



LE PROBLÈME DE LA FINITION : LES SICCATIFS MÉTALLIQUES COMME SOURCE DE RECONTAMINATION PARAMAGNÉTIQUE RAPPORTÉE À LA SURFACE DU BOIS CLASSÉ POUR SA NEUTRALITÉ



Le problème de la finition : les siccatifs métalliques comme source de recontamination paramagnétique rapportée à la surface du bois classé pour sa neutralité

A. Bosque, M. Ferro, L. Solder, H. Park

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Résumé

Une étude complémentaire a établi un grade de neutralité pour le bois de structure, fondé sur la teneur paramagnétique résiduelle et exprimé comme fraction massique cumulée de fer et de manganèse par rapport à une ligne de base diamagnétique. Ce grade est une propriété de la bille brute. Le présent article examine ce qu'il devient lorsque la bille reçoit une finition. Presque toutes les huiles, tous les vernis et toutes les laques employés sur le bois sont des revêtements à durcissement oxydatif, durcis non par évaporation mais par réticulation autoxydative d'une huile siccative catalysée par un métal ; ce catalyseur est un métal de transition paramagnétique -- le plus souvent du cobalt ou du manganèse -- déposé sous forme de sel carboxylate à hauteur d'une fraction de pour cent de métal dans le film humide. Puisque le film occupe la surface extérieure, le catalyseur est déposé exactement là où le support touche le câble. Nous avons mesuré la susceptibilité magnétique volumique rapportée à la surface sur des éprouvettes de teck 5N avant et après six traitements de finition (témoin brut, huile de tung pure sans siccatif, huile de lin cuite avec octoate de Co, vernis marin alkyde avec Co + Mn + Zr, acrylique en phase aqueuse et huile-cire dure), par magnétométrie à échantillon vibrant et SQUID, avec profilage en profondeur par décharge luminescente pour localiser le métal. Les finitions à durcissement oxydatif ont fait passer la susceptibilité des 50 premiers micromètres de la ligne de base diamagnétique proche de $\chi_v = -6 \times 10^{-6}$ à des valeurs nettes positives, reclassant chaque éprouvette catalysée de 5N à moins de 4N ; dans tous les cas, le métal était confiné aux 50 à 100 premiers micromètres. La tendance récente aux siccatifs sans cobalt (substitués à base de Mn, Fe et vanadium) supprime un problème toxicologique, mais non un problème magnétique, puisque ces substitués sont eux-mêmes paramagnétiques. Nous concluons que la seule finition qui préserve un grade de neutralité est l'absence de finition, et que la patine élémentaire de surface -- oxydation du squelette carboné du bois, qui n'ajoute aucun métal -- est la seule voie de vieillissement cosmétique compatible avec le grade.

1. INTRODUCTION

Une bille classée pour sa neutralité mérite son grade par la mesure : la recherche d'inclusions ferreuses, la détermination de la susceptibilité globale et le dosage des métaux à l'état de traces concordent pour établir que le bois ne contient pas plus d'une quantité spécifiée de fer et de manganèse en parties par million et que sa susceptibilité volumique nette reste diamagnétique. Le teck de plantation équatorial atteint 5N ($\text{Fe} + \text{Mn} \leq 10 \text{ ppm}$) à la livraison et 6N par sélection de bille individuelle. Le grade est réel, il est certifié pour chaque unité et il appartient entièrement au bois tel qu'il quitte l'atelier de débit.

L'étude de référence (Bosque, Ferro, Park & Tanaka, 2026) signalait, dans une unique section finale, que la finition du bois détruit le grade et présentait une mesure avant-après sur une éprouvette à l'huile de lin cuite pour l'établir. Cette observation mérite plus qu'un paragraphe. L'affirmation est contre-intuitive : tout artisan du bois considère une finition comme une protection, et l'idée qu'une couche protectrice soit l'intervention la plus destructrice magnétiquement que l'on puisse faire subir à un matériau de support va à l'encontre d'un siècle de pratique d'atelier. Si cette affirmation doit justifier une décision produit -- livrer des supports bruts, contre toutes les attentes du client envers un objet en bois haut de gamme -- elle doit être établie quantitativement, sur plusieurs chimies de finition, et le métal contaminant doit être localisé en profondeur.

Tel est l'objet de cet article. Nous traitons la finition non comme une esthétique de surface, mais comme une mince couche de métal catalytique délibérément déposée, et nous demandons exactement quelle masse paramagnétique elle apporte et où. La réponse est défavorable à la finition en général et fatale à toute la classe des huiles et vernis à durcissement oxydatif qui dominent la belle menuiserie, pour une raison qui n'a rien à voir avec le bois et tout à voir avec la chimie qui fait durcir le film.

2. CHIMIE DES SICCATIFS ET CHARGES MÉTALLIQUES

Une huile siccative -- huile de lin, huile de tung et leurs dérivés alkydes -- durcit par autoxydation : l'oxygène atmosphérique arrache de l'hydrogène aux positions bis-allyliques des chaînes d'acides gras insaturés, formant des hydroperoxydes qui se décomposent en radicaux et réticulent l'huile en un film solide. Livrée à elle-même, cette réaction est lente et prend des semaines. Elle est accélérée par des siccatifs : carboxylates de métaux de transition qui catalysent à la fois les étapes de formation et de décomposition des peroxydes au moyen d'un cycle redox entre deux états d'oxydation. Le siccatif primaire classique est le cobalt, qui alterne entre Co(II) et Co(III) ; le manganèse (Mn(II)/Mn(III)) se comporte de manière analogue. Ce sont les métaux de séchage à cœur et en surface. Le zirconium, le calcium et le zinc sont ajoutés comme siccatifs secondaires ou auxiliaires -- ils ne catalysent pas l'étape redox, mais coordonnent le film, améliorent le séchage à cœur et empêchent le croûtage superficiel provoqué par le cobalt pur.

Le métal est apporté sous forme de sel d'un acide organique à longue chaîne -- historiquement l'acide naphtéinique (naphtéénates),



aujourd'hui plus souvent l'acide 2-éthylhexanoïque (octoates) -- choisi pour sa solubilité dans l'huile, et non pour une propriété de l'ion métallique autre que sa chimie redox. Le sel est vendu selon sa teneur en métal : un naphthénate « à 6 % de cobalt » contient 6 % de cobalt en masse dans le siccatif liquide. Dans un revêtement fini, le métal du siccatif primaire est généralement dosé à 0,02 à 0,1 % par rapport aux solides de l'huile, le cobalt occupant le bas de cette plage en raison de son efficacité et le manganèse une valeur légèrement supérieure.

Ces fractions paraissent négligeables et le sont par unité de masse de finition. Le problème est la densité surfacique, non la concentration. Une seule couche d'une finition à l'huile appliquée au pinceau dépose de l'ordre de 20 à 40 g de solides par mètre carré ; à 0,05 % de cobalt, cela représente 10 à 20 mg de cobalt par mètre carré de surface. Une bille de teck 5N à 10 ppm Fe + Mn contient, dans un bloc représentatif de 200 x 60 x 45 mm et de masse volumique 650 kg/m³, environ 35 microgrammes de métal contaminant classé dans tout son volume. La finition de la seule face supérieure dépose plusieurs centaines de microgrammes de métal paramagnétique -- un ordre de grandeur de plus que ce que la bille entière était autorisée à contenir, dans une couche épaisse de quelques micromètres sur la surface où repose le câble. Le grade a été défini pour maîtriser les parties par million paramagnétiques ; la finition ne le dégrade pas de quelques pour cent, mais d'un facteur entier.

3. EXPÉRIENCE : SUSCEPTIBILITÉ RAPPORTÉE À LA SURFACE AVANT ET APRÈS FINITION

Nous avons préparé 36 éprouvettes (60 x 60 x 8 mm) dans une même bille de teck équatorial 5N, vérifiée par ICP-MS à 7 ppm Fe + Mn, afin que toutes partagent le même substrat et que toute différence postérieure à la finition soit imputable au seul revêtement. Les éprouvettes ont été réparties par groupes de six entre six traitements : (A) témoin brut sans finition ; (B) huile de tung pure, sans siccatif, durcie 21 jours ; (C) huile de lin cuite avec octoate de cobalt (0,05 % Co) ; (D) vernis marin alkyde avec un ensemble Co + Mn + Zr (0,04 % Co, 0,06 % Mn, 0,20 % Zr) ; (E) dispersion acrylique en phase aqueuse (sans siccatif oxydatif) ; et (F) huile-cire dure du commerce (lin et carnauba, catalysée au cobalt). Tous les traitements filmogènes ont été appliqués en deux couches contrôlées à 30 g/m² par couche et laissés durcir jusqu'à pouvoir être manipulés.

Puisque la contamination est une couche de surface et que l'éprouvette est un objet massif, une mesure de susceptibilité de l'échantillon entier dilue le signal dans 8 mm de bois diamagnétique et le sous-estime. Nous présentons donc la susceptibilité rapportée à la surface de deux manières. D'abord, la susceptibilité volumique nette de l'éprouvette entière par magnétomètre à échantillon vibrant (Lake Shore 8600, 300 K), qui saisit la variation intégrée. Ensuite, une valeur de couche superficielle obtenue en mesurant une tranche parallèle à la face, épaisse de 200 micromètres, prélevée au microtome sur la surface finie puis remontée, au moyen d'un magnétomètre SQUID (Quantum Design MPMS3) offrant la sensibilité exigée par cette tranche mince. La valeur rapportée à la surface est celle qui importe, car il s'agit du bois que le câble touche réellement.

Les résultats sont sans ambiguïté. Le témoin brut (A) a conservé la ligne de base diamagnétique : éprouvette entière $\chi_v = -5.9 \times 10^{-6}$, tranche superficielle -6.1×10^{-6} . Les traitements sans siccatif (B, tung pur ; E, acrylique) étaient statistiquement indiscernables du témoin aux deux échelles -- mise à part la permittivité, ils n'ajoutent aucun métal paramagnétique et ne déplacent pas le grade. Les trois finitions catalysées à durcissement oxydatif (C, D, F) ont toutes rendu la tranche superficielle nette positive : huile de lin cuite à $+2.3 \times 10^{-6}$, huile-cire dure à $+1.9 \times 10^{-6}$ et, plus loin encore, vernis marin Co + Mn + Zr à $+4.8 \times 10^{-6}$. Rapportée à la couche superficielle au contact du câble, chaque éprouvette catalysée est passée de diamagnétique à paramagnétique et a été reclassée de 5N à moins de 4N. Les valeurs VSM de l'éprouvette entière ont évolué dans le même sens, mais atténuées par la dilution dans le volume -- raison précise pour laquelle une mesure globale d'un support fini flatte la finition, tandis qu'une mesure rapportée à la surface la condamne.

4. PROFILAGE EN PROFONDEUR : OÙ SE TROUVE LE MÉTAL

Une variation de susceptibilité nous indique que le métal est présent ; elle ne nous dit pas où. Pour un matériau de support, sa distribution en profondeur n'est pas accessoire, car le couplage avec le câble décroît rapidement avec la distance, et un contaminant enfoui à 2 mm est électromagnétiquement bien moins pertinent que la même masse dans les premiers micromètres. Nous avons profilé les éprouvettes finies par spectrométrie d'émission optique à décharge lumineuse radiofréquence (GD-OES, Horiba GD-Profilier 2), qui pulvérise la surface à environ 2 à 3 micromètres par seconde tout en suivant les émissions de Co, Mn, Zr et Fe ; les résultats ont été recoupés sur certaines éprouvettes par analyse en profondeur ICP-MS avec ablation laser.

Dans chaque éprouvette à durcissement oxydatif, le métal catalytique était confiné au revêtement et au bois immédiatement sous-jacent. Les émissions de cobalt et de manganèse culminaient en surface, se maintenaient sur les 30 à 70 micromètres d'épaisseur du film, puis chutaient de plus d'un ordre de grandeur dans les 20 à 40 micromètres suivants lorsque le profil pénétrait le bois intact, jusqu'à atteindre le fond de 7 ppm du substrat vers 100 micromètres dans le pire cas (l'huile de lin cuite à faible viscosité, qui pénètre la porosité superficielle) et vers 60 micromètres pour le vernis plus visqueux. Après intégration, plus de 90 % du métal paramagnétique déposé se trouvait dans les 100 premiers micromètres, et la majorité dans les 50 premiers. Le zirconium suivait en profondeur le cobalt et le manganèse mais, étant effectivement non paramagnétique dans cette coordination, contribuait au profil sans contribuer à la susceptibilité -- contrôle interne utile montrant que le signal magnétique suit Co et Mn, et non le métal total.

C'est la pire distribution géométriquement possible pour un support de câble. Le grade de neutralité reposait sur le principe que le



bois en contact avec le conducteur est diamagnétique ; la finition renverse ce principe en chargeant de métal paramagnétique la peau précise de 50 à 100 micromètres qui forme l'interface de contact, tout en laissant le cœur profond et électromagnétiquement sans intérêt du bloc aussi propre qu'auparavant. Magnétiquement, un support fini est une mince feuille paramagnétique enroulée autour d'une bille neutre et présentée au câble côté métal.

5. LA TENDANCE DES SICCATIFS SANS COBALT NE RÉSOUT RIEN

L'octoate de cobalt est soumis à une pression réglementaire. Les sels de cobalt de l'acide 2-éthylhexanoïque font l'objet d'une classification harmonisée comme cancérigènes présumés et toxiques pour la reproduction, et l'industrie des revêtements a fortement investi dans les siccatifs sans cobalt au cours de la dernière décennie. Les substituts se répartissent en trois familles : complexes de manganèse (souvent associés à des ligands bipyridine ou aminométhyle qui portent l'activité du Mn à un niveau comparable à celui du cobalt), complexes de fer (fer associé à des ligands donneurs d'azote spécialisés, commercialisés comme siccatifs primaires hautes performances directement substituables) et systèmes à base de vanadium. Tous trois sont présentés comme plus sûrs et, pour leur but annoncé -- remplacer un catalyseur toxique par un autre bénin à vitesse de séchage égale -- plusieurs réussissent véritablement.

Pour notre usage, ils ne réussissent à rien. Le manganèse, le fer et le vanadium sont tous paramagnétiques ; le fer et le manganèse sont précisément les deux éléments que le grade de neutralité est défini pour exclure. Remplacer l'octoate de cobalt par un siccatif au fer ou au manganèse ne retire pas le métal paramagnétique du film superficiel -- cela remplace un métal paramagnétique par un autre et, dans le cas du fer, introduit le contaminant le plus lourdement pénalisé par l'échelle. Nous avons fini une série supplémentaire d'éprouvettes de teck avec un siccatif commercial fer-bipyridine à la charge recommandée par le fabricant et mesuré la tranche superficielle à $+3.1 \times 10^{-6}$, résultat comparable à celui de l'huile de lin cuite au cobalt et, puisque le métal est du fer plutôt que du cobalt, sans doute pire au regard d'un grade dont l'axe principal est la teneur en fer. Un siccatif au néodécanoate de manganèse a donné $+2.6 \times 10^{-6}$.

La leçon est que la tendance sans cobalt optimise un objectif toxicologique orthogonal à l'objectif magnétique. Il n'existe aucune chimie de siccatif à durcissement oxydatif, actuelle ou prévisible, qui durcisse une huile siccative sans métal de transition redox-actif, et tout métal de transition redox-actif assez bon marché et abondant pour servir de siccatif est paramagnétique. L'industrie de la finition ne résoudra pas ce problème car, de son point de vue, il n'y a aucun problème à résoudre : un siccatif magnétiquement neutre serait une solution à la recherche d'un marché qui, à ce jour, se compose exclusivement de nous.

6. DISCUSSION : LES OPTIONS RESTANTES

Si les finitions à durcissement oxydatif sont exclues pour des raisons magnétiques, trois catégories de revêtement restent formellement exemptes de métal : les huiles siccatives sans siccatif, les films en phase aqueuse séchant physiquement par coalescence et les véritables laques à évaporation. Notre huile de tung sans siccatif (traitement B) et notre dispersion acrylique (traitement E) ont confirmé qu'elles n'ajoutent aucun métal paramagnétique et conservent le grade. Elles constituent toutefois de mauvaises finitions pour cet objet précis. Une huile sans siccatif appliquée à un support qui doit durcir complètement avant de porter un câble met des semaines à durcir et reste en permanence assez tendre pour retenir le métal superficiel de la pince du câble et des manipulations ordinaires -- elle transforme le support en collecteur passif de la contamination même que le grade exclut. Un acrylique en phase aqueuse scelle le bois, mais élève sa permittivité superficielle et sa tangente de perte bien au-dessus de celles du teck brut, échangeant un problème magnétique interdit par le grade contre un problème diélectrique également pénalisé par l'étude complémentaire.

Autrement dit, chaque finition ajoute soit du métal paramagnétique (les huiles et vernis à durcissement oxydatif, c'est-à-dire toute la classe traditionnelle), soit dégrade la surface diélectrique (les films en phase aqueuse), soit ne durcit pas assez pour résister à la recontamination en service (les huiles sans siccatif). Aucune n'améliore la surface classée, et chacune intervient après que le bois a déjà réussi tous les essais exigés par le grade. La finition ne peut que soustraire au grade que la bille brute possède déjà ; aucun revêtement ne peut l'améliorer, car la grandeur classée est l'absence de quelque chose et un revêtement est, par définition, un ajout.

Le support brut cesse ainsi d'être une économie ou une austérité esthétique pour devenir le seul choix conforme à la mesure. La bille est sélectionnée, scannée, carottée, digérée, dosée et certifiée selon une valeur paramagnétique en parties par million ; badigeonner ensuite sa face de travail d'une huile catalysée au cobalt revient à engager tout ce processus puis à l'annuler à la dernière étape, à l'endroit le plus actif électromagnétiquement, pour un film d'apparence.

7. CONCLUSION

La finition du bois le recontamine magnétiquement, et elle le fait en surface, parce que la chimie qui durcit une finition traditionnelle est une autoxydation catalysée par un métal et que le catalyseur est un métal de transition paramagnétique déposé dans le film. Nous avons mesuré directement cet effet : sur un même substrat de teck 5N, chaque finition à durcissement oxydatif -- huile de lin cuite au cobalt, vernis marin Co + Mn + Zr et huile-cire dure au cobalt -- a fait passer la susceptibilité volumique rapportée à la surface d'une ligne de base diamagnétique proche de -6×10^{-6} à des valeurs nettes positives atteignant $+4.8 \times 10^{-6}$, reclassant



la surface de 5N à moins de 4N, avec plus de 90 % du métal paramagnétique déposé confiné dans les 100 premiers micromètres en contact direct avec le câble. Les huiles sans siccatif et les films en phase aqueuse n'ajoutent aucun métal, mais échouent pour d'autres raisons ; la tendance aux siccatifs sans cobalt substitue le fer, le manganèse ou le vanadium et supprime donc une toxine sans retrancher la moindre unité de contamination paramagnétique.

La conclusion est étroite et ferme. La seule finition qui préserve le grade de neutralité d'un bois est l'absence de finition. La surface brute s'oxyde et grise avec l'âge, mais cette patine est l'oxydation élémentaire du squelette carboné du bois et n'ajoute aucun métal ; c'est un changement cosmétique et un non-événement magnétique. Les Blocs d'Élévation Equatoriaux sont donc, et continueront d'être, livrés bruts -- non parce qu'une finition a été omise pour économiser une étape, mais parce qu'en appliquer une dépenserait tout le grade pour acheter du brillant.

RÉFÉRENCES

- [1] Soucek, M. D., Khattab, T., Wu, J. (2012). Revue de l'autoxydation et des siccatifs. *Progress in Organic Coatings*, 73(4), 435-454.
- [2] Erich, S. J. F., Laven, J., Pel, L., Huinink, H. P., Kopinga, K. (2006). Distribution des savons métalliques et séchage catalytique des revêtements alkydes étudiés par imagerie RMN. *Progress in Organic Coatings*, 55(2), 105-113.
- [3] Micciche, F., van Haveren, J., Oostveen, E., Ming, W., van der Linde, R. (2006). Revêtements à base d'huile et remplacement des siccatifs au cobalt par des complexes de manganèse et de fer. *Applied Catalysis A: General*, 297(2), 174-181.
- [4] van Gorkum, R., Bouwman, E. (2005). Séchage oxydatif de la peinture alkyde catalysé par des complexes métalliques. *Coordination Chemistry Reviews*, 249(17-18), 1709-1728.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). Classification de la neutralité magnétique du bois de structure : classification de pureté par grades N pour les matériaux de support audio. *Journal of Equatorial Audio Science*, 7(2), 44-71.
- [6] Solder, L., Bosque, A. (2026). Profilage en profondeur par décharge luminescente de la contamination paramagnétique rapportée à la surface d'éprouvettes de feuillus finis. *Journal of Equatorial Audio Science*, 7(3), 88-104.