en deux parties : une phase de tests préliminaires et une phase de tests approfondis.



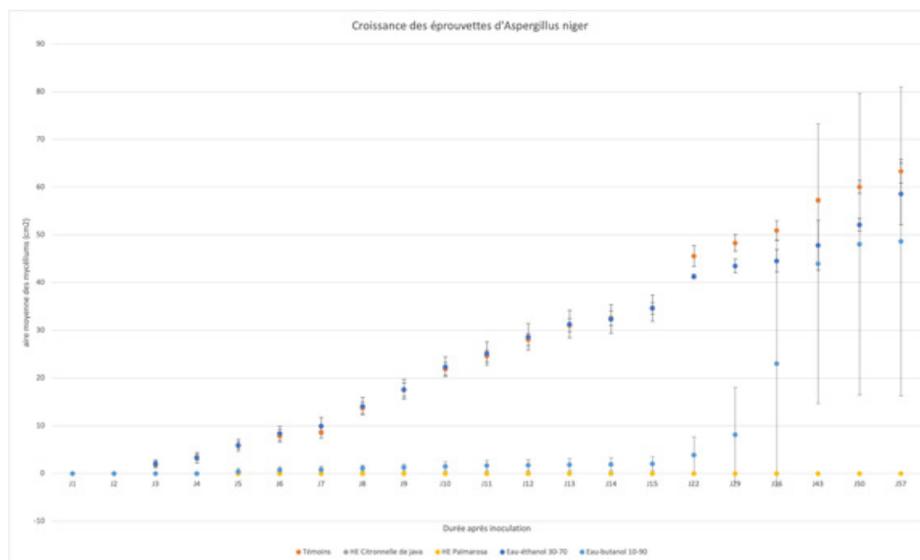
**Figure 4** Visuel de l'inoculation des boîtes de Pétri à l'aide d'une micropipette. © Mathilde Bezon.



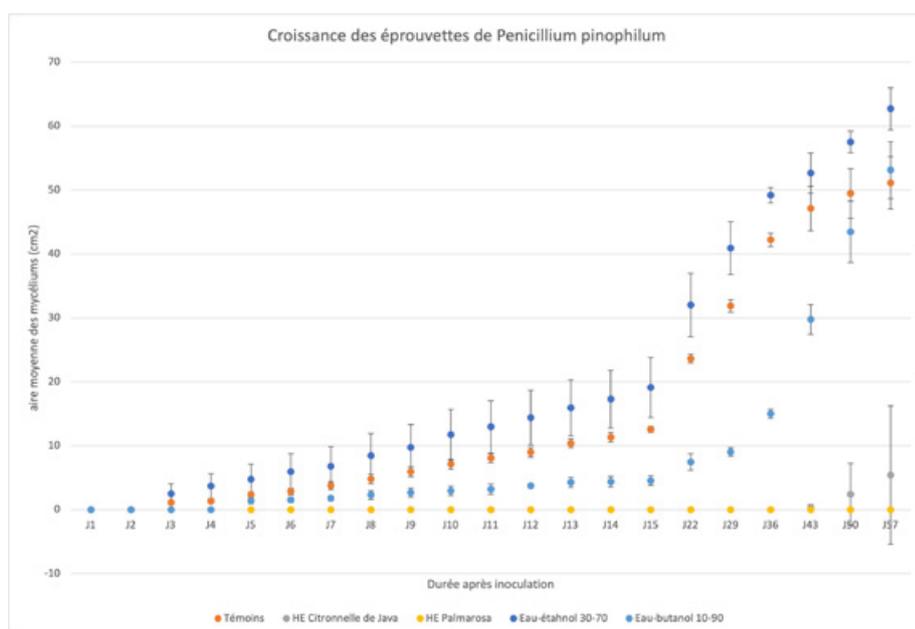
**Figure 5** Schéma de la mise en œuvre des fumigations en microatmosphère, d'après Massoud *et al.*, 2012, p. 299.

La première phase de test a été réalisée *in vitro*, c'est-à-dire sur des souches inoculées sur des milieux de culture malt-agar à 2 %, additionné de chloramphénicol 50 ppm. Les éprouvettes ont été préparées à la mycothèque de l'université catholique de Louvain-la-Neuve

(UCL) (fig. 4) et ont été exposées à des fumigations en microatmosphère<sup>1</sup> immédiatement après inoculation (fig. 5). La quantité de fumigant (50 µL) et le temps d'exposition (7 jours) ont été identiques pour tous les fumigants. La croissance des mycéliums dans les boîtes de Petri a été documentée à l'aide d'un dispositif photographique durant deux mois. Le diamètre des mycéliums a été calculé grâce au logiciel ImageJ 1.53. À partir de ces données, les pourcentages d'inhibition<sup>2</sup> des fumigants ont pu être calculés (fig. 6 et 7) et des graphiques de croissance des mycéliums ont également été réalisés (fig. 8 et 9).



**Figure 6** Graphique de la croissance des échantillons d'*Aspergillus niger* exposés aux différents fumigants.



**Figure 7** Graphique de la croissance des mycéliums de *Penicillium pinophilum* exposés aux différents fumigants.

**1** Mise en œuvre de fumigation dans des boîtes de Pétri, où le fumigant est imbibé sur un papier filtre, collé sur le couvercle de la boîte. Le tout est ensuite scellé avec du Parafilm®.

**2** Le pourcentage d'inhibition des fumigants a été calculé grâce à la formule  $\frac{Dc - Dt}{Dc} \times 100$ , où Dc = aire de la colonie témoin, et Dt = aire de la colonie traitée.

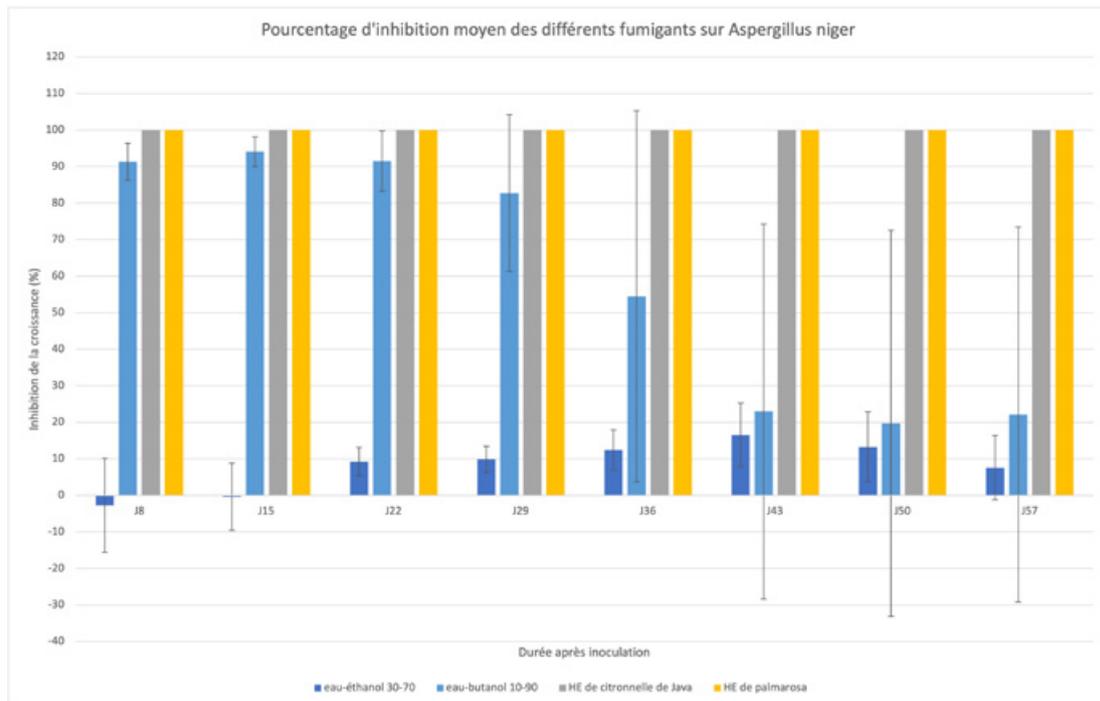


Figure 8 Pourcentage d'inhibition moyen des différents fumigants sur *Aspergillus niger*.

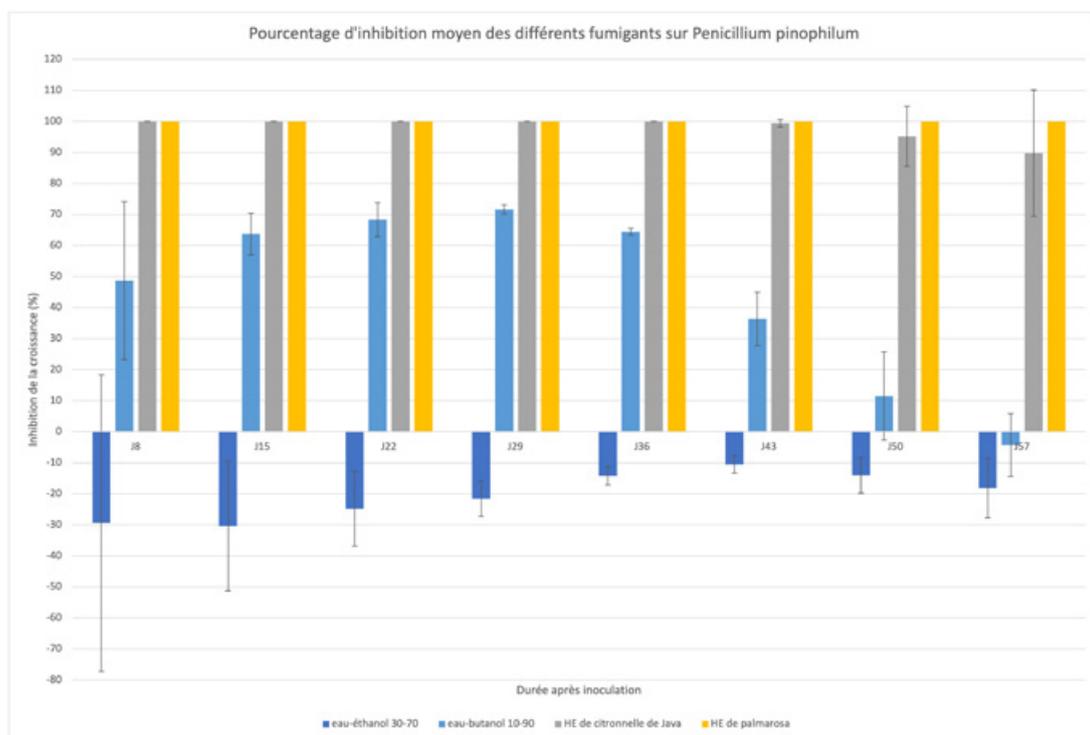
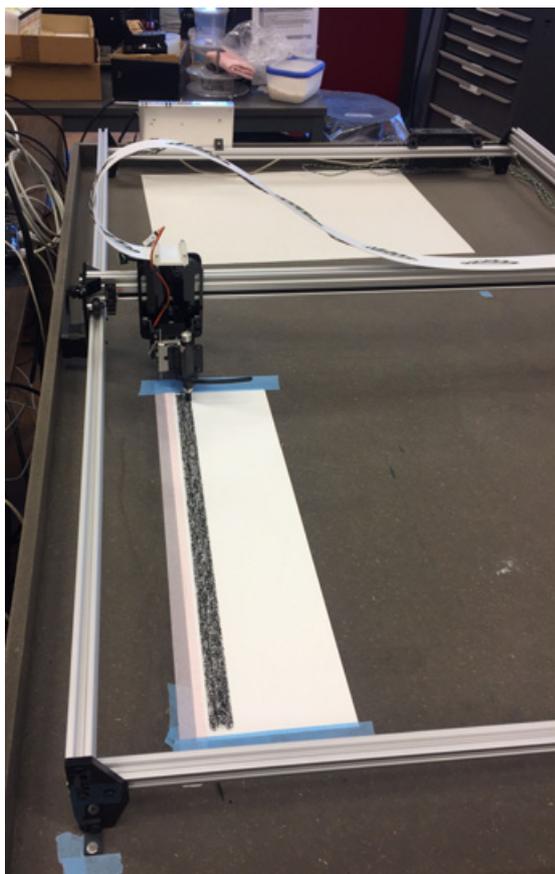


Figure 9 Pourcentage d'inhibition moyen des différents fumigants sur *Penicillium pinophilum*.



L'objectif de la phase approfondie était de tester les propriétés des fumigants sur les mêmes souches mais *in situ*, en les inoculant sur des éprouvettes prenant la forme de *mock-up* de pastels secs sur papier vélin, composés de bandes de différentes couleurs.

Il était important d'avoir une approche la plus systématique possible pour la réalisation des *mock-up* qui allaient servir d'éprouvettes. Ceux-ci ont donc été réalisés mécaniquement à l'aide d'un traceur XY, ou « *pen plotter* » au FormLab de l'académie des Beaux-Arts de Gand (fig. 10).

**Figure 10** Visuel d'un *mock-up* en cours de réalisation. © Mathilde Bezon.



**Figure 11** Visuel de l'inoculation des *mock-up* à l'aide d'une micropipette. © Mathilde Bezon.

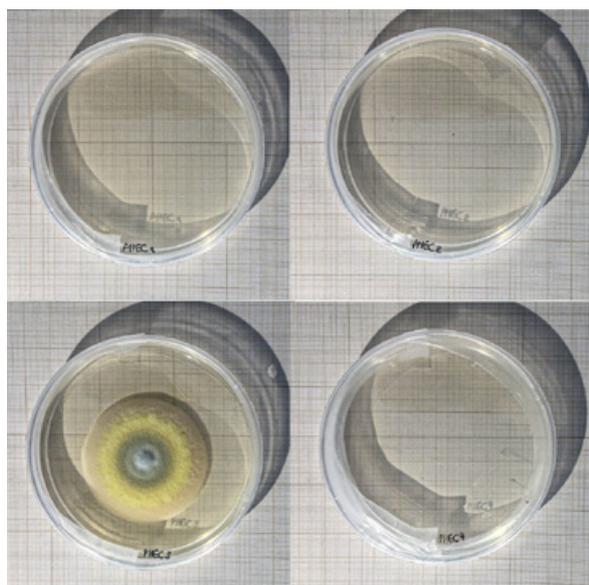
Les éprouvettes ont été inoculées à la mycothèque de l'UCL de la même manière que pour la phase de test préliminaire (fig. 11). Elles ont été placées en incubation, face vers le haut, sur un milieu de culture malt-agar à 2 % additionné de chloramphénicol 50 ppm dans une boîte de Pétri durant 5 jours. Il a pu être constaté le développement très rapide de mycéliums au niveau des zones inoculées à la surface des éprouvettes. Néanmoins, comme les matériaux utilisés pour la confection des éprouvettes n'étaient pas stériles, de nombreuses contaminations externes sont également survenues, ce qui a complexifié l'interprétation des résultats de cette phase.

Après l'incubation initiale, les éprouvettes ont été mises à sécher durant 48 h dans des enceintes préalablement désinfectées en prévision des traitements. Trois types de traitement ont ensuite été effectués, alors que les éprouvettes étaient déposées dans des boîtes de Pétri stériles ne contenant pas de milieu de culture : des éprouvettes ont été traitées uniquement avec l'aspirateur muséal, d'autres ont été traitées par

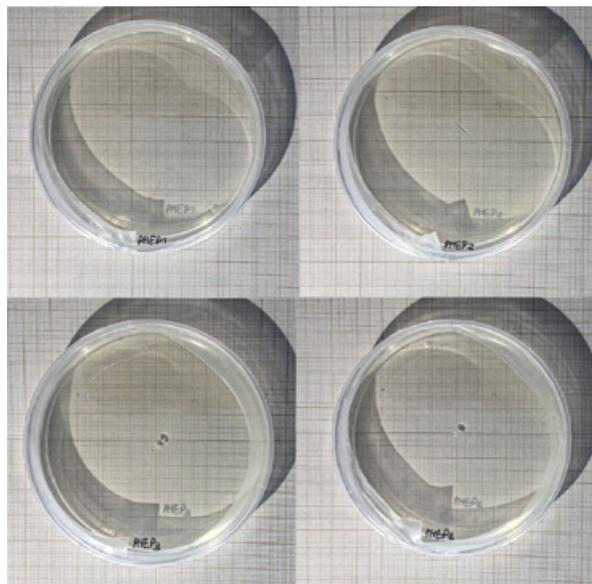
aspiration et fumigation et d'autres, enfin, ont été traitées uniquement par fumigation. Les fumigations ont été réalisées en microatmosphère, à l'instar de la phase de tests préliminaires. Après les traitements, les éprouvettes ont été replacées en incubation dans de nouvelles boîtes comprenant des milieux de culture malt-agar à 2 % additionné de chloramphénicol 50 ppm. L'évolution de la croissance mycélienne a été documentée durant 2 mois, à l'aide du même dispositif que pour la première phase de tests. Le logiciel ImageJ, en revanche, n'a pas pu être utilisé pour une quantification précise du diamètre des colonies à cause de l'hétérogénéité du développement mycélien et des très nombreuses contaminations externes. L'évaluation des résultats s'est donc basée uniquement sur des observations visuelles.

## Interprétations et discussions des résultats

Lors de la phase de tests préliminaires, les deux huiles essentielles ont eu un effet fongicide très important sur les souches d'*Aspergillus niger* et de *Penicillium pinophilum*, même si ces dernières se sont avérées plus résistantes à l'huile de citronnelle de Java. Il a pu être remarqué en effet sur un des répliques des boîtes inoculées avec *Penicillium pinophilum*, le développement d'un mycélium à partir de J44 (fig. 12). Sa croissance, bien que fortement retardée s'est ensuite déroulée de manière similaire aux témoins. Dans le cas de l'huile de palmarosa, aucun développement fongique n'est survenu dans les boîtes de Pétri inoculées et une efficacité résiduelle d'au moins deux mois a été relevée (fig. 13).



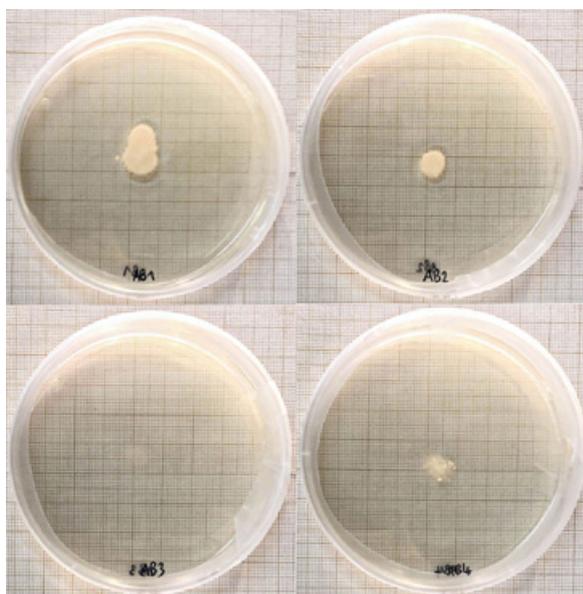
**Figure 12** Visuel des 4 éprouvettes de *Penicillium pinophilum* exposées aux vapeurs d'huile essentielle de citronnelle de Java à J57. © Mathilde Bezon.



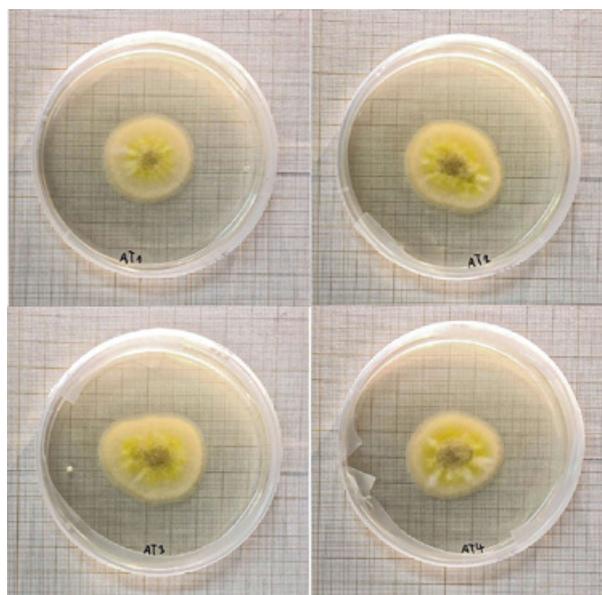
**Figure 13** Visuel des 4 éprouvettes de *Penicillium pinophilum* exposées aux vapeurs d'huile essentielle de palmarosa à J57. © Mathilde Bezon.

L'efficacité plus importante de l'huile essentielle de palmarosa pourrait être liée à sa composition. Cette huile est en effet composée à 80 % de géraniol, là où l'huile de citronnelle de Java n'en contient que 22 %. Les résultats obtenus dans cette phase ont suggéré que le géraniol est un composé déterminant dans l'effet antifongique des deux huiles sélectionnées. La solution d'eau-butanol 10-90 % a eu un effet uniquement fongistatique sur les deux souches. Elle a permis d'endiguer significativement le développement des colonies durant

le premier mois et celles-ci avaient un aspect assez différent des témoins (fig. 14 et 15). Il a pu cependant être constaté qu'à terme la croissance des mycéliums exposés aux vapeurs de butanol était relativement équivalente à celle des témoins pour les deux espèces.



**Figure 14** Visuel des 4 éprouvettes d'*Aspergillus niger* exposées aux vapeurs d'eau-butanol à J8. © Mathilde Bezon.

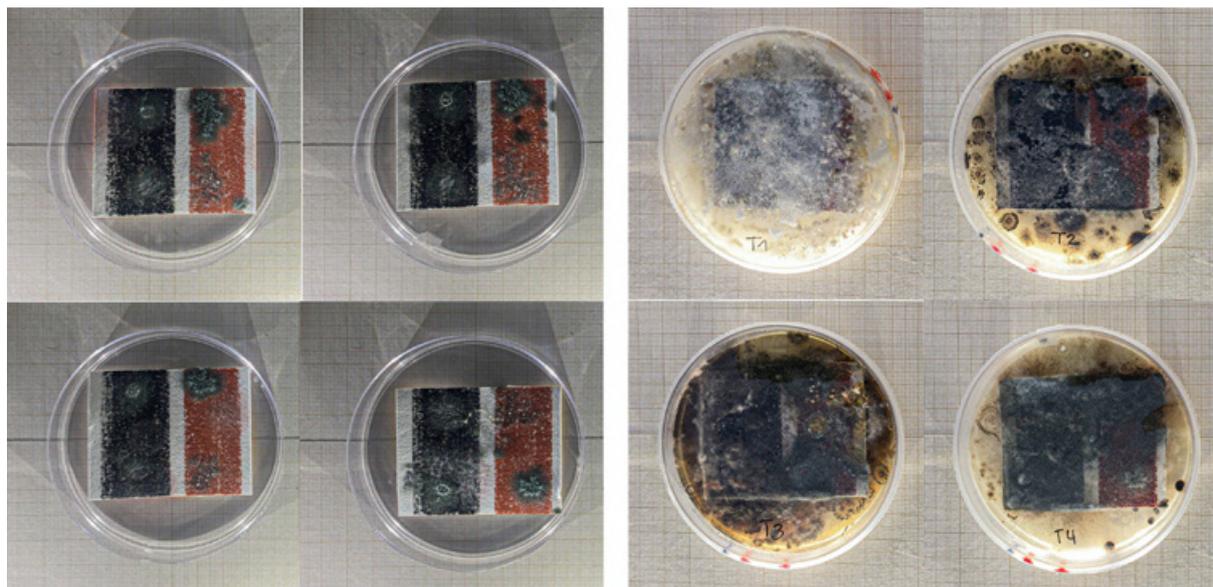


**Figure 15** Visuel des 4 éprouvettes témoins d'*Aspergillus niger* à J8. © Mathilde Bezon.

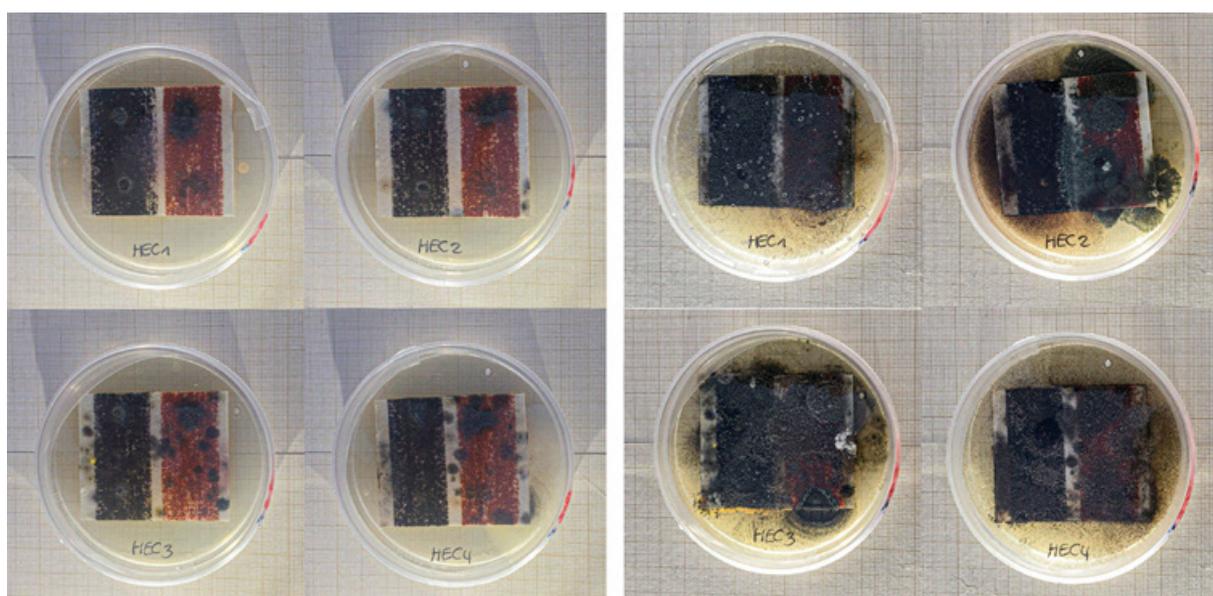
La solution d'eau-éthanol 30-70 % s'est avérée être le fumigant le moins efficace, avec un effet inhibiteur très limité sur la croissance des souches d'*Aspergillus niger* (fig. 6). Dans le cas de *Penicillium pinophilum*, le diamètre moyen des souches fumigées a été même plus important que celui des témoins (fig. 7). Ce phénomène était cependant lié à une manipulation inadéquate lors de la préparation des éprouvettes.

L'effet fongicide important des huiles essentielles durant cette phase a pu être potentialisé par leur rétention importante dans les milieux de culture. En effet, même deux mois encore après le retrait des papiers-filtres une très forte odeur caractéristique de ces huiles se dégageait des boîtes de Pétri.

À l'inverse, la moindre efficacité des alcools par rapport aux huiles essentielles sur les deux souches a pu être également amoindrie par la mise en œuvre. En effet, Il a pu être constaté, par la suite, dans la littérature que l'efficacité des alcools —notamment l'éthanol— était fortement conditionnée par des facteurs environnementaux, en particulier par la température (Dao, Dantigny, 2011), qui n'a pas été contrôlée dans le cadre de cette expérimentation. Pour pouvoir réellement conclure sur les propriétés antifongiques des alcools, en particulier l'éthanol, il faudrait mener de nouveau ces expérimentations avec un dispositif différent, permettant un meilleur contrôle des conditions environnementales, tel qu'un dessiccateur.

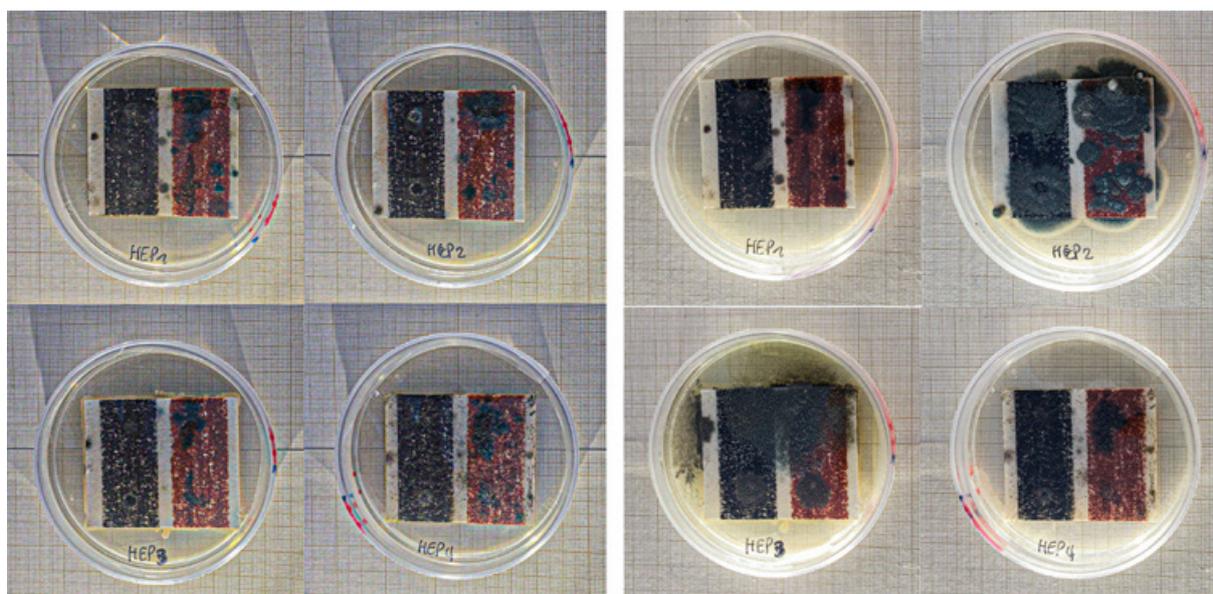


**Figure 16** Visuel des éprouvettes témoins à J1 (gauche) et J57 (droite). © Mathilde Bezon.



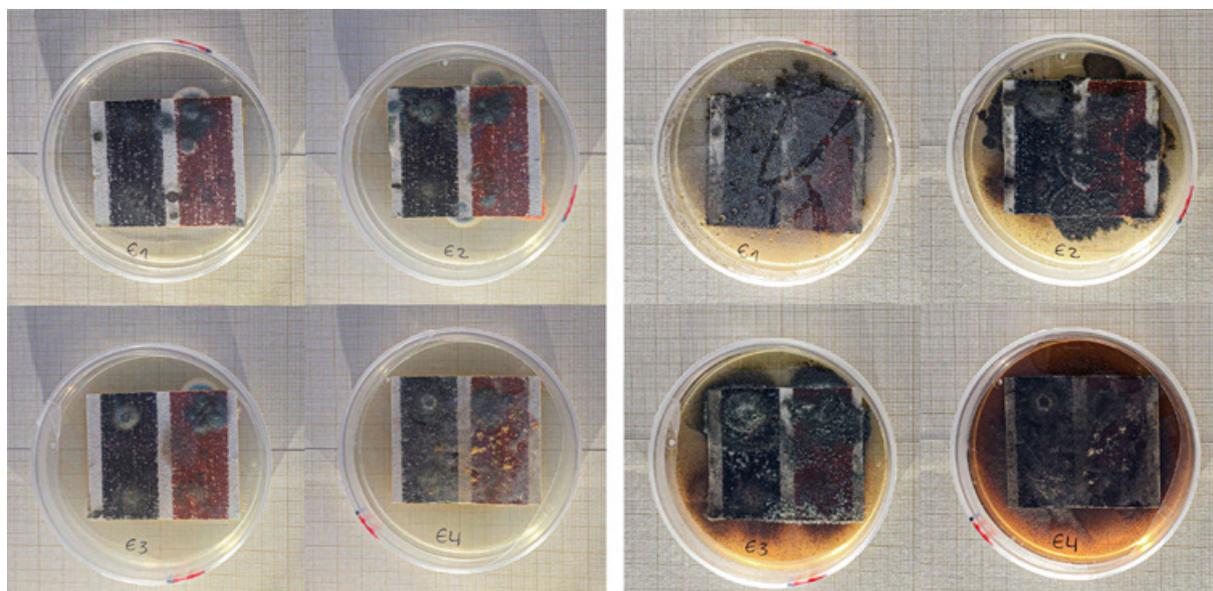
**Figure 17** Visuel des éprouvettes exposées aux vapeurs d'huile essentielle de citronnelle de Java à J8 (gauche) et J57 (droite). © Mathilde Bezon.

Les résultats de la phase de tests approfondis ont été assez différents de ceux de la phase de tests préliminaires. Les huiles essentielles ont démontré une efficacité beaucoup plus réduite. L'huile essentielle de citronnelle de Java a permis d'inhiber la croissance durant 2 semaines mais on a pu constater à terme que l'ampleur de l'infestation était relativement équivalente à celle des éprouvettes non traitées (**fig. 16 et 17**). L'huile essentielle de palmarosa a démontré de nouveau une efficacité supérieure à la citronnelle de Java et a totalement inhibé la croissance de nouveaux mycéliums sur la moitié des éprouvettes (**fig. 18**).



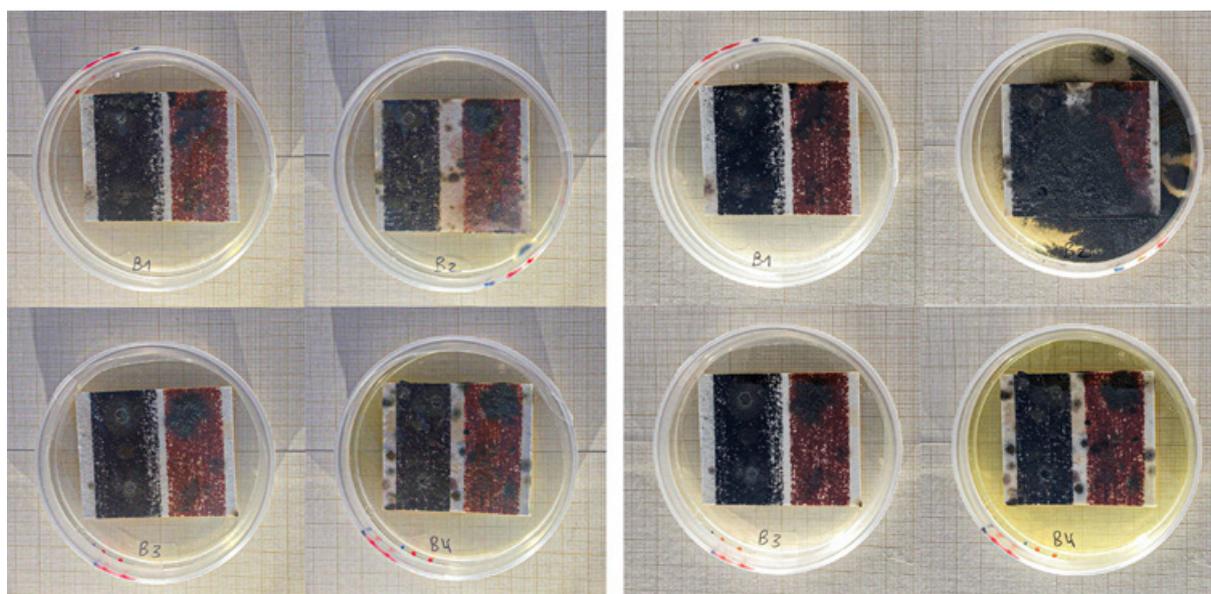
**Figure 18** Visuel des éprouvettes exposées aux vapeurs d'huile essentielle de palmarosa à J8 (gauche) et J57 (droite). © Mathilde Bezon.

La solution d'eau-éthanol (30-70 %) a démontré de meilleures propriétés fongistatiques que durant la phase de tests préliminaires. Bien que son effet soit resté très mitigé, le fumigant a inhibé la croissance de nouvelles colonies durant les 4 premiers jours de la période de documentation. À terme, l'infestation était légèrement moins étendue que pour les éprouvettes témoins (**fig. 19**).



**Figure 19** Visuel des éprouvettes exposées aux vapeurs d'eau-éthanol à J8 (gauche) et J57 (droite). © Mathilde Bezon.

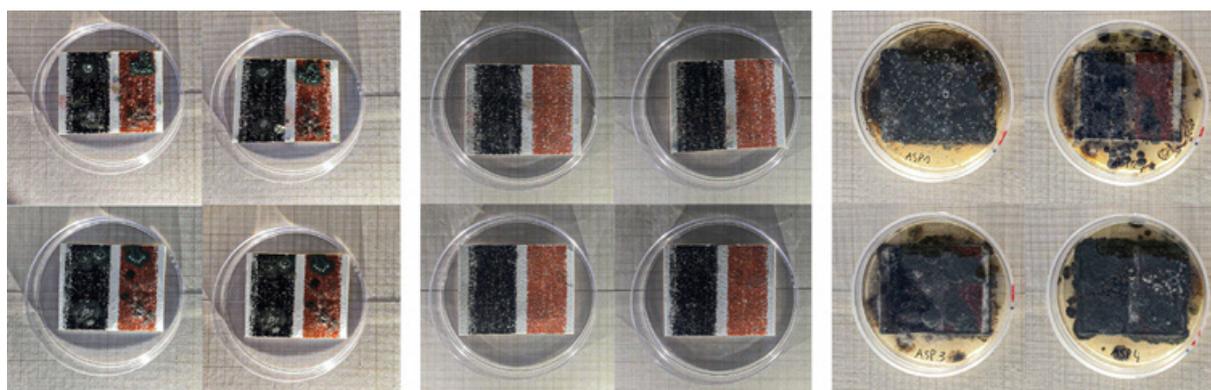
La solution d'eau-butanol (10-90 %) s'est avérée également beaucoup plus efficace lors de la deuxième phase. Elle a montré les propriétés fongicides les plus significatives de tous les fumigants, avec des effets résiduels durant au moins deux mois sur trois des quatre répliquats (**fig. 20**).



**Figure 20** Visuel des éprouvettes exposées aux vapeurs d'eau-butanol à J8 (gauche) et J57 (droite).  
© Mathilde Bezon.

Il est possible que les huiles essentielles aient été moins efficaces sur des colonies à un stade de développement plus avancé, là où durant la phase de tests préliminaires les fumigations avaient été effectuées dès leur premier stade de développement (avant la germination). Il pourrait être intéressant dans une autre étude d'approfondir cette question.

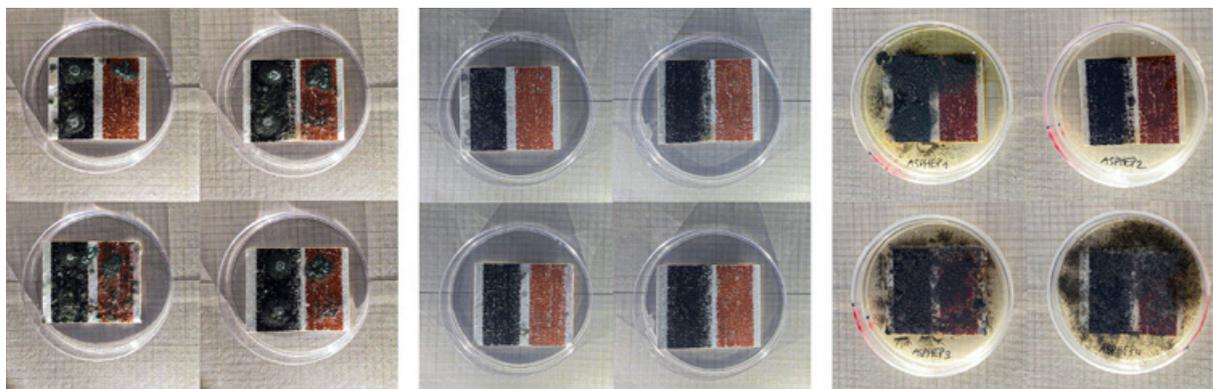
La phase de tests approfondis a permis de démontrer l'hypothèse initiale que les traitements à l'aspirateur muséal, lorsqu'ils sont très localisés, ne procuraient aucune efficacité résiduelle. Les mycéliums ont repris leur croissance dans les zones inoculées dès le deuxième jour et au terme de la période de documentation, la surface des éprouvettes était presque intégralement envahie, à l'instar des éprouvettes témoins (**fig. 21**).



**Figure 21** Visuel des éprouvettes traitées à l'aspirateur muséal avant traitement (gauche), après traitement (centre), et à J57 (droite). © Mathilde Bezon.

Il est important tout de même de tempérer ces résultats. En effet, il a pu être constaté dans de nombreux cas que les traitements à l'aspirateur muséal semblaient avoir étendu l'infestation par rapport aux éprouvettes traitées uniquement par fumigation (**fig. 22**). Sur les éprouvettes traitées à l'aspirateur, les colonies étaient néanmoins plus éparpillées et moins denses. Il a pu être déduit qu'un temps de séchage plus long après l'incubation initiale aurait dû être

mis en place pour assurer un meilleur retrait des mycéliums. En effet, ceux-ci adhéraient relativement fort au support lors des traitements de nettoyage à sec, suggérant que les infestations étaient *a priori* encore très actives. L'action apportée par l'aspirateur a pu également davantage disperser les spores à la surface des *mock-up*. L'observation de ces phénomènes a cependant permis de mettre particulièrement en lumière l'importance de réaliser les traitements de nettoyage à sec sur des infestations parfaitement inactives.



**Figure 22** Visuel des éprouvettes traitées à l'aspirateur muséal et exposées aux vapeurs d'huile essentielle de palmarosa avant traitement (gauche), après traitement (centre) et à J57 (droite).  
© Mathilde Bezon.

## Conclusion

Il ressort de la partie expérimentale de cette recherche que le butanol et l'huile essentielle de palmarosa constituent des pistes solides dans la recherche d'un fumigant efficace contre les micromycètes, avec une toxicité réduite pour l'humain et l'environnement.

Les résultats obtenus durant les deux phases suggèrent également que le géraniol serait un composé déterminant dans l'effet antifongique des deux huiles sélectionnées. L'huile de palmarosa, composée à 80 % de géraniol, s'est avérée en effet beaucoup plus efficace que celle de citronnelle de Java. Il serait ainsi intéressant dans la continuité de cette recherche de pouvoir évaluer les propriétés du géraniol seul et de les comparer avec celles du butanol. Un temps d'exposition et une concentration unique ont été appliqués pour tous les fumigants afin de réduire le nombre de variables, mais il serait intéressant de pouvoir moduler ces facteurs afin de déterminer la quantité et le temps d'exposition minimaux nécessaires à l'inhibition. Les effets des fumigants ont été évalués uniquement sur deux souches, mais pour compléter cette recherche il faudrait pouvoir évaluer le spectre d'activité en testant sur un panel plus large d'espèces.

L'avantage des alcools par rapport aux huiles essentielles est que nous disposons d'un plus grand nombre d'études et de plus de recul sur les effets qu'ils peuvent avoir sur les supports papier. Un aspect essentiel qui n'a pas non plus pu être évalué dans le cadre de cette recherche est l'impact de ces fumigants sur les *media* et la cellulose. L'objectif ici était avant tout d'évaluer les propriétés fongicides et fongistatiques des fumigants mais la continuité logique de la recherche serait de s'assurer de l'innocuité de ces composés sur le long terme. Les résultats obtenus sur les éprouvettes uniquement fumigées ont permis d'évaluer les propriétés des fumigants de manière plus fiable que ceux obtenus pour les éprouvettes aspirées

et fumigées. Afin de pouvoir confirmer ou infirmer que combiner aspiration et fumigations est efficace, il serait nécessaire de conduire de nouvelles expérimentations. Il serait intéressant de tester également l'impact de la réalisation des traitements de fumigations en amont du nettoyage à sec plutôt qu'après celui-ci.

Cette étude a permis d'ouvrir de nombreuses pistes de recherche dans le domaine du traitement des moisissures dans les pastels et de découvrir des candidats potentiels pour la mise en œuvre de fumigations plus respectueuses pour l'être humain et l'environnement.

## Références bibliographiques

- Bacílková B.** (2006), « Study on the effect of butanol vapours and other alcohols on fungi », *Restaurator*, N° 27 (3), p. 186-199.
- Cantigniau A.** (1998), *Comprendre et prévenir l'attaque des toiles peintes par les moisissures*, mémoire de master de Conservation-restauration d'œuvres d'art, École nationale supérieure d'art de la Cambre, 156 p.
- Clarke S.** (2008), « Families of compounds that occur in essential oils », dans *Essential chemistry for aromatherapy*, Churchill Livingstone, p. 41-77.
- Dao T., Dantigny P.** (2011), « Control of food spoilage fungi by ethanol », *Food control*, N° 22 (3-4), p. 360-368.
- Delespaul Q., de Billerbeck V.-G., Roques C.-G., Michel G., Marquier-Viñuales C., Bessière J.-M.** (2000), « The antifungal activity of essential oils as determined by different screening methods », *Journal of essential oil research*, N° 12 (2), p. 256-266.
- Drábková K., Krejčí J., Škrdlantová M., Ďurovič M., Bacílková B.** (2021), « Influence of disinfectants on natural textile fibres », *Restaurator*, N° 42 (2), p. 67-86.
- Massoud M.-A., Saad A.-S.-A., Soliman E.-A., El-Moghazy A.-Y.** (2012), « Antifungal activity of some essential oils applied as fumigants against two stored grains fungi », *Journal of the advances in agricultural researches*, N° 17 (2), p. 296-306.
- Menicucci F., Palagano E., Michelozzi M., Ienco A.** (2023), « Essential oils for the conservation of paper items », *Molecules*, N° 28 (13), p. 1-11.
- Natu K.-N., Tatk, P.-A.** (2019), « Essential oils – prospective candidates for antifungal treatment? », *Journal of essential oil research*, N° 31 (5), p. 347-360.
- Padfield T., Berg H., Dahlstrom N. et al.** (2002), « How to protect glazed pictures from climatic insult », dans ICOM-CC (éd.), *ICOM Committee for Conservation 13th Triennial Meeting (20-27 September 2002)*, Rio de Janeiro, International council of museums, Committee for conservation, p. 80-85.
- Paulus W.** (2004), *Directory of microbiocides for the protection of materials - A handbook*, Dordrecht, Springer, 787 p.
- Pinheiro A.-K.-B., Sequeira S., Macedo M.-L.-R.** (2019), « Fungi in archives, libraries, and museums : a review on paper conservation and human health », *Critical reviews in microbiology*, N° 45 (5-6), p. 686-700.
- Rakotonirainy M.-S., Juchauld F., Gillet M., Othman-Choulak M., Lavedrine B.** (2007), « The effect of linalool vapour on silver-gelatine photographs and book-binding leathers », *Restaurator*, N° 28, p. 95-111.
- Saad N.-Y., Muller C.-D., Lobstein A.** (2013), « Major bioactivities and mechanism of action of essential oils and their components : essential oils and their bioactive components », *Flavour and fragrance Journal*, N° 28 (5), p. 269-279.
- Szczepanowska H.-M., Cavaliere A.-R.** (2003), « Artworks, drawings, prints, and documents—Fungi eat them all! », dans Koestler R.-J. et al. (éd.), *Art, biology, and conservation: biodeterioration of works of art*, New York, Metpublication, p. 128-152.

### L'auteur

**Mathilde Bezon** Conservatrice-restauratrice indépendante spécialisée en arts graphiques, diplômée de l'ENSAV la Cambre à Bruxelles. [mathilde@atelierkozo.be](mailto:mathilde@atelierkozo.be)