



HAL
open science

Colorimétrie des bois : diversité du matériau et complexité de son apparence

Iris Brémaud, Dominique Cardon, Backes Bernadette, Pierre Cabrolier, Daniel Guibal, Patrick Langbour

► **To cite this version:**

Iris Brémaud, Dominique Cardon, Backes Bernadette, Pierre Cabrolier, Daniel Guibal, et al.. Colorimétrie des bois : diversité du matériau et complexité de son apparence. Coré. Conservation et restauration du patrimoine culturel, 2021, 1 (N.S.), pp.61-84. hal-03232368

HAL Id: hal-03232368

<https://hal.science/hal-03232368>

Submitted on 25 May 2021

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

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

COLORIMETRIE DES BOIS : DIVERSITE DU MATERIAU ET COMPLEXITE DE SON APPARENCE ¹

Iris BREMAUD, chargée de recherche
CNRS, Equipe Bois, LMGC UMR5508, Montpellier
iris.bremaud@cnrs.fr

Dominique CARDON, directrice de Recherche émérite
CNRS, CIHAM UMR 5648, Lyon

Bernadette BACKES, artisanne restauratrice
Atelier Lévy Backes, Montpellier

Pierre CABROLIER, docteur ès Sciences du Bois et Artisan
Cognac

Daniel GUIBAL, ingénieur de recherche
Unité BioWooEB, CIRAD², Montpellier

Patrick LANGBOUR, chercheur
Unité BioWooEB, CIRAD, Montpellier

La couleur est une composante essentielle de notre perception visuelle. Puisqu'il s'agit d'une caractéristique avant tout esthétique, qui semble par essence subjective, pourquoi chercher à la mesurer, à l'objectiver ? Quelques exemples peuvent être tirés de la *figure 1*, sur une marqueterie qui visait à obtenir un dégradé de couleur du motif, allant du plus sombre se mêlant avec le fond, au plus clair. Le choix d'essences, basé sur les placages sciés disponibles à l'atelier, montre des discontinuités dans le dégradé (*Fig.1 gauche*). Des données colorimétriques de la diversité des bois permettraient de définir un dégradé plus fluide, mais aussi de comprendre pourquoi, sur cinq essences, trois se trouvent être des espèces du genre botanique *Dalbergia*³. Après 22 ans de vieillissement (*Fig.1 droite*), les transitions de couleur semblent s'être lissées, le fond de grenadille a perdu de sa teinte « violacée » en se « noircissant », le bois de violette semble « affadi », le cocobolo et le duramen d'if sont davantage en continuité et semblent

« renforcés », l'aubier d'if n'apparaît plus « blanc ». Les mesures colorimétriques peuvent permettre de comprendre ces évolutions, que ce soit pour les anticiper, ou dans le cadre d'une restauration ou d'une copie. Mais avant tout, la *figure 1* montre qu'il est très compliqué de documenter correctement la couleur : entre les deux photos du même objet, le matériel photographique, les conditions d'éclairage, le tissu en fond, ont changé⁴ ; peut-être que toutes les suppositions visuelles évoquées ci-dessus ne seraient en réalité que des artefacts. Les mesures colorimétriques permettent de s'affranchir de ces incertitudes et d'étudier les couleurs de façon reproductible.



■ Fig 1

Marqueterie de dos de manche de luth (réalisation Iris Brémaud), suivant un dégradé de couleurs du motif, de bas en haut : amourette, bois de violette, cocobolo, if avec bois de cœur et aubier, sur fond de grenadille.

A gauche : peu de temps après réalisation, et à droite 22 ans après.

© Brémaud Iris.

REPRÉSENTER, CLASSER, OU MESURER LA COULEUR ?

L'œil humain peut dissocier des centaines de milliers de teintes alors qu'à travers le monde, les noms « abstraits » de couleur (noir, blanc, jaune, rouge, bleu, etc.) sont limités : entre trois et dix selon les ensembles linguistiques et culturels⁵. Les noms « imagés »⁶, eux peuvent être beaucoup plus nombreux et, dans certains cas, porter une description très précise⁷. Ils restent cependant extrêmement dépendants du référentiel culturel. De très nombreux systèmes de compréhension, de représentation et de classification des couleurs ont été développés, depuis Aristote et avec un foisonnement à partir du XVII^{ème} siècle, venant de scientifiques comme d'artistes. Globalement, on retrouve dans les différents systèmes trois paramètres fondamentaux de couleur : la Clarté (ou « valeur » ou

« luminance »), la Saturation (ou « chromaticité ») et la Teinte. Mais il est très important de noter que les différents systèmes de couleur suivent trois approches différentes : des systèmes purement visuels, des systèmes purement physiques, ou des systèmes physiques corrigés pour prendre en compte la perception visuelle. Les systèmes purement visuels se traduisent en « nuanciers » : des atlas d'échantillons de coloris, le plus souvent imprimés sur papier, selon un standard élevé. On peut citer l'atlas de couleurs de Munsell (peintre), à partir de 1909 ; les nuanciers Pantone, développés à partir de 1963 dans le contexte de l'imprimerie ; ou encore le Natural Color System (NCS), initié en 1920 en Suède. Un travail pionnier, dans la première moitié du XIX^{ème} siècle, est celui de Chevreul, chimiste-teinturier à la Manufacture

Fig 2 ■

Classification théorique des couleurs et réalité d'un domaine matériel :

deux approches et deux époques issues de la Manufacture Nationale des Gobelins.

A gauche : un cercle chromatique de M.-E. Chevreul, « Couleurs Franches » sur fils de laine, datant de 1861 ;

à droite : le N.I.M.E.S, nuancier d'échantillons de laines teintes du Mobilier National.

© Bideau Isabelle, Mobilier National.



des Gobelins, dont la « Loi du Contraste Simultané » et les « Cercles Chromatiques » (Fig.2 gauche) s'accompagnent d'un dictionnaire de 14 400 nuances. Au XXI^{ème} siècle ses travaux se sont traduits, toujours aux Gobelins/Mobilier National, par un nuancier (Fig.2 droite), très intéressant car il représente la réalité matérielle de plus de 20 000 couleurs possibles⁸ sur un matériau donné – la laine – associé à des mesures colorimétriques. En effet, si les systèmes de nuanciers types Munsell, Pantone ou NCS **représentent** et **classent** les couleurs, ils ne les mesurent pas ; ils servent à comparer, *de visu*, le matériau que l'on travaille/étudie avec les références du nuancier.

Les systèmes purement physiques comportent notamment le système RGB (Rouge Vert Bleu), dans lequel les couleurs se répartissent dans un espace de forme cubique ; et le système XYZ de la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) développé en 1931, dont l'espace de couleurs est de forme triangulaire. Le système RGB comporte des valeurs matériellement irréalistes, le système CIE XYZ n'est pas très intuitif et ses différences entre couleurs mesurées ne sont pas homogènes en termes de perception visuelle.

Le principe des **mesures** colorimétriques⁹ repose sur le fait qu'une « couleur » est la résultante de trois spectres dans les longueurs d'onde visibles (de 400 à 700 nm environ) : le spectre réfléchi par la surface d'un objet ; celui de la lumière incidente (appelée en colorimétrie, « illuminant standard ») ; et celui de la sensibilité de l'œil. Ce dernier a été défini par la CIE selon les courbes des cellules réceptrices de l'œil¹⁰ sensibles surtout dans le bleu (z), dans le jaune-vert (y), et dans le rouge (x), pour un « observateur standard ». L'intégration de ces trois courbes spectrales donne les composantes X, Y et Z, nommées valeurs tristimulaires, du Système CIE XYZ. Sur cette base, le système colorimétrique CIELab (1976) a été développé dans l'objectif d'obtenir un système de **mesure physique** de la couleur, mais de **perception homogène**. A partir des composantes XYZ, des transformations mathématiques assez simples¹¹, permettent d'obtenir les coordonnées CIELab :

- La clarté / luminance L^* , axe vertical de 0=Noir à 100=Blanc
- L'axe a^* , du vert ($-a^*$) au magenta/rouge ($+a^*$)
- L'axe b^* , du bleu ($-b^*$) au jaune ($+b^*$)

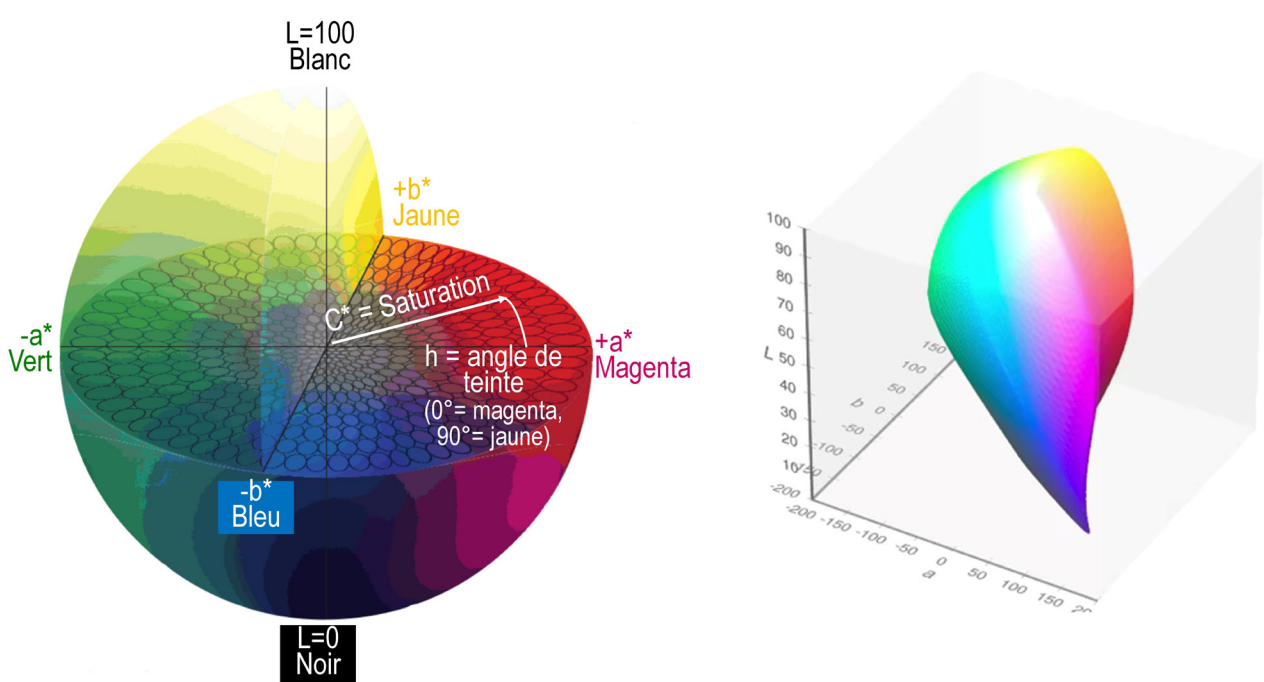


Fig 3 ■

L'espace CIE Lab avec ses axes L* (Clarté/Luminance), a* (du vert au rouge-magenta) et b* (du bleu au jaune) et les valeurs associées C* (Chromaticité/Saturation) et h (angle de teinte).

A gauche : l'espace « idéal » CIE Lab © X-Rite Incorporated | www.xrite.com ;

à droite : forme plus réelle de cet espace pour la gamme des couleurs visibles © Wikimedia Commons

Deux autres paramètres peuvent en être calculés (CIE LCh¹², plus intuitif et plus proche de la perception) :

- La Saturation ou Chromaticité C*, qui exprime l'intensité de couleur (0=axe des gris, valeurs très élevées = couleurs « fluo »)
- L'angle de teinte h° (exprimé en degrés), qui décrit la teinte de façon circulaire (0°=magenta, 90°=jaune, 180°=vert, 270°=bleu, 359°= « presque magenta »).

L'espace de couleur CIE Lab/CIE LCh est censé être une sphère (Fig.3 gauche), où des ellipses représentent la plage de valeurs pour une même couleur perçue. Dans cet espace, la différence de couleur globale, notée ΔE , entre deux points, deux échantillons, peut se calculer. La formule la plus simple et la plus connue (ΔE CIE76) est une simple distance géométrique selon les 3 axes. Cependant, après le développement de l'espace CIE Lab, il s'est révélé ensuite qu'il n'était pas réellement homogène en perception : des différences de +/- 1 point de L*, a* ou b* peuvent être presque invisibles dans le jaune-vert, à peine perceptibles dans le rouge, mais nettement

visibles dans le bleu-violet (Fig.3 droite). D'autres formules de différences de couleur ont été développées, dont l'une des plus récentes (ΔE 2000 ou CIEDE₀₀), calculée par des équations très compliquées, semble résoudre ce problème d'inhomogénéité¹³, et correspondre bien mieux à la perception, y compris pour le bois¹⁴. L'objectif est que, quelle que soit la plage de coloris, les valeurs de différences de couleurs puissent s'interpréter comme¹⁵ :

- $0 < \Delta E < 1$: différence non perceptible, ou seuil de perception par un observateur expert ;
- $1 < \Delta E < 2$: différence presque invisible, perceptible seulement par un observateur expert ;
- $2 < \Delta E < 4$: différence perceptible et visible, même par un observateur inexpérimenté ;
- $4 < \Delta E < 5$: différence notable, ou plafond d'acceptation comme « une même couleur » ;
- $\Delta E > 5$: différence évaluée comme une autre couleur, les observateurs voient deux couleurs distinctes.

C A R A C T É R I S A T I O N D'UN ÉVENTAIL DE DIVERSITÉ COLORIMÉTRIQUE DES BOIS

Nous avons mené, dans le cadre de nos recherches sur la diversité bio-culturelle et de propriétés des bois, des caractérisations de la diversité de couleur des bois sur un matériel (Fig.4) couvrant 80 espèces (résineux, feuillus tempérés et tropicaux), et au total 98 types de bois (aubier et duramen, bois figuré/non figuré, différentes « qualités »)¹⁶. L'échantillonnage venait pour partie de la scierie expérimentale du CIRAD, Unité de Recherche BioWooEB, pour s'assurer de la bonne identification botanique ; et pour une grande partie de « recherche participative », par une collecte auprès d'artisans d'arts (luthiers, tourneurs, ébénistes, etc.) ou d'achats à des fournisseurs spécialisés, pour assurer une bonne correspondance de nos mesures aux

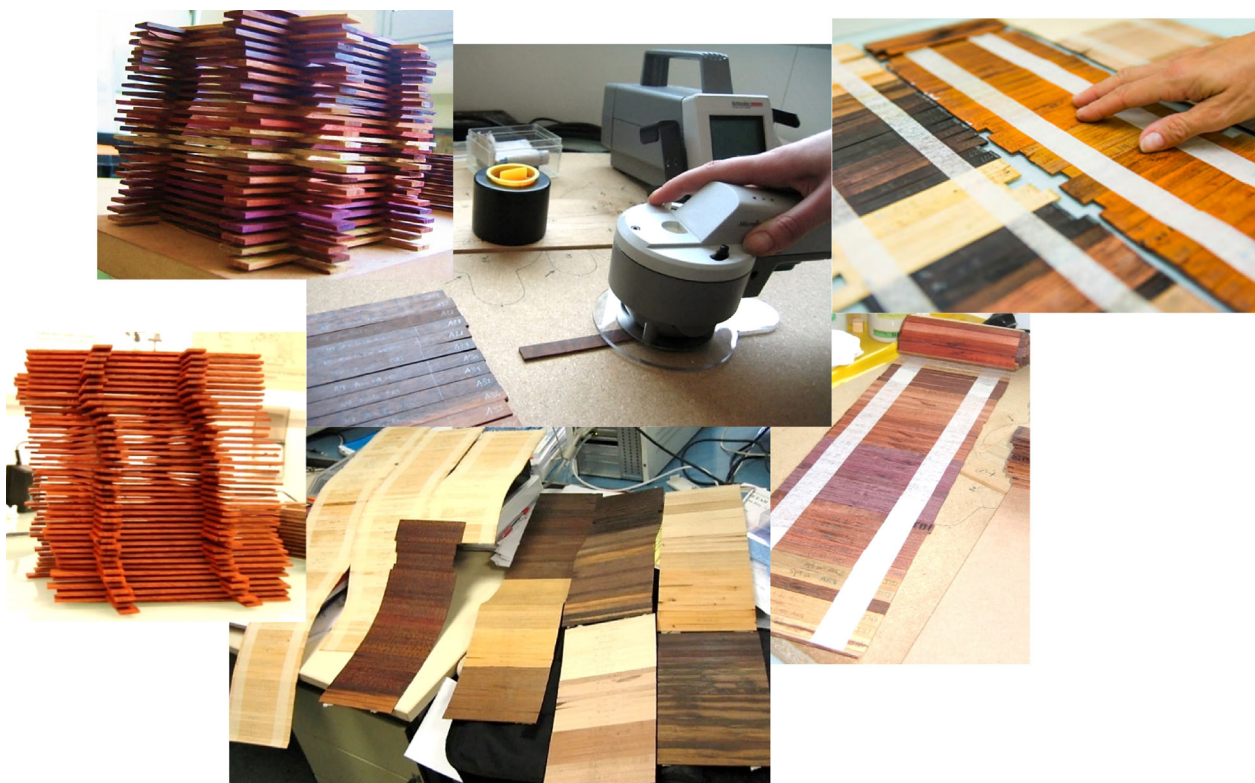
usages culturels. Au total, 1350 spécimens ont été mesurés, sur bois fraîchement débité, avec des surfaces lisses obtenues par outils tranchants. Les mesures ont été faites avec un spectroradiomètre, avec l'illuminant standard D65¹⁷.

■ Fig 4

Mesures colorimétriques de la biodiversité des bois.
Au centre : appareil de mesure - spectroradiomètre ;
tout autour : certains jeux d'échantillons mesurés.

© Brémaud Iris

(sauf photo en haut à droite : © Hargoues Christophe / LMGC / CNRS Photothèque).



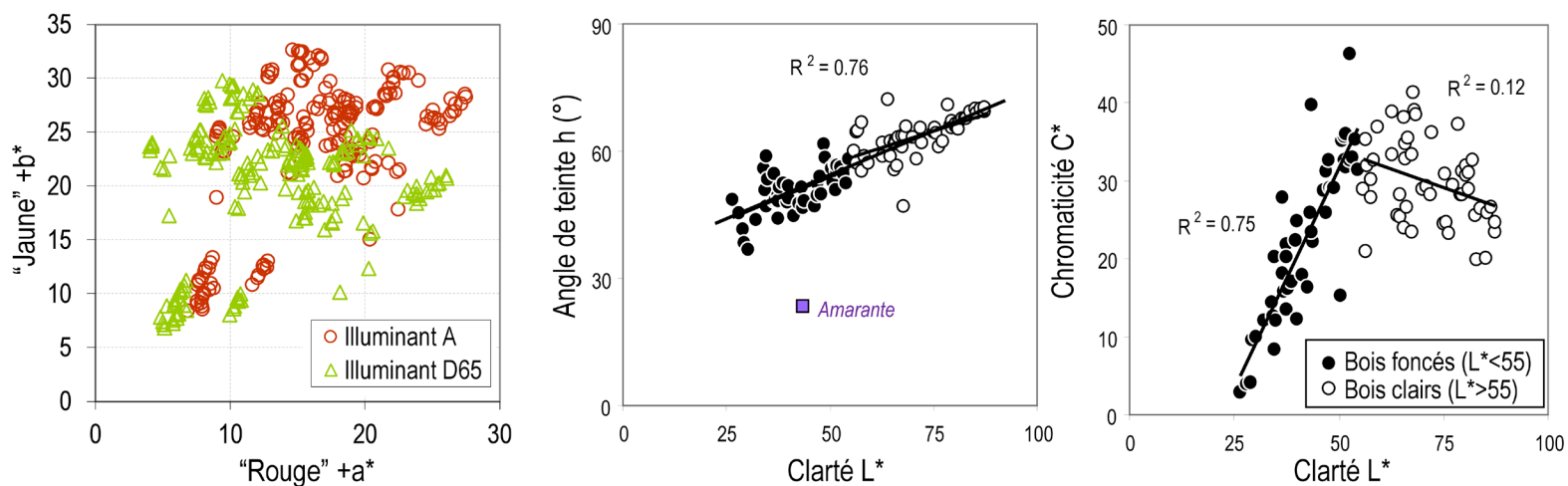


Fig 5 ■

Quelques éléments méthodologiques à considérer dans les analyses colorimétriques des bois :
à gauche, choix de l'illuminant standard ;
au centre et à droite, relations entre paramètres L^* , C^* et h° pour des bois « clairs » et bois « foncés ».

Appliquer la colorimétrie aux bois demande quelques précautions et vérifications méthodologiques. D'abord, le choix de l'illuminant : le D65 (≈ lumière du jour moyenne, répartition spectrale assez homogène) est le plus standard, mais le A (≈ lampe à incandescence, répartition spectrale augmentant du jaune au rouge) a parfois été suggéré comme un meilleur choix pour les bois¹⁸. Nous avons comparé ces deux illuminants sur 193 spécimens de 23 espèces contrastées : la clarté L^* est peu affectée, alors que la plage de saturation C^* est nettement amplifiée en utilisant l'illuminant A (Fig.5 gauche) ; mais ce dernier resserre fortement les angles de teintes. Le choix de l'illuminant dépend donc des questions : le A peut être utile pour étudier des effets d'intensification de couleur sur une espèce donnée, mais nos résultats tendent à ne pas le recommander pour des comparaisons entre mesures et perception, ni dans des études entre espèces très différentes, où l'angle de teinte est un paramètre prédominant. Enfin, dans la littérature colorimétrique sur les bois, il arrive

que seules les valeurs L^* , a^* (« rouge ») et b^* (« jaune ») soient analysées. Or il est délicat de discuter directement d'évolutions individuelles de a^* et b^* : d'une part ils sont moins bien liés à la perception que la saturation/chromaticité C^* et l'angle de teinte h° ; d'autre part la forme de l'espace CIELab (une sorte de sphère inhomogène) fait dépendre les amplitudes de a^* et b^* de la position sur l'axe vertical des clartés. Ceci est manifeste dans la figure 5 droite : entre 98 types de bois, les valeurs maximales de C^* se trouvent pour des clartés de l'ordre de 55, comme observé sur d'autres mesures de bois¹⁹. Au-dessous, les « bois foncés » voient leur saturation diminuer en même temps que la clarté ; au-dessus, les « bois clairs » voient leur saturation diminuer avec une augmentation de la clarté. Cette discontinuité de saturation entre bois clairs et foncés semble un effet géométrique de l'espace CIELab, et doit être prise en compte dans les analyses. L'angle de teinte, en revanche, évolue de façon continue sur la gamme de clarté, avec quelques « outsiders », mais sans inversion de tendance entre les deux groupes « clairs » et « foncés ».

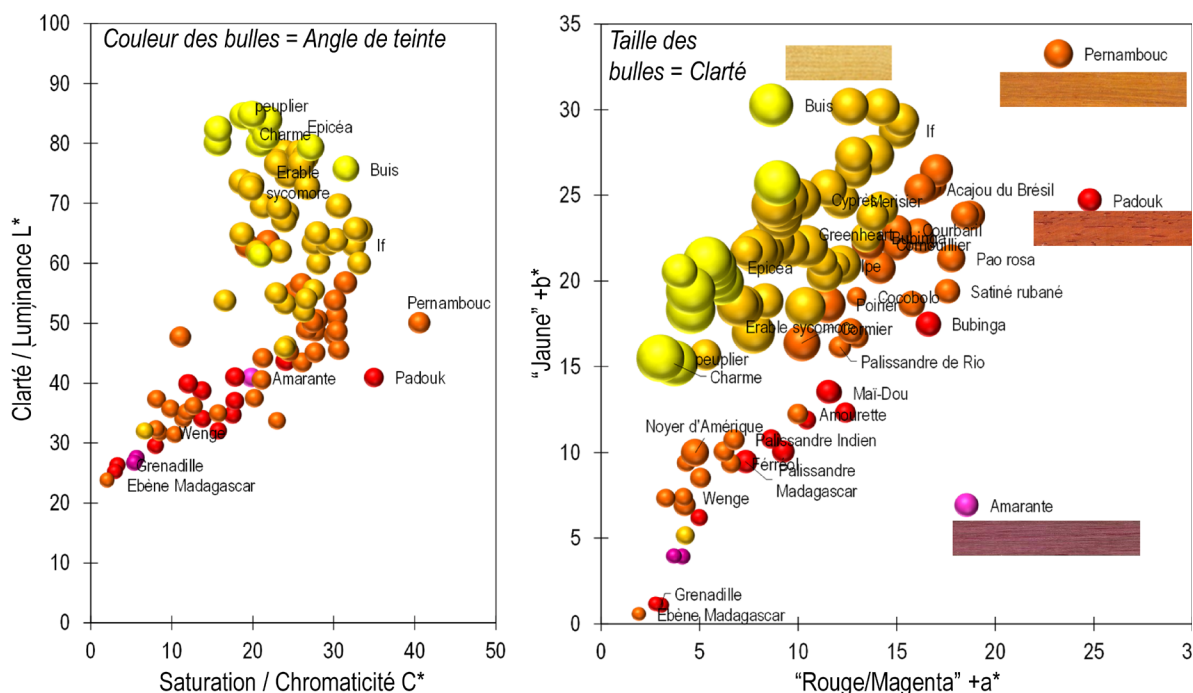


Fig 6 ■

Gamme de couleurs pour 98 types de bois, tropicaux et tempérés, dont une majorité de bois d'artisanat d'art (ébénisterie et/ou lutherie) :

à gauche, dans le plan défini par la clarté L^* et la saturation/chromaticité C^* ;

à droite, dans le plan défini par « l'axe rouge-magenta » $+a^*$ et « l'axe jaune » $+b^*$.

Le terme de gamme, ou « gamut » de couleur désigne l'espace de couleur qui recouvre la réalité d'un domaine matériel étudié (par exemple, un type particulier d'impression sur un type défini de papier, ou une catégorie de teintures sur un textile déterminé, etc.). Pour le bois, des jeux de données existent, mais parfois peu accessibles²⁰, ou ciblés sur une région donnée²¹. La *figure 6* propose une gamme de couleur, à travers les 98 types de bois étudiés ici, tropicaux et tempérés, représentatifs des bois historiquement utilisés en artisanat d'art – ébénisterie, lutherie – en Europe. Dans le plan de la clarté L^* et de la « quantité de couleur » C^* , cette gamme de couleur s'inscrit assez bien dans un demi-cercle, proche de la forme « idéale » de l'espace CIELab/CIELCh. Il est intéressant de noter que, à l'exception des bois très foncés (ébène, grenadille), il n'y a quasiment aucun bois « très peu saturé » (proche de l'axe des noir-gris-blanc). L'enveloppe globale de « quantité de couleur » est assez homogène, mais on trouve quelques bois atypiques qui ont une plus grande saturation (pernambouc, padouk), correspondant justement à des

bois connus pour leurs usages tinctoriaux. En termes de teintes (*Fig.6 à droite*), la totalité des bois sont dans le quart chromatique rouge / jaune ($+a^*$, $+b^*$), et même, majoritairement, dans le secteur d'angle de teinte compris entre 45° (autant de rouge que de jaune) et 90° (surtout du jaune). Même des bois qui nous apparaissent « violets » (l'amarante non vieillie) ou « verdâtres » (le *greenheart*) sont, en mesures colorimétriques, situés entre « rouge » et « jaune ». L'amarante est le seul bois testé qui se rapproche significativement de l'axe « rouge-magenta », tandis que le padouk, bien connu pour son rouge éclatant, est à mi-chemin entre l'axe « rouge-magenta » et l'axe « jaune ». Le fait que les bois ne couvrent qu'un petit domaine de l'espace de couleur CIELab a déjà été noté, mais pour 24 espèces d'Europe Centrale²², alors que la plus grande diversité de couleurs se trouve plutôt dans les bois tropicaux. Pour mieux comprendre cette gamme de couleur des bois, on peut se pencher sur un domaine plus large, mais également issu de colorants naturels : les teintures historiques sur textiles.

COULEURS NATURELLES : REGARDS CROISÉS ENTRE BOIS ET TEINTURES HISTORIQUES SUR TEXTILES

Jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle, toutes les teintures sur textiles étaient d'origine naturelle, issues des règnes végétaux (y compris de bois tinctoriaux) et animaux. Les actifs colorants des végétaux sont des métabolites secondaires, comme par exemple les « extractibles » qui donnent leur couleur aux bois de cœur. Les teintures naturelles historiques étaient appliquées sur des fibres elles aussi naturelles²³. Le parallèle semble donc intéressant à effectuer avec la couleur des bois. Des sources, rares mais précieuses d'information, ont été conservées sous la forme de cahiers de teinturiers (Fig.7), associant les recettes de teintures – et ingrédients/sources de colorants – avec des échantillons de textiles teints suivant ces recettes, ainsi que les noms

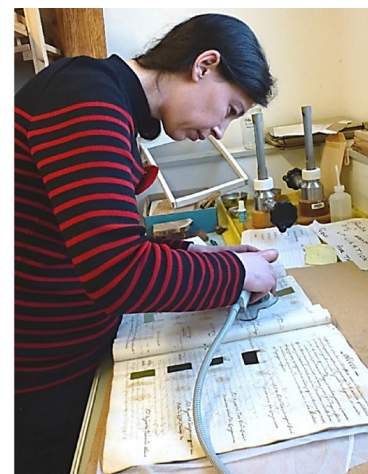
donnés aux couleurs obtenues. Nous avons étudié deux carnets à échantillons provenant de maîtres teinturiers languedociens du XVIII^{ème} siècle : Antoine Janot²⁴ à Saint-Chinian, en 1744 (56 échantillons de drap de laine teints), et Paul Gout²⁵, de la Manufacture Royale de Bize, datant probablement de 1763 (177 échantillons de drap de laine teints). Ces carnets ont fait l'objet de plusieurs recherches²⁶ enquêtant sur les dimensions techniques, historiques et socio-économiques de leur production. Les échantillons de textiles teints sont bien conservés, avec des couleurs incroyablement vives après plus de deux siècles. Un intérêt majeur des mesures colorimétriques est leur aspect non-invasif : il s'agit de mesures de surface, qui peuvent se faire avec des appareils portables (et donc utilisables en archives), avec seulement un très bref flash de lumière visible.

■ Fig 7

Cahiers à échantillons de maîtres teinturiers languedociens du XVIII^{ème} siècle (haut-gauche) et mesures colorimétriques non-invasives (haut-droite).

Trois gammes de couleurs sur drap de laine teint : les rouges-orangés, les verts-jaunes, et la gamme des bleus.

© Cardon Dominique,
Granier Pierre-Norman.



Les noms de couleur « imagés » de ces carnets de teinturiers du XVIII^{ème} siècle présentent une incroyable diversité, et l'on peut se demander si leur dimension poétique (*vert de cêpre, vert d'herbe rempli, soupevin royal, jujube, langouste, poudre à canon des anglais, etc.*) pouvait avoir également une dimension quantitative, voire normative, à l'époque. Les résultats colorimétriques plaident pour cette hypothèse. Dans les mémoires de teintures de Paul Gout, un premier mémoire concerne les recettes officielles, correspondant aux réglementations royales, et un second mémoire porte sur des recettes « alternatives », souvent avec économie de matières premières onéreuses. La comparaison des échantillons portant le même nom de couleur montre que, dans 40% des cas, ce maître teinturier réussissait à obtenir, avec des ingrédients et recettes différents, des couleurs ne dépassant pas un ΔE_{2000} de 2 (soit une différence de couleur à peine visible par un observateur expert), et dans 82% des cas, ne dépassant pas un ΔE_{2000} de 5 (nettement visible mais non encore évalué comme une autre couleur).

Les échantillons de drap de laine teints des *Mémoires de teintures* de Paul Gout couvrent une large gamme de clarté et de saturation (Fig.8). L'étendue de clarté est du même ordre entre ces draps teints et les bois, mais ces derniers n'atteignent pas les valeurs les plus sombres de L^* (même les bois les plus foncés, comme l'ébène ou le grenadille). Les draps de laine teints couvrent une large étendue de saturation, depuis des couleurs proches de l'axe des gris – qu'on ne trouve pas dans les bois – jusqu'à des C^* très élevées – qu'on ne trouve jamais non plus dans les bois, même pour les essences nous apparaissant les plus vivement colorées. En termes d'angles de teinte, les laines teintes au XVIII^{ème} siècle, dans un seul atelier, couvrent toute la palette chromatique. Cependant, la saturation de ces draps de laine teints est beaucoup plus développée dans le quart rouge-jaune, que pour les verts-bleus-violets. Ces derniers échantillons nous apparaissent pourtant très « vifs » à l'œil. Ce contraste entre mesures et perception provient partiellement des caractéristiques – et en particulier du manque d'homogénéité – de l'espace CIELab (Fig.3 à droite), mais aussi de la nature du matériau (ici du drap de laine).

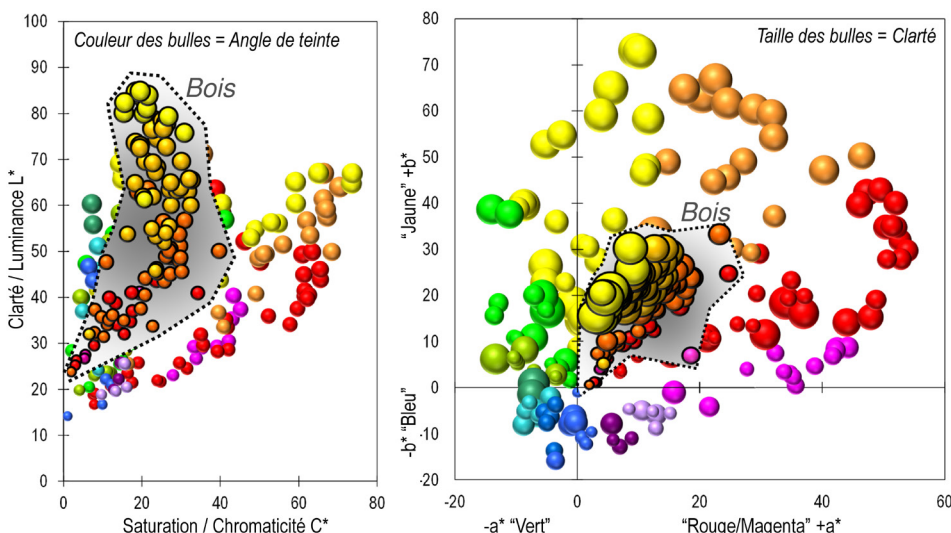


Fig 8 ■

Comparaison des gammes de couleurs pour 98 types de bois, tropicaux et tempérés, et pour 177 échantillons de drap de laine teints au XVIII^{ème} siècle (*Mémoires de teinture* de Paul Gout, Bize, 1763).

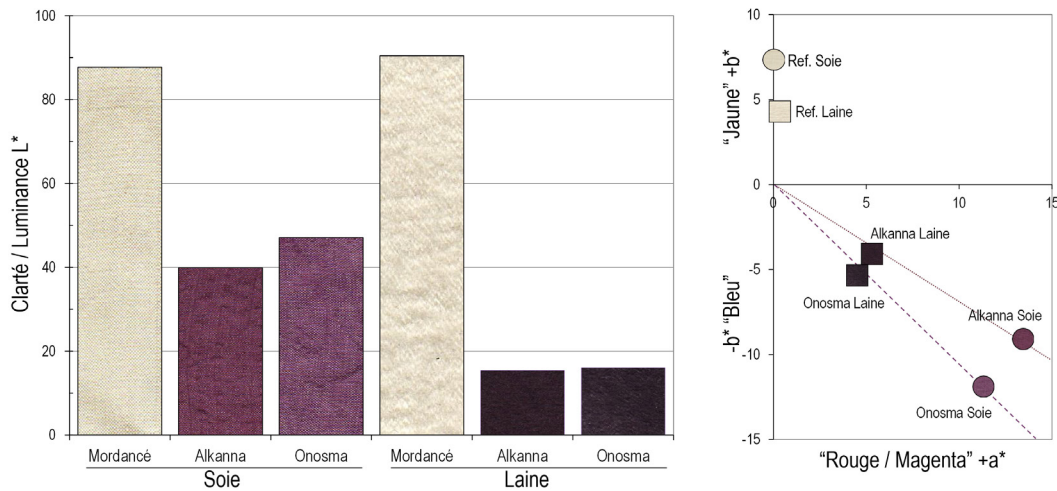


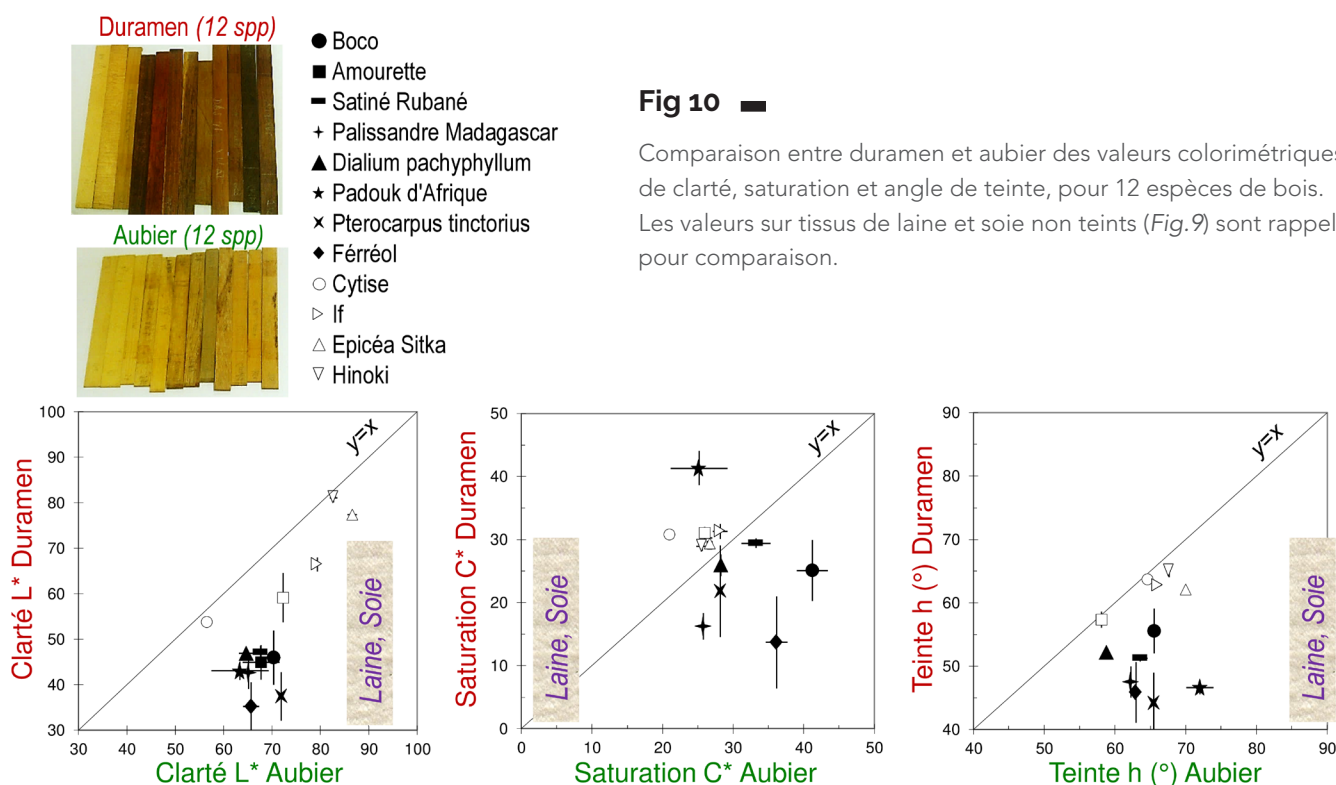
Fig 9 ■

Comparaison colorimétrique de tissus de laine et de soie, avant teinture (juste mordancés), puis après teinture par deux espèces de Boraginaceae méditerranéennes : à gauche clarté/luminance L^* , à droite teintes (dans le plan a^* et b^*). D'après Cardon et al. 2009, op. cit.

COULEUR DU BOIS DE CŒUR : UNE « TEINTURE » (FAITE PAR L'ARBRE OU LE BOIS LUI-MÊME) SUR AUBIER

En effet, les différents « supports de teinte » n'ont pas les mêmes caractéristiques de réflexion de la lumière, ni les mêmes valeurs colorimétriques avant teinture. Une illustration est présentée dans la *figure 9*, par des essais de reconstitution de recettes de teinture provenant de textes d'Égypte ancienne, avec deux espèces de *Boraginaceae* tinctoriales (*Alkanna tinctoria* et *Onosma fastigiata*)²⁷. Avant teinture, les tissus de laine sont aussi clairs que ceux de soie, mais, au sortir d'un même bain de teinture, la laine teinte est beaucoup plus sombre que la soie. La saturation/chromaticité est nettement plus élevée pour la soie, avant puis après teinture. L'angle de teinte, lui, vient de l'espèce tinctoriale, il reste similaire entre les deux supports/fibres textiles. Cette interaction entre « support » – qui détermine l'intensité de couleur – et « colorant » – qui détermine l'angle de teinte – peut être considérée en parallèle dans le cas des bois.

La diversité de couleurs des bois vient de l'imprégnation de métabolites secondaires, aussi appelés extractibles, lors de la transformation de l'aubier (qui vient du latin « albus » : blanc) en bois de cœur, ou duramen. Il s'agit plus exactement de modifications de la nature chimique de ces extractibles lors de la « duraminisation », car les aubiers contiennent aussi des extractibles, mais peu ou pas colorés²⁸. En comparant les valeurs colorimétriques entre aubier et duramen, pour 12 espèces variées (résineux, feuillus tempérés ou tropicaux), on constate que les duramens sont presque toujours plus foncés et plus « rouges » (*Fig.10*). Certains bois ont cependant un duramen qui n'est pas différencié de l'aubier en termes de couleur. Les duramens peuvent avoir des valeurs de saturation (C^*) plus élevées, ou au contraire plus faibles, que les aubiers : dans le deuxième cas, cela vient des spécificités de l'espace CIELab/CIELCh vu plus haut (*Fig.5 droite*). On constate aussi que les aubiers sont nettement plus colorés (souvent plus sombres, toujours nettement plus saturés, jamais « exclusivement jaune ») que les tissus de laine ou soie non teints.



Le « support » du bois est donc nettement moins neutre vis-à-vis de la teinte que des tissus de fibres animales protéiques. Ceci explique certainement en grande partie la gamme de couleurs restreinte observée pour les bois (Fig.8). Par ailleurs, des analyses sur 26 espèces de feuillus ont montré que la couleur des aubiers dépend partiellement de la densité et du plan de débit²⁹, les aubiers de bois très denses ont tendance à avoir de plus fortes saturations (C*), et des angles de teintes se rapprochant de 60° ; tandis que les aubiers d'espèces à faible densité tendent vers des « jaunes » purs (angles de teinte proches de 90°). Si l'on considère que les aubiers sont le « support » de la teinte qui sera apportée par la transformation en duramen, il s'ensuit que les bois les plus denses tendront naturellement vers le « rouge ».

De plus, les extractibles du bois de cœur ne consistent pas en une seule molécule, mais en des mélanges complexes de différentes molécules, toutes n'étant pas colorantes, ou n'ayant pas un égal pouvoir colorant. Même au

sein d'un seul genre botanique, les différentes espèces du genre auront chacune leur propre assemblage d'extractibles. Dans certains cas, ceci peut aider dans l'identification de l'espèce, par exemple parmi les Palissandres (genre *Dalbergia*), dont certaines espèces sont difficilement dissociables sur la seule base de leur anatomie. La diversité biochimique des extractibles a de nombreuses répercussions sur les qualités et propriétés mesurables des bois (résistance aux insectes ou champignons, hygroscopie...). Certains extractibles sont aussi capables de modifier d'un facteur 2 une propriété acoustique importante : l'amortissement des vibrations. Nous avons trouvé, sur de nombreuses espèces, notamment de feuillus tropicaux, des corrélations fortes entre angle de teinte et amortissement des vibrations : les bois tendant le plus vers le « rouge » sont les moins amortissants³⁰, mais avec des spécificités par familles botaniques (les plus faibles amortissements se retrouvent principalement dans la famille des *Fabaceae*³¹).

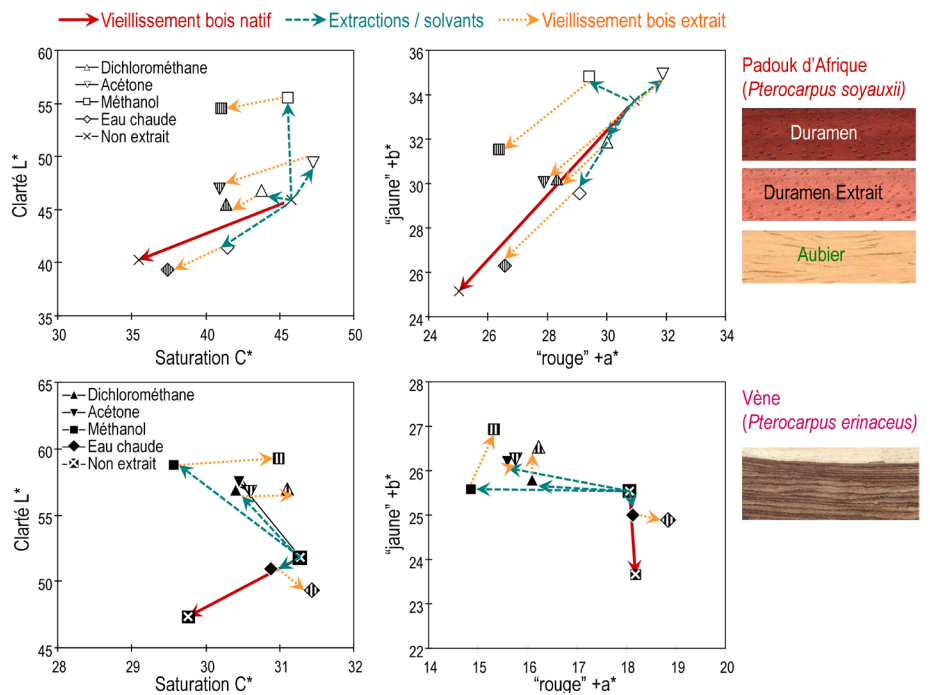


Fig 11

Effets, intrinsèques ou superposés, des extractibles (solubles dans différents solvants), et du vieillissement durant 4 ans (« en conditions ambiantes » mais avec peu d'exposition à la lumière), pour le Padouk (en haut) et le Vène (en bas).

Pour approfondir la question de l'impact des extractibles sur les propriétés et le vieillissement du bois, nous avons étudié deux espèces du genre botanique *Pterocarpus* (sous-famille des *Papilionoideae*, *Fabaceae*) : le padouk d'Afrique (*P. soyauxii*) et le vène (*P. erinaceus*). Le padouk (aussi appelé bois de corail en ébénisterie) est connu pour sa couleur rouge éclatante, qui se « ternit » cependant au cours du temps ; le vène, moins connu en Europe, a une coloration moins vive mais avec des veinages « bruns-roses-violets » très esthétiques. Les deux sont des bois traditionnellement majeurs dans la facture de xylophones et balafons Africains³² mais sont aussi connus pour leurs usages historiques comme bois tinctoriaux³³. L'analyse chimique³⁴ de leurs mélanges respectifs d'extractibles a montré que certains composés sont communs aux deux espèces, mais chaque espèce présente également des composés que l'on ne retrouve pas dans l'autre. Nous avons observé les modifications de différentes propriétés physiques et acoustiques³⁵ ainsi que colorimétriques de ces bois suivant trois types de traitements : juste après le retrait de différentes fractions d'extractibles par des solvants ; après quatre ans de vieillissement naturel en conditions ambiantes du bois « non-extrait » ; et enfin

le même vieillissement mais sur les bois préalablement extraits (Fig. 11).

Les extractibles ont des effets très contrastés sur la couleur, entre les deux espèces mais aussi dans une même espèce selon le type de solvant utilisé : toutes les extractions diminuent la saturation, mais certaines augmentent la clarté tandis que d'autres la diminuent ; la plupart des solvants retirent du « rouge », mais certains extraient autant de « jaune » que de « rouge », voire même n'enlèvent que du « jaune ». Le vieillissement naturel, lui, va vers un assombrissement et une perte de saturation. Mais les deux espèces réagissent différemment : le padouk non traité perd beaucoup de couleur, dans le « rouge » et d'autant plus dans le « jaune », tandis que le vène perd beaucoup moins de couleur, et uniquement du « jaune ». Après quatre ans, les deux bois sont plus sombres, le padouk est bien moins saturé (le vène à peine), mais les angles de teintes restent dans une gamme comparable. Les bois d'abord extraits vieillissent moins en couleur (pour le padouk), voire regagnent en saturation (pour le vène). Ceci indique que les extractibles créent la couleur du bois de cœur, certes, mais qu'ils contribuent également à son instabilité dans le temps.



■ Fig 12

Diversité d'apparence de « Palissandres vrais », illustrée par 12 espèces (sur environ 250) du genre *Dalbergia*, couvrant différents continents, et usages en artisanats d'art. Sélection parmi les 168 échantillons de *Dalbergia* dans les collections de la xylothèque du CIRAD (Unité de Recherche BioWooEB). © Suarez Diaz Sebastian.

LES « BOIS ROUGES » EN VOIENT DE TOUTES LES COULEURS

On peut mettre en regard nos résultats sur deux espèces de *Pterocarpus*, avec les bois du genre *Dalbergia* qui est botaniquement proche, et qui produit les « Palissandres vrais » (y compris bois de violette, bois de rose, grenadille, etc.) très largement employés en artisanat d'art et mobilier historique³⁶ européen. Le genre *Dalbergia* comprend environ 250 espèces (dont 12 sont représentées sur la figure 12) réparties sur tous les continents tropicaux. La majorité des espèces de *Dalbergia* ont des

usages ethnobotaniques importants, y compris souvent avec des activités biologiques, colorantes et pharmacologiques³⁷, qui révèlent des compositions chimiques particulières. Mais l'ensemble des espèces du genre *Dalbergia* sont inscrites à la CITES³⁸. La menace provient notamment d'une explosion, dans la dernière décennie, de la demande chinoise pour le mobilier « Hongmu »³⁹ (qui peut se traduire par « bois rouges »).

Dans la gamme de couleur sur 98 bois (Fig.6), seules sept espèces présentaient un angle de teinte h° inférieur à 45° , c'est-à-dire avec une plus forte composante « rouge-magenta » que « jaune », et, mis à part l'amarante, il ne s'agissait que d'espèces des genres *Dalbergia* et *Pterocarpus*. Mais l'échantillonnage que nous avons mesuré sur-représente des bois choisis en artisanats d'art, par rapport à l'ensemble de la biodiversité. Dans d'autres études publiées sur des échantillonnages différents, les seuls bois ayant des angles de teinte inférieurs à 45° étaient des espèces soit de *Dalbergia*, soit d'autres genres de la famille *Fabaceae*⁴⁰. Les bois tempérés ne descendent guère au dessous de h° de 60° ⁴¹. Il semble donc que des bois de cœur avec une forte composante « rouge-magenta », soient une caractéristique forte des *Dalbergia* (et de quelques genres botaniquement proches). Mais malgré cette spécificité, et l'importance culturelle des palissandres, il n'existait pas, à notre connaissance, d'étude colorimétrique de la diversité de leurs espèces. Le caractère non-invasif des mesures colorimétriques nous a permis de mesurer des échantillons ayant une dimension patrimoniale : la xylothèque du CIRAD à Montpellier, une des plus riches en Europe et dans le monde, avec plus de 8 000 espèces représentées par plus de 33 000 échantillons de bois⁴². Le genre *Dalbergia* est le 3^{ème} genre botanique le plus représenté en nombre d'échantillons dans cette collection, avec 168 plaquettes de bois, couvrant 44 espèces identifiées plus 16 *Dalbergia* non identifiés au niveau spécifique.

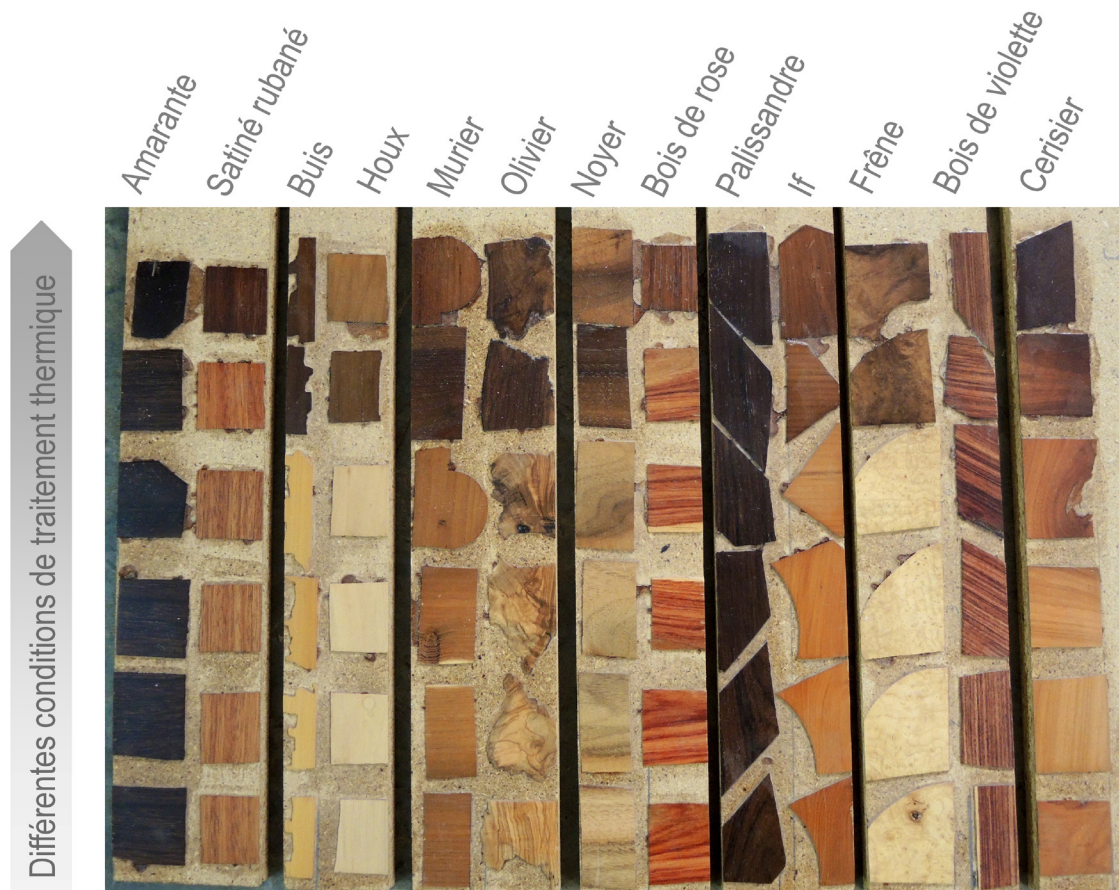
Les mesures colorimétriques sur ce riche échantillonnage⁴³ confirment que les *Dalbergia* ont des bois de cœur très fortement différenciés, avec des clartés L^* en moyenne de 69 dans les aubiers contre 40 dans les duramens. Sur l'ensemble des espèces testées, l'angle de teinte h° des duramens est en moyenne de 48° , et pour plus du quart des espèces h° est inférieur à 45° . Cela place le genre *Dalbergia* dans les bois ayant les plus fortes composantes « rouge-magenta » – quoique ceci ne saute pas toujours aux yeux compte tenu des différences de clarté et de saturation (Fig.12). Les rares valeurs de h° les plus élevées ne dépassent pas 64° , c'est-à-dire que les *Dalbergia* ne se recoupent pas avec les feuillus tempérés, dont les bois tendant le plus vers le « rouge » (souvent des fruitiers) ne descendent guère au-dessous de 60° . La couleur rouge des *Dalbergia* pourrait de surcroît être un peu sous-estimée dans nos mesures sur des échantillons patrimoniaux : la collection de la xylothèque du CIRAD s'étant constituée à partir de 1937⁴⁴, même si ces bois sont conservés à l'abri de la lumière, ils ont vraisemblablement vieilli.

VIEILLISSEMENTS (NATURELS OU ARTIFICIELS) ET COULEUR DES BOIS

L'apparence visuelle du bois, et notamment la couleur, se modifie au cours du temps. Ceci recouvre plusieurs phénomènes différents. Des essais normalisés de vieillissement accéléré, ou *weathering* sont souvent effectués, avec des cycles d'intenses expositions aux ultraviolets, éventuellement avec des aspersion d'eau, mais ces types d'études ne sont pas représentatifs des conditions de conservation du mobilier historique. Plus finement, on peut dissocier d'une part des aspects de vieillissement à la lumière, ou photochimique, (dont les mécanismes d'action peuvent porter prioritairement sur la lignine et/ou sur les extractibles⁴⁵ et leur diversité chimique) et, d'autre part, un vieillissement uniquement dû au passage du temps⁴⁶.

Le vieillissement sur le très-long terme a été étudié par des chercheurs japonais, grâce à leurs collaborations avec le monde de la conservation-restauration du patrimoine bâti. Des échantillons de bois âgés jusqu'à 1600 ans ont ainsi pu être collectés. Pour certains types de temples bouddhistes, on peut retrouver systématiquement la même espèce employée. Échantillonner sur des éléments de bâti, de section importante, permet d'observer les différences « à cœur », c'est-à-dire des modifications dues au vieillissement naturel du bois, en s'éloignant de la surface qui est affectée en plus par le vieillissement photochimique, voire par le *weathering* ou la fumée. L'effet des conditions d'humidité rencontrées est très important aussi⁴⁷. Au cours

des siècles, le bois s'assombrit nettement (clarté L* passant de 80 à près de 60 pour du bois de hinoki récent et vieux de 1600 ans)⁴⁸. Les composantes « jaune » et « rouge » augmentent d'abord, puis re-diminuent, de manière plus tardive pour le rouge. Ceci révèle des mécanismes chimiques mais provient aussi de la forme de l'espace CIELab : au cours de traitements thermiques modérés, la saturation C* décrit un demi-cercle en fonction de la clarté⁴⁹, tandis que l'angle de teinte h° décroît de façon presque linéaire – vers des bois vieillissant plus sombres et plus rouges. Ces travaux ont des répercussions en conservation-restauration du patrimoine puisque les modifications de couleur peuvent être observées en regard de celles de propriétés mécaniques⁵⁰. Il existe de plus un principe d'équivalence temps-température, qui permet d'effectuer des traitements thermiques de vieillissement accéléré⁵¹ et ainsi de reproduire l'apparence de bois ancien dans le cas de restaurations. Cependant, les modifications de couleur ne suivent pas nécessairement les mêmes évolutions selon les espèces⁵².



■ Fig 13

Nuancier de vieillissements accélérés de couleur, obtenu par traitements thermiques en conditions d'atelier, sur 13 essences importantes en marqueterie et ébénisterie fine.

© Backes Bernadette.

Ce dernier point est particulièrement important en atelier de restauration de meubles marquetés. De très nombreuses espèces de bois sont employées, avec différentes apparences, grains, veinages, couleurs et compositions chimiques. Chaque feuille, voire portion, de placage est différente. Et chaque meuble, voire partie de meuble, a vieilli dans des conditions différentes. Dans le cadre de restaurations, des fragments de placages peuvent être manquants. La question se pose, déontologiquement, de savoir s'il faut remplacer ou non ces fragments manquants. En tout cas si il y a remplacement, l'intervention doit être réversible, et visible mais non flagrante. Le choix du morceau de bois doit respecter 4 paramètres : dans la mesure du possible l'essence doit être la même ; la figure du bois doit correspondre ; ainsi que

« l'accroche de lumière » ; et enfin la couleur. Mais comment retrouver la teinte d'un bois ancien ? Et ceci sans traitements chimiques, car leur comportement à long-terme est mal connu. Des traitements thermiques historiques sont documentés en marqueterie/ébénisterie pour obtenir des effets de teinte. Partant de ces textes, nous avons réalisé un « nuancier » de traitements thermiques, sur 13 différentes espèces, en conditions d'atelier⁵³. Ce nuancier (Fig.13) permet de comparer les teintes d'un placage à restaurer, avec des conditions de traitement thermique souhaitables. Il constitue un bon guide, mais il reste difficile de prédire tout le dégradé possible de nuances.

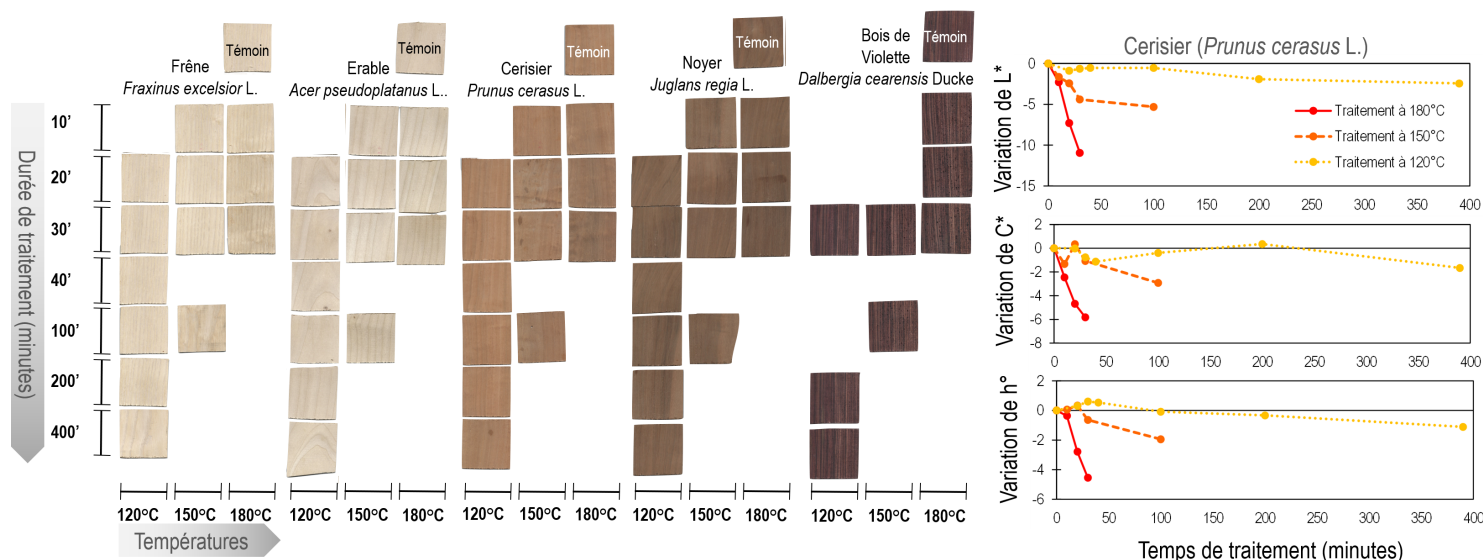


Fig 14 ■

Dégradé de teintes (à gauche) obtenu par traitements thermiques modérés, en fonction du temps et de la température de traitement, sur des placages de 5 essences importantes en marqueterie ; et exemple (sur du cerisier, à droite) des évolutions colorimétriques mesurées.

© Cabrolier Pierre.

Nous avons alors entamé une recherche, avec des traitements thermiques modérés réalisables en atelier, afin de tenter d'obtenir un dégradé de couleurs, pour plusieurs espèces importantes en marqueterie européenne. L'un des objectifs complémentaires était d'essayer de relier les mesures colorimétriques avec la perception d'ébénistes experts. Des échantillons ont été préparés, les plus proches possibles les uns des autres dans une même feuille de placage, de 5 essences de bois clairs à foncés (frêne, érable sycomore, cerisier, noyer européen, et bois de violette). Les traitements, en étuve sèche, ont été faits à 120°C, 150°C et 180°C sur des durées de 10 à 390 minutes, puis les valeurs colorimétriques ont été mesurées (Fig.14).

La clarté diminue pour toutes les essences. La saturation augmente pour les bois clairs et diminue pour les bois plus foncés. L'angle de teinte réagit différemment d'une espèce à l'autre : peu modifié pour le frêne, augmenté pour l'érable, diminué pour le cerisier, à peine diminué pour le noyer, et, pour le bois de violette, diminué ou augmenté selon les conditions de traitement. Les traitements à

120°C ont peu d'effets, ou nécessiteraient des temps plus longs : la différence totale de couleur dépasse rarement 2 (c'est-à-dire perceptible seulement par des experts⁵⁴ et de l'ordre de la variabilité naturelle dans un bois⁵⁵). A 150°C, les différences totales de couleur atteignent de l'ordre de 5, c'est-à-dire que la nuance du bois traité serait évaluée comme une autre couleur que celle du bois natif. Après 30 minutes à 180°C, quoique le temps de traitement reste court, tous les bois traités atteignent des différences de couleur tout à fait significatives. En revanche, la comparaison avec le classement subjectif par une experte ébéniste/restauratrice est plus complexe : le classement des échantillons traités en trois groupes, pour chaque essence, correspond bien à des différences de couleur ΔE significatives entre ces groupes, mais sans que les valeurs colorimétriques individuelles L^* , C^* , et h° ne suivent de tendances générales. De plus, la description verbale des échantillons accorde beaucoup d'importance à « l'accroche de lumière » – un terme sensoriel de métier qui ne semble pas être retranscrit par les mesures colorimétriques effectuées. Et enfin,

le discours révèle une claire **anticipation**, possible seulement par une longue expérience de pratique et le développement de dextérités spécifiques, de ce que pourrait être l'apparence **prévue** des échantillons après les procédés de finitions. Ces derniers points, qualitatifs, rejoignent des travaux quantitatifs d'autres chercheurs⁵⁶, qui mettaient en évidence, d'une part le besoin d'intégrer d'autres mesures que les seules mesures colorimétriques (la brillance ou *gloss* qui peut se mesurer avec un brillancemètre, mais aussi une nouvelle valeur caractéristique de « profondeur de réflexion de la lumière »), d'autre part le phénomène « d'intensification de couleur » (testé par mouillage de la surface) qui anticipe l'effet de finitions de surface (vernis, huiles, etc.) et qui est particulièrement marqué pour les bois sombres⁵⁷. Nous avons donc initié une étude pour quantifier les effets sur la couleur de différentes étapes de finition (placage brut, pré-ponçage, ponçage final, puis cire, ou mâtine alcool, ou bouche-pôrage suivi de cire, ou suivi d'un verni au tampon). Mais au moment de la rédaction du présent article ceci ne peut encore être mentionné qu'à titre de perspective.

CONCLUSION

La colorimétrie est un outil extrêmement utile pour mesurer la couleur d'une façon quantitative tout en étant basée sur les principes de la perception visuelle. Elle permet ainsi de comparer la biodiversité des bois, d'évaluer la variabilité dans une espèce, de comprendre les origines de la coloration, ses évolutions en fonction du temps et des conditions rencontrées, d'établir des

classements ou appariements de pièces de bois pour des usages exigeants, et d'évaluer la perception de la couleur du bois par l'humain dans différents contextes. Dans cet article, nous avons proposé une gamme de couleur pour des bois d'artisanat d'art et discuté des différences observées entre teintures naturellement faites par les arbres, et teintures naturelles historiques sur textiles. La diversité de couleur des bois peut s'interpréter en fonction de l'interaction entre aubier et extractibles, en fonction de l'origine botanique, mais aussi des différents types de vieillissements. Pour appréhender pleinement l'apparence visuelle des bois, on pourrait ajouter à la mesure de couleur « globale », le veinage de couleurs, la brillance, « l'accroche de lumière », la texture et le « grain », la « figure » et les « figurations ». Ces différentes caractéristiques révèlent différentes échelles d'organisation du bois (chimie, microstructure, organisation anatomique, directions du « fil » dans l'arbre) qui se superposent et, souvent, les bois choisis en artisanat d'art en présentent des modalités particulières par rapport à l'ensemble plus général des bois. L'esthétique visuelle des bois pourrait ainsi être liée à des propriétés physiques, et la perception fine des artisans fournir des indications précieuses. Enfin, la diversité et la richesse esthétique des bois, qui passionnent conservateurs, restaurateurs et artisans, semblent aujourd'hui n'être pas pleinement perçues auprès de tous les publics, malheureusement. Comment transmettre cette sensibilité, éduquer à regarder cette beauté ? Il en va d'une meilleure considération des matériaux naturels, et de la sauvegarde d'une part importante de notre patrimoine culturel immatériel.

Notes

1- Article développé à partir d'une communication présentée le 11 octobre 2019 lors de la journée du groupe Bois de la SFIC, à l'Institut National du Patrimoine (Aubervilliers).

2- CIRAD : Le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) est l'organisme français de recherche agronomique et de coopération internationale pour le développement durable des régions tropicales et méditerranéennes.

3- Dans la figure 1, qui représente une marqueterie par placages superposés type « Boule », les espèces employées pour le motif sont, de bas en haut : amourette (*Brosimum guianense*), bois de violette (*Dalbergia cearensis*), cocobolo (*Dalbergia retusa*), if (*Taxus baccata*) avec bois de cœur et aubier, et l'espèce du placage de fond est du grenadille (*Dalbergia melanoxylon*). Le genre botanique *Dalbergia*, dont les bois sont appelés de façon générique « Palissandres », compte environ 250 espèces réparties entre les différents continents tropicaux, et de nombreuses espèces de *Dalbergia* sont très importantes en artisanats culturels.

4- Dans la figure 1, la photo de gauche a été prise en 1998, peu de temps après réalisation de la marqueterie, celle de droite en 2020, après 22 ans essentiellement à l'abri de la lumière. La finition était simplement une application légère d'huile dure. Les deux photos ont été prises en extérieur au même endroit, au soleil d'hiver, mais pas au même mois ni à la même heure, ni sur le même fond, ni avec le même matériel (à gauche : photo argentique scannée, à droite : photo numérique).

5- Regier et al., 2007.

6- Par noms « imagés » de couleurs, on entend par exemple « bleu turquoise », « vert printemps », « gris souris », etc.

7- Cardon, 2013 & 2019 ; Cardon, 2020.

8- Mobilier National, 2020. Dans la figure 2 à droite représentant le N.I.M.E.S, nuancier d'échantillons de laines teintées (par teintures de synthèse, issues de la

pétrochimie) du Mobilier National, l'on voit clairement les différentes distributions de coloris matériellement possibles pour des secteurs de teintées « rouge », « jaune », ou « bleu ».

9- Janin, 1987 ; Janin et al., 2001 ; Mokrzycki & Tatol, 2011.

10- Les principales cellules de l'œil sont les bâtonnets (sensibles à la luminosité), et les cônes qui se répartissent en trois sortes avec des maximums de sensibilité dans le bleu (longueur d'onde 447 nanomètres=nm), jaune-vert (547 nm), rouge-orangé (577 nm). Janin, 1987.

11- Janin, 1987 ; Janin et al., 2001 ; Mokrzycki & Tatol, 2011.

12- Les coordonnées CIE LCh se calculent à partir des coordonnées CIE Lab selon les formules simples suivantes : $C^*=(a^{*2}+b^{*2})^{1/2}$ et $h^{\circ}=\arctan(b^*/a^*)$.

13- Luo, 2002.

14- Hauptmann et al., 2011.

15- Buchelt & Wagenführ, 2011 ; Mokrzycki & Tatol, 2011.

16- Dans la figure 4, les jeux d'échantillons mesurés représentent différentes questions initiales. De gauche à droite : diversité botanique, variabilité dans une espèce, évolution du choix de bois pour un usage artisanal donné au cours des siècles ; questions chimie-propriétés ; comparaison de la diversité entre espèces et de la variabilité dans une seule espèce (autre exemple au centre avec des échantillons d'amourette mouchetée et non mouchetée).

17- Les mesures présentées dans cet article ont été effectuées avec deux spectrocolorimètres, de même marque Datacolor et reproductibles entre eux, l'un portable et l'autre fixe, interfacés pour la collecte des données sur ordinateur. Le diamètre de mesure était de 8,7mm. Les courbes de référence étaient celles de l'observateur standard CIE 1964 (angle d'observation de 10°) avec l'illuminant standard D65. Au moins trois points de mesures ont été pris pour chaque échantillon.

18- Janin, 1987; Janin et al., 2001; Zanetti et al., 2003.

19- Nishino et al., 1998.

- 20- Kitamura, 1987.
- 21- Nishino et al., 1998 ; Meints et al., 2016.
- 22- Meints et al., 2016.
- 23- Il faut signaler une différence notable : les usages historiques tinctoriaux les plus importants en Europe étaient souvent sur fibres animales, de nature protéique, plutôt que sur fibres végétales, de nature (ligno-) cellulosiques.
- 24- Le carnet du teinturier Antoine Janot était signé et daté, il est conservé aux Archives Départementales de l'Hérault sous la forme de trois mémoires sous les cotes C/5569, C/2150 et C/2238, et analysé dans les ouvrages Cardon, 2019 et Cardon & Brémaud, 2020.
- 25- Les *Mémoires de teinture* de Paul Gout étaient anonymes et non datés, conservés dans une collection privée. L'identification de l'auteur et de son contexte a fait l'objet du travail de recherches historiques dans l'ouvrage Cardon, 2013.
- 26- Cardon, 2013 et 2019 ; Cardon & Brémaud, 2020.
- 27- Cardon et al., 2009.
- 28- Moya et al., 2012.
- 29- Nishino et al., 2000.
- 30- Brémaud et al., 2010.
- 31- Brémaud et al., 2009.
- 32- Brémaud, 2012.
- 33- Cardon, 2014.
- 34- Surowiec et al., 2004.
- 35- Brémaud et al., 2011.
- 36- Viaux-Locquin, 1997 ; Georges et al., 2020.
- 37- Saha et al., 2013.
- 38- CITES = Convention sur le Commerce International des Espèces Menacées.
- 39- Basik Treanor, 2015 ; Lake Zhu, 2020.
- 40- Sur un échantillonnage de 74 espèces, résineux et feuillus tempérés (Japon) et tropicaux, les deux seuls bois d'angle de teinte inférieure à 45° étaient des *Dalbergia* (Kitamura, 1987). Sur 97 espèces de Guyane Française (Nishino et al., 1998), seules 2 espèces (*Fabaceae*) avaient des angles de teinte inférieurs à 45°.
- 41- Le « plancher » d'angle de teinte autour de 60° se retrouve pour 24 espèces d'Europe centrale (Meints et al., 2016), et pour des feuillus tempérés de France (notre jeu de données) ou du Japon (Kitamura, 1987).
- 42- Langbour et al., 2019.
- 43- Suarez Diaz et al., 2020.
- 44- Langbour et al., 2019.
- 45- Zahri et al., 2007.
- 46- Yokoyama et al., 2010 ; Matsuo et al., 2011.
- 47- Zeniya et al., 2018.
- 48- Matsuo et al., 2011.
- 49- Karami et al., 2020.
- 50- Yokoyama et al., 2010 ; Zeniya et al., 2018 ; Marcon et al., 2018.
- 51- Matsuo et al., 2011 ; Marcon et al., 2018.
- 52- Matsuo et al., 2013.
- 53- Les conditions des traitements en ateliers dans la figure 13 étaient dans un four de cuisine, entre 150°C et 190°C, avec un bol d'eau pour maintenir un peu d'humidité.
- 54- Mokrzycki & Tatol, 2011.
- 55- Buchelt & Wagenführ, 2011.
- 56- Meints et al., 2016.
- 57- Meints et al., 2016.

Bibliographie sélective

BASIK TREANOR Naomi. *Envol de la consommation chinoise de hongmu: Analyse du commerce chinois de bois de rose et des liens avec les activités illégales dans les forêts tropicales*. Forest Trends, Série de rapports Commerce et financement dans le domaine forestier. 2015.

BRÉMAUD Iris, MINATO Kazuya, THIBAUT Bernard. Mechanical damping of wood as related to species classification : a preliminary survey. In: *6th Plant Biomechanics Conference PBM09, 16-21 November 2009, Cayenne, French Guyana*. p.536-542.

BRÉMAUD Iris, et al. « Physico-chemical indicators of inter-specific variability in vibration damping of wood ». *Annals of Forest Science*, 2010, 67 (7), p.707.

BRÉMAUD Iris, et al. « Effect of extractives on vibrational properties of African Padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub.) ». *Wood Science and Technology*, 2011, 45 (3), p.461-472.

BRÉMAUD Iris. « Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: biological and cultural diversity ». *Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131 (1), p.807- 818.

BUCHELT Beate, WAGENFÜHR André. « Evaluation of colour differences on wood surfaces ». *European Journal of Wood and Wood Products*, 2011, 70 (1-3), p.389-391.

CARDON Dominique, et al. « Purple-dyeing Boraginaceae: the Mediterranean sub-plot ». *Journal of Dye & Medicinal Plants*, 2009, 1, p.2-17.

CARDON Dominique. *Mémoires de teinture-Voyage dans le temps chez un maître des couleurs*. Paris : CNRS Editions, 2013.

CARDON Dominique. *Le monde des teintures naturelles*. Paris : Belin, 2014.

CARDON Dominique. *Des couleurs pour les Lumières. Antoine Janot, teinturier occitan 1700-1778*. Paris : CNRS Editions, 2019.

CARDON Dominique, BREMAUD Iris. *Le Cahier de Couleurs d'Antoine Janot/Workbook, Antoine Janot's Colours*. Paris : CNRS Editions, 2020.

HAUPTMANN Markus, et al. « The potential of color measurements with the CIEDE2000 equation in wood science ». *European Journal of Wood and Wood Products*, 2011, 70 (4), p.415-420.

JANIN Gérard. « Mesure de la couleur du bois. Intérêt forestier et industriel ». *Annales des Sciences Forestières*, 1987, 44 (4), p.455-472.

JANIN Gérard, et al. « Aesthetics appreciation of wood colour and patterns by colorimetry. Part 1. Colorimetry theory for the CIELab system ». *Maderas Ciencia y tecnologia*, 2001, 3 (1-2), p.3-13.

KARAMI Elham, et al. « Effects of mild hygrothermal treatment on the physical and vibrational properties of spruce wood ». *Composite Structures*, 2020, 253 : 112736 .

KITAMURA Yoko. « Measured Colour Values of Important Domestic and Imported Wood ». *Bulletin of the Forest and Forest Products Research Institute*, 1987, (347), p.203-223.

LAKE ZHU Annah. « China's Rosewood boom: A cultural fix to capital overaccumulation ». *Annals of the American Association of Geographers*, 2020, 110 (1), p.277-296.

LANGBOUR Patrick, PARADIS Sébastien, THIBAUT Bernard. « Description of the Cirad wood collection in Montpellier, France, representing eight thousand identified species ». *Bois & Forêts Des Tropiques*, 2019, 339, p.7-16.

LUO M Ronnier. « Development of colour-difference formulae ». *Review of Progress in Coloration and Related Topics*, 2002, 32 (1), p.28-39.

MARCON Bertrand, et al. « Kinetic analysis of poplar wood properties by thermal modification in conventional oven ». *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 2018, 11 (1), p.131-139.

MATSUO Miyuki, et al. « Aging of wood: Analysis of color changes during natural aging and heat treatment ». *Holzforschung*, 2011, 65 (3), p.361-368.

MATSUO Miyuki, UMEMURA Kenji, KAWAI Shuichi. « Kinetic analysis of color changes in keyaki (*Zelkova serrata*) and sugi (*Cryptomeria japonica*) wood during heat treatment ». *Journal of Wood Science*, 2013, 60 (1), p.12-20.

MEINTS Tillmann, et al. « Wood colour of central European wood species: CIELAB characterisation and colour intensification ». *European Journal of Wood and Wood Products*, 2016, 75 (4), p.499-509.

MOKRZYCKI Wojciech, TATOL Maciej. « Colour difference ΔE - A survey ». *Machine Graphic & Vision*, 2011, 20 (4), p.383-411.

MOYA Róger, et al. « Relationship between wood color parameters measured by the CIELab system and extractive and phenol content in *Acacia mangium* and *Vochysia guatemalensis* from fast-growth plantations ». *Molecules*, 2012, 17 (4), p.3639-3652.

NISHINO Yoshihiko, et al. « Colorimetry of wood specimens from French Guiana ». *Journal of Wood Science*, 1998, 44 (1), p.3-8.

NISHINO Yoshihiko, et al. « Relations between the colorimetric values and densities of sapwood ». *Journal of Wood Science*, 2000, 46, p.267-272.

GEORGES Patrick, MAURIN Emmanuel and TROUY-JACQUEMET Marie-Christine. *L'essence du bois-Manuel d'identification macroscopique des bois du mobilier français - XVI^e-XX^e s.* Paris : Editions du Patrimoine, 2020.

REGIER Terry, KAY Paul and KHETARPAL Naveen. « Color naming reflects optimal partitions of color space ». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104 (4), p.1436-1441.

SAHA Sanjib, et al. « Ethnomedicinal, phytochemical, and pharmacological profile of the genus *Dalbergia* L. (Fabaceae) ». *Phytopharmacology*, 2013, 4 (2), p.291-346.

SUAREZ DIAZ Sebastian, et al. Comprendre les spécificités physiques et vibro-mécaniques des Palissandres, bois du genre pantropical menacé *Dalbergia*. In: *9^{ème} journées du GDR 3544 « Sciences du bois », Grenoble/Distanciel, 18-20 novembre 2020.*

SUROWIEC Isabella, NOWIK Witold, TROJANOWICZ Marek. « Identification of "insoluble" red dyewoods by high performance liquid chromatography-photodiode array detection (HPLC-PDA) fingerprinting ». *Journal of Separation Science*, 2004, 27, p.209-216.

VIAUX-LOCQUIN Jacqueline. *Les bois d'ébénisterie dans le mobilier français.* Paris : Léonce Laget, 1997.

YOKOYAMA Misao, et al. Mechanical characteristics of aged Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) wood from Japanese historical buildings. 2010 In: *International Conference of COST Action IE0601 'Interaction between Wood Science and Conservation of Cultural Heritage'*, Oct 2010, Turkey. 6p. hal-00796431 .

ZAHRI S, et al. « UV light impact on ellagitannins and wood surface colour of European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) ». *Applied Surface Science*, 2007, 253, p.4985-4989.

ZANETTI Michela, et al. « Conséquences du vieillissement du bois de chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) sur sa perception esthétique par les utilisateurs ». *Annals of Forest Science*, 2003, 60, p.61-68.

ZENIYA Nanami, et al. « Changes in vibrational properties and colour of spruce wood by hygrothermally accelerated ageing at 95–140 °C and different relative humidity levels ». *SN Applied Sciences*, 2019, 1 (3) <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0009-8>

CITES

<https://cites.org/fra> 2020.

MOBILIER NATIONAL

<http://www.mobiliernational.culture.gouv.fr/fr/nous-connaitre/les-manufactures/atelier-de-teinture-et-nuancier> 2020.