



**HAL**  
open science

## Le bois, un matériau hygrosopique

Delphine Jullien

► **To cite this version:**

Delphine Jullien. Le bois, un matériau hygrosopique. Monumental 2017-2 Musées et monuments historiques, Editions du Patrimoine, 2017, 9782757705353. hal-01769478

**HAL Id: hal-01769478**

**<https://hal.science/hal-01769478>**

Submitted on 18 Apr 2018

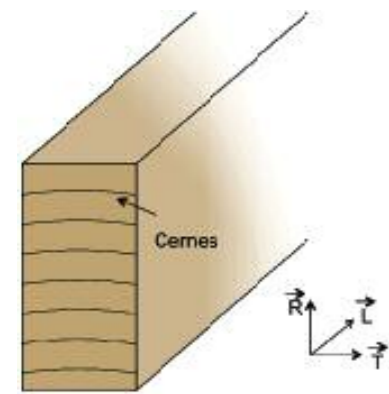
**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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.

# Le bois, un matériau hygroscopique

Delphine Jullien  
Maître de conférences  
Laboratoire de mécanique et Génie civil  
Université de Montpellier / CNRS

Le bois est un matériau hygroscopique : sa teneur en eau dépend de l'humidité relative du milieu dans lequel il baigne. On appelle *taux d'humidité* du bois la masse d'eau de l'échantillon rapportée à sa masse anhydre, exprimée en pourcentage. Ce taux d'humidité peut dépasser 100 % : un échantillon de bois pesant 25 g humide, qui ne pèse plus que 10 g anhydre, présente un taux d'humidité de 1,5, soit 150 % [(25-10)/10]. Dans l'arbre, le bois est gorgé de liquide, son taux d'humidité est élevé. À la suite de l'abattage de l'arbre, le bois va s'équilibrer avec le milieu environnant, notamment par l'intermédiaire de la nouvelle surface créée : on parle de séchage. Une partie de l'eau contenue dans le matériau est dite « libre », elle disparaît lors du séchage, sans modification dimensionnelle. En dessous d'un certain taux d'humidité – appelé point de saturation des fibres (PSF), qui dépend de l'essence de bois concernée et qui est notamment lié à sa composition chimique –, l'eau éliminée par évacuation s'accompagnera d'un retrait dimensionnel. Ce retrait est très fortement anisotrope, il dépend de la direction du matériau considérée. Les trois directions principales sont illustrées dans la figure 1.



1. Directions radiale (R), tangentielle (T) et longitudinale (L) du matériau.

## Un retrait au séchage fortement anisotrope

Il est seulement de l'ordre de 0,1% entre le PSF et l'état anhydre dans la direction longitudinale (L, direction des fibres, axe de l'arbre), alors qu'il peut atteindre 10% dans la direction tangentielle (T, direction tangente aux cernes de croissance) et 5% dans la direction radiale (R). Cela signifie qu'une poutre de 5 m de longueur et de section de 0,1 m (largeur) x 0,2 m (hauteur) débitée dans un état saturé pourrait voir lors de son passage à l'état anhydre ses dimensions diminuer de 5 mm ( $5 \times 0,1/100 = 0,005$  m) en longueur, de 10 mm ( $0,1 \times 10/100 = 0,01$  m) en largeur et de 10 mm ( $0,2 \times 5/100 = 0,01$  m) en hauteur. Le très faible coefficient de retrait dans la direction longitudinale ne doit pas être négligé car il concerne le plus souvent de grandes dimensions d'utilisation.

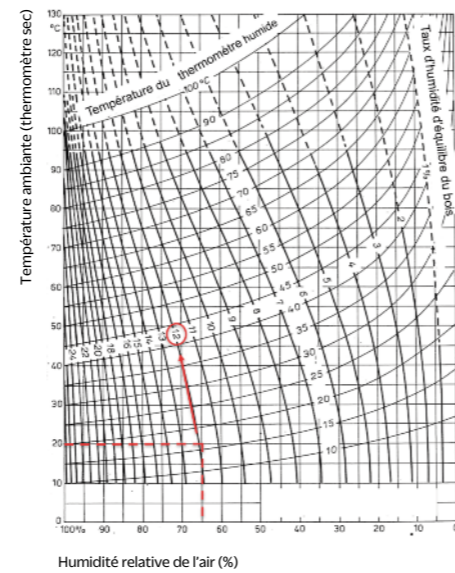
L'anisotropie de ces retraits est l'une des causes des distorsions des pièces de bois lors du séchage. Elle permet notamment d'expliquer pourquoi une rondelle de bois se fissure radialement lors du séchage si elle est épaisse (fig. 3) ou peut prendre une forme de chapeau chinois si elle est fine (fig. 4). En effet, les retraits radial et tangential étant différents l'un de l'autre, la relation entre le rayon et la périphérie du disque n'est pas conservée. Les déformations issues du séchage ne sont pas compatibles avec la géométrie. Par exemple, une rondelle de 0,2 m de rayon présente une circonférence de 1,25 m ( $2 \times \pi \times 0,2$ ). Lors de son passage à l'état anhydre, le rayon (retrait radial) pourrait diminuer de 0,01 m ( $0,2 \times 5/100$ ) et la circonférence (retrait tangential) de 0,125 m ( $1,25 \times 10/100$ ). Si le retrait radial s'exprime complètement, la nouvelle rondelle anhydre aura une circonférence de 1,19 m [ $2 \times \pi \times (0,2 - 0,01)$ ], à comparer avec 1,125 m ( $1,25 - 0,125$ ), qui serait la circonférence de la rondelle anhydre si le retrait tangential s'exprimait totalement. La différence entre ces deux longueurs explique la déformation hors plan de la rondelle fine et la fissuration radiale de la rondelle épaisse, qui n'a pas pu mettre en place une telle déformation.

1. Directions radiale (R), tangentielle (T) et longitudinale (L) du matériau.

Figure 2

Abaque reliant humidité relative de l'air, température sèche, température humide et taux d'humidité d'équilibre du bois (d'après Giordano, 1971). Un bois immergé dans un environnement à 65% d'humidité relative et à 20°C s'équilibre à un taux d'humidité de 12%.

Doc. Guglielmo Giordano.  
© Unione Tipografico – Editrice Torinese, 1971.



## Une influence de l'histoire hygrothermique

On peut estimer l'ordre de grandeur théorique des déformations dues aux variations d'humidité, comme nous venons de le faire, entre l'état saturé et l'état anhydre. Ces déformations, dues aux variations d'humidité, sont appelées déformations hygro-élastiques. Elles sont généralement estimées en prenant comme référence les dimensions à l'état d'équilibre standard, bois équilibré dans un environnement à 65% d'humidité relative (HR) et à 20°C. Guglielmo Giordano [1] a établi des abaques qui relient l'humidité relative et la température du milieu ambiant au taux d'humidité d'équilibre du bois. On peut y lire, par exemple, qu'un bois dans un environnement à 65% HR et 20°C s'équilibre à un taux d'humidité d'environ 12% (fig. 5).

Cependant, un autre facteur à prendre en compte est l'hystérésis de la courbe sorption-désorption : pour une même humidité relative du milieu ambiant, le bois ne va pas tendre vers le même taux d'humidité d'équilibre, selon qu'il est en phase d'adsorption ou de désorption (fig. 6).



3.

Les flèches rouges schématisent le parcours suivi par un échantillon de bois dans un environnement à 65% HR passant à 50% HR en désorption, puis à 75% HR en adsorption : le taux d'humidité d'équilibre à 65% HR est plus élevé lorsqu'il est en phase de désorption que lorsqu'il est en phase d'adsorption. Le taux d'humidité d'équilibre d'un échantillon de bois dépend donc de son *histoire hygrothermique*. Dans des environnements fluctuants, les taux d'humidité d'équilibre du bois sont situés quelque part entre les courbes de sorption et désorption.

## Un matériau plus humide est également moins rigide

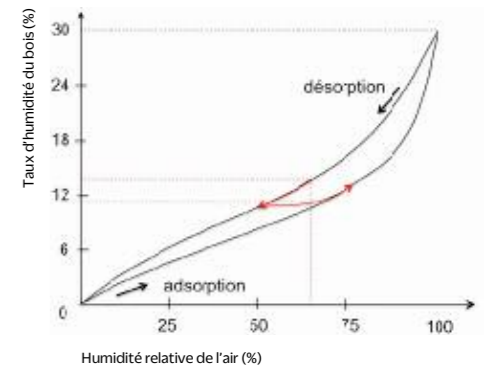
Ces variations de teneur en eau impactent aussi les propriétés mécaniques du matériau. Un même bois aura tendance à être moins rigide lorsque son taux d'humidité est plus élevé, c'est-à-dire qu'il se déforme davantage sous une même charge. Les lois empiriques établies par Daniel Guitard [2] prévoient, par exemple, une diminution de 11% du module de rigidité longitudinal et de 30% des modules de rigidité radial et tangential pour un feuillu standard de densité 0,65 ayant un taux d'humidité passant de 6% à 18% (correspondant à un passage de 30% à 85% HR à 20°C). La figure 6 illustre les variations de modules de rigidité radial, tangential et longitudinal d'un feuillu standard de densité 0,65, en fonction de son taux d'humidité.



4.

CI-dessous  
Figure 5

Mise en évidence de l'hystérésis de la courbe sorption-désorption du bois. Par exemple, un bois immergé dans un environnement à 65% d'humidité relative peut s'équilibrer à un taux d'humidité supérieur à 12% lorsqu'il est en phase de désorption et à un taux inférieur à 12% lorsqu'il est en phase d'adsorption.



CI-dessus

Figure 3  
Rondelle épaisse fissurée radialement à la suite du séchage.

Figure 4  
Rondelle fine prenant la forme d'un chapeau chinois à la suite du séchage.

Figure 6

Influence du taux d'humidité sur les modules de rigidité radial (ER), tangential (ET) et longitudinal (EL) d'un feuillu standard de densité 0,65 d'après les lois empiriques établies par Guitard (1987).

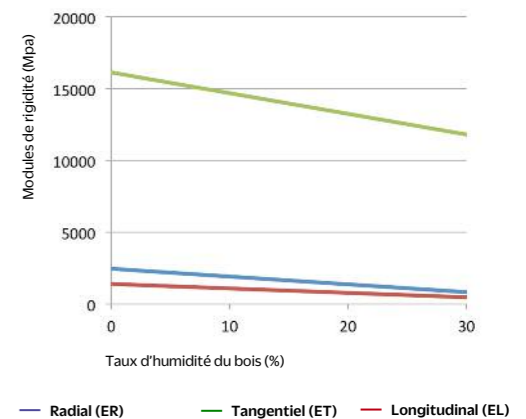




Figure 7

Illustration du couplage mécano-sorptif: les variations hygrothermiques, appliquées à une structure sollicitée mécaniquement, mènent à une flèche nettement plus forte que la flèche observée dans le cas d'une structure sollicitée à un taux d'humidité constant.

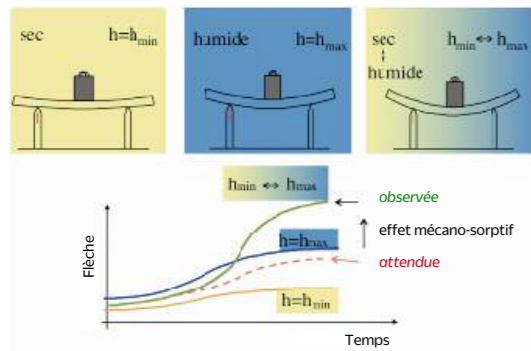


Figure 8

Mise en évidence schématique des effets du gonflement empêché et du retrait sous compression, rencontrés dans les panneaux de bois peints soumis à des variations de teneur en eau, d'après Hoadley (1995).

Planche A: retraits et gonflements empêchés.  
Planche B: gonflements empêchés.  
Planche C: retraits et gonflements libres.

Doc. Delphine Jullien.  
© K. Dardes and A. Rothe Editors, 1995.

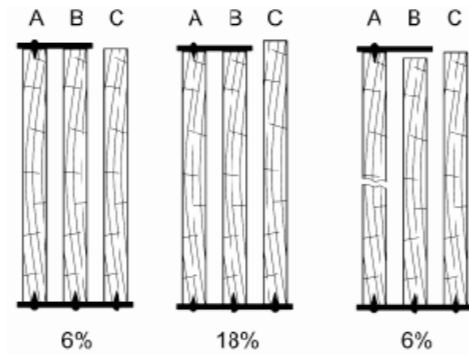


Figure 9

Exemple de renforts contraignant les panneaux de bois peints: les 3 montants horizontaux (orientation longitudinale) limitent les gonflements transverses des planches verticales.

Figure 10

Exemple de cadre pouvant contraindre le panneau de bois peint: un cadre trop ajusté en bas et en haut limiterait les gonflements transverses des planches horizontales.

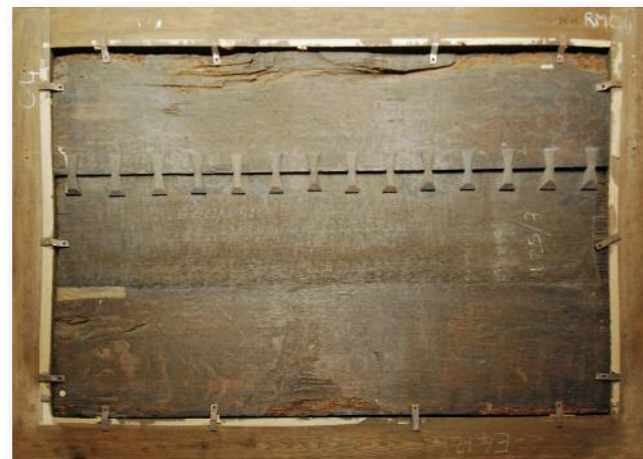
Figure 11

Exemple de renforts contraignant les panneaux de bois peints: les 7 montants horizontaux (orientation longitudinale) limitent les gonflements transverses des planches verticales.

Photographies et documents  
Delphine Jullien,  
sauf mentions contraires.



11.



10.

### Couplage mécano-sorptif

Mais pour « compliquer » l'affaire, il existe également un couplage entre le chargement mécanique et les variations d'humidité (fig. 7). Prenons une poutre en bois (feuillu standard de densité 0,65) positionnée sur deux appuis qui fléchirait d'une flèche  $f$  sous une charge placée en son milieu. Un bois à un taux d'humidité de 18% présentera une flèche de 11% plus forte qu'un bois équilibré à 6%, soit une flèche de  $1,11 \times f$ .

Si cette poutre sous charge voit son taux d'humidité varier à plusieurs reprises entre 6 et 18%, on pourrait s'attendre à une flèche comprise entre ces deux valeurs ( $f$  et  $1,11 \times f$ ). Toutefois, on observe que la flèche est largement plus élevée. Cette flèche augmente à chaque variation du taux d'humidité, que cette variation soit positive ou négative. Ce phénomène est appelé *couplage mécano-sorptif*.

### Conséquences du couplage mécano-sorptif sur les panneaux de bois peints

Ce phénomène de couplage mécano-sorptif explique une partie des problèmes rencontrés dans la conservation des panneaux peints du patrimoine. R. Bruce Hoadley [3] a illustré les conséquences typiques de ce couplage, de façon schématique (fig. 8). Il a considéré trois planches débitées sur dosse A, B et C, équilibrées à un faible taux d'humidité de 6%. Le schéma représente les sections transverses de ces planches. Tandis que les retraits et le gonflement de la planche C peuvent se faire librement, ceux de la planche A sont totalement empêchés, quant à la planche B, le retrait est libre mais le gonflement empêché. Ces différentes situations visent à représenter les *conditions limites en déplacement* que l'on peut rencontrer dans les panneaux peints du patrimoine – actions exercées par le cadre ou par les renforts de type parquetage (fig. 8).

Ces trois planches sont alors équilibrées à un taux d'humidité plus élevé, de 18%. La planche C présente un gonflement libre, tandis que les gonflements des planches A et B sont empêchés. Ces gonflements empêchés entraînent un chargement mécanique de ces planches; elles sont en compression. Ce chargement peut aisément dépasser la limite élastique en compression transverse du matériau, qui est typiquement de l'ordre de 0,5 à 1%. Lors du retour au faible taux d'humidité d'origine, de 6%, la planche C retrouve sa dimension de départ. Cette planche n'a pas subi de chargement mécanique car les déformations se sont exprimées librement. La planche B présente un retrait plus important que celui de la planche C, illustrant le phénomène de couplage mécano-sorptif: la variation à la baisse de son taux d'humidité a entraîné une plus grande déformation, car elle a eu lieu sous chargement mécanique.

La rupture tangentielle de la planche A s'explique de la manière suivante: un retrait similaire à celui de la planche B est souhaité, mais empêché par les conditions de blocage de la planche A, cette dernière se retrouve donc en situation de traction transverse, qui peut mener à la rupture du matériau si la déformation excède 1,5%.

La situation de la planche A pourrait correspondre à l'effet d'un renfort longitudinal au dos d'un panneau: d'une part, les coefficients de retrait et de gonflement dans la direction longitudinale étant 100 fois plus faibles que dans la direction tangentielle, les variations dimensionnelles du renfort sont négligeables; d'autre part, le module longitudinal du matériau étant environ 10 fois plus élevé que le module tangentiel, ce renfort empêche les retraits et gonflements tangentiels. Les figures 9, 10 et 11 illustrent des exemples de renforts et de cadre pouvant contraindre les planches constitutives des panneaux de bois peints.

### Conséquences d'un chargement hydrique asymétrique

De plus, le chargement hydrique asymétrique d'une structure en bois, situation typique des panneaux peints sur une seule face, mène à des courbures non souhaitées. En effet, la face peinte a tendance à diminuer la vitesse des transferts d'eau. Lors d'une baisse d'humidité relative du milieu ambiant, le revers du panneau va sécher plus rapidement que la face peinte, entraînant un gradient du taux d'humidité dans l'épaisseur du panneau, et donc un gradient de déformation, qui provoque la courbure du panneau. À mesure que le taux d'humidité se stabilisera dans le panneau, la courbure diminuera. Néanmoins, le phénomène de couplage mécano-sorptif décrit auparavant résulte en une courbure permanente très fréquemment observée dans les panneaux peints.

Les propriétés de la couche picturale peuvent également évoluer au cours du temps. Notamment, l'apparition de fissures dans cette couche augmente sa perméabilité et facilite grandement l'accès à l'humidité, dans les zones proches de ces fissures. La couche picturale, généralement constituée de différentes couches de composants, participe aussi au renfort mécanique de la structure, comme elle contribue aux effets mécano-sorptifs constatés sur le bois du panneau. La courbure permanente des panneaux peints du patrimoine est une question d'actualité, qui a fait l'objet d'une récente communication à un colloque international [4]. Restaurateurs, conservateurs et scientifiques s'unissent pour mieux appréhender cette problématique complexe.

D. J.

### Bibliographie

[1] **Guglielmo Giordano**, *Tecnologia del legno*. 1. *La materia prima*, Turin, Unione Tipografica – Editrice Torinese, 1971.

[2] **Daniel Guitard**, *Mécanique du matériau bois et composites*, Toulouse, Cépaduès Éditions, « Nabra », 1987.

[3] **R. Bruce Hoadley**, « Chemical and physical properties of wood », dans Kathleen Dardes et Andrea Rothe (dir.), *The Structural Conservation of Panel Paintings*, actes de colloque, Los Angeles, J. Paul Getty Museum, 24-28 avril 1995, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 1998, p. 2-20.

[4] **Joseph Gril, Delphine Jullien et David Hunt**, « Compression set and cupping of painted wooden panels », *Analysis and Characterisation of Wooden Cultural Heritage by Scientific Engineering Methods*, avril 2016, Halle (Saale), Allemagne, actes de colloque, 2016.