



ANISOTROPIE DIÉLECTRIQUE ET PLAIDOYER POUR LE BOIS DE BOUT : ORIENTATION DU CHEMIN DE CHARGE CAPACITIF DANS LES SUPPORTS DE CÂBLE EN BOIS MAGNÉTIQUEMENT NEUTRE



Anisotropie diélectrique et plaidoyer pour le bois de bout : orientation du chemin de charge capacitif dans les supports de câble en bois magnétiquement neutre

A. Bosque, Y. Tanaka, M. Ferro, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Résumé

Un support de câble en bois est un corps diélectrique maintenu dans le champ proche d'un conducteur de signal ; sa contribution à l'installation est donc une capacité répartie, dépendante de l'orientation et placée en parallèle avec le câble. Dans l'étude de référence sur la classification de la neutralité du bois (Bosque, Ferro, Park et Tanaka, 2026), l'orientation du fil a été identifiée comme variable de conception et l'usinage bois de bout vertical a été adopté sur la base d'un argument mécanique et diélectrique combiné, formulé dans une seule section. Le présent article complémentaire développe cet argument intégralement. Le bois est diélectriquement anisotrope : la permittivité relative ϵ_{ps_r} et la tangente de perte $\tan \delta$ sont toutes deux plus élevées dans le sens du fil qu'en travers, l'axe longitudinal dépassant les deux axes transversaux parce que la géométrie tubulaire des trachéides et des vaisseaux, ainsi que les dipôles d'eau liée qui dominent la polarisation, sont alignés avec la fibre. Nous présentons des mesures à l'analyseur d'impédance et à plaques parallèles gardées de ϵ_{ps_r} et $\tan \delta$ pour le teck équatorial suivant les trois axes anatomiques (longitudinal L, radial R, tangentiel T), à 8, 12 et 16 % de teneur en humidité, de 20 Hz à 10 MHz ; elles confirment un rapport d'anisotropie $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T}$ de 1.24 à 1.31 aux fréquences audio et à 12 % d'humidité. À partir de ces constantes, nous construisons un modèle de capacité répartie d'un câble reposant dans un berceau usiné au-dessus d'une colonne de bois, puis calculons la contribution capacitive par bloc pour un usinage bois de bout vertical et un usinage sur dosse : les deux orientations diffèrent d'une marge mesurable, le bois de bout présentant la capacité rapportée au câble la plus faible parce qu'il place les axes transversaux de faible permittivité dans le plan horizontal où le champ du câble est le plus intense, et réserve l'axe longitudinal de forte permittivité au chemin de charge vertical, où il est électriquement inoffensif et mécaniquement idéal. Un balayage de l'angle du fil situe le minimum de couplage au véritable bois de bout. Nous concluons en rappelant que le bois de bout avait initialement été spécifié pour sa rigidité en compression et que l'argument diélectrique, établi indépendamment et ultérieurement, concorde avec l'argument mécanique au point de le confirmer.

1. INTRODUCTION

Un support de câble ne transporte pas le signal. Il se trouve à côté. C'est précisément pourquoi son rôle électrique est si facilement écarté : un bloc de bois sous un câble n'est manifestement pas dans le circuit, et il est tentant d'en conclure que sa composition, son fil et son orientation relèvent de l'ébéniste plutôt que de l'ingénieur. L'article de référence sur la classification de la neutralité (Bosque, Ferro, Park et Tanaka, 2026) a exposé la moitié magnétique de l'argument -- un support en contact permanent avec un conducteur fait partie de l'environnement de champ proche de celui-ci, et sa teneur paramagnétique résiduelle est un paramètre mesurable de l'installation plutôt qu'un élément décoratif. Il a réglé la moitié diélectrique en une seule section. Le présent article reprend cette section et lui donne la longueur que mérite sa physique.

Le fait électrique que le bloc se trouve à côté du câble plutôt qu'en son sein ne le retire pas du circuit ; il fixe la forme de son couplage. Un corps diélectrique placé dans le champ d'un conducteur stocke de l'énergie par effet capacitif, et une capacité répartie en parallèle avec une ligne de transmission constitue une charge, faible mais réelle, dont la grandeur dépend de la permittivité du corps et de l'orientation de cette permittivité par rapport au champ. Le bois n'est pas un diélectrique isotrope. Sa permittivité dépend de la direction ; un support en bois présente donc non une contribution diélectrique, mais trois, sélectionnées sur le banc d'usinage par l'angle de coupe de la bille.

L'affirmation du présent article est étroite et quantitative. L'orientation bois de bout vertical prescrite pour le Bloc d'Élévation Equatorial -- cernes visibles sur la face supérieure, fibres descendant verticalement dans le chemin de charge -- est celle qui minimise la capacité du bloc rapportée au câble ; ce minimum est mesurable plutôt que théorique et coïncide avec l'orientation déjà retenue pour des raisons mécaniques. Nous ne prétendons pas que l'effet est important. Nous affirmons qu'il possède un signe, une grandeur et une direction privilégiée, et qu'un fabricant qui usine le bloc dans l'autre sens pour obtenir un fil de face plus séduisant a déplacé la valeur dans la mauvaise direction sans même savoir qu'elle existait.

2. L'ANISOTROPIE DIÉLECTRIQUE DU BOIS

Le bois est un solide cellulaire constitué de longues cellules creuses alignées axialement -- trachéides dans les résineux, fibres et vaisseaux dans les feuillus tels que le teck -- dont l'axe long définit le fil. Cette géométrie est à l'origine de l'anisotropie mécanique connue de tout artisan du bois, et également d'une anisotropie diélectrique moins appréciée mais tout aussi réelle et documentée depuis longtemps (James, 1975 ; Torgovnikov, 1993).

Trois mécanismes rendent la permittivité dépendante de la direction, et tous trois favorisent l'axe longitudinal. Premièrement, les parois cellulaires forment elles-mêmes des chemins polarisables continus le long de la fibre et interrompus en travers, de sorte que la polarisation interfaciale (Maxwell-Wagner) aux nombreuses frontières entre paroi et lumière s'accumule préférentiellement dans le sens du fil. Deuxièmement, l'eau liée retenue dans les parois cellulaires -- principal contributeur à la permittivité du bois sauf dans



les états les plus secs -- occupe un environnement dont les sites hydroxyle et l'armature microfibrillaire sont eux-mêmes alignés avec la fibre ; la polarisation d'orientation des dipôles d'eau liée est donc plus facile dans le sens du fil qu'en travers. Troisièmement, les deux directions transversales, radiale R et tangentielle T, ne diffèrent que légèrement entre elles et restent toutes deux nettement inférieures à la valeur longitudinale L. Dans toute la littérature, il en résulte l'ordre $\epsilon_{L} > \epsilon_{R} \sim \epsilon_{T}$, identique pour la tangente de perte, et un rapport d'anisotropie $\epsilon_{L} / \epsilon_{T}$ généralement compris entre 1.2 et 1.5 pour les feuillus tempérés et tropicaux dans le domaine hygroscopique.

Les valeurs absolues sont modestes et dominées par l'humidité. Le bois anhydre se situe près de $\epsilon_{r} = 2$ à 3, puis augmente fortement et de manière monotone avec la teneur en humidité, chaque incrément d'eau liée ajoutant des dipôles au réservoir polarisable. Cette forte dépendance explique pourquoi la teneur en humidité, plus que l'essence, constitue le principal levier de la contribution diélectrique d'un support ; elle est traitée à la section 5. Pour l'argument d'anisotropie, l'essentiel est structural plutôt que numérique : la direction de permittivité la plus élevée est celle de la fibre, et cette direction est fixée par l'artisan, non par l'arbre.

3. MESURE : PERMITTIVITÉ ET PERTES SUIVANT TROIS AXES

Nous avons mesuré ϵ_{r} et $\tan \delta$ sur des éprouvettes de teck usinées suivant chacun des trois axes anatomiques, afin que le champ appliqué par la cellule à plaques parallèles traverse successivement l'échantillon dans les directions longitudinale, radiale et tangentielle. Les éprouvettes mesuraient 40 mm de côté sur 3.0 mm d'épaisseur, avec des faces planes et parallèles à ± 10 micromètres ; elles avaient été prélevées dans trois billes équatoriales classées 5N, sélectionnées selon le protocole de l'étude de référence afin qu'aucune contamination magnétique ne puisse fausser la lecture diélectrique. Chaque série d'éprouvettes a été conditionnée à l'équilibre à trois teneurs en humidité -- 8, 12 et 16 % -- en enceintes climatiques, puis son humidité a été vérifiée par gravimétrie par rapport à la masse anhydre à la fin de la série.

La cellule était un montage à plaques parallèles gardées du type décrit précédemment (Tanaka et Park, 2022), piloté par un analyseur d'impédance Keysight E4990A de 20 Hz à 10 MHz. L'anneau de garde supprime les effets de frange, de sorte que la capacité mesurée correspond à une aire d'électrode définie et que la permittivité extraite représente la valeur volumique du matériau plutôt qu'une estimation contaminée par les bords ; la tangente de perte est lue directement comme facteur de dissipation du montage. Le contact était assuré par de minces intercalaires en élastomère conducteur afin d'absorber la rugosité résiduelle des faces usinées sans employer de colle qui apporterait sa propre polarisation.

À 12 % de teneur en humidité et 1 kHz, le teck a donné $\epsilon_{L} = 2.64$, $\epsilon_{R} = 2.09$ et $\epsilon_{T} = 2.02$, soit un rapport d'anisotropie $\epsilon_{L} / \epsilon_{T}$ de 1.31 et $\epsilon_{L} / \epsilon_{R}$ de 1.26 ; les deux axes transversaux concordaient à 4 % près, comme prévu. La tangente de perte suivait le même ordre : $\tan \delta$ valait 0.021 dans le sens du fil et 0.014 à 0.015 en travers. Dans la bande audio de 20 Hz à 20 kHz, les permittivités restaient constantes à 3 % près et le rapport d'anisotropie se maintenait entre 1.24 et 1.31. Porter la teneur en humidité à 16 % élevait chaque valeur -- ϵ_{L} atteignait 3.08 -- et, fait notable, accentuait légèrement l'anisotropie, car l'eau liée supplémentaire se polarise préférentiellement suivant l'axe favorisé. Un séchage à 8 % réduisait à la fois les valeurs absolues et le rapport. L'anisotropie n'est donc pas une constante matérielle fixe, mais une grandeur modulée par l'humidité, la plus forte là où elle importe le moins (bois humide) et la plus faible là où le matériau est le plus sec ; à la spécification de livraison de 12 ± 1 %, elle est nettement résolue et stable.

4. MODÈLE DE CAPACITÉ RÉPARTIE DU BERCEAU, DU CÂBLE ET DE LA COLONNE

Pour convertir trois permittivités en décision de conception, il faut connaître la géométrie du couplage. Le câble ne repose pas sur un bloc plat ; il s'appuie dans un berceau, une gorge peu profonde et rayonnée usinée dans la face supérieure, de sorte qu'un arc fini de la gaine du câble n'est séparé du bois que par l'épaisseur de cette gaine. Le bois situé directement sous cet arc -- une courte colonne verticale allant du fond du berceau jusqu'au corps du bloc -- est la zone où le champ entre le conducteur et tout retour de masse distant est le plus intense et où se stocke la grande majorité de la capacité câble-support. Le bois plus éloigné vers l'extérieur et vers le bas contribue avec un poids qui décroît rapidement à mesure que le champ s'étale et faiblit.

Nous modélisons le système comme une capacité répartie par unité de longueur du parcours, en intégrant l'énergie locale du champ dans le volume de bois situé sous et autour du berceau, avec le tenseur de permittivité du bois inséré axe par axe. La construction est classique pour un diélectrique anisotrope : la composante verticale du champ échantillonne la permittivité de l'axe vertical, les composantes horizontales échantillonnent celles des axes horizontaux ; comme le berceau concentre le champ dans la région presque verticale immédiatement sous le conducteur tandis que les chemins de retour qui ferment la capacité s'écartent et descendent par les flancs de la colonne, les permittivités horizontales représentent la plus grande part de l'énergie stockée. Le modèle fournit une seule valeur d'intérêt technique : la capacité que le bloc ajoute au câble, en picofarads par bloc, selon l'orientation du tenseur de permittivité.

Deux orientations présentent un intérêt pratique. L'usinage bois de bout vertical place l'axe longitudinal L verticalement, suivant le chemin de charge, et laisse les deux axes transversaux faibles R et T dans le plan horizontal. L'usinage sur dosse (fibres horizontales) couche l'axe longitudinal L dans le plan horizontal, où il est sollicité par les fortes composantes horizontales du champ, et redresse verticalement un axe transversal. L'injection des constantes mesurées à 12 % dans le modèle pour une



géométrie représentative de berceau (câble de 12 mm de diamètre, berceau rayonné de 3 mm, bloc de 60 mm de haut, retour de masse nominal à la distance du châssis) donne environ 1.9 pF par bloc pour l'orientation bois de bout et environ 2.3 pF par bloc pour l'orientation sur dosse -- soit une différence proche de 0.4 pF, environ 18 %, due au seul angle de coupe. Par bloc, cette valeur est faible. Elle est également réelle, répétable, de signe constant et gratuite : elle ne coûte au fabricant que la décision d'orienter correctement la bille, et elle s'accumule sur les plusieurs blocs d'un parcours complet.

5. BALAYAGE DE L'ANGLE DU FIL ET SENSIBILITÉ À L'HUMIDITÉ

Les deux orientations nommées sont les extrémités d'un continuum, et il convient de confirmer que le bois de bout constitue un véritable minimum plutôt que le simple meilleur de deux choix arbitraires. Nous avons usiné une série d'éprouvettes avec des angles du fil allant de 0 deg (fibre verticale, véritable bois de bout) à 90 deg (fibre horizontale, bois de face), en passant par 30, 45 et 60, puis mesuré chacune dans la géométrie du modèle de berceau avec un conducteur sous tension au-dessus. La capacité rapportée au câble augmentait de manière monotone avec l'angle du fil, du minimum bois de bout à 0 deg jusqu'au maximum bois de face à 90 deg, en suivant de près la pondération en cosinus carré prédite par le modèle tensoriel à mesure que l'axe longitudinal de forte permittivité pivote progressivement dans le champ horizontal. La courbe est peu inclinée près de 0 deg -- quelques degrés d'erreur d'usinage ne coûtent presque rien -- et la plus raide au milieu du balayage, de sorte que la pénalité d'une coupe véritablement négligente dépasse celle d'une coupe imparfaite mais bien intentionnée. Le minimum se trouve au véritable bois de bout, et c'est un minimum, non un point d'inflexion.

La teneur en humidité déplace toute la courbe verticalement sans déplacer le minimum. Comme la permittivité augmente fortement avec l'eau liée, un bloc passé de 12 à 16 % d'humidité ajoute en valeur absolue davantage de capacité que toute la différence entre bois de bout et bois de face à humidité constante -- le levier d'humidité est plus important que celui de l'orientation. Mais les deux paramètres sont indépendants : mouiller le bois élève le plancher, sans changer l'orientation la plus basse. Orientation et conditionnement constituent donc des moyens de maîtrise complémentaires, et tous deux doivent être exercés. Voilà la base mesurée du séchage au four à l'origine de chaque bille classée jusqu'à 12 +/- 1 %, ainsi que du contrôle annuel de l'humidité prévu au programme d'entretien : l'orientation est définitivement usinée et ne peut dériver, mais l'humidité qui la met à l'échelle le peut, et un support laissé à l'équilibre dans une pièce humide abandonne lentement la marge obtenue au banc d'usinage.

Notons au passage que la concordance des axes transversaux mesurée à la section 3 rend sans conséquence, dans l'incertitude de mesure, le choix d'une présentation radiale ou tangentielle dans le plan horizontal ; le bloc peut être orienté en rotation autour de son axe vertical pour obtenir le meilleur aspect des cernes sur la face supérieure, sans conséquence diélectrique, à condition que les fibres restent verticales.

6. DISCUSSION : DEUX ARGUMENTS, UNE ORIENTATION

L'orientation bois de bout n'a pas été adoptée pour son comportement diélectrique. Elle l'a été parce que le bois de bout est la manière la plus rigide et la plus résistante de charger le bois en compression : lorsque les fibres sont verticales, une charge descendante est portée le long des cellules tubulaires dans leur direction la plus résistante, et le bloc supporte le poids statique d'un parcours de câble et le tassement de l'installation avec le moins de fluage et de variation dimensionnelle. C'est un principe ancien et incontesté de l'ingénierie du bois, qui a fixé la spécification d'usinage avant toute mesure de permittivité.

Les mesures diélectriques présentées ici ont été réalisées ensuite et auraient pu, en principe, contredire le choix mécanique -- l'axe longitudinal aurait pu être celui de faible permittivité, auquel cas le placer verticalement aurait été mécaniquement correct et électriquement incorrect, imposant un compromis. Elles ne l'ont pas contredit. L'axe longitudinal est celui de forte permittivité ; le placer verticalement l'extrait donc du plan horizontal où le champ du câble est le plus intense, ce qui répond exactement à la demande du modèle capacitif. L'orientation mécaniquement idéale est, indépendamment, celle qui est diélectriquement la plus silencieuse. Les deux arguments ont été construits à partir de physiques différentes, à des moments différents et par des personnes résolvant des problèmes différents, et ils sélectionnent la même coupe.

Nous n'attribuons aucune portée mystique à cette concordance ; dans les matériaux anisotropes, l'axe rigide et l'axe de forte permittivité sont fréquemment alignés parce que les deux propriétés remontent à la même microstructure orientée, et le teck en est un exemple. La conséquence pratique demeure cependant. Un fabricant qui suit le seul argument mécanique aboutit au bois de bout et, sans le vouloir, minimise également le couplage capacitif. Un fabricant qui écarte l'argument mécanique au profit d'un fil de face décoratif perd sur les deux tableaux à la fois. Cette convergence est moins une coïncidence à admirer qu'une raison de se fier à la spécification : lorsque deux raisonnements indépendants aboutissent au même nombre, ce nombre a davantage de chances d'être correct.

7. CONCLUSION

Le bois est un corps diélectriquement anisotrope, et un support de câble en bois est ce corps maintenu dans le champ proche d'un conducteur. Sa contribution à l'installation est une faible capacité répartie dont le fabricant fixe la grandeur, consciemment ou non, sur le banc d'usinage. Nous avons mesuré la permittivité et les pertes suivant trois axes du teck équatorial, confirmé l'ordre attendu $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$ avec un rapport d'anisotropie proche de 1.3 à la teneur en humidité de livraison, puis propagé ces



constantes dans un modèle capacitif de berceau et de colonne jusqu'à un indicateur -- les picofarads par bloc -- qui diffère de manière mesurable entre usinage bois de bout et usinage bois de face. Le bois de bout est le plus faible des deux, d'environ 0.4 pF et 18 % dans une géométrie représentative, et un balayage de l'angle du fil confirme qu'il constitue un véritable minimum.

La marge est faible par bloc et nous refusons de l'exagérer. Nous affirmons seulement qu'elle est réelle, qu'elle possède une direction privilégiée et que celle-ci est déjà prescrite pour des raisons mécaniques. Le Bloc d'Élévation Equatorial est usiné bois de bout vertical parce que le bois de bout est la manière la plus rigide de porter une charge en compression ; l'analyse diélectrique présentée ici a été entreprise ensuite et confirme que la même coupe est aussi la plus silencieuse diélectriquement. Chaque bloc est livré bois de bout vers le haut, séché au four à 12 +/- 1 %, brut, avec son grade et ses constantes mesurées inscrits sur le certificat. Nous invitons le lecteur à demander à tout autre fabricant de supports en bois dans quel sens court son fil, et pourquoi.

RÉFÉRENCES

- [1] James, W. L. (1975). Propriétés diélectriques du bois et des panneaux durs : variation avec la température, la fréquence, la teneur en humidité et l'orientation du fil. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). Propriétés diélectriques du bois et des matériaux à base de bois. Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Skaar, C. (1988). Relations entre le bois et l'eau. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin.
- [4] Norimoto, M. (1976). Propriétés diélectriques du bois. Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.
- [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] Tanaka, Y., Park, H. (2022). Mesure de permittivité par plaques parallèles gardées de solides anisotropes à faibles pertes. Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.