

Etude bibliographique du développement de champignons de bleuissement sur surfaces peintes et non peintes (Etude BIBLIOBLEU)

Laurence PODGORSKI

Décembre 2022

Siège social

10, rue Galilée
77420 Champs-sur-Marne
Tél +33 (0)1 72 84 97 84
www.fcba.fr

Siret 775 680 903 00132
APE 7219Z
Code TVA CEE : FR 14 775 680 903

Institut technologique FCBA :
Forêt, Cellulose, Bois – Construction,
Ameublement

Financé par :



CODIFAB
Développement des Industries Françaises
de l'Ameublement et du Bois

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	2
2. Champignons de bleuissement: définition, caractéristiques.....	2
2.1 Production de mélanine.....	4
2.2 Conditions de croissance.....	4
3. Les facteurs influençant leur développement sur les surfaces non peintes	5
3.1 pH	5
3.2 Essences et vieillissement du bois	6
3.3 Influence de la conception des surfaces de bois non peintes sur le développement des champignons de bleuissement.....	9
4. Le développement de champignons de bleuissement sur les surfaces peintes	10
4.1 Généralités.....	10
4.2 Influence de la géométrie des surfaces peintes	14
4.3 Influence de la composition des produits de peinture	15
4.3.1 Composants génériques des produits de peinture.....	15
4.3.2 Phase solvant, phase aqueuse	15
4.3.3 Concentration pigmentaire volumique	16
4.3.4 Pigmentation.....	16
4.3.5 Perméabilité à l'eau liquide et à l'eau vapeur	19
4.3.6 Brillance, rugosité et développement fongique	20
4.4 Influence du macroclimat et microclimat.....	22
5. Les méthodes d'évaluation du développement de champignons de bleuissement	24
6. Moyens pour limiter le développement des champignons de bleuissement.....	33
6.1 Agir sur les conditions essentielles du développement des champignons de bleuissement.....	33
6.2 Les biocides protecteurs de films.....	36
7. Décolorer le bois bleui.....	38
8. Conclusions.....	39
9. Références.....	41

1. INTRODUCTION

Le règlement sur les produits biocides RPB (règlement (UE) n° 528/2012) a entraîné les industriels à formuler des peintures et lasures pour le bois en extérieur avec très peu voire pas de biocides protecteurs du film (PT7). On constate une recrudescence de développement de champignons de bleuissement sur les surfaces peintes, favorisés par la pollution, l'isolation thermique des bâtiments, la nature phase aqueuse de la plupart des peintures et lasures. Ces champignons perforent le film de finition (Cf Etude CODIFAB Finitions 10 ans¹). Les micro-perforations créées rompent l'intégrité physique du film de finition qui n'assure donc plus son rôle de barrière à l'eau. Des entrées d'eau alors possibles amplifient ensuite les dégradations des surfaces.

L'étude bibliographique BIBLIOBLEU a donc pour objectif de mieux comprendre le développement de ces champignons selon les typologies de surfaces (peintes, non peintes) et d'identifier des solutions, dans l'idéal physiques, pour limiter le bleuissement sans recours à l'utilisation de biocides de plus en plus contrainte.

L'étude s'appuie notamment sur l'analyse d'articles scientifiques disponibles dans la base de données de l'International Research Group on Wood Protection (IRG-WP) à laquelle FCBA a accès.

2. Champignons de bleuissement: définition, caractéristiques

Les champignons de bleuissement (*blue stain fungi* en anglais) sont des champignons lignicoles : ils se développent sur le bois sans le dégrader mécaniquement à la différence des champignons lignivores (champignons de pourritures).

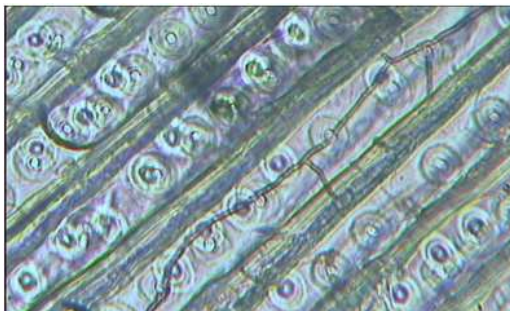
Généralement, les champignons responsables du bleuissement (colonisation en profondeur et en surface) n'entraînent pas de modification importante des propriétés mécaniques du bois dans la mesure où ils utilisent des éléments nutritifs digestes comme les sucres, l'amidon et les triglycérides et ne peuvent digérer les composants de la paroi des cellules du bois². Quelques espèces de champignons, telles que *Botryosphaeria theobromae*, responsable du bleuissement chez les feuillus tropicaux, possèdent des enzymes pouvant attaquer la paroi des cellules ligneuses et entraîner des pertes de résistance importantes³.

Les champignons de bleuissement créent cependant des désordres esthétiques à la surface du bois et en profondeur en apportant au bois une coloration bleue ou noire. Ils se développent aussi bien sur les bois frais que sur les bois mis en œuvre et touchent d'avantage l'aubier que le duramen du fait de la présence plus importante de substances nutritives dans l'aubier (sucres, amidon, protéines).



Figure 1 : section transversale de pin sylvestre dont l'aubier est bleu (Photo D. Dirol, CTBA)⁴

Les champignons de bleuissement appartiennent à la classe des Ascomycètes et des Deutéromycètes. Les plus connus appartiennent aux genres *Ophiostoma*, *Aureobasidium* et *Dothichiza* (*Sclerophoma*).



Hyphes d'*Aureobasidium pullulans*
à l'intérieur de trachéides



Développement de *Ophiostoma piliferum*
à la surface du bois

Figure 2 : Exemple de champignons de bleuissement observés au microscope (gauche) et à la loupe binoculaire (droite), (Photographies FCBA©)

Selon Wengert ¹⁴, la coloration typique produite par les champignons de bleuissement est bleue, grise ou noire. La couleur est due au champignon lui-même, et non à un changement de couleur dans le bois. Bien que le champignon n'affecte pas de manière appréciable la résistance du bois, il crée des problèmes de couleur et d'esthétique pour le bois, notamment dans le cas de bois revêtu avec des finitions claires ou semi-transparentes.

D'autre part, les champignons de bleuissement préparent bien souvent la voie à d'autres champignons qui détruisent le bois (pourriture), car ils perforent les parois des cellules, ce qui facilite l'absorption d'eau par le bois (capillarité).

Sharpe et Dickinson ont examiné des bois frais et des bois vieillis et ont montré que les champignons de bleuissement utilisent les sucres simples mais pas les oligosaccharides ⁵.

Selon Zink *et al.*⁶, les champignons de bleuissement vivent principalement de la teneur en protéines des cellules du parenchyme mais existent aussi dans les trachéides. Le passage d'une cellule à une autre se produit par la pénétration des hyphes dans les ponctuations des membranes ou même dans les parois des cellules dans toute leur largeur.

On trouve le bleuissement chez certains feuillus où les hyphes des champignons responsables à pigmentation foncée poussent surtout dans les vaisseaux longitudinaux ⁷.

2.1 Production de mélanine

Zink *et al.* ont caractérisé les matières colorées de deux champignons de bleuissement : *Ceratocystis coerulea* et *Alternaria alternata* ⁸.

Les pigments isolés des deux champignons rejoignent les caractéristiques décrits pour les mélanines: ils sont insolubles dans la plupart des solvants organiques mais solubles dans les produits alcalins, ils sont décolorés par réaction avec H₂O₂, et ils réduisent AgNO₃. Les mélanines sont connues pour être des polymères de composition complexe.

Les auteurs étudient les pourcentages de carbone, hydrogène, azote et oxygène des pigments des deux champignons. Ils trouvent des compositions élémentaires différentes. Le degré d'oxydation est plus élevé pour *Ceratocystis coerulea* que pour *Alternaria alternata*. Le taux de composants inorganiques est très faible comme démontré par une analyse des cendres.

Après une hydrolyse acide des pigments, les auteurs ont montré que les taux de sucres étaient légèrement plus élevés chez *Ceratocystis coerulea*. Les sucres sont les mêmes dans les deux pigments (mannose, galactose, glucose, xylose) mais la composition varie surtout pour le mannose et galactose.

Le taux élevé d'azote trouvé dans la partie récupérée par hydrolyse indique la présence de composés protéiques.

Les mélanines des deux champignons sont très semblables dans leur structure chimique. Elles contiennent un nombre élevé de groupes aliphatiques, alors que les mélanines synthétiques sont principalement aromatiques.

Les mélanines fongiques sont associées à des glucides et des protéines qui peuvent être éliminées par hydrolyse acide. Une partie des éléments aminés, cependant, restent dans la structure résiduelle de la mélanine.

La mélanisation des hyphes commence par l'apparition de granules de teinte sombre au sein des parois des hyphes.

Les mélanines ne sont pas essentielles pour le développement et la croissance des microorganismes mais augmentent plutôt leurs chances de survie et les capacités compétitives des espèces dans certains environnements ⁹. Les mélanines inhibent diverses enzymes de digestion de la paroi cellulaire ¹⁰. Les pigments protègent les parois cellulaires de l'action de la chitinase et de l'endo-β-1,3-glucanase microbiennes. Selon Zhdanova et Pokhodenko ¹¹, les pigments de mélanine protègent les cellules fongiques de la déshydratation dans des conditions d'humidité atmosphérique défavorables.

Des auteurs montrent que la production de mélanine a été totalement inhibée sur les milieux contenant des celluloses ou de la lignine comme seules sources de carbone ¹².

2.2 Conditions de croissance

Les champignons de bleuissement sont tellement répandus dans l'air que même le bois stérilisé peut être réinfecté après une brève exposition à l'air. Par conséquent, la lutte contre les champignons de bleuissement n'est possible qu'en contrôlant les conditions environnementales nécessaires à leur survie. Pour se développer, les champignons de bleuissement ont besoin de quatre conditions essentielles :

La température :

Selon Wengert ¹⁴, la température doit être comprise entre 10°C et 54°C. La croissance fongique optimale se produit entre 21°C et 32°C. En dessous de 10°C, le champignon est dormant ; au-dessus de 54°C, il est tué.

Selon Evans *et al.* ¹³, *Aureobasidium pullulans* serait toutefois capable de résister à des températures de 80 °C et de survivre pendant de longues périodes sans humidité.

L'oxygène :

L'oxygène doit être présent en quantité suffisante. Dans les arbres vivants, ou dans des grumes ou bois continuellement arrosés d'eau, il n'y a pas assez d'oxygène pour que le champignon puisse se développer. Cependant, une fois que le séchage commence, l'oxygène est suffisant pour permettre un développement fongique.

L'humidité

L'humidité doit être suffisante. En général, les champignons de bleuissement se développent lorsque la teneur en humidité du bois est supérieure à 30%. Dans la pratique, le risque le plus élevé de dommages causés par les champignons de bleuissement se situe au-dessus d'un taux d'humidité moyen du bois de 40%.

Selon Wengert ¹⁴, lorsque le bois est exposé à des conditions de séchage lent, il est probable que l'aubier devienne infecté par des champignons de bleuissement. Simpson rapporte également qu'un séchage initial lent favorise le développement ¹⁵.

L'isolation thermique des bâtiments s'est fortement accentuée ces dernières années et conduit à moins d'échanges de chaleur entre l'intérieur du bâtiment et l'extérieur. Selon Sedlbauer *et al.* ¹⁶, la meilleure façon d'empêcher la croissance fongique est de réduire la fréquence de la condensation en limitant les périodes de sur-refroidissement.

La nourriture :

Il doit y avoir de la nourriture disponible, sous forme de sucres. L'approvisionnement en nourriture est généralement inadéquat dans le bois de cœur, ce qui explique la présence du champignon principalement dans l'aubier. La teneur en sucre ne varie pas de manière appréciable tout au long de l'année, il y a donc toujours un risque de bleuissement lorsque les autres conditions sont favorables.

3. Les facteurs influençant leur développement sur les surfaces non peintes

3.1 pH

Aureobasidium pullulans survit dans une plage de pH de 1,9 à 10,1 ^{17, 13}. Le vieillissement des surfaces du bois est favorable aux champignons de bleuissement car la dégradation du bois par les UV se traduit par une augmentation de l'acidité ¹⁸.

Une étude menée à FCBA (projet Woodcolor ¹⁹) avait conduit à réaliser différents traitements de surface du bois dans le but d'homogénéiser des différences de teinte entre aubier et duramen. Durant cette étude, les traitements à pH basiques ont montré moins de développement de champignons de bleuissement que les traitements à pH acides lorsque les échantillons étaient exposés aux intempéries. Augmenter le pH du bois peut donc être une solution pour limiter le

développement de champignons de bleuissement. Cependant, l'augmentation du pH des surfaces bois génère d'autres problématiques (endommagement des surfaces, compatibilité avec des finitions, problématique de corrosion des métaux).

3.2 Essences et vieillissement du bois

Aucune échelle de classification de durabilité du bois vis-à-vis des champignons responsables de l'altération de l'aspect du bois n'est disponible ²⁰.

La littérature et les ouvrages spécialisés font état d'essences plus sensibles aux champignons de bleuissement que d'autres. On cite notamment les résineux (et en particulier leur aubier) et quelques feuillus tels que le hêtre, le frêne, le peuplier. Parmi les essences tropicales, le samba, l'iroko, l'ilomba, le ramin sont mentionnés comme sensible au bleuissement. Ces mentions d'essences sensibles concernent surtout le bois frais, bien que les documents ne le stipulent pas toujours clairement.

Tous les bois mis en œuvre, non protégé par une finition, développent progressivement une coloration grise lorsqu'ils sont exposés aux intempéries. Nombreux sont les articles spécialisés attribuant cette coloration grise à l'action des UV. Certes le rayonnement solaire génère une modification de la couleur du bois, mais en aucun cas le rayonnement UV peut à lui seul conduire à la teinte grise caractéristique du bois nu exposé aux intempéries. L'eau intervient aussi dans ce processus de coloration grise. L'eau conduit à un lessivage des produits de photodégradation de la lignine, ce qui génère un blanchiment de la surface du bois. Elle favorise ensuite l'installation de microorganismes et notamment de champignons de bleuissement contribuant à la teinte grise caractéristique du bois vieilli.

Le grisaillement du bois résulte donc toujours de l'action combinée de 3 facteurs : le rayonnement solaire, l'eau et les microorganismes dont les champignons de bleuissement.

Toutes les essences de bois, sans exception, deviennent grises lorsque exposées aux intempéries sans protection de surface (de type finition filmogène). On peut donc conclure que toutes les essences de bois en service sont sensibles aux champignons de bleuissement.

Lors de cette étude BIBLIOBLEU, nous avons procédé à une observation macroscopique et microscopique d'échantillons d'aubier et de duramen de chêne exposés 1 an à 45° face au Sud sur le terrain de vieillissement de FCBA (Bordeaux). Les observations, rassemblées dans la Figure 3, montrent macroscopiquement une coloration noire pour l'aubier de chêne et une coloration grise pour le duramen de chêne. Microscopiquement, l'observation montre que la coloration noire est le résultat d'une présence importante de champignons de bleuissement tandis que la coloration grise résulte d'une densité plus faible de champignons de bleuissement. Dans les deux cas (aubier et duramen), *Aureobasidium pullulans* a été identifié.

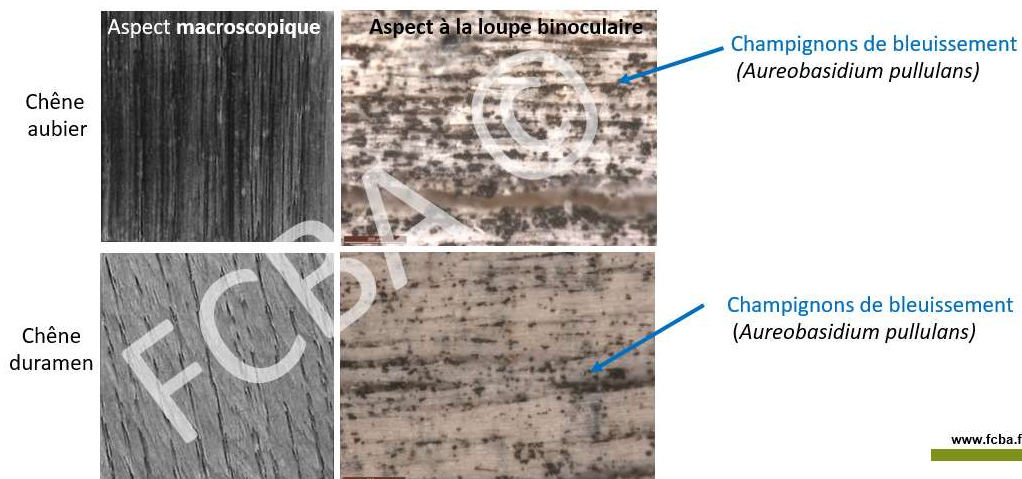


Figure 3 : Observations macroscopiques (gauche) et à la loupe binoculaire (droite, échelle 200 μ m) d'aubier (haut) et duramen (bas) d'échantillons de chêne exposés aux intempéries – Photographies FCBA©

Sell et Leukens ²¹ ont soumis 20 essences européennes et non-européennes de feuillus et de résineux, de densité et de résistance mécanique très différentes, à une exposition extérieure non protégée en Suisse. Alors que le comportement des différentes essences était initialement très différent, la détérioration photochimique et mécanique ainsi que l'intensité de l'attaque par les champignons du bleuissement se sont uniformisées. Après seulement un an d'exposition à 45° face au sud, toutes les surfaces de bois avaient un aspect gris uniforme.

La Figure 4 montre les variations de couleur du bois d'échantillons de pin sylvestre exposé à différents appareils de vieillissement artificiels (roue de dégradation, QUV, panneau radiant). Dans les 3 cas, la dégradation produite par les UV des lampes des appareils conduit à un blanchiment de la surface. La Figure 5 montre comment les variations de couleur du pin sylvestre nu varient durant les 12 semaines du cycle de vieillissement artificiel NF EN 927-6, conduisant à une teinte blanchâtre de la surface. La coloration grise n'est pas produite par le vieillissement artificiel, et cela d'autant plus que les microorganismes de type champignons de bleuissement ne se développent pas durant ce type de vieillissement. En comparaison, la Figure 6 montre le développement progressif de la coloration grise de ce même pin sylvestre exposé à 45° face au sud durant 24 mois sous l'action des UV, de l'eau et du développement de microorganismes dont les champignons de bleuissement.

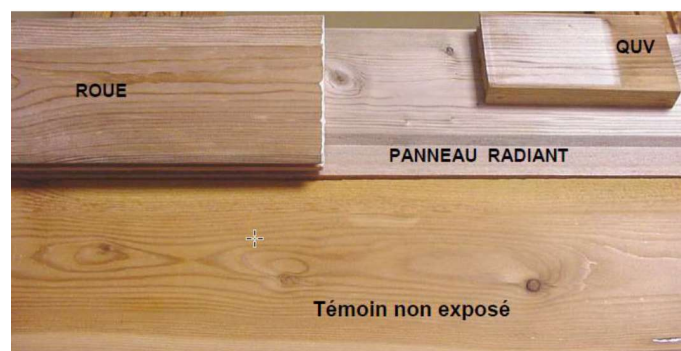


Figure 4 : Variations de couleur de pin sylvestre vieilli à FCBA par trois dispositifs artificiels (roue de dégradation, QUV, panneau radiant)-Photographie FCBA©



Figure 5 : Variations de couleur de pin sylvestre nu exposé dans un QUV durant 12 semaines (projet WoodWisdom-net WoodExter)

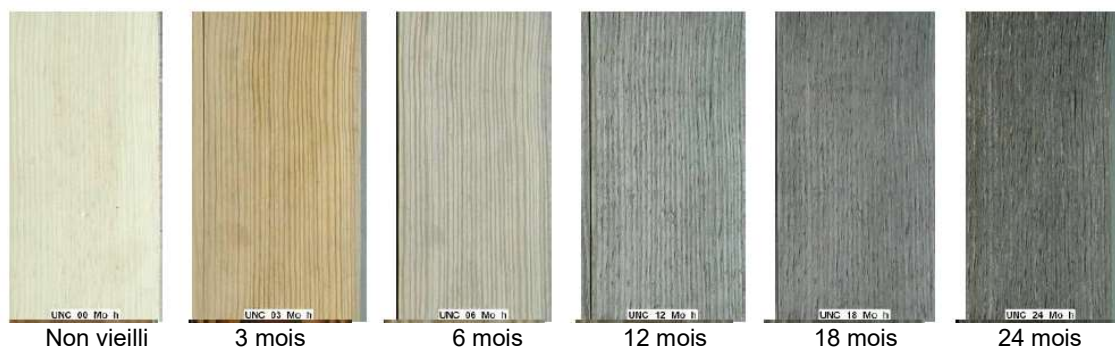


Figure 6 : Variation de couleur de pin sylvestre nu exposé à 45° Sud durant 24 mois (projet WoodWisdom-net WoodExter)

D'un point de vue chimique, tous les constituants chimiques majeurs du bois sont dégradés durant le vieillissement. La lignine est dépolymérisée et des fragments de lignine de faibles poids moléculaires sont lessivés par la pluie. Les surfaces de bois vieilli sont constituées principalement de cellulose et d'un très faible taux de lignine. La dégradation du bois par les UV se traduit par une réduction du taux de méthoxyl et de lignine, et une augmentation de l'acidité et du taux de carbonyles. L'exposition aux UV conduit à une augmentation des groupes carbonyles et carboxyliques et une diminution des groupes aromatiques. Des trois principaux composants du bois, c'est la lignine qui est la plus facilement modifiée par les UV.

Des travaux²² ont montré qu'*Aureobasidium pullulans* pouvait croître sur des placages d'épicéa exposés aux UV et que cette croissance variait en fonction du temps d'exposition. La croissance du champignon augmente avec le temps d'exposition jusqu'à un point au-dessus duquel la croissance diminue. Les auteurs concluent que *Aureobasidium pullulans* utilise les produits de photodégradation résultant d'une exposition aux UV. Le fait que les sous-unités de lignines soient aromatiques et donc fongitoxiques peut expliquer la réduction de la croissance observée sur les placages exposés aux UV pendant 8 jours.

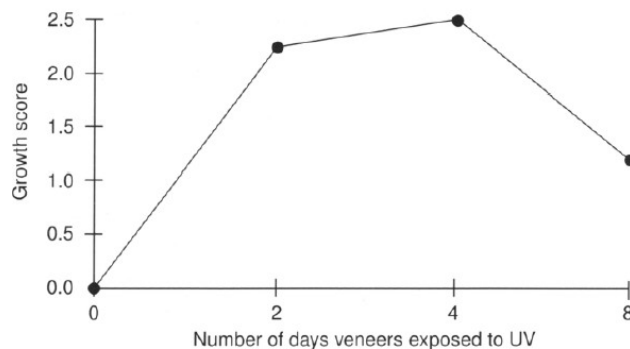


Figure 7 : Croissance d'Aureobasidium pullulans sur des placages d'épicéa exposés aux UV ²²

Dans ses travaux de thèse, Julia Buchner a exposé des surfaces de bois (non peintes) à du vieillissement naturel et du vieillissement artificiel ²³. Trois cycles de vieillissement artificiel ont été étudiés : le cycle de NF EN 927-6 et deux variations de ce cycle (l'une sans pulvérisation, l'autre sans pulvérisation et avec une irradiation plus faible). Ses travaux ont montré une augmentation graduelle du nombre de colonies formant unités (CFU) sur les échantillons exposés naturellement et une diminution des CFU sur les échantillons exposés artificiellement. L'auteur conclut que le vieillissement naturel ne peut pas être remplacé par des techniques de vieillissement artificiel pour l'étude du développement des microorganismes à la surface du bois et que le vent et la pluie dans un environnement naturel peuvent être les vecteurs d'une nouvelle colonisation des surfaces en bois.

3.3 Influence de la conception des surfaces de bois non peintes sur le développement des champignons de bleuissement

La conception des surfaces peut influencer le développement des microorganismes comme l'illustrent la Figure 8 et la Figure 9. Dans la Figure 8, les parties saillantes des lames de bardage sont plus colonisées par les microorganismes (et donc plus grises) car elles sont plus exposées à l'humidité. En particulier, les lames à proximité du sol sont elles aussi fortement colonisées car soumises à une humidification accentuée du fait du rebond des gouttes de pluie du sol vers le bardage. Quant aux zones directement sous les parties saillantes, elles sont plus protégées de l'humidité ce qui explique une moindre colonisation par les microorganismes. Dans la Figure 9, le débord métallique en partie supérieure du bardage procure une protection vis-à-vis du ruissellement de l'eau. Cette partie plus sèche est donc moins colonisée par les champignons de bleuissement.

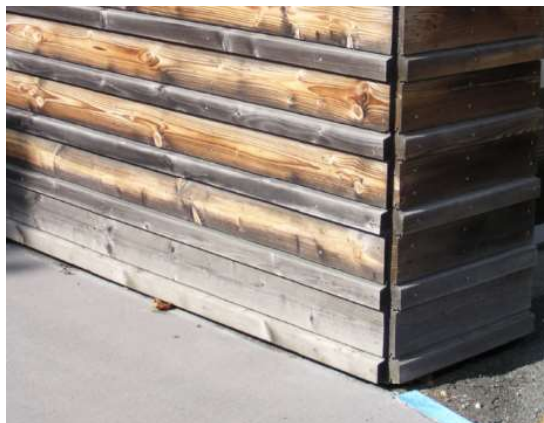


Figure 8 : Influence du design de lames de bardages sur le développement des microorganismes et champignons de bleuissement – Exposition sud (Photographie FCBA ©)



Figure 9 : Influence de détail architecturaux sur le développement de microorganismes et champignons de bleuissement à la surface d'un bardage bois exposé au sud. (Photographie FCBA ©)

4. Le développement de champignons de bleuissement sur les surfaces peintes

4.1 Généralités

Selon O'Neill ²⁴ les bactéries sont les premiers colonisateurs des surfaces peintes. Les capsules bactériennes semblent favoriser l'installation ultérieure des champignons et leur croissance continue. Des preuves sont fournies pour étayer l'hypothèse selon laquelle les bactéries conditionnent les surfaces peintes et, par le biais d'enzymes extracellulaires, convertissent les composants de la peinture en métabolites fongiques.

Une étude brésilienne ²⁵ sur des façades minérales décrit la séquence de colonisation fongique et l'influence de l'incorporation de biocides sur les films de peinture. Deux bâtiments ont été peints avec une peinture acrylique, avec et sans une formulation biocide expérimentale contenant un carbamate (carbendazim), du N-octyl-2H-isothiazolin-3-one et du N-(3,4-dichlorophényl)N,N-diméthyl urée (concentration totale du biocide 0,25% m/m). Une semaine après l'application de la peinture, les principaux groupes d'organismes détectés étaient les levures et *Cladosporium*. La population de levures est tombée à des niveaux indétectables après la troisième semaine et

ce groupe microbien n'a plus été détecté jusqu'à la 31^{ème} semaine, après quoi il a augmenté à des niveaux élevés la 42^{ème} semaine. *Aureobasidium* a montré un schéma similaire à celui des levures. Les principaux genres de champignons détectés sur la période de 42 semaines étaient *Alternaria*, *Curvularia*, *Epicoccum*, *Helminthosporium*, *Coelomyces* (principalement *Pestalotia/Pestalotiopsis*), *Monascus*, *Nigrospora*, *Aureobasidium* et *Cladosporium*. Ce dernier a été le principal genre fongique détecté à tout moment. Les facteurs physiologiques contrôlant la colonisation sont discutés. *Cladosporium*, *Aureobasidium*, *Tripospermum* et les levures présentes sur les surfaces peintes étaient tous capables de se développer sur une gélose aux sels minéraux contenant 10% de chlorure de sodium. C'est la première fois que le genre *Tripospermum* a été signalé sur des bâtiments peints. La population fongique sur les surfaces contenant du biocide était significativement plus faible que sur les surfaces sans biocide après 13 semaines, et ce jusqu'à 42 semaines après application de la peinture, mais il n'y avait pas de différence statistiquement significative dans le niveau de biodiversité fongique.

Horvath R.S *et al.* ²⁶ ont observé en laboratoire la croissance d'*Aureobasidium* sur du pin recouvert de peinture et du pin brut, mais pas sur des lames de verre peintes par les mêmes peintures ou lames de verre non peintes. Comme la croissance d'*Aureobasidium pullulans* s'est produite à la fois sur le bois peint et sur le bois non peint, mais pas sur les lames de verre, les auteurs concluent que la source de carbone et d'énergie nécessaire à la croissance n'était pas associée aux composants de la peinture mais était probablement fournie par le bois. Les auteurs montrent que plusieurs composés aromatiques liés aux matières extractibles aromatiques du bois se sont avérés favoriser la croissance de ce champignon. Selon les auteurs, le fait que la croissance sur la surface du bois peint est apparue 1 à 2 jours après le début de la croissance sur la surface non peinte indique également que la lixiviation des composants du bois à travers le film de peinture était nécessaire avant que la croissance du champignon puisse commencer. Ces résultats sont certainement à modérer du fait que les produits de peinture étudiés dans ces travaux sont anciens et n'étaient pas en phase aqueuse ; des produits actuels en phase aqueuse auraient certainement abouti à d'autres conclusions. Cette critique s'appuie en effet sur des expérimentations menées récemment à FCBA : dans le cadre de l'étude MOVAP, des films d'une peinture commerciale blanche ont été déposés sur des plaques de polyéthylène afin de pouvoir ensuite les décoller et les soumettre à des tests de traction. Ces plaques revêtues avec cette peinture ont été exposées au vieillissement naturel (site de FCBA Bordeaux) sur des châssis inclinés à 45° face au sud. Après seulement 5 mois de vieillissement (avril à septembre 2019), les films de peinture sur ce support inerte ont présenté du développement de champignons de bleuissement. Cette expérimentation confirme que le développement de champignons de bleuissement sur les surfaces en bois peintes n'est pas exclusivement attribuable au support bois mais qu'il peut également se développer sur les produits de peinture s'ils y trouvent les conditions favorables pour croître.

Schoeman et Dickinson précisent que *Aureobasidium pullulans* a la capacité de croître sur le film de peinture et à travers le film de peinture conduisant à une apparence mouchetée. Selon les auteurs, ce type de colonisation est rendue possible par des nutriments transférés à partir du bois sous la finition, l'environnement externe et les composants de la formulation de peinture ²².

Depuis les travaux d'Henderson ^{27, 28, 29}, on sait que *Aureobasidium* est capable de se développer sur le benzoate, le p-hydroxybenzaldéhyde, l'acide férulique, syringaldéhyde, et la vanilline. Les travaux de Horvath *et al.* ²⁶ permettent d'inclure l'acide protocatéchuïque, l'acide tannique et le

catéchol. Tous ces composés sont liés aux extraits aromatiques du bois et tous pourraient servir de facteurs de croissance présents dans le bois. Le catéchol n'est probablement pas le substrat initial utilisé par cet organisme pour se développer sur le bois mais serait plutôt un produit intermédiaire commun issu de la décomposition des autres composants utilisables du bois. Cette possibilité est suggérée par le fait que la croissance sur le bois présentait la pigmentation normale de la mélanine du champignon, alors que la croissance sur le catéchol provoque une perte graduelle de ce pigment. D'une manière générale, il a été démontré par Chavin *et al.*³⁰ que le catéchol provoque la dépigmentation des cellules contenant de la mélanine. Si le catéchol constituait une source primaire de carbone et d'énergie fournie par le bois, le pigment de mélanine ne serait pas présent pendant la croissance sur le bois.

Selon Jensen *et al.*³¹, le scénario le plus courant de surfaces peintes colonisées est une croissance secondaire sur des particules de sol organique adhérant au film de peinture. Ces particules de sol fournissent un substrat riche pour les champignons. Les espèces prédominantes sur les surfaces peintes incluent *Aureobasidium*, *Alternaria*, *Epicoccum*, *Phoma* et *Cladosporium*. Les propriétés initiales du film de peinture peuvent évoluer une fois que des microorganismes s'y développent. La présence d'un biofilm local accélérera la croissance, car il retiendra l'humidité et permettra la croissance d'autres organismes. L'augmentation de l'humidité à la surface peut également entraîner des défauts physiques du film, tels que des microfissures permettant aux champignons de pénétrer dans le revêtement. Toujours selon Jensen *et al.*³¹, les hyphes fongiques peuvent s'étendre dans le film de peinture et les enzymes extracellulaires sécrétées par les champignons peuvent éventuellement dégrader les liants (résines) de la finition. Les auteurs préconisent d'éliminer les champignons de bleuissement avant toute remise en peinture au risque de voir le problème réapparaître.

Selon la revue bibliographique menée par Gaylarde *et al.*³² portant sur la détérioration des surfaces peintes, les microorganismes se déposent sur les surfaces peintes à partir de l'environnement. Sur les surfaces extérieures, la pluie et le vent entraînent de petits fragments d'origine végétale et animale, des spores et des cellules microbiennes, ainsi que des minéraux et des polluants atmosphériques. Une fois qu'ils atteignent la surface, les micro-organismes adhèrent et croissent à une vitesse qui dépend de la nature du revêtement, du substrat peint et des conditions environnementales. Les conditions hygrothermiques sont particulièrement importantes: une humidité ou une condensation élevée, ainsi que des températures élevées, favorisent la croissance. Les constituants de la peinture influencent également le développement microbien, certains composants étant inhibiteurs et d'autres stimulant la croissance. Des dérivés de cellulose peuvent être des nutriments pour les cellules fongiques, alors que les solvants organiques et les métaux lourds contenus dans les pigments peuvent avoir un effet défavorable sur eux. La formation éventuelle du biofilm microbien conduit à des modifications de propriétés telles que la brillance, la rugosité, l'hydrophobie, la rétention de chaleur et d'eau de la peinture, et à long terme sa durabilité.

Les champignons peuvent altérer la surface peinte en pénétrant dans le film et en attaquant ou en exposant le matériau sous-jacent. Les métabolites microbiens libérés peuvent réagir avec le revêtement, réduisant ainsi son efficacité et sa durée de vie. De nombreux micro-organismes détectés sur un film de peinture sont de purs contaminants aériens qui ne croissent pas sur la surface mais qui peuvent servir de nutriments pour d'autres organismes.

Qu'ils soient ou non les premiers colonisateurs, les champignons sont capables de produire des métabolites dégradants (principalement des acides organiques) qui affaiblissent le film et le pénètrent ensuite avec leurs hyphes.

Les auteurs rapportent que l'encrassement biologique sur les surfaces des bâtiments était plus élevé au printemps et à l'automne.

Les travaux menés par FCBA lors du projet européen SERVOWOOD ont permis d'établir une succession de microorganismes sur des surfaces peintes exposées à 45° face au sud ³³. Cette succession est illustrée dans la Figure 10. Après 3 et 6 mois d'exposition, plusieurs espèces fongiques ont été identifiées, principalement présentes dans l'environnement. Après 9 et 12 mois d'exposition, la diversité des espèces fongiques a diminué et le champignon de bleuissement *Aureobasidium pullulans* est devenu dominant sur les surfaces lasurées étudiées. Ce résultat démontre que lorsque *Aureobasidium pullulans* devient dominant, la diversité des autres espèces fongiques diminue. Ce résultat était cohérent avec les évaluations visuelles de la croissance fongique indiquant une forte augmentation des valeurs de cotations visuelles après 9 et 12 mois d'exposition.

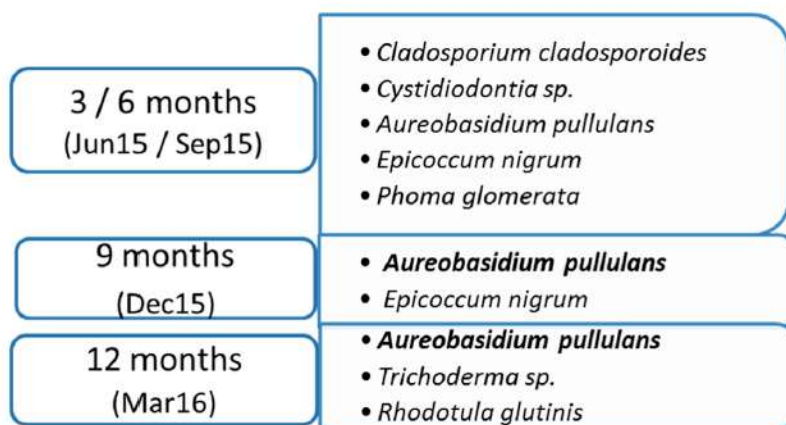


Figure 10 : Principales espèces fongiques identifiées après 3, 6, 9 et 12 mois d'exposition sur des échantillons lasurés (exposition 45° Sud, Bordeaux). Les espèces en gras ont été identifiées de manière prédominante ³³.

Une étude menée par l'ITECH et l'université Claude Bernard de Lyon a analysé 64 échantillons de revêtements extérieurs provenant de différentes régions françaises (Alsace, Bretagne, Franche Comté, Landes, Pays basque, Rhône Alpes, Vendée) afin d'étudier les populations fongiques. Les résultats résumés dans le Tableau 1 montre que *Aureobasidium pullulans* figure parmi les principales espèces fongiques isolées.

Fungi collectés sur les peintures en extérieur en France

Fungi identifiés sur au moins 5% des échantillons collectés	Répartition en %
Alternaria alternata	72
Epicocum purpurascens	53.1
Trichoderma viride	26.6
Cladosporium cladosporioides	23.4
Aureobasidium pullulans	14.1
Sordaria fimicola	14.1
Phoma herbarum	10.9
Ulocladium atrum	10.9
Ulocladium chartarum	9.4
Aspergillus japonicus	7.8
Chaetomium globosum	7.8
Fusarium graminearum	7.8
Mucor hiemanis	7.8
Mucor circunelloides	6.25

Tableau 1 : Principales espèces fongiques identifiées sur les revêtements extérieurs en France³⁶

4.2 Influence de la géométrie des surfaces peintes

La géométrie des surfaces peintes peut favoriser le développement de champignons de bleuissement par l'effet qu'elle induit sur l'épaisseur de la finition et donc sur l'humidité de la surface. Les arêtes vives sont des zones où l'épaisseur de la finition est très faible, même après l'application de trois couches de produit de peinture. La Figure 11 illustre la problématique en montrant une coupe transversale d'une arête d'un échantillon de bois peint (3 couches) observée au microscope. Plus on se rapproche de l'arête, plus l'épaisseur de la finition (en orange vif) décroît. Au droit de l'arête, l'épaisseur est quasi nulle. Dans cette zone, le bois est donc peu (voire pas) protégé de l'humidité, ce qui constitue une zone favorable au développement de champignons de bleuissement.

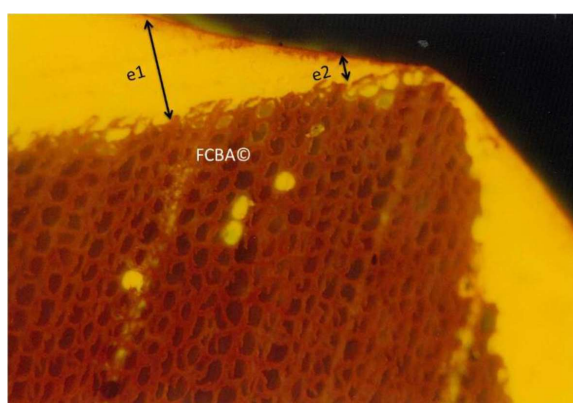


Figure 11 : Variation d'épaisseur de finition aux abords d'une arête vive d'une éprouvette de bois (Photographie FCBA)

En pratique on constate en effet que, sur les surfaces peintes, les arêtes vives sont les premières zones à être colonisées par les champignons de bleuissement comme le montre la Figure 12. Arrondir les arêtes est donc un moyen de réduire le développement de ces champignons en conduisant à une surface moins humide du fait d'une épaisseur plus importante de finition.



Figure 12 : développement de champignons de bleuissement sur 3 éprouvettes revêtues de lasure semi-transparente et dont les bois de bout sont imperméabilisés – Projet SERVOWOOD

4.3 Influence de la composition des produits de peinture

4.3.1 Composants génériques des produits de peinture

Tous les produits de peinture contiennent les mêmes constituants primaires : un ou des liants (résines), des pigments et des charges qui confèrent la couleur et le garnissant et un solvant. Le solvant est soit de nature organique, dans le cas d'un produit en phase solvant, soit de l'eau dans le cas d'un produit en phase aqueuse. Plusieurs autres ingrédients, représentant environ 5 % de la formule, sont également présents : tensioactifs, biocides, plastifiants, diluants, cires, épaississants, agents matants, absorbeurs UV, etc. Certains composés peuvent favoriser le développement fongique de surface. Les composants cellulosiques (tels certains épaississants) peuvent agir comme des nutriments pour les microorganismes qui produisent des enzymes cellulases³².

4.3.2 Phase solvant, phase aqueuse

Avant la Directive Européenne de 2010 sur les émissions de Composés Organiques Volatils, les produits de peinture utilisés pour la protection du bois en extérieur étaient principalement en phase solvant et à base de résines alkydes. Force était de constater que ces produits étaient moins sujets au développement de champignons de bleuissement.

Traditionnellement, aucun biocide spécial n'était ajouté pour la conservation du film sec. Les anciennes peintures alkydes en phase solvant contenaient des sels de métaux lourds (par exemple du plomb et du zinc) utilisés comme catalyseur de durcissement. En plus de jouer le rôle de catalyseur, ces métaux lourds rendaient le film résistant aux développements de microorganismes³¹.

Selon Schoeman et Dickinson, les finitions en phase aqueuse sont plus vulnérables à l'attaque fongique du fait de leur propriétés de transmission de l'humidité³⁴.

4.3.3 Concentration pigmentaire volumique

La concentration pigmentaire volumique (CPV) définit le rapport des volumes de matières pulvérulentes contenu dans le produit à la valeur de l'extrait sec. La CPV rend compte, par définition, non pas de la concentration de la pigmentation mais de l'ensemble « pigments – matières de charge »³⁵. Le Tableau 2 rassemble quelques CPV selon le revêtement considéré.

CPV (%)	Masse de matières pulvérulentes	Domaines d'utilisation
0	Quantités croissantes du haut vers le bas ↓	Vernis
15 à 20		Laques
35 à 50		Peintures satinées : • brillantes • moyennes • mates
50 à 60		Peintures mates
60 à 80		Apprêt/RPE(1)

(1) Revêtement plastique épais.

Tableau 2 : Valeurs de quelques concentrations pigmentaires volumiques³⁵

La CPV est un paramètre important dans l'élaboration d'un produit de peinture car elle détermine la brillance et la perméabilité. La relation entre la CPV et la susceptibilité des films de peinture à la croissance des microorganismes est complexe. Une CPV plus faible augmente l'imperméabilité, ce qui entraîne une diminution de la biodétérioration. Avec une CPV faible, du fait de la faible charge en matières pulvérulentes, le film sera relativement lisse, "fermé", peu lessivable. Il possède une bonne rétention des biocides, mais son efficacité instantanée est faible. Mais une faible CPV diminue également la perméabilité du film à la vapeur d'eau, ce qui peut conduire à des temps plus longs d'humidification des surfaces.

A l'opposé, une peinture à haute CPV (aspect mat), présente un film rugueux, "ouvert", fortement lessivable, permettant au biocide de s'exprimer très vite, donc avec une efficacité instantanée forte, mais limitée dans le temps³⁶.

4.3.4 Pigmentation

Les pigments sont utilisés pour donner sa couleur au revêtement. Ils peuvent être inorganiques ou organiques. Les pigments organiques sont plus susceptibles d'agir comme nutriments microbiens. Les impuretés contenues dans les pigments, telles que les phosphates et les sels de potassium, peuvent jouer le rôle de micronutriments et augmentent la sensibilité de la peinture à la biodétérioration. L'oxyde de zinc, pigment blanc très utilisé, est connu pour ses propriétés antifongiques^{32,37}.

En ce qui concerne les pigments organiques, une étude montre que le bleu Victoria et le méthyl violet ont été déclarés comme étant sensibles à la croissance fongique probablement en raison de la présence de dextrine (un sucre nutritif) dans la formulation³².

Une étude du taux d'encrassement de panneaux en fibrociment peints exposés durant 34 mois à Florianopolis (Brésil) a montré que sur les dix peintures acryliques testées, les peintures de couleur bleue, rouge et marron foncé ont été les plus lentes à se décolorer par l'action des microorganismes comparativement aux peintures de couleur blanche, verte, jaune, marron clair³⁸. Les auteurs attribuent la performance supérieure de la peinture bleue du fait de la présence de cuivre dans le pigment. La peinture rouge ne contenait pas d'oxydes de métal, mais l'analyse par

spectrophotométrie à fluorescence X a révélé qu'elle contenait le taux d'ion chlorure le plus important. Les auteurs supposent que c'est le fort taux de pigment de cette peinture et ce fort taux d'ions chlorures qui sont responsables de l'effet.

Dans le cas de la peinture couleur marron, les auteurs pensent que c'est son fort taux de SO₃ qui conduit certainement à une surface acide pouvant inhiber la croissance de certains microorganismes et en particulier des cyanobactéries. Les auteurs concluent qu'un choix approprié de pigments peut prolonger la vie du produit de peinture et réduire l'utilisation de biocides.

Sjökvist et Blom³⁹ ont étudié l'influence de la couleur de la finition, du bois de cœur et de l'aubier, sur la teneur en humidité et la croissance des micro-organismes à la surface de planches d'épicéa de Norvège exposé au vieillissement naturel. Ils montrent qu'après 5 ans de vieillissement, la peinture acrylique rouge étudiée (Coating C) était exempte de croissance fongique contrairement aux deux peintures blanches de l'étude, l'une alkyde (Coating A), l'autre acrylique (Coating B). Les auteurs montrent que le taux d'humidité des bois revêtus de peinture rouge était inférieur à celui à celui des bois peints en blancs (Cf Tableau 3). Les auteurs montrent que les échantillons de bois de cœur peints présentant une humidité plus faible que ceux en bois d'aubier avaient une croissance biologique plus faible.

Table 2: Measured MC and biological growth during the test period (October 12, 2011–August 26, 2016) with the standard deviation given in parentheses

Sample	MC (%)			Biological growth		
	MC _{average}	Min	Max	June 2014	June 2015	June 2016
Coating A						
Heartwood	20.6 (5.7)	11.3	29.4	2.1 (0.3)	2.2 (0.4)	3.2 (0.4) [°]
Sapwood	24.9 (7.4)*	13.7	39.2	1.6 (0.5)	2.0 (0.9)	4.3 (0.7) [°]
Coating B						
Heartwood	20.4 (5.9)	11.4	29.3	1.0 (0)	1.0 (0)	1.5 (0.5)
Sapwood	23.3 (7.1)	12.7	34.9	1.0 (0)	1.0 (0)	1.6 (0.5)
Coating C						
Heartwood	17.5 (7.5)*	7.3	29.2	0	0	0
Sapwood	19.7 (7.6)	9.2	32.5	0	0	0

A white alkyd coating, B white acrylic coating, and C red acrylic coating

Significant difference in values between the two groups, $p \leq 0.05$, * = MC, ° = biological growth

Tableau 3 : Influence de la pigmentation de peintures, du duramen et de l'aubier sur le taux d'humidité d'épicéa peint et la croissance biologique³⁹.

D'autres travaux montrent cette même tendance à moins de colonisation sur les surfaces rouges que blanches⁴⁰ du fait d'une humidité plus faible et de températures de surface plus élevées.

La pigmentation d'un produit de peinture a une influence sur la température de surface. Elle peut donc également influencer sur l'humidité à la surface des échantillons peints, et par conséquent sur le développement de microorganismes. La Figure 13 montre que pour une température de l'air maximale d'environ 30°C, la température de surface du pin recouvert de peinture blanche est d'environ 40°C alors que celle du pin recouvert de peinture noire est d'environ 60°C. Parmi les produits étudiés (peintures, lasures), c'est la peinture blanche qui a conduit aux températures les plus basses. L'essence de bois influence elle aussi la température de surface des échantillons revêtus de finition : pour le même produit et la même pigmentation, l'échantillon de chêne (3xICP

clear Oak) a conduit à une température supérieure de quasi 10°C par rapport à celle du mélèze (3xICP clear Larch).

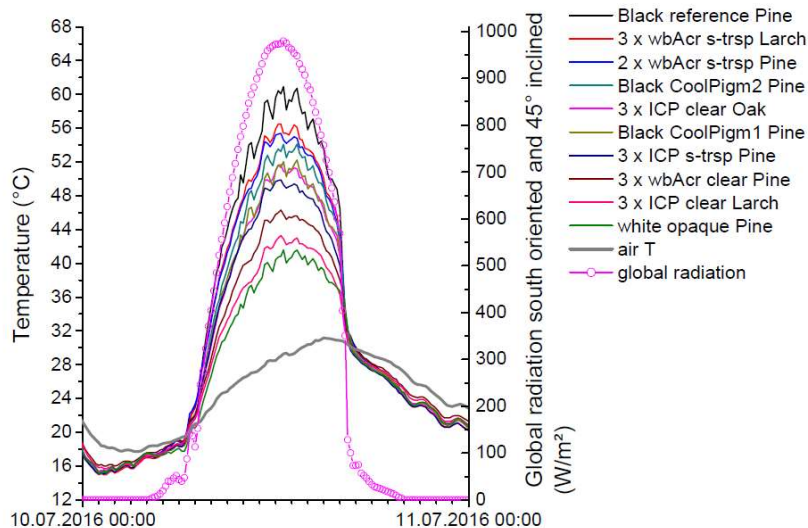


Figure 13 : Températures de surface d'échantillons de bois recouverts de produits de différentes pigmentations mesurées un jour d'été 2016 à Vienne en comparaison de la température de l'air et de du rayonnement global (exposition sud 45°)⁴¹

Dans le cadre de l'étude CODIFAB MECAFINIT, des films libres de peinture blanche et de lasure marron ont été exposés aux intempéries à FCBA avant d'être soumise à des essais de traction. Les films libres (non adhérents à un support) étaient placés dans un porte-échantillon métallique et simplement posés sur des éprouvettes de pin sylvestre utilisées pour faciliter leur accrochage sur les racks d'exposition inclinés à 45° face au sud. Après 3 mois de vieillissement (Bordeaux, FCBA), lorsque les films ont été retirés des racks pour évaluer leur élasticité par les tests de traction, nous avons pu observer que les éprouvettes de bois sous les films présentaient un développement fongique totalement différent comme le montre la Figure 14. Sous le film non adhérent de peinture blanche, la surface était colonisée par les champignons de bleuissement. Sous le film de lasure marron, les champignons de bleuissement n'étaient pas visibles. La Figure 14 montre également l'effet du porte-échantillon métallique utilisé pour maintenir les films sur le développement des champignons. Toutes les zones de bois recouvertes par le porte-échantillon étaient exemptes de champignons de bleuissement très probablement du fait que le métal a généré à ces endroits des températures plus importantes qu'ailleurs ce qui a asséché ces zones.

Les pigments ont aussi un rôle à jouer sur la protection des biocides utilisés comme protecteurs de films secs. Les biocides sont dégradés plus rapidement dans les films ne contenant pas de pigments. Cependant, dans les films pigmentés, les pigments non seulement reflètent la lumière entrante, mais peuvent interagir également avec la photodégradation du biocide ⁴².



Films de peinture blanche et de lasure marron



Aspect du pin sylvestre sous les films non adhérents (en haut : sous la peinture blanche ; en bas : sous la lasure marron)

Figure 14 : Effet de la pigmentation des films de finition sur le développement de champignons de bleuissement sous ces films (non adhérents)

Les peintures à pigments refroidissants (*cool pigment paint*) sont une nouvelle génération de peintures destinées à refroidir les surfaces des bâtiments dans un but d'économie d'énergie. Ces peintures thermo-réfléchissantes fournissent une isolation en réfléchissant la chaleur rayonnante du soleil, réduisant ainsi la température de surface des matériaux peints. Elles peuvent donc contribuer à atténuer les îlots de chaleur urbains. Les pigments utilisés dans ces revêtements comprennent des pigments colorés inorganiques complexes et des oxydes métalliques mixtes. Les peintures contenant ces pigments ont montré qu'elles réfléchissent beaucoup plus le rayonnement proche infrarouge que les peintures colorées similaires contenant des pigments conventionnels, et qu'elles conservent ce comportement pendant près de deux ans.

On peut se demander si cette technologie est favorable ou défavorable au développement de microorganismes. En refroidissant les surfaces, on risque d'aboutir à des supports humides plus longtemps et on risque également de favoriser les phénomènes de condensation d'eau. On risque donc de favoriser le développement de microorganismes. Cependant en Allemagne, Sedlbauer *et al.* montrent une diminution des temps de condensation d'environ 15 % grâce à l'utilisation de telle peinture ¹⁶.

Selon Gaylarde *et al.* ³², les peintures à effet refroidissant ne contribuent à l'efficacité énergétique que sur une courte période. En particulier, exposés à des climats tropicaux et subtropicaux, les matériaux se couvrent rapidement de saletés et de biofilms, ce qui modifie leur apparence initiale et leurs propriétés réfléchissantes.

4.3.5 Perméabilité à l'eau liquide et à l'eau vapeur

Les produits de peinture en phase solvant présentent généralement une perméabilité à l'eau liquide plus faible que les produits de peinture en phase aqueuse, ce qui réduit notablement le développement de champignons de bleuissement. Les systèmes de finition pour menuiserie doivent démontrer que leur perméabilité à l'eau liquide, testée selon NF EN 927-5 ⁴³, est inférieure à 175 g/m². Cette valeur seuil est introduite dans la norme NF EN 927-2 relative aux performances des finitions extérieures pour bois ⁴⁴.

Les propriétés de transmission à la vapeur d'eau des produits de finition interviennent également dans les processus d'humidification des surfaces et donc dans le risque de colonisation par les microorganismes. Par contre, à l'heure actuelle, il n'existe pas de seuil défini pour la perméabilité

à la vapeur d'eau des systèmes de finition pour menuiserie bois. Quel seuil de perméabilité à la vapeur d'eau influence le développement de champignons de bleuissement ? Des études sont nécessaires pour y répondre, d'autant que récemment une étude néerlandaise a montré qu'il n'y a pas de corrélation entre la perméabilité à l'eau liquide et la perméabilité à l'eau vapeur des systèmes de finition pour menuiserie ⁴⁵. Autrement dit, un produit de peinture peut être imperméable à l'eau liquide tout en étant perméable ou imperméable à la vapeur d'eau.

4.3.6 Brillance, rugosité et développement fongique

Les surfaces peintes lisses qui présentent peu d'irrégularités microscopiques reflètent la lumière. Il en résulte une finition brillante et lumineuse. Si la surface de la finition est rugueuse, elle génère une réflexion diffuse de la lumière (Figure 15). La surface apparaît donc moins brillante.

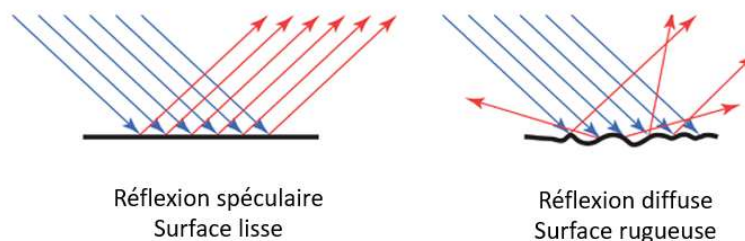


Figure 15 : Influence de la topographie de la surface sur la réflexion de la lumière

Une surface rugueuse permet une accroche plus facile des spores des bactéries et champignons. Selon Breitbach *et al.*³⁸, la bioréceptivité d'une surface est déterminée par sa rugosité ainsi que par sa composition chimique.

Dans le cas du bois, l'essence de bois et ses caractéristiques anatomiques peuvent influencer la rugosité en surface de la finition. A titre d'illustration, la Figure 16 montre un développement de champignons de bleuissement sur deux peintures commerciales blanches appliqués sur chêne. Les hyphes du champignon sont particulièrement visibles dans les fonds de pores parce que ces zones en creux sont humides plus longtemps.

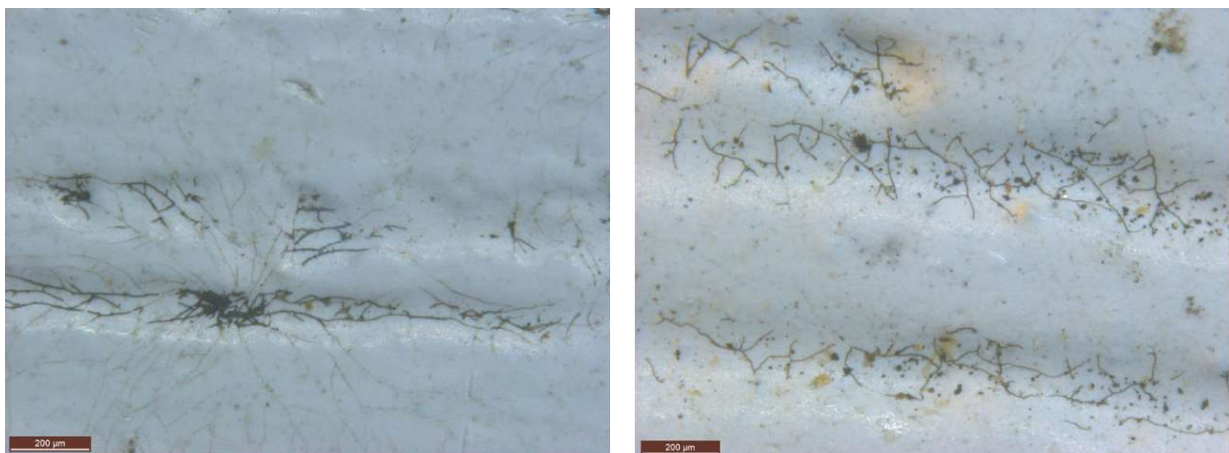


Figure 16 : Développement de champignons de bleuissement sur deux peintures commerciales blanches appliquées sur chêne (x63-photographies FCBA ©, échantillons de l'étude CODIFAB Finitions 10 ans)

D'une manière générale, la dégradation des finitions conduit à des changements de brillant importants. En pratique le film de finition perd progressivement son brillant. Outre le changement de brillance proprement dite, ces pertes de brillant traduisent aussi une augmentation de la rugosité de la surface de la finition. Celle-ci devient donc un réceptacle plus favorable à l'accrochage de spores de champignons.

Dans le cadre du projet européen SERVWOOD, nous avons montré que les pertes de brillant (augmentation de la rugosité) et le développement de champignons de bleuissement étaient concomitants ⁴⁶, comme le montre la Figure 17 où le développement des champignons de bleuissement a été quantifié via les variations de la composante chromatique b^* du système colorimétrique CIE Lab. Cette figure montre une bonne superposition des variations de Delta b^* (dus au développement de champignons de bleuissement) avec les variations de la rétention de brillant (développement de la rugosité) d'une lasure semi-transparente exposées à 45° face au nord. Cette concomitance de la perte de brillant avec le développement de champignons de bleuissement est aussi visible dans le cas d'une exposition à 45° face au sud comme le montre la Figure 18. Cette figure montre à nouveau une bonne superposition des variations de Delta b^* avec les variations de la rétention de brillant.

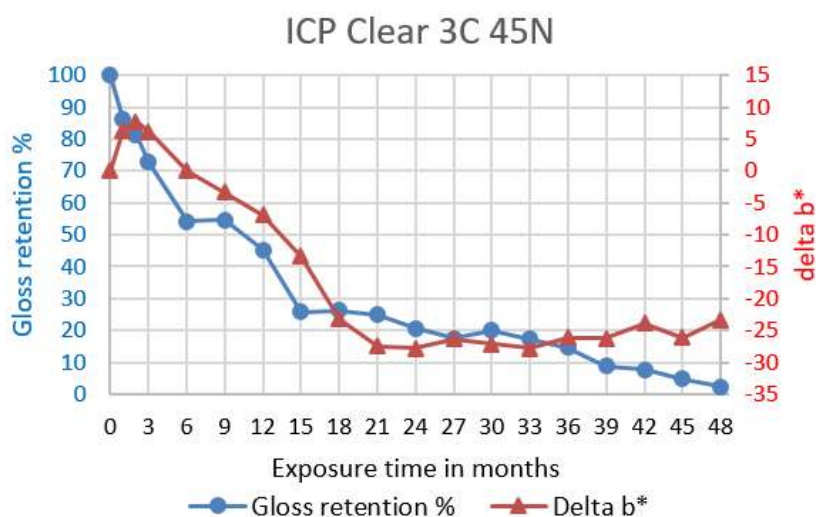


Figure 17 : Variation de la rétention de brillant et variation de Delta b^ d'une finition semi-transparente (3 couches) exposées à 4 ans de vieillissement naturel (45° face au nord, Bordeaux)*

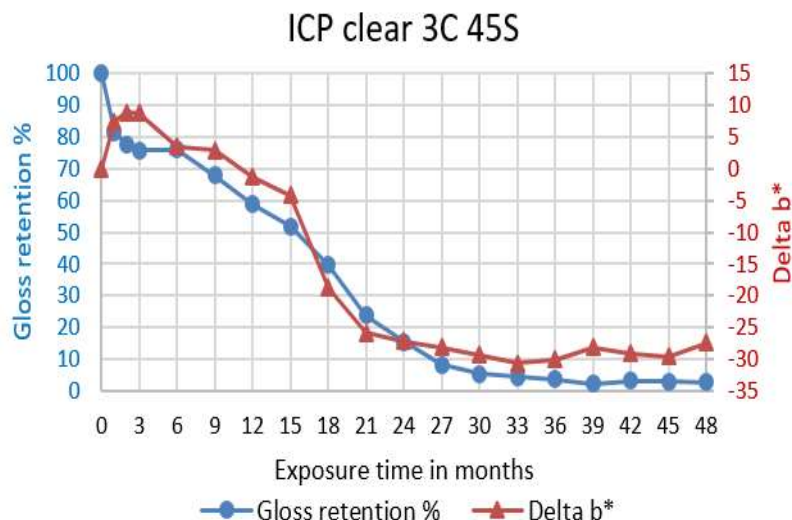


Figure 18 : Variation de la rétention de brillant et variation de Delta b* d'une finition semi-transparente (3 couches) exposées à 4 ans de vieillissement naturel (45° face au sud, Bordeaux)

4.4 Influence du macroclimat et microclimat

Le macroclimat se définit par les conditions météorologiques auxquelles est exposé l'ouvrage considéré. Selon Gaylarde *et al.*³², le macroclimat peut être moins important pour la colonisation microbologique que le microclimat à proximité immédiate des surfaces peintes.

L'isolation thermique moderne des murs a eu un impact important sur les conditions d'humidité des surfaces peintes, qui se refroidissent la nuit au-dessous du point de rosée de l'humidité atmosphérique. Du fait des progrès en isolation, peu ou pas de chaleur est transférée de l'intérieur vers l'extérieur. La surface extérieure reste donc humide plus longtemps. Cela fournit d'excellentes conditions de croissance pour les microorganismes³¹.

Il semblerait également que l'évolution de la pollution atmosphérique, associée à une diminution significative des concentrations de dioxyde de soufre dans l'air due à l'amélioration de la technologie d'épuration des gaz d'échappement et à l'interdiction de brûler du charbon dans les centrales électriques, ait modifié le climat pour favoriser la croissance de champignons et d'algues sur des surfaces peintes³¹.

En outre, le changement des méthodes dans le secteur agricole pourrait également être important pour la croissance biologique sur les façades. Les nutriments des microbes sont introduits dans l'air par les engrais. Une diminution de l'utilisation des pesticides et/ou la tendance à utiliser des pesticides plus sélectifs dans l'agriculture européenne, pourrait également influencer l'écologie sur les façades³¹.

Le microclimat aux abords du bois peint influence le développement des champignons de bleuissement. Les travaux menés par FCBA dans le cadre du projet européen SERVOWOOD l'ont clairement montré grâce notamment aux expérimentations menés sur un dispositif multifacette spécialement conçu pour le projet. Ce dispositif a permis d'exposer des éprouvettes

de bois recouvert de 2 lasures (l'une alkyde transparente en phase solvant, l'autre acrylique semi-transparente en phase aqueuse) aux différents points cardinaux et à différents angles d'exposition (0°, 45° 90°) comme le montre la Figure 19.



Figure 19 : Dispositif multifacette du projet SERVOWOOD ^{47,48} (Photographie FCBA©)

Les résultats obtenus via ce dispositif multifacettes ont montré que le développement de champignons de bleuissement était plus rapide et plus important pour les surfaces horizontales et inclinées à 45° parce que ces surfaces étaient plus humides que les surfaces verticales ³³. La Figure 20 révèle l'aspect des éprouvettes après 12 mois de vieillissement (FCBA, Bordeaux) et montre que les cotations de champignons de bleuissement atteignent le maximum de 4 (échelle de EN 16492) pour les surfaces horizontales, les surfaces inclinées à 45° et orientées à l'ouest ainsi qu'au nord. Les surfaces verticales montrent un développement plus restreint (cotation 1 à 1,3).

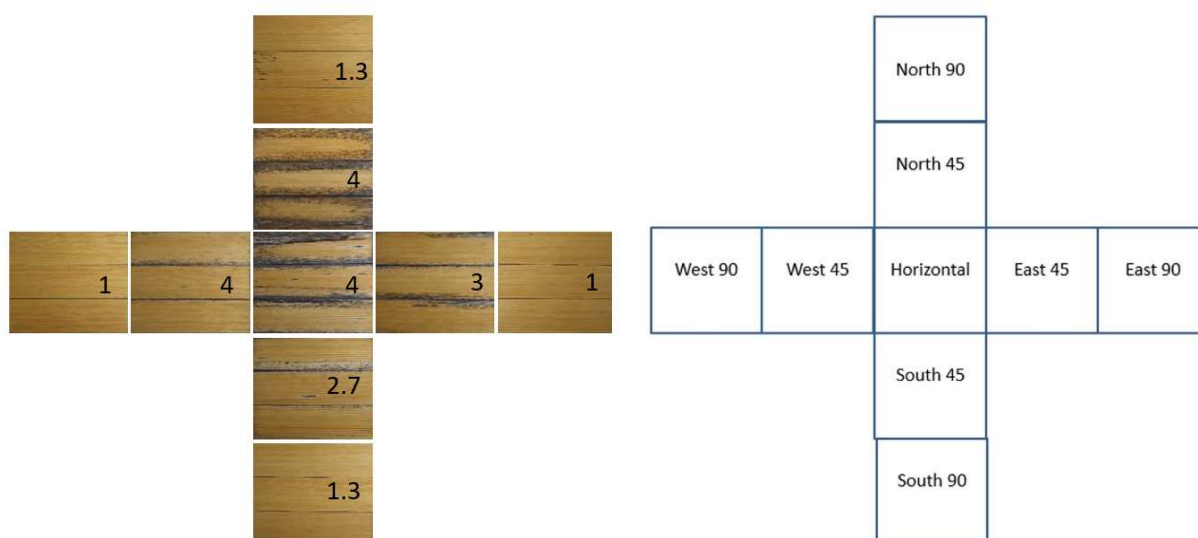


Figure 20 : Influence de l'orientation cardinale et de l'inclinaison des éprouvettes sur le développement de champignons de bleuissement d'une lasure alkyde (3 couches) phase solvant (pour chaque orientation et inclinaison, 3 répliques sont utilisées)

5. Les méthodes d'évaluation du développement de champignons de bleuissement

La détermination de l'efficacité préventive d'un traitement de protection du bois mis en œuvre contre le bleuissement fongique repose sur la norme NF EN 152 ⁴⁹. Cette méthode permet de juger de l'efficacité de produits utilisés pour le traitement du bois d'œuvre contre les champignons de bleuissement. Elle s'applique au traitement notamment par brossage et concerne les produits de préservation ayant une fonction anti-bleuissement et les produits de protection de la surface du bois (type lasure) revendiquant une fonction anti-bleu.

Dans cette méthode les surfaces à évaluer (aubier de pin sylvestre traité, pin sylvestre lasuré) sont exposées soit à un vieillissement naturel de 26 semaines (entre mars et octobre), soit à un vieillissement artificiel. La norme EN 152 propose 3 types de vieillissement artificiel possibles. A titre d'exemple, un vieillissement de 4 semaines au QUV (cycle NF EN 927-6) est une des options. A noter que les arêtes des éprouvettes sont arrondies avec un rayon de courbure de 2 mm. Les surfaces sont ensuite mises au contact de *Aureobasidium pullulans* et de *Sydowia polyspora* (*Sclerophoma pithyophila*) en présence d'un milieu nutritif durant 6 semaines.

A l'issue de l'essai les éprouvettes sont évaluées sur une échelle de 0 à 3 :

- Cotation 0 : aucun bleuissement ne peut être détecté visuellement à la surface
- Cotation 1 : la surface est bleuie de façon non significative
- Cotation 2 : la surface est complètement bleuie sur au plus un tiers
- Cotation 3 : plus d'un tiers de la surface est complètement bleui ou plus de la moitié est partiellement bleuie.

Une évaluation est réalisée sur la surface plane des éprouvettes, et une évaluation séparée est réalisée au niveau des arêtes arrondies.

Une coupe transversale de l'éprouvette permet de mieux visualiser la colonisation fongique. Elle est particulièrement utile pour distinguer le développement des champignons de bleuissement sur certaines couleurs foncées de finition.

Pour qu'un produit de traitement du bois puisse revendiquer une efficacité contre les champignons de bleuissement en service, il devra présenter aucune cotation de surface supérieure ou égale à 2. De plus, l'observation des coupes transversales des échantillons de bois traité devra montrer une zone sans bleu d'une profondeur minimale de 1 mm (Figure 21). Pour chacune des 6 éprouvettes, six mesures de la distance entre la surface de l'éprouvette et la zone intérieure bleuie sont réalisées en 6 points différents. La moyenne des 36 mesures doit être supérieure ou égale à 1,5 mm ⁵⁰.

Pin sylvestre traité par un produit anti-bleu efficace



Pin sylvestre non traité



Figure 21 : Coupes transversales de six échantillons de pin sylvestre traité par un produit anti-bleu efficace selon NF EN 152 (gauche) et de pin sylvestre non traité (droite)

Les spécifications de performance des finitions extérieures pour bois sont décrites dans la norme NF EN 927-2 ⁴⁴. Elles n'incluent actuellement aucun critère de performance en lien avec le développement de microorganismes à la surface de la finition. Seuls les critères de cloquage, craquelage, écaillage adhérence et perméabilité à l'eau liquide font l'objet de valeurs limites à ne pas dépasser.

Cela soulève des questions comme l'illustre la Figure 22. Celle-ci montre l'aspect d'une lasure transparente exposée durant 12 mois à 45° face au sud (NF EN 927-3) à Bordeaux. Les cotations visuelles ont révélé un craquelage moyen de 0,3, donc en deçà de la limite de 0,7 établie pour la catégorie stable (ouvrages type menuiserie). La finition est donc validée par l'essai requis (12 mois de vieillissement naturel à 45° face au sud). Pour autant l'aspect n'est pas acceptable pour l'utilisateur final car l'on constate un développement de champignons de bleuissement pour chacune des 3 éprouvettes exposées, principalement à partir des arêtes. Cette même lasure présente un aspect encore plus inacceptable lorsqu'elle est exposée 12 mois à 45° face au nord. Les critères de performance des finitions devraient donc tenir compte des variations d'aspect, en particulier lorsqu'elles résultent de colonisation biologique. Des limites en terme de rétention de brillant ou de variations de couleur pourrait y contribuer, comme cela se pratique dans des référentiels de peinture pour des matériaux autre que le bois.

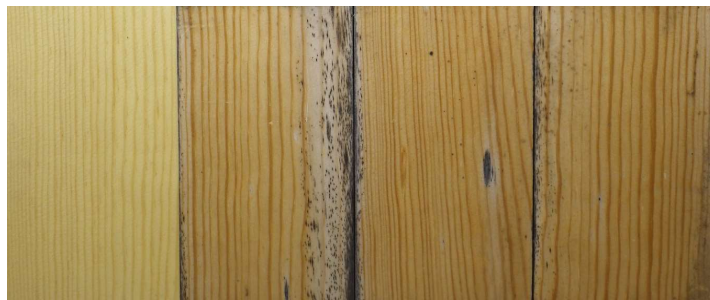


Figure 22 : Aspect d'éprouvettes de pin sylvestre recouvert de 3 couches de lasure et exposées 12 mois à 45° face au sud (Bordeaux). A gauche : témoin non exposé ; à droite : trois répliques exposées. Photographies FCBA©



Figure 23 : : Aspect d'éprouvettes de pin sylvestre recouvert de 3 couches de lasure et exposées 12 mois à 45° face au nord (Bordeaux). A gauche : témoin non exposé ; à droite : trois répliques exposées. Photographies FCBA©

Dans le cadre de l'étude CODIFAB Finitions 10 ans, le développement de champignons de bleuissement sur différentes finitions commerciales avait été évalué lors d'un vieillissement à 45° face au sud. La cotation avait utilisé l'échelle de 0 à 3 de la norme NF EN 152 ⁴⁹. La Figure 24 montre l'aspect de 4 peintures blanches (appliquées sur pin sylvestre) avant et après vieillissement. Après vieillissement, la cotation 3 a été attribuée pour le développement de champignons de bleuissement à chacune de ces 4 finitions. Celles-ci présentaient cependant un aspect très différent que l'échelle de cotation de NF EN 152 n'a pas permis de retranscrire. L'échelle de cotation proposée par NF EN 152 n'apparaît pas comme suffisamment précise pour être utilisée sur des finitions d'autant qu'elle ne prend pas en compte l'intensité du développement de champignons de bleuissement.



Figure 24 : Aspect de 4 peintures commerciales blanches avant (en bas) et après (en haut) 24 mois de vieillissement naturel (45°, Sud, Bordeaux) –Photographies FCBA©

L'évaluation du développement de microorganismes sur les surfaces peintes lors d'une exposition au vieillissement naturel s'appuie actuellement sur la norme NF EN 927-3 ⁵¹. Dans l'Annexe B de son édition de 2012, celle-ci n'évoquait pas les champignons de bleuissement mais décrivait comment évaluer le développement de moisissures sur les surfaces peintes.

Les travaux menés par FCBA dans le cadre du projet européen SERVOWOOD ainsi que dans l'étude CODIFAB Finitions 10 ans ont permis de faire évoluer ce texte en 2019. FCBA a en effet constaté que les différentes équipes européennes travaillant sur les finitions pour bois mettaient derrière le terme « moisissures » des dégradations qui majoritairement n'étaient pas des moisissures mais des champignons de bleuissement. D'une manière générale des moisissures peuvent certes se développer sur les surfaces peintes mais elles sont éliminables par un lavage de la surface et elles ne dégradent pas le revêtement. Au contraire, les champignons de bleuissement ne sont pas éliminés par un lavage de la surface, ils s'installent de manière irréversible et ils dégradent la finition en la perforant. Lors de la révision de la norme EN 927-3 en 2019, FCBA a proposé d'intégrer à la norme la distinction entre moisissures et champignons de bleuissement car leur développement respectif n'a pas la même conséquence pour la finition. Cette proposition n'a pas été retenue collectivement en tant que telle car les équipes européennes ne se sont pas senties suffisamment compétentes pour faire la distinction entre moisissures et champignons de bleuissement. C'est pourquoi le terme plus généraliste de « microorganismes » a été adopté et est venu remplacer le terme « moisissures ». La révision de la norme EN 927-3 a également permis de préciser l'échelle de cotation de ces microorganismes et renvoie désormais à la norme EN 16492 ⁵². Celle-ci recommande une évaluation de trois paramètres : intensité, quantité et surface concernée par la croissance des microorganismes. Les échelles de cotations sont précisées dans cette norme.

Les essais de vieillissement naturel des finitions extérieures pour bois (NF EN 927-3 ⁵¹) préconisent l'application du produit ou du système de finition sur la face d'essai et les 2 chants

latéraux de l'éprouvette. Les bois de bout sont scellés par un produit standard, résistant au vieillissement. Le dos de l'éprouvette n'est pas revêtu de finition et est laissé nu. Cette disposition d'essai a parfois soulevé des questions : le dos nu de l'éprouvette est-il responsable du développement de champignons de bleuissement constaté sur la face exposée ?

Les travaux de FCBA durant le projet européen SERVOWOOD ont permis d'apporter des éléments de réponse. Dans ce projet, 8 finitions ont été exposées durant 1 an à 45° face au sud (NF EN 927-3). Une partie des éprouvettes étaient réalisées conformément à la norme NF EN 927-3 (dos de l'éprouvette laissé nu), et une autre partie avait le dos nu recouvert de finition. Les résultats ont montré un développement de champignons de bleuissement similaire dans les deux cas (Figure 25). Le dos nu de l'éprouvette n'est donc pas responsable du développement de champignons de bleuissement constaté sur la face recouverte de finition et exposée à 45° face au sud.

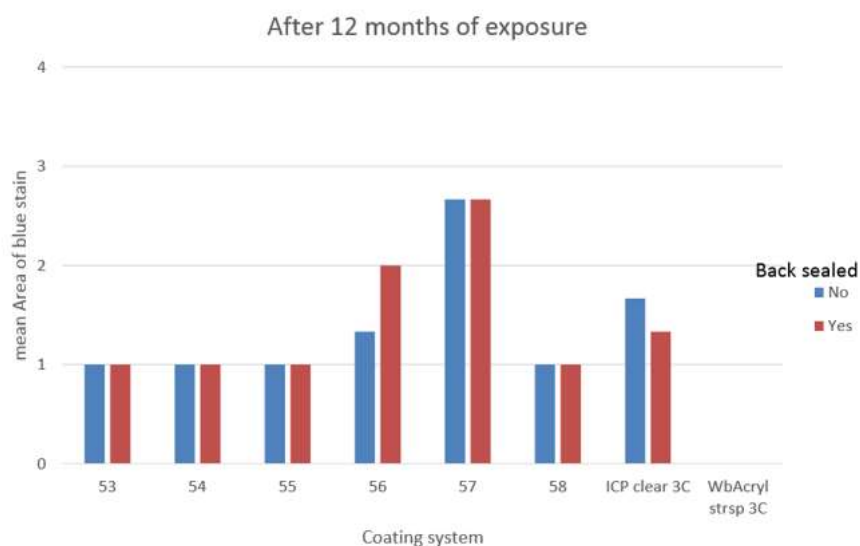


Figure 25 : Influence du traitement de surface du dos de l'éprouvette NF EN 927-3 sur le développement de champignons de bleuissement (surface colonisée, EN 16492) sur 8 finitions après 12 mois d'exposition à 45° face au sud à Bordeaux

A noter que les éprouvettes utilisées pour l'évaluation de performance des finitions (selon NF EN 923-3) ont des arêtes vives (contrairement à celles de EN 152) ce qui est favorable au développement de champignons de bleuissement (cf 4.2). Les récentes discussions au sein du CEN/TC 139/WG2 montrent que les avis sont partagés parmi les experts : certains sont en faveur des arêtes vives pour révéler les fragilités de la finition, d'autres sont en faveur d'arrondir les arêtes pour maximiser la performance de la finition ⁵³.

Evaluer le développement de champignons de bleuissement (ou de microorganismes) n'est pas toujours aisé et requiert des équipes de mycologues. L'évaluation des champignons de bleuissement sur des finitions sombres est en particulier plus difficile que sur des finitions claires. L'utilisation de la mesure de couleur peut se révéler très utile comme l'ont montré des analyses de résultats récemment faites par FCBA ⁴⁶. La Figure 26 montre le développement de champignons de bleuissement évalué visuellement (surface de colonisation, EN 16492) en comparaison des variations de couleur et plus précisément des variations sur l'axe b* (axe bleu-jaune) du système colorimétrique CIE Lab. Cette figure montre que dès 6 mois de vieillissement,

la cotation visuelle plafonne à son maximum (cotation 4). Par contre la mesure de couleur révèle des variations importantes de Delta b* dès 1 mois d'exposition et jusqu'à 21 mois où les valeurs se stabilisent. Entre 0 et 2 mois de vieillissement, l'augmentation de Delta b* traduit un jaunissement de la surface, phénomène classique du vieillissement des surfaces lasurées semi-transparentes. Par contre, dès 3 mois de vieillissement, la chute de Delta b* traduit un déplacement de la couleur vers le bleu, en accord avec le développement de champignons de bleuissement coté par l'œil. La chute continue de Delta b* jusqu'à 21 mois traduit la progression du développement de champignons de bleuissement que l'échelle de cotation de EN 16492 n'a pas permis de retranscrire puisque la cotation maximale de 4 a été atteinte dès 6 mois d'exposition.

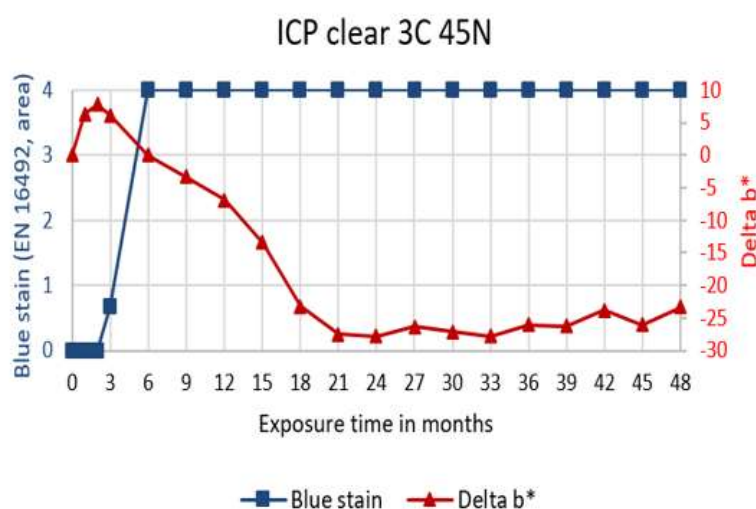


Figure 26 : Développement de champignons de bleuissement (surface colonisées, EN 16492) et variations de couleur (delta b) d'échantillons de pin sylvestre recouverts de 3 couches de lasure alkyde et exposés durant 4 ans à 45° face au nord (Bordeaux) ⁴⁶*

L'analyse des variations de Delta b* de cette même lasure alkyde exposée aux différents points cardinaux et sous différents angles (Figure 27) permet de mettre en évidence que le développement de champignons a été particulièrement plus rapide pour les surfaces horizontales et les surfaces exposées à 45° face au nord. Cette figure montre que les surfaces verticales présentent un développement de champignons de bleuissement bien plus lent. Cela s'explique par le fait que les surfaces verticales sont moins humides que les surfaces inclinées à 45° et les surfaces horizontales.

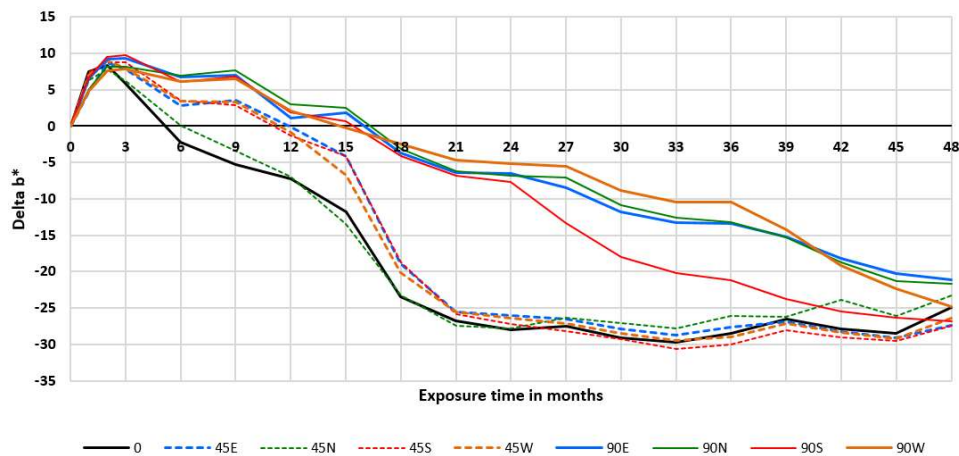


Figure 27 : Influence de l'orientation cardinale et de l'angle d'exposition sur les variations de couleur (delta b) d'échantillons de pin sylvestre recouverts de 3 couches de lasure alkyde et exposés durant 4 ans (Bordeaux)*

Il est intéressant de mettre en regard ces variations de Delta b* (Figure 27) avec les cotations de champignons de bleuissement que les mycologues ont réalisées en utilisant l'échelle de 0 à 4 (surface de colonisation) de la norme EN 16492 (Figure 28) ainsi qu'avec les photos des éprouvettes (Figure 29). La Figure 28 montre que les surfaces horizontales et les surfaces exposées à 45° face au nord atteignent la cotation visuelle maximale dès 6 mois de vieillissement. Par contre, la mesure de couleur (Figure 27) montre que ces surfaces présentent de fortes au-delà de 6 mois et jusqu'à une trentaine de mois, ce que la cotation EN 16492 ne transcrit pas. Les autres surfaces inclinées à 45° (est, sud, ouest) atteignent aussi très vite la cotation visuelle maximale de EN 16492 (après 15, 18, 12 mois respectivement) tandis que leur couleur continue fortement à évoluer jusqu'à une trentaine de mois (Figure 27 et Figure 29). Les éprouvettes exposées verticalement face au sud (90S) atteignent la cotation maximale visuelle à 27 mois correspondant à une valeur moyenne de Delta b* de -13.4 qui continuent toutefois à évoluer jusqu'à 48 mois (Delta b* = -26.8). Les autres surfaces exposées verticalement (est, nord, ouest) atteignent la cotation maximale visuelle à 42 mois tandis que leur couleur continue d'évoluer jusqu'à la fin de l'essai. On peut conclure que mesurer la couleur d'échantillons de bois revêtus de finition s'avère très utile pour étudier le développement de champignons de bleuissement.

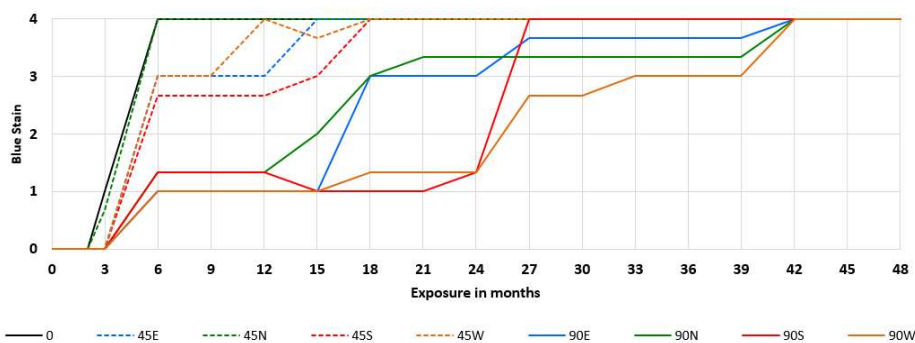
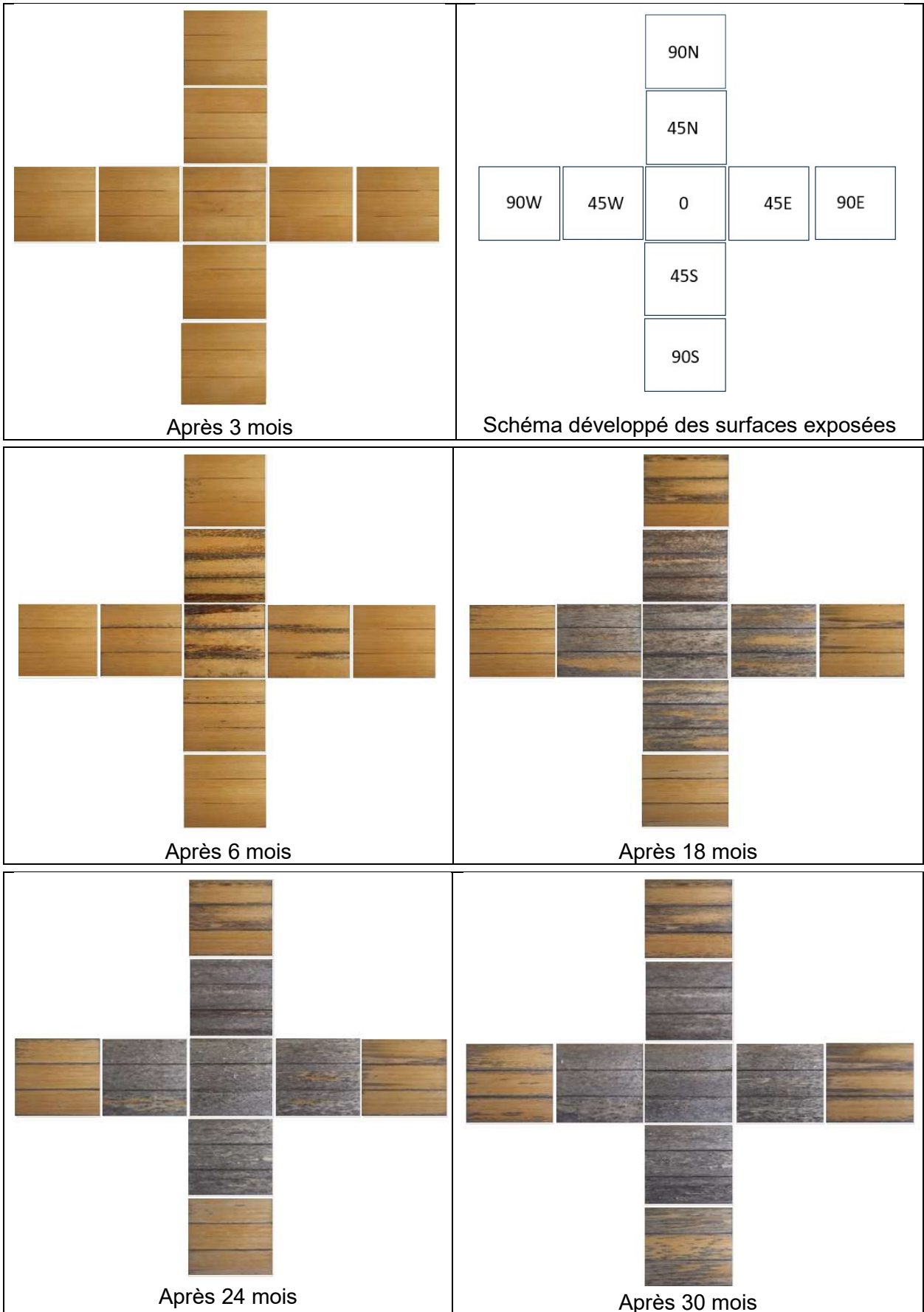


Figure 28 : Influence de l'orientation cardinale et de l'angle d'exposition sur le développement de champignons de bleuissement (surface colonisée, EN 16492) d'échantillons de pin sylvestre recouverts de 3 couches de lasure alkyde et exposés au vieillissement naturel durant 4 ans (Bordeaux)



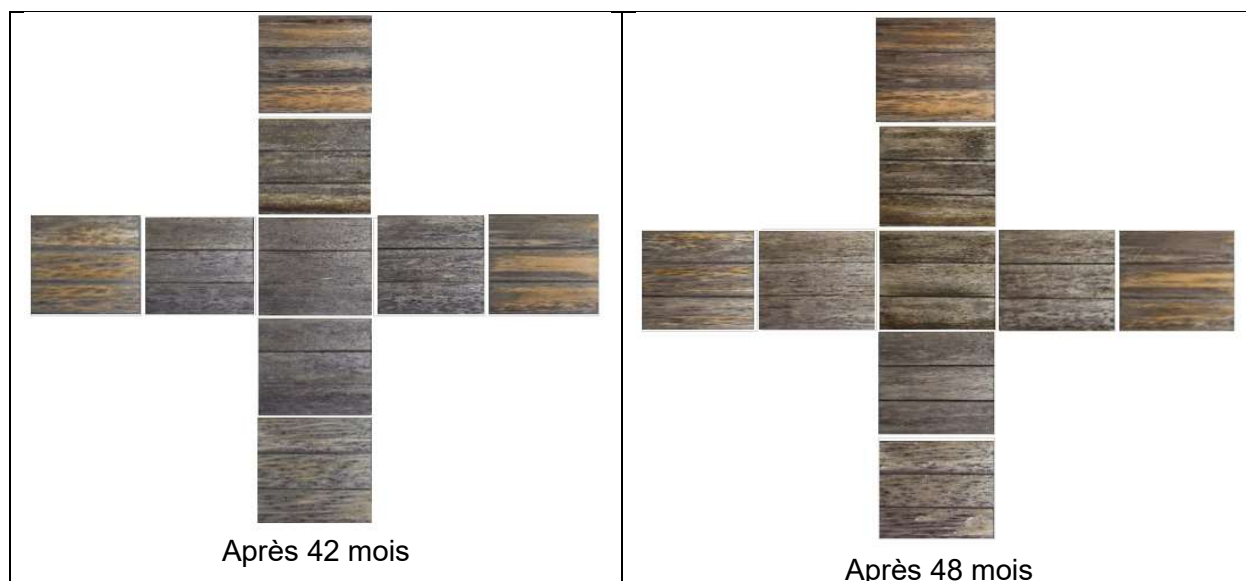


Figure 29 : Influence de l'orientation cardinale et de l'angle d'exposition sur l'aspect d'échantillons de pin sylvestre recouverts de 3 couches de lasure alkyde et exposés au vieillissement naturel durant 4 ans (Bordeaux) – projet SERVOWOOD

En complément des cotations visuelles classiquement effectuées par les mycologues et des mesures de couleur, la mesure des variations de brillant des surfaces peintes peut être très utile pour appréhender le développement de champignons de bleuissement (cf § 4.3.6). Ceux-ci, en se développant, modifient la topographie de la surface ce que le brillancemètre enregistre comme une perte de brillant. La Figure 30 montre que la rétention de brillant des surfaces horizontales et des surfaces exposées à 45° face au nord chute rapidement du fait du développement des champignons de bleuissement. Elle montre aussi que la rétention de brillant des surfaces inclinées à 45° chute moins rapidement, en accord avec le développement fongique plus lent constaté visuellement par les mycologues.

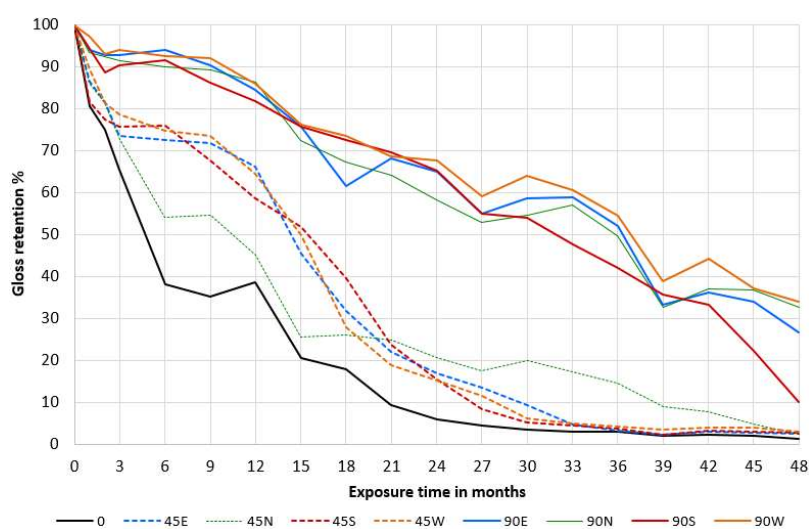


Figure 30 : Influence de l'orientation cardinale et de l'angle d'exposition sur la rétention de brillant d'échantillons de pin sylvestre recouverts de 3 couches de lasure alkyde et exposés au vieillissement naturel durant 4 ans (Bordeaux)

6. Moyens pour limiter le développement des champignons de bleuissement

6.1 Agir sur les conditions essentielles du développement des champignons de bleuissement

Pour limiter le développement des champignons de bleuissement, il faut pouvoir agir sur au moins une des quatre exigences essentielles de leur développement (température, oxygène, eau, nourriture)¹⁴.

- La température : la température extérieure peut difficilement être contrôlée et, dès que les conditions sont favorables, les champignons de bleuissement peuvent se développer. Cependant il est possible d'agir localement via la pigmentation des surfaces qui elle-même influence l'humidité des surfaces. Les surfaces blanches sont favorables au développement de champignons car elles sont froides et humides plus longtemps. La couleur blanche est très souvent plébiscitée pour les systèmes de finition utilisées pour protéger les menuiseries en bois et primaire, couche intermédiaire et couche de finition sont alors de couleur blanche. Pigmenter le primaire autrement qu'en blanc pourrait être une solution pour réduire les durées d'humidification des systèmes blancs pour menuiserie.

-L'oxygène : les niveaux d'oxygène sont difficiles à contrôler, car l'oxygène est présent partout. Pour les sciages, l'arrosage du bois fraîchement scié est une technique de contrôle connu mais l'eau peut poser des problèmes de coloration. Pour les surfaces peintes, il n'est a priori pas possible de les isoler de l'oxygène.

-L'eau : des quatre exigences essentielles au développement des champignons, c'est celle sur laquelle il est le plus facile d'agir.

Pour les surfaces de bois nues, un séchage rapide des bois permet de lutter contre les champignons du bleuissement. Dans les piles de bois, lors du séchage, il est important d'avoir un bon flux d'air et de courts trajets d'air pour éviter que l'humidité relative de l'air augmente localement et soit favorable au développement de champignons de bleuissement.

Tout action de conception pour limiter les reprises en eau des surfaces bois permet de réduire le développement de champignons de bleuissement.

Réduire l'humidité des surfaces peintes est possible en jouant sur la pigmentation des films mais aussi sur les perméabilités à l'eau liquide et à l'eau vapeur du système de finition. Les perméabilités à l'eau liquide sont a priori connues et contrôlées puisqu'un seuil limite est préconisé par NF EN 927-2. Par contre la perméabilité à la vapeur d'eau fait l'objet de très peu d'attention et mériterait des études afin de déterminer son influence sur la performance des finitions extérieures pour bois et en particulier son influence sur le développement de champignons de bleuissement. Réduire l'humidité des surfaces peintes est aussi possible en jouant sur l'épaisseur du système de finition, en utilisant un design aux arêtes arrondies, des essences au grain fin (cf § 4.3.6)

-La nourriture : l'utilisation de fongicide permet de modifier la source de nourriture utile au développement des champignons. Ce type de traitement superficiel empêche le champignon de pénétrer dans le bois et de se développer à sa surface. Cependant, si le bois est déjà infecté

avant le traitement ou si une fente ou une fissure se développe et expose le bois non traité, le champignon peut se développer.

Pour les surfaces peintes, l'utilisation de fongicides protecteurs de films secs est une solution classique pour contrer le développement de microorganismes. L'utilisation de matières premières défavorables au développement de microorganismes est aussi une possibilité pour le fabricant de peintures (cf §4.3).

Lutter contre le développement de champignons de bleuissement à la surface des bois a fait l'objet de nombreuses d'études portant sur des procédés chimiques, thermiques, par rayonnement, ou des procédés dits naturels (utilisation d'huiles essentielles, d'extraits du bois, lutte biologique, etc). Une synthèse a résumé les points positifs et négatifs de chaque catégorie de procédés, et donne une analyse critique des études consultées ⁵⁴. Parmi les solutions dites naturelles, les auteurs concluent que la plus probante est l'utilisation d'un champignon albinos qui colonise le bois avant les champignons de bleuissement. En effet, une étude canadienne montre qu'après avoir passé au crible 50 000 colonies obtenues à partir d'ascospores de *Ceratocystis resinifera*, un champignon responsable du bleuissement, les auteurs ⁵⁵ ont réussi à isoler un mutant albinos. Ils ont nommé cet albinos « Kasper » et des tests ont montré que cet isolat pouvait coloniser rapidement le bois tout en étant capable de rivaliser avantageusement avec les autres microorganismes présents. Les auteurs rapportent qu'en laboratoire, la réduction du développement de la coloration chez l'épinette blanche (*Picea glauca*) peut atteindre jusqu'à 94 % avec Kasper. Des comparaisons ont été effectuées avec un autre albinos d'un autre champignon causant le bleuissement, *Ophiostoma piliferum*, dont la formulation commerciale est connue sous le nom de « Cartapip 97 ». En laboratoire et sur site, Kasper s'est montré généralement plus efficace que Cartapip 97 pour prévenir la coloration causée par *C. resinifera* et *O. piliferum*, quoique les deux albinos limitaient moins efficacement le développement de *O. piliferum*. Les auteurs proposent certaines recommandations pour mieux protéger le bois, comme d'inoculer les billes de bois en forêt quelque temps avant que celles-ci soient acheminées vers les usines afin de favoriser une colonisation plus complète avec Kasper.

Dans le domaine papetier, des travaux ont consisté à inoculer *Phlebiopsis gigantea* un champignon de pourriture blanche qui empêche le développement des champignons de bleuissement ⁵⁶. Le papier fabriqué à partir de bois prétraité a présenté de meilleures propriétés de résistance à la traction.

A noter qu'aux Pays-Bas, plutôt que de chercher à éviter le développement de champignons de bleuissement, des chercheurs l'ont encouragé et ont développé un traitement de surface du bois à base de champignons de bleuissement (biofinish) ⁵⁷. Le pin sylvestre est traité par une huile de lin qui favorise la croissance des champignons de bleuissement. Grâce à la croissance du champignon naturel *Aureobasidium pullulans* sur le bois imprégné d'huile de lin, un biofilm fonctionnel et vivant est créé. Le revêtement est de couleur noire. Il est développé par Xyhlo ⁵⁸. Les auteurs voient la possibilité d'utiliser des essences peu durables et considèrent le revêtement développé comme auto-réparable.

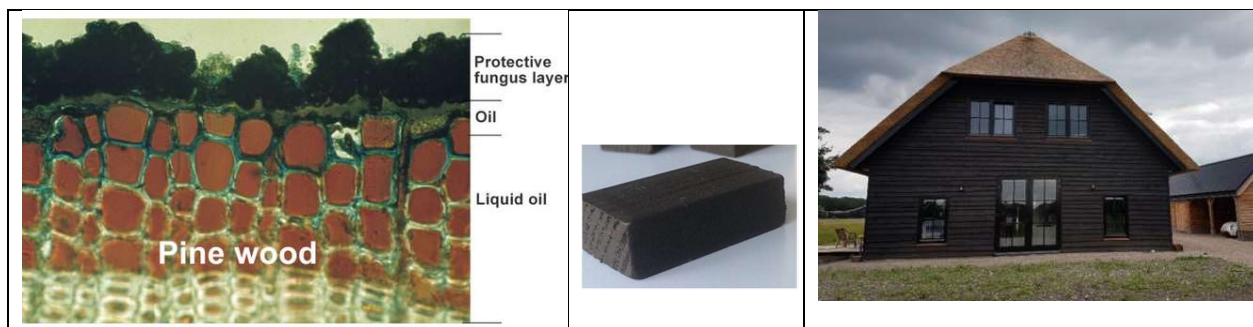


Figure 31 : Revêtement du bois à base de champignons de bleuissement ⁵⁸

L'utilisation de cyanobactéries vis-à-vis des champignons de bleuissement a été étudiée en laboratoire par des chercheurs argentins ⁵⁹. Les cyanobactéries ont un potentiel pour le contrôle des bactéries et des champignons pathogènes. L'effet des produits intra et extracellulaires des souches cyanobactériennes sur la croissance des champignons isolés de bleuissement du bois a été testé. Les substances cyanobactériennes ont favorisé ou inhibé la croissance des champignons selon les souches fongiques et cyanobactériennes testées. Des produits extracellulaires de la bactérie lactique hétérotrophe *Streptococcus termophilus* ont également été testés et ont fortement inhibé (64-92%) toutes les souches fongiques.

D'autres travaux canadiens ⁶⁰ se sont intéressés à la dispersion de nanoparticules inorganiques dans un revêtement translucide pour conférer une résistance à long terme aux champignons de bleuissement. Des latex acryliques contenant différentes concentrations de nanoparticules d'argent ont été mélangés à une résine acrylique commerciale. Les formulations ont été appliquées sur l'aubier de pin ponderosa (*Pinus ponderosa*) et la résistance fongique a été évaluée contre trois espèces : *Aureobasidium pullulans*, *Sclerophoma pityophila* et *Epicoccum nigrum*. Des latex avec des concentrations de nanoparticules d'argent faibles (0,03 %) ont été capables de contrôler *S. pityophila* et *E. nigrum*. Les concentrations de nanoparticules d'argent de 0,03% et 0,06% respectivement, n'ont pas été aussi efficaces que la formulation de référence (contenant 0.1% IPBC + 1% propiconazole) pour contrôler la croissance d'*Aureobasidium pullulans*. Cependant, les échantillons enduits de la formulation avec 0,09% en nanoparticules d'argent présentaient des résultats similaires à ceux obtenus avec la formulation de référence après 4 semaines. L'ajout de nanoparticules d'argent dans un latex a cependant affecté de manière significative la couleur du film final.

L'effet de substances extractibles a été étudié par Shrimpton et Witney ⁶¹. Selon ces auteurs, la résistance du pin tordu à l'invasion par les champignons de bleuissement s'effectue par un écoulement initial d'oléorésine suivi d'une imprégnation progressive par des substances résineuses des tissus adjacents à la blessure. L'addition de cet aubier résineux à des milieux de culture a provoqué une inhibition de la croissance des champignons de bleuissement, tandis que l'aubier non résineux a favorisé la croissance. Selon les auteurs, les composants volatils des extraits sont responsables de cette inhibition.

6.2 Les biocides protecteurs de films

La méthode la plus répandue pour protéger les produits de peinture pour bois du développement de microorganismes (dont les champignons de bleuissement) est l'utilisation de biocides ajoutés à la formulation de peinture afin de protéger.

Le statut des substances actives autorisées pour la mise sur le marché des formulations TP7 (produits de protection pour les pellicules) est consultable sur le site de l'ECHA⁶², Agence Européenne des Produits Chimiques, qui joue un rôle central au sein des autorités de réglementation pour la mise en œuvre de la législation européenne sur les produits chimiques, notamment REACH, CLP et RPB.

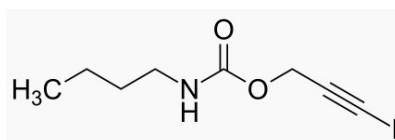
Selon Jensen *et al.*³¹ les principaux biocides (fongicides et algicides) utilisés pour la protection des films de peinture sont ceux listés dans le Tableau 4.

Active substance	Application	Typical dosage (ppm)	Future possible challenges
Carbendazim	Fongicide	1000	CLP classified as CMR category 1B [17]
OIT	Fongicide	500-1000	Sensitizer. Proposed SCL is 50 ppm [18]
DCOIT	Fongicide	1000-2000	Sensitizer. Proposed SCL is 10 ppm [19]
IPBC	Fongicide	2000-5000	
ZnPT	Fongicide	1000-5000	Submitted CHL proposal is reprotoxic category 1B, H360D [20]
Diuron	Algicide	1000-2000	WFD, listed as priority substance [21]
Terbutryn	Algicide	1000-2000	WFD, listed as priority substance [22]
Isoproturone	Algicide	2000	WFD, listed as priority substance [21]

SCL = skin sensitization limit, CMR = Carcinogenic, mutagenic and reprotoxic substances, WFD = Water Framework Directive [15], CLP = European regulation of classification, labelling and packaging of substances and mixtures [14]

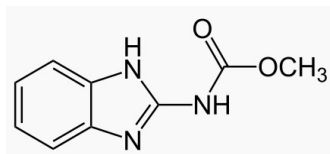
Tableau 4 : biocides (fongicides et algicides) pour films secs les plus couramment utilisés³¹

Parmi les fongicides listés, l'IPBC (le 3-iodo- 2-propynyl butylcarbamate, CAS n° 55406-53-6) est le principal fongicide utilisé dans les formulations de finition pour bois pour éviter le développement de champignons de bleuissement. Il est incorporé à la formulation à une concentration pouvant aller jusqu'à 1%. Il peut être dégradé par les UV. Sa solubilité dans l'eau (pH 7) est de 165 mg/l.



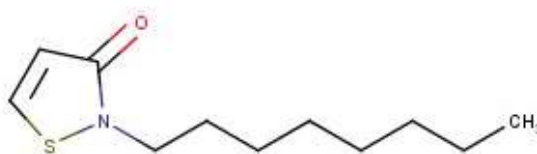
Bien qu'approuvée pour le traitement du bois (TP8), il fait actuellement l'objet d'un examen en vue de son utilisation en tant que biocide pour la protection des films (TP7). Il fait également l'objet d'une évaluation en tant que possible perturbateur endocrinien selon le site de l'ECHA (janvier 2022).

Le carbendazim (CAS n° 10605-21-7) présente une plus faible solubilité dans l'eau (8 mg/l) que l'IPBC.

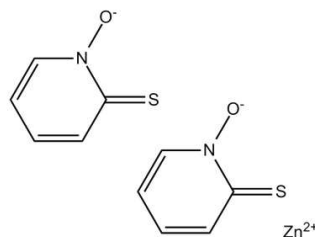


Il est connu pour être stable aux UV. Son spectre d'activité étant incomplet, il est souvent couplé avec l'OIT. Il présente une toxicité et écotoxicité élevées.

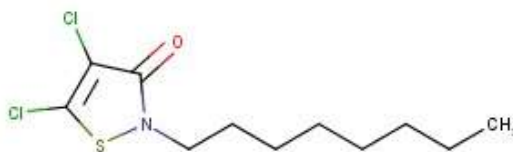
L'OIT (2-octyl-2H-isothiazol-3-one) est un fongicide utilisé comme protecteur de films secs qui possède une solubilité dans l'eau de 500 mg/L à 25 °C et pH 7.



Le Zinc Pyrithione (ZnPT) a une solubilité dans l'eau de 20 mg/l



Le 4,5-dichloro-2-octyl-2H-isothiazol-3-one (DCOIT), CAS 64359-81-5, est un fongicide dont la solubilité dans l'eau est de 3,47 mg/l à 20°C et pH 7⁶³.



Selon Jensen *et al.*³¹ la protection des films sec de produits de peinture vis-à-vis des microorganismes n'est pas universelle : les différents produits de peinture nécessitent films des protections différentes. Le système de préservation du film sec ne peut pas être le même pour toutes les applications. En outre, tous les biocides ne seront pas stables dans toutes les formulations de peinture. Certains biocides peuvent provoquer une grave décoloration, à l'état humide comme à l'état sec, de certaines formulations. Il est donc essentiel pour l'industrie de la peinture de disposer d'une sélection d'actifs parmi lesquels choisir pour optimiser la durabilité du système de peinture et prolonger l'intervalle d'entretien.

Lorsqu'un fongicide est utilisé par un fabricant de peinture pour protéger le film sec (TP7) contre la décoloration, la peinture n'est pas considérée comme un produit biocide mais comme un article traité⁶⁴. Par contre, si le fabricant de peinture utilise un fongicide dans un revêtement avec,

comme revendication, un effet anti-bleuissement du bois, cette revendication doit être étayée par un test normé selon NF EN 152 qui exige un minimum de pénétration dans le bois. Passer le test avec succès permet de classer le produit biocide en TP8 (préservation du bois). Un échec au passage du test ne permettra pas de faire le classement en produit de préservation du bois, auquel cas, la revendication pourrait se limiter à la protection du film et le revêtement devient alors un article traité.

Pour autant, lors de la vie du bois traité, ou du bois peint, les biocides utilisés dans les formulations peuvent être lessivés par la pluie ou photodégradés^{65, 66}.

7. Décolorer le bois bleui

Des travaux canadiens indiquent que des agents commerciaux de blanchiment à base d'acide oxalique, hypochlorite de sodium ou hydroxyde de sodium et peroxyde hydrogène ne suffisent pas à blanchir les bois bleuis⁷.

Une étude canadienne s'intéresse à la décoloration du bois bleui à l'hypochlorite de sodium et à l'exposition à la lumière intense⁶⁷. Les auteurs montrent qu'un traitement de 10 minutes à l'hypochlorite de sodium suivi d'une exposition intense à la lumière (Arc Xénon) est efficace pour retirer les discolorations de l'aubier de pin sans affecter la couleur du duramen. Les auteurs observent que le traitement n'a pas compromis l'adhérence d'une finition bien que la surface ait subi des changements.

Des travaux franco-canadiens se sont intéressés à l'utilisation de traitement plasma pour décaper le bois bleui⁶⁸. Les auteurs montrent que le traitement plasma augmente la mouillabilité et la perméabilité du bois bleui, permet de retirer une partie de la coloration bleue et modifie la structure des parois cellulaires. Le traitement plasma augmente l'efficacité de l'agent de blanchiment à l'hypochlorite de sodium pour éliminer la décoloration de l'aubier de pin bleui. Cependant, l'effet positif du prétraitement au plasma sur l'élimination de la coloration bleue dépendait du temps pendant lequel les échantillons étaient exposés au plasma. Les résultats ont également montré que la relation entre le temps de prétraitement au plasma et l'élimination du bleuissement par l'eau de Javel n'est pas linéaire. Par exemple, des temps d'exposition plus longs ont légèrement réduit l'efficacité de l'eau de Javel à éliminer le bleuissement. Le traitement au plasma seul a éliminé le bleuissement, mais la combinaison du traitement au plasma pendant 333 s à 1000 s et du blanchiment a été beaucoup plus efficace pour éliminer le bleuissement. Le plasma a attaqué les parois des hyphes du champignon de bleuissement et dégradé la mélanine. Les auteurs concluent que les traitements au plasma sont capables d'éliminer la décoloration du bois bleui et d'augmenter l'efficacité d'un agent de blanchiment parce qu'ils dégradent et éliminent les hyphes de champignons de bleuissement, ouvrent les ponctuations aréolées du bois et permettent à une plus grande partie de l'agent de blanchiment d'être absorbée par le bois. La mise au point de dispositifs de traitement plasma capables de fonctionner à haute vitesse et à la pression atmosphérique est nécessaire pour développer des procédés de blanchiment assistés par plasma qui puissent être utilisés commercialement pour éliminer les taches fongiques du bois.

8. Conclusions

L'étude BIBBIOBLEU avait pour objectif de mieux comprendre le développement des champignons de bleuissement sur les surfaces en bois recouvertes ou non de finition, dans le but d'identifier des solutions, idéalement autres que biocides, pour empêcher ou limiter la croissance de ces champignons altérant l'esthétique du matériau.

L'étude a rappelé les quatre exigences essentielles au développement des champignons de bleuissement (température, humidité, oxygène, nourriture). Elle a aussi montré que toutes les surfaces de bois (non protégées par un produit de finition) sont sensibles aux champignons de bleuissement, ceux-ci contribuant à la couleur grise caractéristique du vieillissement du bois nu exposé aux intempéries.

De même, toutes les surfaces de bois recouvertes de finition peuvent être colonisées par ces champignons. Lors de l'exposition aux intempéries, les études montrent que les champignons de bleuissement se développent bien avant que le craquelage de la finition soit observé. Ils constituent donc souvent les premières dégradations de la finition. Les champignons de bleuissement sur les surfaces recouvertes de finition ne sont pas simplement un problème esthétique : ils sont capables de perforer la finition qui de ce fait ne remplit plus son rôle. Ils peuvent se développer sur la finition même si celle-ci est appliquée sur un bois ayant reçu au préalable un traitement de préservation contenant un fongicide anti-bleu.

Paradoxalement, le système d'évaluation des performances des finitions extérieures pour bois (Normes EN 927) ne tient actuellement pas compte des champignons de bleuissement, dans la mesure où il n'y a pas de critère de performance associé au développement fongique de surface. Il importe donc de faire évoluer ce système normatif.

Le développement de champignons sur les surfaces peintes a été amplifié par le passage des finitions en phase solvant aux finitions en phase aqueuse. Le règlement biocide a aussi conduit les formulateurs à utiliser moins de biocides protecteurs de films secs (TP7) et à développer moins de lasures traitantes autorisées en TP8 du fait des coûts à supporter pour leur mise sur le marché. L'isolation thermique des bâtiments contribue aussi au développement fongique car les surfaces extérieures restent humides plus longtemps.

La conception de l'ouvrage peut influencer le développement des champignons de bleuissement sur les surfaces peintes. Les surfaces horizontales et les surfaces inclinées sont plus exposées aux champignons car elles sont plus humides que les surfaces verticales. Il est particulièrement important d'arrondir les angles des composants en bois pour favoriser une épaisseur de finition constante sur l'ouvrage. Toute variation importante de l'épaisseur favorise en effet le développement fongique.

Si l'utilisation de biocides est la méthode classique pour lutter contre ces champignons et autres micro-organismes de surface, cette étude bibliographique montre qu'il est possible d'agir sur d'autres paramètres pour en limiter la croissance. L'eau, qu'elle soit atmosphérique ou qu'elle provienne de condensation sur les surfaces, favorise le développement des champignons de bleuissement. Aussi toute méthode permettant de bloquer la source d'humidification permet d'éliminer la colonisation.

La bioréceptivité d'une surface est conditionnée par sa rugosité ainsi que par sa composition chimique. Une alternative consiste à contrôler les ingrédients de la peinture de manière à ce que le film sec favorise moins l'adhérence et la croissance des micro-organismes.

L'anatomie du bois utilisé sous la finition peut influencer la rugosité de la surface revêtue et exposée aux intempéries et peut donc favoriser le développement biologique. Les fonds de pores d'essences comme le chêne sont des réceptacles pour les champignons car ces zones piègent l'humidité plus facilement.

La pigmentation des finitions influence le développement fongique de surface. Plusieurs études le montrent clairement. Les surfaces blanches développent plus de champignons de bleuissement car elles sont plus froides et plus humides que des finitions plus sombres. Outre l'effet induit sur les températures de surface des finitions, certains pigments peuvent contenir des substances favorisant ou inhibant le développement biologique. Alors que le marché plébiscite les peintures blanches, utiliser un primaire foncé sous un revêtement blanc devrait contribuer à réduire la colonisation fongique. Des expérimentations mériteraient d'être menées pour le confirmer.

La perméabilité à la vapeur d'eau est aussi un paramètre sur lequel le formateur pourrait jouer pour réduire la croissance fongique de surface. L'idée est de formuler un film imperméable à l'eau liquide, perméable à la vapeur d'eau pour ne pas piéger l'eau à l'interface support-film, et ayant une faible rugosité de surface pour limiter l'encrassement.

Les polymères synthétiques étant plus résistants à l'action des microorganismes, une colonisation fongique accrue n'est pas à exclure pour les finitions à base de polymères naturels facilement biodégradables, actuellement en vogue pour remplacer les liants pétro-sourcés.

Le développement de champignons de bleuissement est actuellement évalué visuellement par des mycologues. La mesure de couleur et la mesure du brillant sur les surfaces peintes se sont montrées tout à fait pertinentes pour suivre le développement de champignons de bleuissement et compléter ces observations visuelles.

9. Références

- ¹ Etude CODIFAB Finitions 10 ans. <https://www.codifab.fr/actions-collectives/des-finitions-pour-maintenir-10-ans-lesthetique-des-menuiseries-bois-1444>
- ² Fleet C., Breuil C., Uzunovic A. Nutrient consumption and pigmentation of deep and surface colonizing sapstaining fungi in *Pinus contorta*. *Holzforschung*, 55, 4, 340-345, 2001.
- ³ Encinas O., Daniel G. Wood cell wall biodegradation by the blue stain fungus *Botryodiplodia theobromae* Pat. *Material und Organismen*, 29(4):255-272, 1995.
- ⁴ Dirol D. Le bleuissement des bois par les champignons, ISSN 0528-4929, 1995.
- ⁵ Sharpe P. R., Dickinson D.J. Blue stain in service on wood surface coatings. Part 1: the nutritional requirements of *Aureobasidium pullulans*. Annual meeting of the International Research Group on Wood Preservation, Harrogate (UK). Document IRG/ WP/1556-92, 14 pages, 10-15 May 1992
- ⁶ Zink P., Fengel D. Studies on the Colouring Matter of Blue-stain Fungi. Part 2. Electron Microscopic Observations of the Hyphae Walls. *Holzforschung*, 43, 6, 371-374, 1989.
- ⁷ Uzunovic A., Byrne T., Gignac M., Yang D-Q. Les colorations du bois et leur prévention. Accent mis sur le bleuissement. Publication spéciale SP-50F. FPIinnovations, 2008.
- ⁸ Zink P., Fengel D. Studies on the Colouring Matter of Blue-stain Fungi. Part 1. General Characterization and the Associated Compounds. *Holzforschung* 42, 4, 217-220, 1988
- ⁹ Zink P., Fengel D. Studies on the Colouring Matter of Blue-stain Fungi Part 3. Spectroscopic studies on fungal and synthetic melanins. *Holzforschung*, 44, 3, 163-168, 1990.
- ¹⁰ Bell A.A., Wheeler M.H. Biosynthesis and functions of fungal melanins. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 32 :21-81, 1981.
- ¹¹ Zhdanova N.N., Pokhodenko V.D. Possible participation of melanin pigment in protection of fungal cell from dehydration. *Mikrobiologiya* 43, 848—853, 1973.
- ¹² Ritschkoff A.C., Rättö M., Thomassin F. Influence of the nutritional elements on pigmentation and production of biomass of blue stain fungus *Aureobasidium pullulans*. Proceedings of The International Research Group on Wood Protection, Document IRG/WP 97-10198, 8 pages, 1997.
- ¹³ Evans P.D., Chowdhury M.J., Mathews B., Schmalzl K.J., Ayer S., Kiguchi, M., Kataoka Y. Weathering and Surface Protection of wood. William Andrew Publishing, Norwich, NY Kutz, M. (Ed.) In: Handbook of Environmental Degradation of Materials, Chapter 14, 277-297, 2005.
- ¹⁴ Wengert E.M. Causes And Cures For Stains In Dried Lumber: Sticker Stain, Chemical Stain, Iron Stain and Blue Stain. *Forestry facts*, N°64, 6 pages, 1992.
- ¹⁵ Simpson W.T. Drying and Control of Moisture Content and Dimensional Changes, Chapter 12 in *Wood Handbook FPL-GTR-113*, 1999.
- ¹⁶ Sedlbauer, K., Krus, M. Fitz, C, Künzel, H.M. Reducing the risk of microbial growth on insulated walls by PCM enhanced renders and IR reflecting paints. In: Proceedings of the 12th International Conference on durability of building materials and components, Porto, Portugal, 2011.
- ¹⁷ Bridge Cooke, W. M. An ecological life history of *Aureobasidium pullulans* (DeBary) Arnaud. *Mycopathol. Mycol. Appl.* 12:1-45, 1959.

- ¹⁸ Evans P.D., Chowdhury M.J., Mathews B., Schmalzl K.J., Ayer S., Kiguchi, M., Kataoka Y. Weathering and Surface Protection of wood. William Andrew Publishing, Norwich, NY Kutz, M. (Ed.) In: Handbook of Environmental Degradation of Materials, Chapter 14, 277-297, 2005.
- ¹⁹ Labat G., Reynaud C., Tapin Lingua S., Nougier P., Bouvet A., Podgorski L., Lehn V. Modification de couleur du bois massif par traitement chimique. Rapport de ressourcement scientifique N° 15007198-046. Conseil régional Nouvelle Aquitaine, 2018.
- ²⁰ Guide Comprendre et maîtriser la durabilité du bois dans la construction. <https://www.codifab.fr/actions-collectives/comprendre-et-maitriser-la-durabilite-du-bois-2510>
- ²¹ Sell J., Leukens U. Investigations of weathered wood surfaces: Part II. Weathering phenomena of unprotected wood species. Holz als Roh- und Werkstoff 29, 1, p. 23-31, 1971
- ²² Schoeman M., Dickinson D. Growth of *Aureobasidium pullulans* on lignin breakdown products at weathered wood surfaces. Mycologist, vol 11, part 4, 168-172, 1997.
- ²³ Buchner J. Do biotic and abiotic factors combine to affect the weathering of wood in use class 3 ? Doctorat en Génie des matériaux, Ecole Centrale de Nantes, 8 mars 2021
- ²⁴ O'Neill T.B. Succession and interrelationships of micro-organisms on painted surfaces. J. Coating Technol. 58 (734), 51-56, 1986. [https://doi.org/10.1016/0265-3036\(88\)90023-1](https://doi.org/10.1016/0265-3036(88)90023-1)
- ²⁵ Shirakawa M.A., Gaylarde C.C., Gaylarde P.M., John V., Gambale W. Fungal colonization and succession on newly painted buildings and the effect of biocide. FEMS Microbiology Ecology 39, 165-173, 2002.
- ²⁶ Horvath R.S., Brent M.M., Cropper D.G. Paint Deterioration as a Result of the Growth of *Aureobasidium pullulans* on Wood. Applied and environmental microbiology, Vol 32, N° 4, 504-505, 1976.
- ²⁷ Henderson, N. E. Fungal metabolism of certain aromatic compounds related to lignin, p. 589-602. In The biochemistry of fungi and yeasts. Butterworths, London, 1963.
- ²⁸ Henderson, M. E. Isolation, identification and growth of some soil hyphomycetes and yeast-like fungi which utilize aromatic compounds related to lignin. J. Gen. Microbiol. 26:149-155, 1961.
- ²⁹ Henderson, M. E. Metabolism of aromatic compounds related to lignin by some hyphomycetes and yeast-like fungi of soil. J. Gen. Microbiol. 26:155-165, 1961.
- ³⁰ Chavin, W., and W. Schlesinger. Effects of melanin depigmentational agents upon normal pigment cells, melanoma and tyrosinase activity. Adv. Biol. Skin 8:421-445, 1966.
- ³¹ Jensen H., Sandve M., Lystvet S.M. Exterior paint for the future - Will there be any dry-film preservatives left? Proceedings of the International Research Group on Wood Protection, Ghent (Belgium), IRG/WP 17-50332, 11 pages, June 2017.
- ³² Gaylarde C.C., Morton L.H.G., Loh K., Shirakawa M.A. Biodeterioration of external architectural paint films-a review. International Biodeterioration & Biodegradation, 65, 1189-1198, 2011.
- ³³ Podgorski L., Reynaud C., Montibus M. Fungal growth on coated wood exposed outdoors: influence of coating pigmentation, cardinal direction, and inclination of wood surfaces. Coatings 2019, 9, 27; doi:10.3390/coatings9010027
- ³⁴ Schoeman M., Dickinson D. Growth of *Aureobasidium pullulans* on lignin breakdown products at weathered wood surfaces. Mycologist, vol 11, part 4, 168-172, 1997.
- ³⁵ Laout J.C. Formulation des peintures. Physico-chimie et matières pulvérulentes. Techniques de l'Ingénieur. J2270, 2005.

-
- ³⁶ ITECH Formation – Les revêtements industriels en phase aqueuses, Formation P28, 2013.
- ³⁷ Laout J.C. Formulation des peintures. Pigments et colorants. Techniques de l'Ingénieur. J2271, 2005.
- ³⁸ Breitbach A.M., Rocha J.C., Gaylarde C.C. Influence of pigment on biodeterioration of acrylic paint films in Southern Brazil. *Journal of Coatings Technology and Research* 8, 619-628, 2011. DOI:10.1007/S11998-011-9350-1.
- ³⁹ Sjökvist T. Blom A. The influence of coating color, heartwood and sapwood, on moisture content and growth of microorganisms on the surface during outdoor exposure of Norway spruce boards. *J.Coat.Technol. Res.* Volume 16, Issue 3, 819–826, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11998-018-00165-3>
- ⁴⁰ Gobakken, L.R. Verstøl G.I. Mould growth on spruce claddings and the effect of selected influencing factors after 4 years of outdoor testing. Annual meeting of the International Research Group on Wood Protection, Vina del Mar, Chile, Document IRG/WP 15-30671, 11 pages, 10-14 May 2015.
- ⁴¹ Truskaller M., Forsthuber B., Oreski G. Grüll G. The influence of paint colour and cooling pigments on total solar reflectance and surface temperature of wood panels during natural weathering. Paper 6.2 Proceedings of the International Woodcoatings Congress, Amsterdam 23-24 October 2018.
- ⁴² Urbanczyk M.M., Bester K., Borho N., Schoknecht U., Bollmann U.E. Influence of pigments on phototransformation of biocides in paints. *Journal of hazardous materials*, Volume 364, 125-133, 2019. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.018
- ⁴³ NF EN 927-5 : 2007. Peintures et vernis - Produits de peinture et systèmes de peinture pour bois en extérieur - Partie 5 : détermination de la perméabilité à l'eau.
- ⁴⁴ NF EN 927-2 : 2014. Peintures et vernis - Produits de peinture et systèmes de peinture pour le bois en extérieur - Partie 2 : spécifications de performance.
- ⁴⁵ Lutke Schipholt N., Oor M. van 't, Cobben W.N.H. Zee M.E. van der. Water vapour permeability of modern water-borne industrial wood coatings, test method, comparison with water permeability and durability results. Proceedings of the 12th International Woodcoatings Congress, Paper 4.4, 12 pages Amsterdam, 8-9 November 2022.
- ⁴⁶ Podgorski L. Towards new performance criteria for exterior wood coatings. Proceedings of the 12th International Woodcoatings congress, Paper 4.5, 13 pages, Amsterdam (NL), 8-9 November 2022.
- ⁴⁷ Arnold M. EU-Project SERVOWOOD- Improved service life prediction and test capability for wood coatings. 7th European Weathering Symposium, Naples, Italy, September 16 – 18, 2015.
- ⁴⁸ Forsthuber B., Grüll G., Podgorski L., Bulian F. Arnold M., Naden B., Graystone J. The influence of exposure orientation and inclination on the service life of wood coatings. PRA's 12th International woodcoatings congress, Amsterdam (NL), 8-9 Novembre 2022.
- ⁴⁹ NF EN 152 : 2011. Produits de préservation du bois - détermination de l'efficacité préventive d'un traitement de protection du bois mis en œuvre contre le bluissement fongique – Méthode de laboratoire
- ⁵⁰ EN 599-1+A1 : 2014. Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Efficacité des produits préventifs de préservation du bois établie par des essais biologiques - Partie 1 : spécification par classe d'emploi
- ⁵¹ NF EN 927-3 : 2019. Peintures et vernis - Produits de peinture et systèmes de peinture pour bois en extérieur - Partie 3 : essai de vieillissement naturel
- ⁵² EN 16492, Peintures et vernis — Évaluation de l'altération d'aspect de la surface des revêtements provoquée par les champignons et les algues

⁵³ Document CEN/TC 139/WG 2 N 1143, Page 11/13 of the draft minutes 62nd meeting 2022-09-14.+15 in Berlin.

⁵⁴ Robert G., Le Bayon I., Degenne B., Blaison X. Plan d'action de résolution des désordres esthétiques sur les palettes et emballages en bois. Rapport final Août 2018.

⁵⁵ Morin C., Tanguay P., Breuil C., Yang D.-Q., Bernier L. Bioprotection of spruce logs against sapstain using an albinos strain of *Ceratocystis resinifera*. *Phytopathology* 96:526-533, 2006. DOI: 10.1094/PHYTO-96-0526

⁵⁶ Blanchette R.A., Williams D., Iverson S., Akhtar M., Enebak S.A. A new approach to effective biopulping : treating logs with *Phlebiopsis gigantea*. 7th International Conference on Biotechnology in the Pulp and paper Industry, Vancouver 16-19 June, 1998.

⁵⁷ Rensik S., Klein Rot E.A.M., Sailer M.F. Thermal stability of a wood protective biofinish and the influence of flame retardants on *Aureobasidium* cells. . Proceedings of the International Research Group on Wood Protection, Ghent (Belgium), IRG/WP 17-30716, 15 pages, June 2017.

⁵⁸ <https://www.xyhlo.com/en/bio-finish/>

⁵⁹ Zulpa G., Zaccaro M.C., Boccazzi F., Parada J.L., Storni M. Bioactivity of intra and extracellular substances from cyanobacteria and lactic acid bacteria on "wood blue stain" fungi. *Biological Control* 27, 345–348, 2003.

⁶⁰ Boivin G., Ritcey A.M., Morris P.I., Landry V. Black-stain resistant acrylic latexes for wood coatings applications. Proceedings of the International Research Group on Wood Protection, Ghent (Belgium), IRG/WP 17-40786, 14 pages, June 2017.

⁶¹ Shrimpton D. M., Whitney H.S. Inhibition of growth of blue stain fungi by wood extractives. *Canadian Journal of Botany*, Vol 46, 757-761, 1968.

⁶² <https://echa.europa.eu/fr/information-on-chemicals/biocidal-active-substances>

⁶³ <https://echa.europa.eu/documents/10162/f92dc10d-039a-590b-a365-e057fb15c2c8>

⁶⁴ <https://www.cepe.org/wp-content/uploads/2020/05/2016-11-30-Biocides-document-Orientation-CEPE-Etiquetage-des-articles-traites-trad-Fr-1.pdf>

⁶⁵ Burkhardt M. Zuleeg S., Vonbank R., Bester K., Carmeliet J., Boller M., Wangler T. Leaching of biocides from façades under natural weather conditions. *Environ Sci Technol.*15;46(10):5497-503, 2012. doi: 10.1021/es2040009.

⁶⁶ Ouali O. Etude du comportement des biocides lors de vieillissements de bois traités en classe d'emploi 3 par des méthodes physico-chimiques d'analyse. Thèse de l'Université de Bordeaux, Novembre 2021.

⁶⁷ Stirling R., Morris P.I. Decolorization of blue stain in lodgepole pine sapwood by hypochlorite bleaching and light exposure. *Forest Product Journal*, vol 59, N°78, 47-52, 2009.

⁶⁸ Jamali A., Evans P.D. Plasma-assisted bleaching of blue-stain from lodgepole pine wood. Proceedings of the International Research Group on Wood Protection, Ghent (Belgium), IRG/WP 17-40799, 19 pages, June 2017.