

## ***Caractéristiques du bois ancien et technique traditionnelle japonaise de revêtement pour la protection du bois***

**Eiichi Obataya, Graduate School of Life and Environmental Sciences Université de Tsubuka - Ibaraki 305-8572, Japon**

*Présentation des expériences dirigées par Kohara dans les années 50 sur le bois ancien. Les résultats prouvent que la rigidité, la résistance axiale et la stabilité dimensionnelle s'améliorent quelque peu avec les siècles, tandis que la résistance en cisaillement et la flexibilité se dégradent de manière significative. Ces changements sont à mettre sur le compte des transformations chimiques intervenues dans les constituants du bois. On étudiera les effets du vieillissement obtenus par chauffage. Des différences quantitatives et qualitatives entre les effets produits par traitement thermique à sec et à la vapeur indiquent que si l'on veut obtenir un vieillissement artificiel, il faut contrôler prudemment l'humidité. En outre, les changements réversibles de l'hygroscopicité du bois chauffé sont expliqués par le recuit, c'est-à-dire le vieillissement par des moyens physiques des polymères du bois. Enfin, on présentera une laque japonaise traditionnelle (l'urushi) en indiquant ses qualités prometteuses en tant que revêtement pour les instruments de musique.*

### **I Introduction**

Au Japon, le bois a toujours été le premier matériau de construction. Même à notre époque de béton, 45% des maisons ordinaires sont construites à base de bois. La plus ancienne construction en bois est le temple Horyu-ji, érigé en 607 (figure 1). Son apparence est demeurée intacte grâce à sa structure en bois depuis plus de 1400 ans. Cela tend à prouver que le bois reste incroyablement résistant lorsqu'on s'en occupe convenablement et qu'on le protège du mauvais temps et des attaques biologiques.



Figure 1. Les cinq étages de la pagode du temple Horyu-ji (Nara, Japon).

Les Japonais considèrent que la couleur sombre du bois n'est pas synonyme de vieillesse, mais qualifie un objet vénérable qui leur rappelle sa longue histoire. Le bois ancien est également vénéré par les musiciens et les artisans. Il est admis que le vieillissement améliore la raideur et la stabilité du bois, et donc, qu'on peut faire des instruments de qualité avec du bois vieilli. Dans ce sens, le vieillissement n'est pas une sénescence négative, mais un traitement positif pour accroître la valeur du bois. Quoi qu'il en soit, les caractéristiques du bois vieilli doivent être bien comprises. La diminution de la résistance (en cisaillement) et de la flexibilité du bois ancien doivent être prise en compte pour un entretien judicieux des vieilles constructions en bois. En même temps, l'augmentation de la raideur et de la stabilité du bois ancien suggère qu'on peut utiliser le vieillissement artificiel pour améliorer les qualités futures du bois. Dans cet exposé, les effets du vieillissement et du traitement thermique seront détaillés pour qu'on comprenne bien quels sont leurs avantages et leurs inconvénients. En outre, nous présenterons la durabilité incroyable d'un revêtement japonais traditionnel (l'urushi) pour montrer ses qualités dans la protection des instruments de musique en bois.

## **II Caractéristiques du vieux bois**

### ***II.1 Les résultats de Kohara***

Dans les années 50, Jiro Kohara a testé les qualités chimiques et mécaniques de plusieurs centaines d'échantillons de bois ancien ([1] – [6]). Jusque-là, de nombreuses études ont été menées sur le vieillissement du bois ; cependant, on considère que les résultats de Kohara sont les plus crédibles, car il a prélevé les échantillons de son étude sur d'anciens temples. Il est bon de noter que le bois de charpente destiné aux constructions religieuses était la plupart du temps prélevé dans des forêts spéciales, soigneusement séché et strictement classé. De plus, de telles constructions religieuses ont été soigneusement protégées des guerres, du feu, des attaques météorologiques et biologiques par les croyants. En conséquence, les échantillons utilisés par Kohara présentent un minimum de défauts (fibre irrégulière, taches etc.).

La figure 2a montre les effets du vieillissement sur les composants chimiques du bois de cyprès (*Chamaecyparis obtusa*). Le bois de cyprès est très prisé au Japon pour les bâtiments et les sculptures religieux. Au fil du temps, la teneur en holocellulose et  $\alpha$ -cellulose décroît dans le bois, tandis que s'accroissent les alcalis solubles et que la quantité apparente de lignine reste pratiquement la même. Ces résultats indiquent qu'une partie des polysaccharides se dégradent en substances alcalis solubles, alors que la dégradation de la lignine est relativement lente.

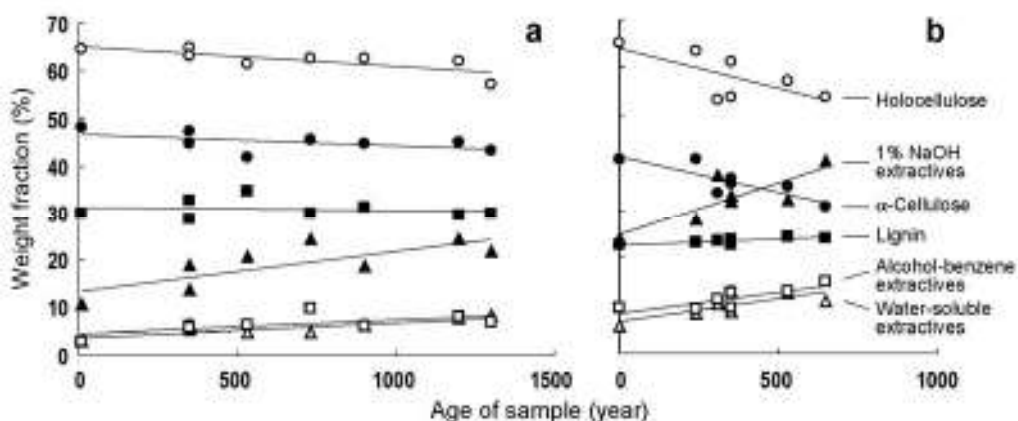


Figure 2. Les effets du vieillissement sur les composants chimiques des bois de cyprès (a) et de zelkova (b) ([4], [5])

On observe la même tendance pour ce qui est du bois de zelkova (*Zelkova serrata*), comme le montre la figure 2b, mais la dégradation chimique est visiblement plus rapide dans le zelkova que dans le cyprès. Aussi le choix du cyprès par les anciens Japonais pour construire leurs bâtiments est-il des plus logiques étant donné sa stabilité chimique. Le vieillissement prolongé produit en outre des changements dans la cellulose. La figure 3 montre les variations de la fraction cristalline pendant le vieillissement. La cellulose cristalline augmente légèrement durant les 300 premières années, puis décroît graduellement. Sans doute la cristallisation et la décomposition de la cellulose produisent-elles un obscur pic aux alentours de 300 ans.

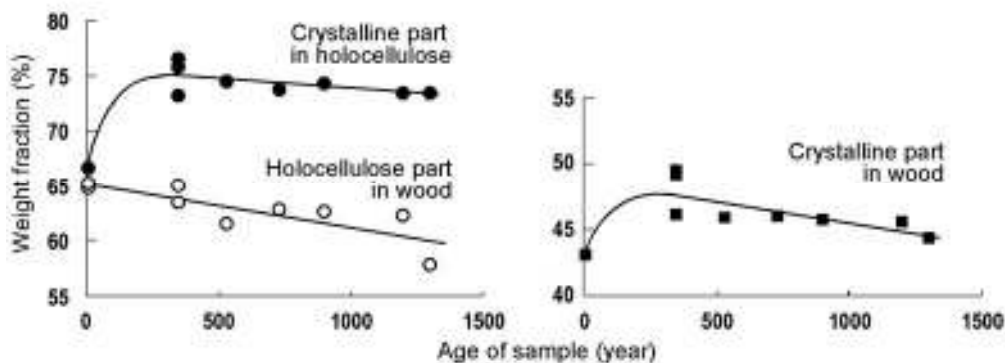


Figure 3. Les changements dans la fraction cristalline au cours du vieillissement [6].

La figure 4 montre le coefficient d'élasticité en flexion ( $E$ ), la contrainte de flexion ( $\sigma_b$ ), la contrainte de compression longitudinale ( $\sigma_c$ ) et la dureté ( $H$ ) du bois de cyprès pendant son vieillissement. Bien que la disparité des points rende difficile l'élaboration d'une courbe lissée, il semble que le vieux bois soit plus rigide, plus solide et plus dur que le bois jeune. La modification la plus significative réside dans la contrainte de compression du bois au long de la fibre : elle augmente de 50% au cours des 300 premières années et par la suite demeure pratiquement constante.

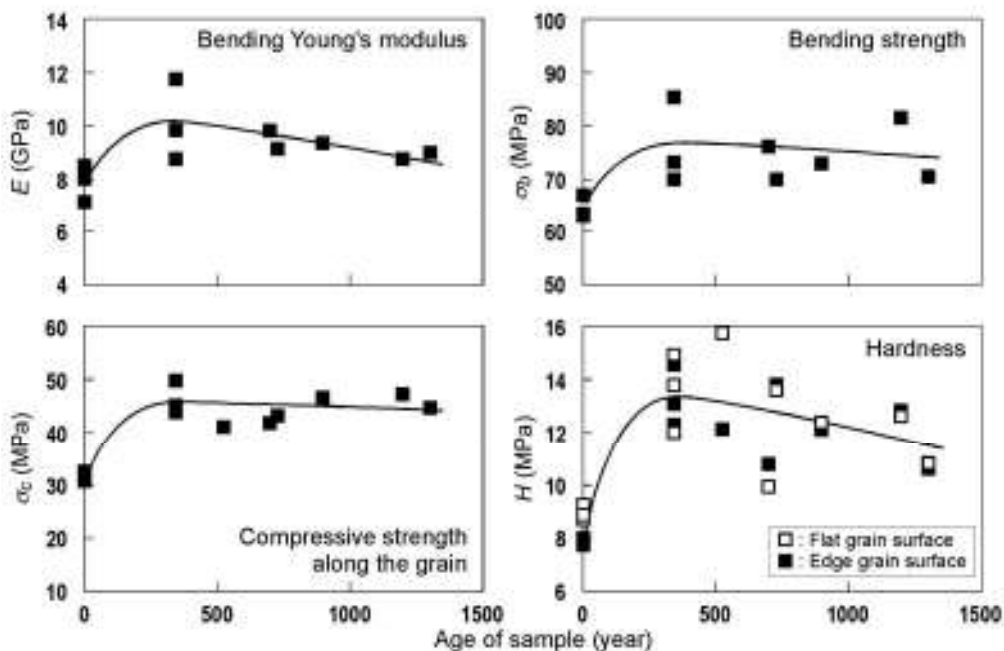


Figure 4. Le coefficient d'élasticité en flexion ( $E$ ), la contrainte de flexion ( $\sigma_b$ ), la contrainte de compression ( $\sigma_c$ ) et la dureté ( $H$ ) du bois de cyprès vieilli [3]. Chaque schéma indique la moyenne de vingt exemples.

Les propriétés mécaniques du bois dépendent généralement de son degré d'humidité. Dans le cas présent, le degré d'humidité du bois varie de 13,9% (bois jeune) à 10,7% (bois de 1300 ans d'âge). C'est pourquoi, Kohara a revu les courbes de la figure 4 en tenant compte de l'humidité du bois. La figure 5 montre l'évolution de la contrainte de compression normalisée par rapport à l'hygrométrie. La contrainte de compression augmente au cours des 300 premières années et tend à décroître par la suite. Il est incroyable que cette contrainte soit plus importante pour du bois ancien (1300 ans) que pour du jeune. Cela prouve que le bois peut être utilisé d'une manière particulièrement durable lorsqu'il est entretenu convenablement.

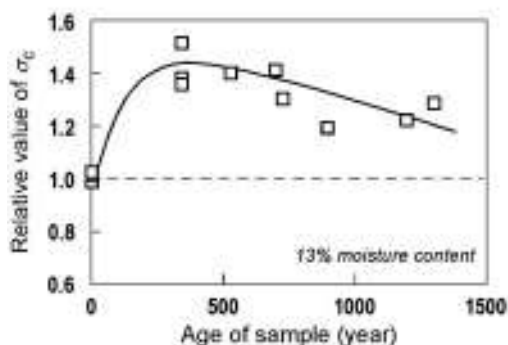


Figure 5. Les effets du vieillissement sur la contrainte de compression ( $\sigma_c$ ) ramenée au même degré d'humidité [3].

Il est intéressant de remarquer que l'allure de la courbe de la figure 5 est semblable à celle de la figure 3. C'est la preuve indirecte que la cristallisation de la cellulose est responsable de l'amélioration des propriétés mécaniques au cours de quelques centaines d'années. La figure 6 montre la microstructure du bois. La paroi de la cellule du bois est un composite renforcé dans lequel sont enchâssées les fibres de cellulose cristalline dans une « matrice » amorphe des hémicelluloses et de la lignine. Une partie de la cellulose est désordonnée (amorphe), mais regroupée le long de l'axe de la fibre et se cristallise aussitôt sous l'action de la chaleur. La fibre cristalline joue un rôle important dans les propriétés mécaniques du bois car sa raideur est plus grande que celle de la matrice : le coefficient d'élasticité de la cellulose cristalline est d'environ 130 Gpa [7]), alors que celui de la substance matrice ne dépasse pas 8 Gpa ([8], [9]). Il s'ensuit que la cristallisation de la cellulose désordonnée provoque une plus grande rigidité du bois, sauf si la cohésion fibre-matrice est affaiblie.

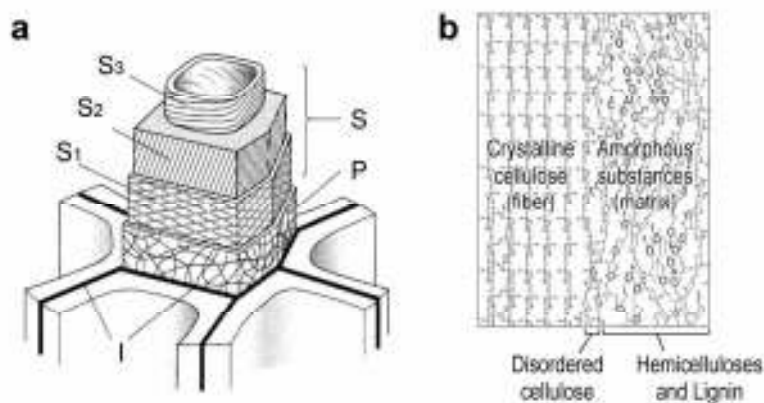


Figure 6. La structure cellulaire du bois (a) et la structure PFR de la paroi cellulaire (b).

D'autre part, les effets du vieillissement ne sont pas toujours avantageux dans le domaine des performances pratiques du bois. La figure 7 montre l'énergie absorbée dans l'impact de la flexion ( $AE$ ), la force de cisaillement ( $\sigma_s$ ) et la résistance au claquage ( $CR$ ) du bois ancien. Toutes ces qualités se dégradent en vieillissant. Cela indique que le bois se fragilise au cours des ans. On peut attribuer cette fragilité du bois ancien à la dégradation chimique des substances de la matrice amorphe. Parmi celles-ci, les hémicelluloses ont une importance toute particulière en ce qui concerne l'étroite cohésion entre la fibre et la matrice. On sait que la cohésion fibre-matrice est nécessaire à la rigidité, à la flexibilité et à la résistance du composite, alors que la raideur et la contrainte du composite (le long de l'axe de la fibre) sont déterminées par le renforcement des fibres. Donc, il est naturel que le bois se fragilise dès lors que la cohésion fibre-matrice est affaiblie par la dégradation et la disparition des hémicelluloses. On observe un phénomène semblable lorsque le bois est traité à la vapeur à de hautes températures, expérience au cours de laquelle l'hydrolyse des hémicelluloses est accélérée en présence d'humidité.

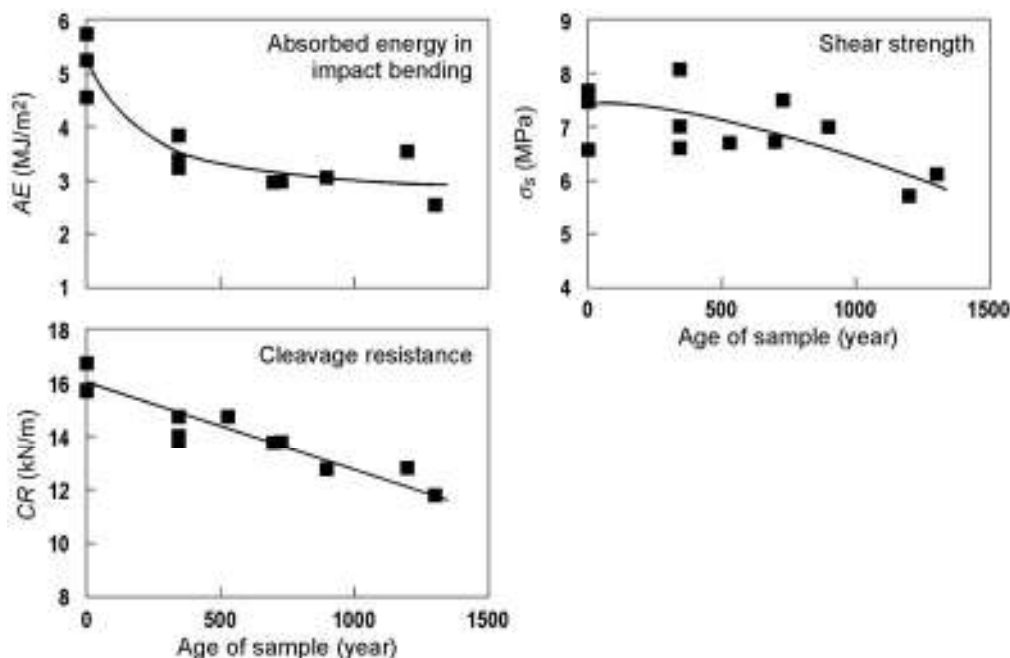


Figure 7. L'énergie absorbée dans la flexion ( $AE$ ), la force de cisaillement ( $\sigma_s$ ) et la résistance à la segmentation ( $CR$ ) du bois de cyprès mise en regard de l'âge [3].

Dans la figure 8, les valeurs  $AE$  du bois ancien sont représentées en fonction de l'humidité. Le bois jeune montre des valeurs d' $AE$  plus élevées dans le cas d'une humidité élevée à cause de la sorption et de l'assouplissement des constituants de la matrice qui augmentent la flexibilité du bois. Au contraire la valeur  $AE$  du bois ancien décroît avec la sorption. Cela suggère que le bois ancien devrait être traité avec soin, plus spécialement dans des conditions de forte humidité. En outre, c'est là une preuve indirecte que la fragilité du bois ancien vient de la dégradation des constituants sensibles à l'eau comme les hémicelluloses.

Le principal avantage du vieillissement du bois est sa stabilisation. La figure 9 montre les variations du retrait tangentiel maximum du cyprès en fonction de son vieillissement. Les plus petits retraits tangentiels sont observés pour des échantillons de bois ancien, ce qui traduit sa stabilité dimensionnelle aux variations d'humidité. Une telle stabilisation dimensionnelle due au vieillissement s'explique par la décomposition et la perte d'hygroscopicité des hémicelluloses aussi bien que par la cristallisation de la cellulose pendant le vieillissement. La stabilité améliorée du bois ancien pourrait être favorable aux instruments de musique dont les performances seraient stables quelles que soient les variations d'humidité.

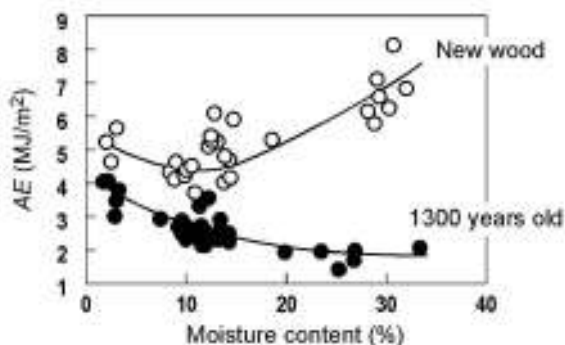


Figure 8. Énergie absorbée (AE) en fonction de l'humidité.

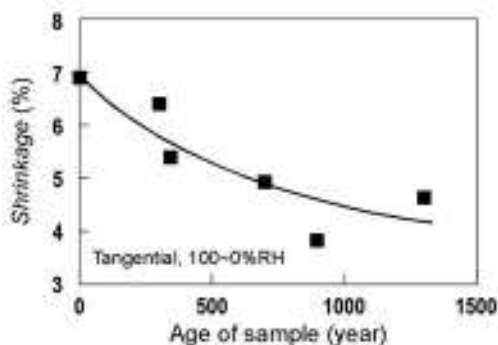


Figure 9. L'effet du vieillissement sur le retrait tangentiel du bois de cyprès [2]

## II.2 Retour sur les données de Kohara

Kohara n'a pas discuté la variation de masse volumique de ses échantillons de bois. À strictement parler, cependant, elle doit être prise en compte lorsqu'il est question de changements de structure dans la paroi de la cellule.

Le coefficient d'élasticité longitudinal du bois ( $E_L$ ) est relié à celui de la paroi de la cellule ( $E_w$ ) selon l'équation suivante :

$$\frac{E_L}{\rho} = \frac{E_w}{\rho_w}$$

Où  $\rho$  et  $\rho_w$  représentent respectivement la masse volumique du bois et celle de la paroi cellulaire. Puisque  $\rho_w$  est presque constant (autour de  $1400 \text{ kg/m}^3$ ), le coefficient d'élasticité spécifique  $E_L/\rho$  peut être une indication directe de la raideur de la paroi cellulaire elle-même.

Le terme  $E_L/\rho$  a une autre importance quant à l'évaluation qualitative des tables d'harmonie en bois. Puisque  $E_L$  du bois est proportionnel à son coefficient d'élasticité dynamique ( $E'_L$ ) [10],  $E_L/\rho$  peut être relié à la célérité longitudinale ( $V_L$ ) :

$$V_L \approx \sqrt{\frac{E_L}{\rho}}$$

De grandes valeurs de célérité correspondent à un amortissement mécanique faible quel que soit le bois utilisé [11] parce qu'ils dépendent tous deux de l'angle des microfibrilles de la paroi cellulaire : plus cet angle est petit, plus  $V_L$  sera grand et plus

l'amortissement sera faible [12]. Puis, plus  $V_L$  sera grand, plus les performances acoustiques du bois seront importantes. En fait les tables d'harmonie sont généralement fabriquées avec du bois ayant un fort  $V_L$ , tel que le sapin Sitka ([10], [13], [14]). Donc, un fort  $V_L$  est l'exigence minimale requise pour des tables d'harmonie de qualité.

L'anisotropie mécanique du bois est aussi une qualité importante. Du fait de l'orientation des microfibrilles de cellulose, la valeur du module d'Young  $E$  du bois est bien supérieure à son module de cisaillement ( $G$ ). C'est pourquoi, le bois présente des valeurs  $E/G$  supérieures (environ 30) aux matériaux isotropes (2 ou 3). En outre, l'amortissement du bois en cisaillement est de 2 à 4 fois supérieure à ce qu'il est en longitudinal [12]. En conséquence, le bois présentant une valeur  $E/G$  grande montre un amortissement important à de hautes fréquences et produit un son « de bois » plus doux ([14] — [16])

Ici, il convient de reprendre les données de Kohara afin d'évaluer la qualité acoustique du bois ancien. La valeur  $V_L$  a été calculée à partir du coefficient d'élasticité du bois et de la masse volumique du matériau séché. Malheureusement, les valeurs  $G$  ne sont pas accessibles dans les articles de Kohara ; il s'ensuit qu'on a utilisé la contrainte de cisaillement au lieu du module  $G$  pour obtenir le facteur d'anisotropie ( $E/\sigma_s$ ). Dans la figure 10,  $V_L$  et  $E/\sigma_s$  du bois sont représentés en fonction de l'âge de l'échantillon. La valeur  $V_L$  augmente au cours des 300 premières années et tend à diminuer par la suite. Même si le caractère éparpillé des données  $E/\sigma_s$  ne permet pas de tracer une courbe modèle, il apparaît que les valeurs  $E/\sigma_s$  du bois ancien sont supérieures à celles du bois jeune. Ces résultats suggèrent que la qualité acoustique du bois peut être améliorée par un vieillissement de 300 ans.

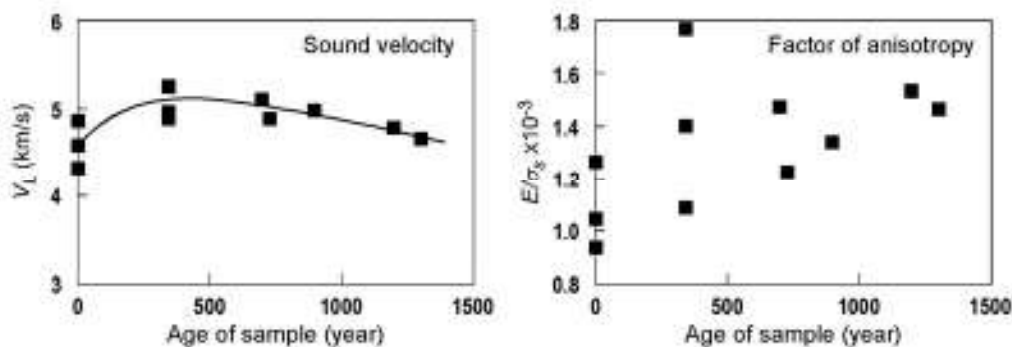


Figure 10. La vitesse sonore le long de la fibre ( $V_L$ ) et le facteur d'anisotropie ( $E/\sigma_s$ ) du bois de cyprès en fonction du vieillissement. Recalculés à partir des données de Kohara (3)

Jusqu'ici, diverses méthodes de modifications chimiques ont été proposées pour améliorer la qualité acoustique du bois. Elles sont vraiment efficaces pour modifier les valeurs de  $E$ ,  $V_L$  et d'autres facteurs entrant en compte dans les caractéristiques dépendant du temps des tables d'harmonie. Cependant un calcul théorique a établi qu'un traitement chimique a du mal à être efficace à la fois sur le plan acoustique et sur l'anisotropie du bois [12]. En ce sens, il est préférable d'attendre 300 ans plutôt que de traiter le bois avec des produits chimiques pour obtenir une meilleure table d'harmonie.



### III Les effets du chauffage

#### **III.1 Est-il possible de reproduire un bois ancien par traitement thermique?**

On considère parfois le chauffage comme un « vieillissement accéléré » parce que les réactions chimiques sont généralement accélérées par l'élévation de la température. En réalité, le bois traité par la chaleur est très semblable au bois ancien du fait de sa couleur plus sombre, de sa nature fragile et de sa stabilité aux variations d'humidité. Cependant, il est encore difficile de parvenir à un réel vieillissement accéléré, c'est-à-dire à reproduire parfaitement le bois ancien par chauffage rapide.

Il est à noter que le bois vieillit dans des conditions variables où à la fois la température et l'humidité relative (*RH*) changent de façon irrégulière et importante (de 10° à 35° et de 20 à 90% *RH* au Japon). Malheureusement, il est difficile, dans la pratique, de reproduire de tels changements environnementaux à des températures élevées, car la capacité hygroscopique du bois dépend de la température aussi bien que du *RH*. Une possibilité consiste à chauffer le bois en l'humidifiant et en le séchant alternativement, mais jusque-là seuls quelques essais ont eu lieu. En général, la résistance du bois se trouve réduite par le traitement à chaud ou par séchage dans des étuves à haute température principalement à cause de la décomposition des hémicelluloses ([17] – [20]). La raideur du bois est elle aussi réduite par un chauffage prolongé, même si on note souvent une légère augmentation au début du chauffage. Une telle augmentation de la raideur est due à une diminution de la capacité hygroscopique ([20], [21]), à une cristallisation de la cellulose [22] et/ou aux changements chimiques des constituants moins importants tels que les extractibles du bois de cœur [20]. Tous ces changements sont qualitativement comparables à ceux qui résultent du vieillissement. Cependant, d'après Kubojima et al. [22], l'augmentation maximale du module d'Young spécifique ( $E/\rho$ ) est de 5%, et d'environ 10% pour le module de cisaillement spécifique ( $G/\rho$ ). Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, une valeur importante de  $E/G$  est caractéristique de la qualité acoustique des tables d'harmonie en bois. Donc, le chauffage reste un traitement risqué pour ce qui est des instruments de musique, car il peut dégrader la qualité sonore des tables d'harmonie en modifiant de façon significative la valeur  $E/G$  du bois.

Évidemment, je ne nie pas qu'il soit possible d'utiliser le chauffage, car c'est une méthode facile et efficace pour réduire la capacité hygroscopique du bois. La capacité hygroscopique réduite donne une stabilité plus grande aux variations d'humidité. En outre, diverses propriétés dépendant de l'humidification du bois se trouvent indirectement stabilisées grâce à la réduction de la capacité hygroscopique. Telles sont les raisons pour lesquelles de nombreux chercheurs ont travaillé sur les effets de vieillissement par chauffage sur la capacité hygroscopique du bois. Dans ce chapitre, les caractéristiques de sorption du bois chauffé sont exposées en détail afin de montrer l'importance de l'humidification pour obtenir une stabilisation réelle par chauffage. En outre, on présentera brièvement la récente utilisation du bois chauffé pour imiter les statues anciennes en bois.

### III.2 Les différents effets du chauffage à sec et à la vapeur sur la capacité hygroscopique du bois [23].

Lorsque le bois est chauffé, une partie de ses composants sont dépolymérisés et perdus. Donc, la perte de masse ( $W_L$ ) due au chauffage indique le degré de destruction thermique mise en jeu. La figure 11 représente la durée nécessaire du chauffage en fonction de la température permettant d'atteindre 10% de perte de masse de l'échantillon de bois ([23] – [25]).

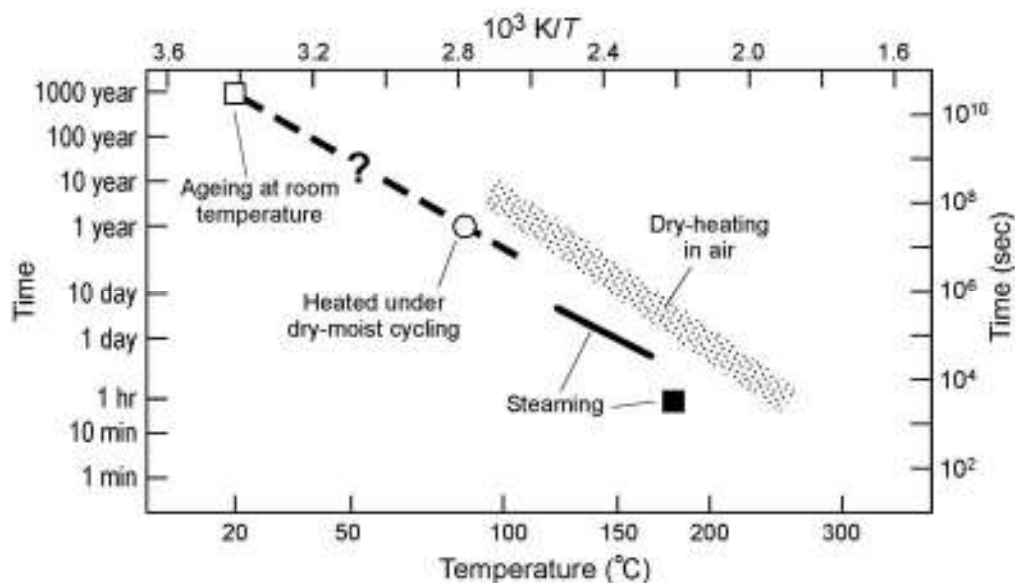


Figure 11. Logarithme du temps de chauffage en regard de la température pour atteindre 10% de  $W_L$  du bois. *Hachures*, La zone possible pour le chauffage à sec (par exemple 24) ; *carré clair*, vieillissement à la température ambiante (estimé d'après les changements des divers constituants du bois) (4) ; *carré plein et ligne continue*, utilisation de la vapeur ([23], [24]) ; *cercle clair*, chauffage à 85°C avec alternance d'humidification et de séchage (80 — 30% RH) [25].

Dans le « chauffage à sec », le bois est d'abord séché puis chauffé en l'absence de toute humidité, alors que dans le « traitement à la vapeur », le bois est chauffé dans une vapeur saturée d'eau. Au-dessus de 100°C, on obtient toujours avec la vapeur une dégradation plus rapide qu'à sec du fait de l'hydrolyse accélérée de la cellulose et des hémicelluloses en présence d'humidité ([18], [24], [26], [27]). D'autre part, le manque de données à des températures plus basses (< 100°C), au cours desquelles les réactions chimiques se produisent à une humidité modérée, rend difficile de préciser la dégradation due au vieillissement.

Bien que la figure 11 soit utile pour évaluer approximativement la dégradation thermique, elle ne rend pas les différences qualitatives entre le bois chauffé à sec et celui traité à la vapeur. La figure 12 montre le  $W_L$  du bois en tant que fonction du temps de chauffage (a) et les effets du  $W_L$  sur le taux d'extractibles solubles dans l'eau du bois chauffé (b).

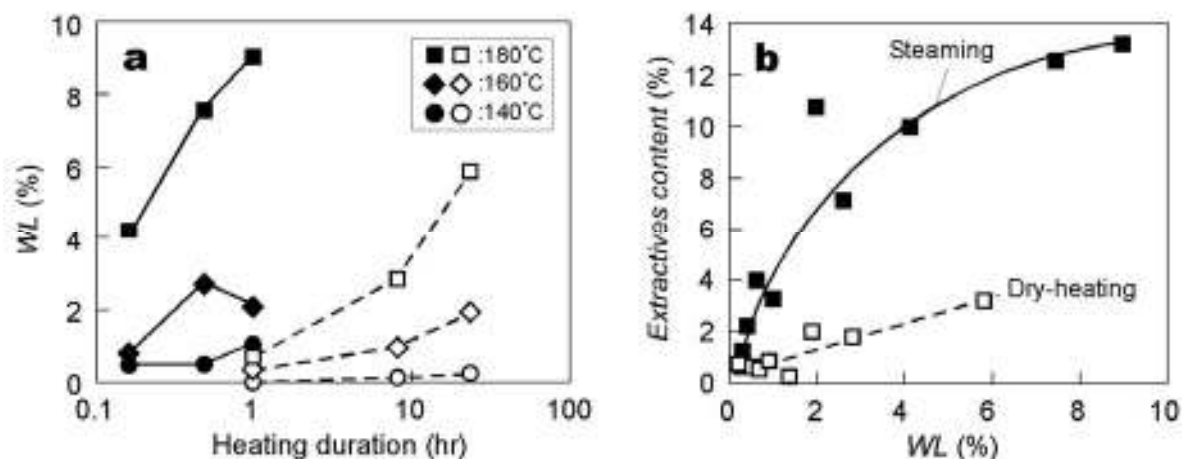


Figure 12. Les effets du temps de chauffage sur le  $W_L$  du sapin (a) et les pourcentages d'extractibles solubles dans l'eau du bois chauffé mis en fonction de  $W_L$  (b). *Signes clairs*, bois parfaitement sec chauffé en l'absence de toute humidité (chauffage à sec) ; *signes pleins*, bois humidifié (27—30% de composants humides) chauffé dans une atmosphère saturée d'eau (vapeur).

A  $W_L$  équivalent, les composants extractibles dans le bois traité à la vapeur sont considérablement plus importants que ceux contenus dans le bois chauffé à sec. Les résidus solubles de la décomposition ne sont pas les principaux constituants de la structure de la paroi cellulaire. Donc, aucun compte n'en sera tenu lors de la comparaison des effets du chauffage à sec et du chauffage à la vapeur sur les polymères de structure.

La figure 13 montre l'humidité d'équilibre ( $M$ ) du bois chauffé à 30% et à 97% de  $RH$  en fonction de  $W_L$ . Dans ce cas, les extractibles solubles dans l'eau ont été prélevés avant de faire les mesures de capacité hygroscopique. On n'observe aucune différence entre le  $M$  du bois chauffé à sec et celui du bois chauffé à la vapeur à 33% de  $RH$ , alors qu'à 97% de  $RH$  on obtient un  $M$  nettement inférieur par chauffage à sec.

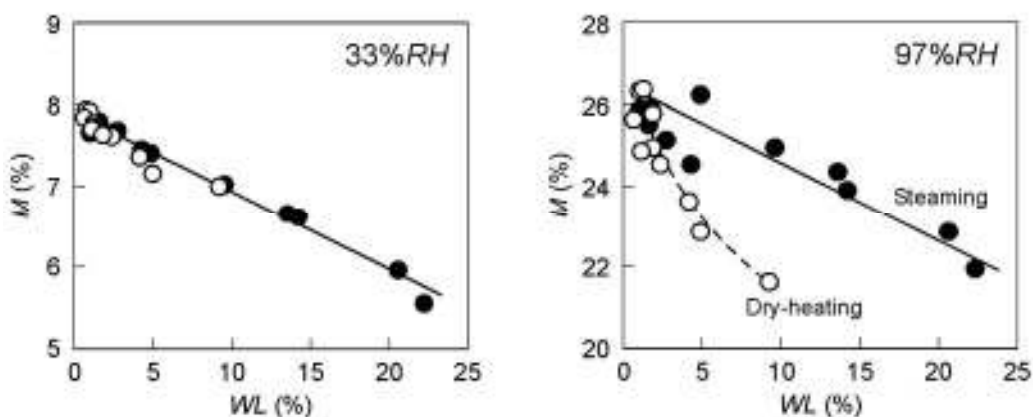


Figure 13. Humidité moyenne ( $M$ ) du bois de sapin chauffé à 25°C illustrant la perte de poids ( $W_L$ ). *Signes clairs*, chauffage à sec ; *signes pleins*, vapeur.

Ici, nous appliquons l'équation d'adsorption de Hailwood-Horrobin [28] pour décomposer l'eau absorbée en eau hydratée ( $M_h$ ) et eau dissoute ( $M_s$ ) comme le montre la figure 14a. En général  $M_h$  représente le nombre des sites d'adsorption, tandis que  $M_s$  est sensible à l'organisation à plus grande échelle des polymères du bois. Dans la figure 14b, les variations de  $M_h$  et de  $M_s$  sont représentées en fonction de  $W_L$ . La quantité  $M_h$  décroît régulièrement à mesure que croît  $W_L$  quelle que soit la méthode de chauffage utilisée. En revanche,  $M_s$  varie peu pendant le traitement thermique à la vapeur, alors qu'il décroît significativement en chauffage à sec.

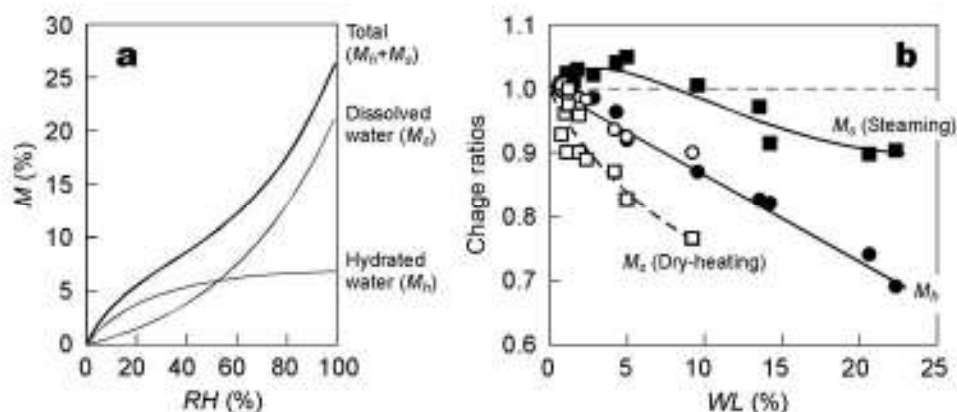


Figure 14. Les isothermes de sorption du bois de sapin non traité (a) et les changements dans la quantité d'eau libre  $M_h$  et d'eau dissoute  $M_s$  dus au chauffage (b). Cercles, changements en  $M_h$  ; carrés, changements en  $M_s$  ; signes clairs, les effets du chauffage à sec ; signes pleins, les effets de la vapeur.

On explique souvent la réduction de la capacité hygroscopique et l'amélioration de la stabilité dimensionnelle du bois chauffé par la décomposition des hémicelluloses hygroscopiques et autres carbohydrates et leur condensation ou polymérisation [26]. Si tel était le cas,  $M_s$  devrait diminuer plus par le traitement à la vapeur que par le chauffage à sec du fait de la décomposition des hémicelluloses et de la cristallisation de la cellulose qui se trouvent accélérées en présence d'humidité ([18], [24], [26], [27], [29]). Pourtant, les résultats de l'expérience ne corroborent pas cette hypothèse. Cela implique que  $M_s$  du bois chauffé présente des variations de l'organisation grande échelle des polymères du bois. Pendant le chauffage à sec, des changements chimiques divers tels que la dépolymérisation, la condensation et la cristallisation produisent un état « rétréci » pour lequel l'espace intermoléculaire est minimisé. Bien que la formation de liaisons éther transversales ait été écartée par des recherches précédentes [30], la condensation de la lignine et la formation de liaisons hydrogène fortes (appelées aussi hornification) peuvent limiter la dilatation du bois pour réduire  $M_s$ . Or une structure aussi serrée ne peut se constituer au cours du traitement à la vapeur, car les changements chimiques se produisent à l'état « dilaté » au cours duquel l'espace intermoléculaire est maximisé. Conséquemment,  $M_s$  ne varie pas de façon significative au cours du chauffage à la vapeur, alors que le traitement à sec le diminue notablement. Ces spéculations sont étayées par les changements survenus dans le volume humide causé par le chauffage. La figure 15 montre la dilatation du bois chauffé dans l'eau comme fonction du  $W_L$ . En opposition aux restrictions effectives de dilatation lors du traitement à sec, le volume humide de bois traité à la vapeur montre un léger accroissement à bas  $W_L$  et est toujours plus

grand que celui obtenu à sec au même *WL*. Ainsi, il semble que le traitement à sec soit une meilleure option que la vapeur lorsqu'on veut réduire la capacité hygroscopique du bois et améliorer sa stabilité dimensionnelle avec un minimum de dégradation thermique.

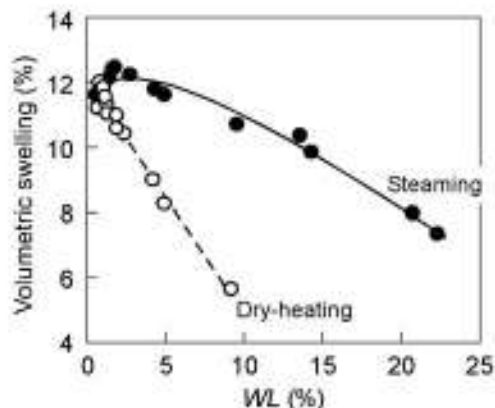


Figure 15. La dilatation du bois chauffé dans l'eau en regard du *WL*. Le coefficient de dilatation volumique a été calculé d'après le volume du bois totalement sec et non traité.

Dans la figure 16, les caractéristiques de sorption du vieux bois sont comparées à celles du bois chauffé. Puisque l'équation de sorption n'est pas applicable aux données du bois ancien (car peu disponibles), le taux d'humidité relative ( $M_{traité}/M_{non\ traité}$ ) du bois ancien et du bois chauffé sont représentés en fonction de *RH*. Les effets du vieillissement sont qualitativement plus similaires à ceux du traitement à sec qu'à ceux obtenus par la vapeur. Le vieillissement implique probablement peu d'effets comparables au traitement à la vapeur comme par exemple l'hydrolyse radicale des hémicelluloses et l'assouplissement de la paroi cellulaire, parce que le bois est conservé à sec (à environ 10% d'humidité) durant ce vieillissement.

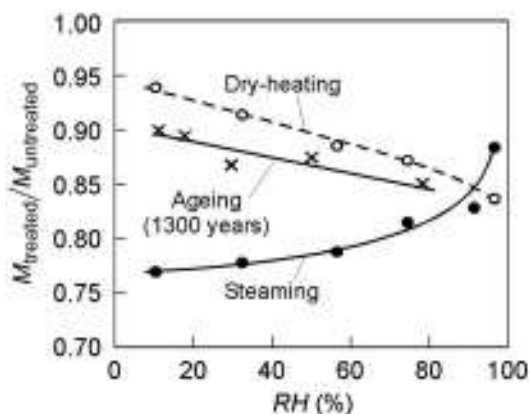


Figure 16. Le taux d'humidité relative ( $M_{traité}/M_{non\ traité}$ ) du bois ancien et chauffé en regard de l'humidité relative (*RH*). *Signes clairs*, chauffage à sec à 180°C pendant 24 heures ( $WL = 9,3\%$ ) ; *signes pleins*, vapeur à 180°C pendant 0,50 heure ( $WL = 20,7\%$ ) ; *croix*, vieillissement pendant 1300 ans (recalculé d'après [6]).

Enfin on présente les effets des principales modifications chimiques. Comme le montre la figure 17a, les groupes hydroxyle dans les composés polymères amorphes sont remplacés par des groupes acétyle par acétylation, alors que le traitement formaldéhyde jette des ponts oxyméthylènes entre les polymères du bois. Les effets de ces traitements sont montrés dans la figure 17b. L'acétylation produit une réduction plus importante de  $M$  à faible  $RH$  parce que  $M_h$ , plutôt que  $M_S$ , est réduit par la substitution des groupes hydroxyles à effet hydrophile par les groupes acétyles à effet hydrophobe. Au contraire, l'effet du traitement formaldéhyde est plus important à  $RH$  élevé parce que  $M_S$  est effectivement réduit par liaison transversale. Selon les caractéristiques de sorption, les effets du vieillissement et du chauffage à sec sont qualitativement semblables à ceux du traitement formaldéhyde.

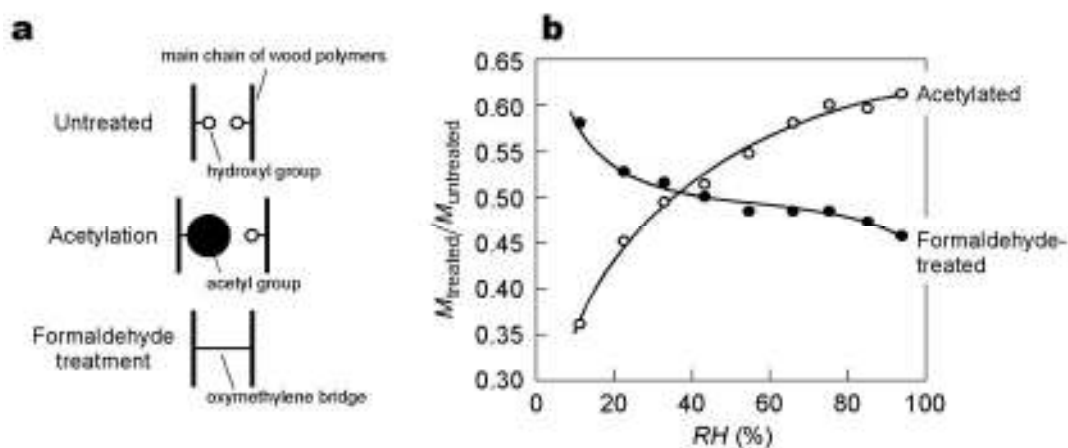


Figure 17. Les changements structurels dans les composés polymères amorphes dus aux modifications chimiques (a) et les effets de ces modifications chimiques sur la capacité hygroscopique du bois (b) [31]

### III.3 Les effets réversibles et irréversibles du chauffage [32]

Les effets du chauffage se traduisent généralement par des changements chimiques irréversibles tels que l'hydrolyse, la condensation et la cristallisation des constituants du bois.

Il s'ensuit que la capacité hygroscopique du bois chauffé devrait rester inchangée par des traitements ultérieurs n'impliquant pas de transformations chimiques. Cependant, les effets du chauffage ne sont pas toujours irréversibles, comme il est décrit ci-dessous.

La figure 18 montre le taux d'humidité à l'équilibre ( $M$ ) du bois chauffé à sec en fonction de la perte de masse ( $WL$ ) due au chauffage. L'hygrométrie du bois reste constante si on répète les mesures à 97% de  $RH$  (2-4), mais on constate une augmentation significative lors de la deuxième expérience à 57% de  $RH$  (1-3). Cela indique que l'effet du chauffage à sec est en partie réversible, et qu'un effet aussi temporaire disparaît si on humidifie à des  $RH$  élevés.

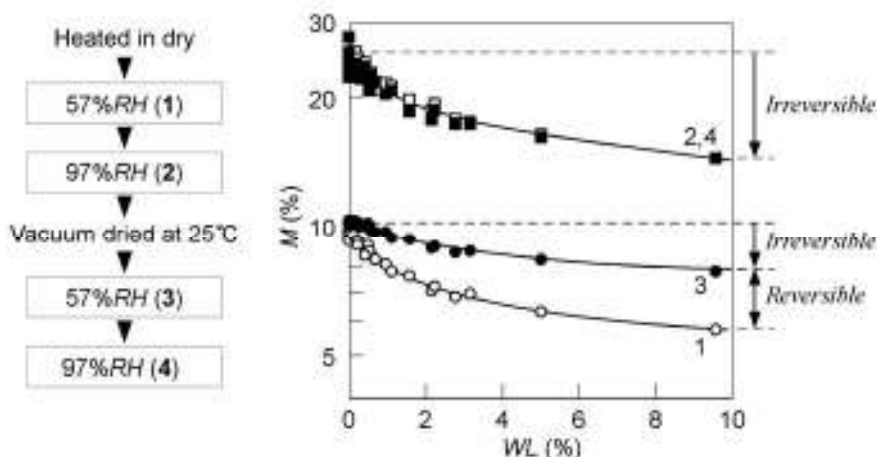


Figure 18. L'équilibre de l'humidité contenue ( $M$ ) du bois chauffé à 25°C en fonction de la perte de poids ( $WL$ ) due au chauffage. *Cercles*, à 57% de RH ; *carrés*, à 97% de RH. Les chiffres indiquent l'ordre des mesures.

On peut expliquer cette réversibilité du chauffage à sec par le recuit ou le vieillissement physique des polymères du bois. La figure 19 illustre un modèle simplifié de bois constitué d'une partie amorphe viscoélastique (a), d'une contribution de l'humidité absorbée (b) et d'une partie hydrophobique rigide (c) visant à expliquer l'effet de recuit du chauffage.

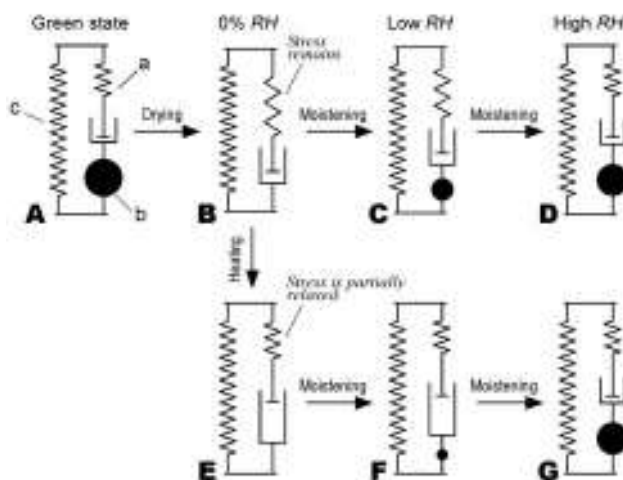


Figure 19. Une interprétation des changements réversibles dans la capacité hygroscopique du bois chauffé.

Pendant le séchage du bois vert (A), une contrainte apparaît dans la partie amorphe, car son rétrécissement est limité par la rigidité de la contribution hydrophobe. Cette contrainte est définitive une fois sec, car la mobilité des molécules amorphes est très faible (B). Cependant, la partie amorphe devient mobile grâce à la sorption d'eau (C) et retrouve son état « naturel » initial dans des conditions d'humidité élevée (D). Au cours du chauffage à sec, la contrainte résiduelle est relâchée grâce à l'activation thermique des polymères amorphes (E) et cette structure stabilisée, c'est-à-dire

recuite, réduit la sorption d'eau à un taux d'humidité relativement bas (**F**). À un taux d'humidité plus élevé, cependant, les molécules amorphes retrouvent leur état initial tandis que leur mobilité s'accroît (**G**). En fait, la structure du bois n'est pas si simple, car la nature viscoélastique des polymères amorphes doit être prise en compte pour comprendre les changements réversibles dans la capacité hygroscopique qui suivent le chauffage et l'humidification. Il se peut qu'un tel effet de recuit se produise au cours des centaines d'années du vieillissement. Puisque le bois vieillit en général à sec, ses polymères amorphes sont maintenus en état vitreux et sont presque « gelés » durant le vieillissement. Cependant, il se peut qu'ils se réorganisent et se stabilisent au gré des dilatations et des rétrécissements dûs aux variations d'humidité.

### **III.4 Restauration de statues anciennes grâce au bois chauffé [33]**

En général, le chauffage assombrit la couleur du bois. La teinte brune du bois chauffé n'est pas toujours la bienvenue dans les usages quotidiens, mais elle est utile dans un cas particulier : la restauration des statues anciennes. Même si l'on dispose de teintures et de peintures synthétiques, il demeure difficile d'imiter la couleur naturelle et la patine du bois ancien. De plus, la combinaison de bois neuf et vieux n'est jamais souhaitable en raison de l'apparition toujours possible de problèmes inattendus de changements dimensionnels consécutifs aux variations d'humidité. Dans ce cas, le chauffage est une méthode avantageuse pour reproduire des parties de statues anciennes, car il permet un aspect « antique » aussi bien qu'une meilleure stabilité dimensionnelle. La figure 20 montre l'heureuse restauration d'une statue de Bouddha dont la chevelure a été refaite avec du bois traité thermiquement.

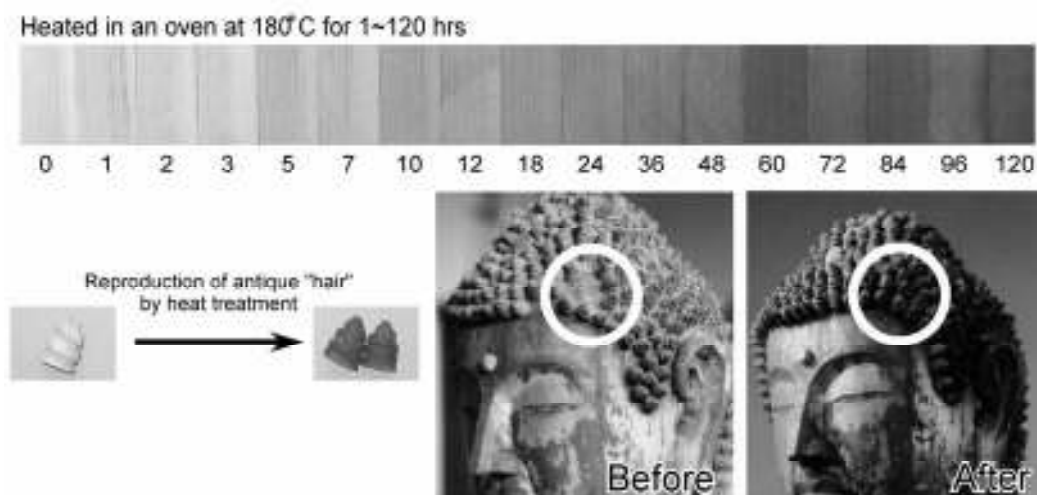


Figure 20. Changements de couleur du bois de cyprès après chauffage à 180°C et restauration de la statue ancienne par des rajouts traités à la chaleur (« Yakushinyorai » du temple Okubo-dera, VIII<sup>ème</sup> siècle).



## IV Techniques japonaises traditionnelles de revêtement pour la protection du bois.

### IV.1 L'Urushi, une excellente laque naturelle.

Ces dernières années, on a étudié la fiabilité et la résistance de divers laques et vernis naturels. Parmi ceux-ci, l'« urushi » constitue le meilleur choix du fait de sa belle apparence et de ses extraordinaires qualités pratiques. On voit sur la figure 21a un peigne antique en bois recouvert de trois couches d'urushi. Même si les dents sont cassées, le corps a été protégé des intempéries et des attaques biologiques par le revêtement d'urushi pendant 6800 ans. On utilise encore très couramment l'urushi comme laque pour la vaisselle, les ornements et les autres objets du quotidien au Japon et dans les autres pays d'Extrême Orient. Puisqu'ils symbolisent l'esthétique japonaise traditionnelle par leur couleur profonde et leur beau brillant, ces objets artistiques laqués sont généralement connus sous le nom de « japonaiseries ». Le revêtement en urushi n'est pas seulement agréable à regarder, mais également résistant à l'eau, à l'acide, aux alcalins et à la plupart des solvants organiques. Sa propriété antibactérienne fait merveille aussi sur la vaisselle comme on le voit sur la figure 21b. Comme l'urushi s'applique également sur les métaux, il s'adapte parfaitement à la technologie moderne comme on le voit sur la figure 21c.



Figure 21. Peigne antique en bois revêtu d'urushi et vieux de 6800 ans (a), vaisselle traditionnelle japonaise enduite d'urushi (b) et une utilisation récente de ce revêtement sur un appareil photo digital (c). La photo du peigne en bois a été fournie par la Fondation Archéologique Ishikawa.

De plus, l'urushi montre une parfaite adhésion au bois et aux autres matériaux cellulotiques. Sans doute les abeilles ont-elles été les premières créatures à découvrir les qualités adhésives de l'urushi : il leur arrivait de fixer leur essaim à la branche d'un arbre à l'aide d'urushi ou d'une sève comparable à la résine d'un arbre. La forte cohésion entre l'urushi et le chanvre permet la réalisation des premiers polymères armés (Fibre Reinforced Polymers) utilisés dans la fabrication des vêtements en chanvre. Ce produit ressemblant au FRP (en Japonais, *kanshitsu*) a été utilisé au Moyen-Age pour l'érection de statues de Bouddha.

#### IV.2 Les composants chimiques et la structure de l'urushi

L'urushi est tiré de la sève d'un arbre à laque, *Rhus vernicifera*, comme on le voit sur les figures 22a et 22b. Cette sève est composée d'eau (20-25%), d'urushiol non soluble (55-70%), de glycoprotéines (1-3%) de polysaccharides solubles (6-10%) et d'enzymes (laccase etc., environ 1%). L'Urushiol, le principal composant de la sève, est un mélange de quelques-uns des dérivés de catéchol, comme on le voit sur la figure 22c (34).

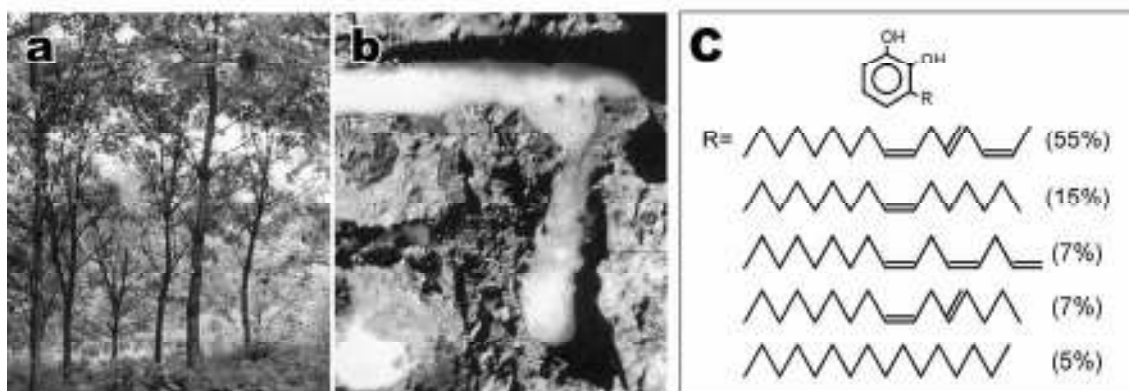


Figure 22. Arbre à laque (a), la sève sortant du tronc (b) et la structure de l'urushiol (c) [34]

Dans les instruments traditionnels laqués, la sève est suffisamment traitée grâce à un faible chauffage (40-50°). Ce procédé « kurome » produit l'évaporation de l'eau, la polymérisation de l'urushiol et la réaction des glycoprotéines avec l'urushiol. En même temps, les constituants de la laque sont bien homogénéisés et les polysaccharides se diffusent en phase huileuse dans laquelle se forme le complexe glycoprotéinique de l'urushiol. En conséquence, chaque grain sphérique de l'urushiol polymérisé est entouré d'une fine enveloppe de polysaccharides pour former l'urushi comme on le voit sur la figure 23a. Une structure en « core-shell » si parfaite est responsable, pense-t-on, de l'excellente durabilité de ce vernis du fait de l'enveloppe de polysaccharides qui constitue une haute barrière contre l'oxygène [35]. Bien que l'effet anti-oxydation de la coquille de polysaccharides soit encore l'objet d'un débat [36], on peut affirmer que la belle surface de cette laque obtenue par le procédé « kurome » explique son esthétique.

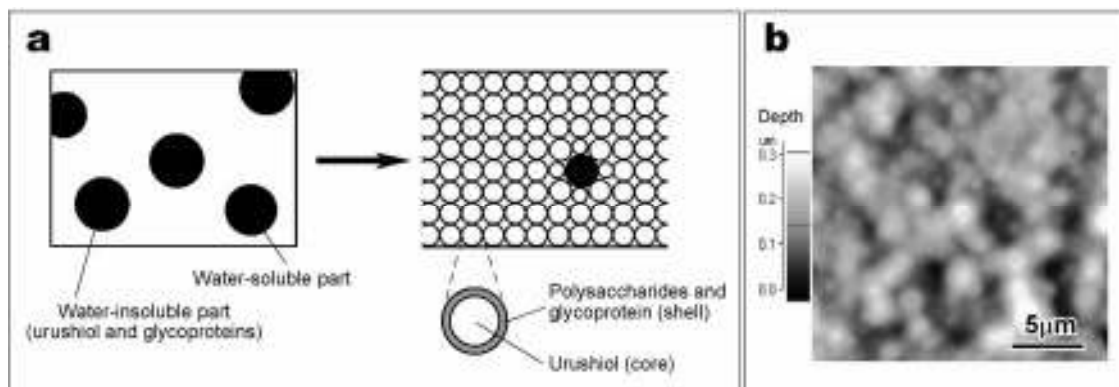


Figure 23. Les changements structurels dans la laque urushi au cours de l'opération traditionnelle (a) et la belle image structurale de ce revêtement grâce à un microscope à force atomique.

### IV.3 Utilisation potentielle de l'urushi pour le vernis des instruments de musique

Bien que les qualités de l'urushi aient été totalement étudiées, on ne compte que quelques expérimentations quant aux propriétés acoustiques du bois vernis avec ce produit [37], [38]). Le profil viscoélastique du revêtement urushi se distingue par trois processus de relaxation comme on le voit sur la figure 24. Grâce aux liaisons transversales fortes des polymères d'urushiol, l'amortissement mécanique du revêtement d'urushi est relativement lent et stable à température ambiante dans la gamme de fréquence audio. Cette propriété de l'urushi rappelle beaucoup celles du revêtement en polyuréthane qu'on a utilisé pour les tables d'harmonie des harpes et de divers instruments de ce type [37]. Cette caractéristique suggère que l'urushi constitue une laque adéquate pour les tables d'harmonie en bois pour lesquelles on recherche un amortissement plus lent, une grande durabilité et un aspect artistique.

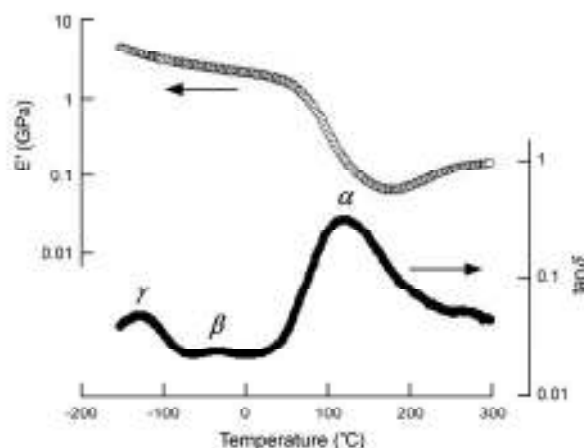


Figure 24. Les variations de température du coefficient d'élasticité ( $E'$ ) et la tangente de l'angle de perte ( $\tan\delta$ ) du revêtement d'urushi à 11 Hz.  $\alpha$ , transition vitreuse des polymères d'urushiol ;  $\beta$ , mouvements des molécules d'eau absorbée ;  $\gamma$ , mouvements des groupes méthylène groups de l'urushiol.

Dans tous les cas, on accordera un soin extrême à l'application du revêtement parce que son épaisseur influence considérablement les qualités acoustiques des tables d'harmonie. Même si un revêtement plus épais produit une stabilité supérieure quels que soient les changements environnementaux [38], il réduit à la fois l'efficacité acoustique et l'anisotropie des tables d'harmonie en bois [37].

## V Conclusions générales

Le bois est incroyablement pérenne lorsqu'il est convenablement entretenu. L'augmentation de la raideur et de l'anisotropie du bois ancien semble bien adaptée aux tables d'harmonie. Cependant sa nature fragile, particulièrement en milieu humide, doit être prise en compte.

Les effets du vieillissement sont qualitativement comparables à ceux du chauffage à sec en ce qui concerne les caractéristiques de sorption du bois. Cependant il se peut que l'anisotropie réduite par le chauffage détériore la qualité des tables d'harmonie.

Une laque traditionnelle japonaise, l'urushi, présente toutes les promesses d'un revêtement excellent pour les instruments de musique en bois.

## Remerciements

Je remercie le professeur Kazuya MINATO de la Prefectural University de Kyoto et le docteur Misao YOKOYAMA du Research Institute for Sustainable Humanosphere de l'université de Kyoto pour les précisions aimablement communiquées concernant le vieillissement artificiel et la réfection des statues anciennes. Je remercie également la Fondation Archéologique Ishikawa pour son autorisation de reproduire la photographie du peigne antique en bois de la figure 21.

## Bibliographie

[1] Kohara, J., « Studies on the durability of wood I, mechanical properties of old timbers », *Bulletin of Kyoto Prefectural University*, vol. 2, 1952, p. 116-131. (in Japanese)

[2] Kohara, J., « Studies on the permanence of wood V, shrinkage and swelling of old timbers about 300-1300 years ago », *Bulletin of Kyoto Prefectural University*, vol. 5, 1953, p. 81-88. (in Japanese)

[3] Kohara, J., « Studies on the permanence of wood VI, the changes of mechanical properties of old timbers », *Bulletin of Kyoto Prefectural University*, vol. 6, 1954, p. 164-174. (in Japanese)

[4] Kohara, J., « Studies on the permanence of wood VII, the influence of age on the components of wood (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher)», *Bulletin of Kyoto Prefectural University*, vol. 6, 1954, p. 175-182. (in Japanese)

[4] Kohara, J., « Studies on the permanence of wood XV, the influence of age on the components of wood (*Zelkova serrata* Makino)», *Mokuzai Gakkaishi*, vol. 1, 1955, p. 21-24. (in Japanese)

- [6] Kohara, J., « On permanence of wood II, differences between the ageing processes of cypress wood and zelkova wood », *Wood industry*, vol. 10, 1955, p. 395-399. (in Japanese)
- [7] Sakurada, I., et al., « Experimental determinations of the elastic modulus of crystalline regions in oriented polymers », *Journal of Polymer Science*, vol.57, 1962, p.651-660.
- [8] Cousins, W. J., « Elastic modulus of lignin as related to moisture content », *Wood Science and Technology*, vol.10, 1976, p.9-17.
- [9] Cousins, W. J., « Young's modulus of hemicellulose as related to moisture content », *Wood Science and Technology*, vol.12, 1978, p.161-167.
- [10] Ono, T. et Norimoto, M., « On physical criteria for the selection of wood for soundboards of musical instruments », *Rheologica Acta*, vol.23, 1984, 652-656.
- [11] Ono, T. et Norimoto, M., « Study on Young's modulus and internal friction of wood in relation to the evaluation of wood for musical instruments » *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.22, 1983, p.611-614.
- [12] Obataya, E., et al., « Vibrational properties of wood along the grain », *Journal of Materials Science*, vol.35, 2000, p.2993-3001.
- [13] Norimoto, M., « Structure and properties of wood used for musical instruments I, on the selection of wood used for piano soundboards », *Mokuzai Gakkaishi*, vol.28, 1982, p.407-413. (in Japanese)
- [14] Nozaki, K., et al., « Engineering approach for piano timber – Relation between material and timber - », *Kikai Gakkaishi*, vol.91, 1988, p.653-659. (in Japanese)
- [15] Yano, H., et Matsuhisa, H., « Study on the timbre of wood II, analysis of the sound spectrum of wood using viscoelastic Timoshenko equation », *Scientific Reports of the Kyoto Prefectural University*, No.43, 1991, p.24-31. (in Japanese)
- [16] Ono, T., « Frequency responses of wood for musical instruments in relation to the vibrational properties », *Journal of Acoustic Society of Japan (E)*, vol.17, 1996, p.183-193.
- [17] Millett, M. A. et Gerhards, C. C., « Accelerated aging: Residual weight and flexural properties of wood heated in air at 115° to 175°C », *Wood Science*, vol.4, 1972, p.193-201.
- [18] Hillis, W. E., « High temperature and chemical effects on wood stability. Part 1: General considerations », *Wood Science and Technology*, vol.18, 1984, p.281-293.
- [19] Green, D. W., et al., « Durability of structural lumber products at high temperatures. Part I. 66°C at 75%RH and 82°C at 30%RH », *Wood and Fiber Science*, vol.35, 2003, p.499-523.
- [20] Obataya, E., et al., « Effects of high temperature kiln drying on the practical performances of Japanese cedar wood II : changes in mechanical properties due to heating », *Journal of Wood Science*, vol.52, 2006, p.111-114.
- [21] Obataya, E., et al., « Moisture dependence of vibrational properties of heat-treated wood », *Mokuzai Gakkaishi*, vol.46, 2000, p.88-94. (in Japanese)
- [22] Kubojima, Y., et al., « Vibrational properties of Sitka spruce heat-treated in nitrogen gas », *Journal of Wood Science*, vol.44, 1998, p.73-77.
- [23] Obataya, E., et al., « Hygroscopicity of heat-treated wood III. effects of steaming on the hygroscopicity of wood », *Mokuzai Gakkaishi*, vol.48, 2002, p.348-355. (in Japanese)
- [24] Stamm, A.J., « Thermal degradation of wood and cellulose », *Industrial and Engineering Chemistry*, vol.48, 1956, p.413-417.

- [25] Hayashi, H. et Minato, K., unpublished data.
- [26] Mitchell, R.L., et al. « Effect of heat on the properties and chemical composition of Douglas-fir wood and its major components », *Journal of Forest Product Research Society*, vol.3, 1953, p.38-42, 72-73.
- [27] Kubinsky, E. et Ifju, G., « Influence of steaming on the properties of red oak. Part I. Structural and chemical changes », *Wood Science*, vol.6, 1973, p.87-94.
- [28] Hailwood, A.J. et Horrobin, S., « Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model », *Transactions of the Faraday Society*, vol.42B, 1946, 84-92.
- [29] Bhuiyan, M.T.R., et al. « Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions », *Journal of Wood Science*, vol.46, 2000, 431-436.
- [30] Seborg, R.M., et al., « Effect of heat upon the dimensional stabilization of wood », *Journal of Forest Product Research Society*, vol.3, 1953, p.59-67.
- [31] Yasuda, R., et al., « Moisture adsorption thermodynamics of chemically modified wood », *Holzforschung*, vol.49, 1995, 548-554.
- [32] Obataya, E., et al., « Hygroscopicity of heat-treated wood II. Reversible and irreversible reductions in the hygroscopicity of wood due to heating », *Mokuzai Gakkaishi*, vol.48, 2002, p.288-295. (in Japanese)
- [33] Yokoyama, M., private communication.
- [34] Miyakoshi, T., et al., *Urushi, A Fascinating Biopolymer*, Tokyo, IPC Inc., 1999.
- [35] Kumanotani, J., « Urushi (oriental lacquer) – a natural aesthetic durable and future-promising coating » *Progress in Organic Coatings*, vol.26, 1995, 163-195.
- [36] Obataya, E., et al., « Effects of aging and moisture on the dynamic viscoelastic properties of oriental lacquer (urushi) film » *Journal of Applied Polymer Science*, vol.83, 2002, p.2288-2294.
- [37] Obataya, E., et al., « Effects of oriental lacquer (urushi) coating on the vibrational properties of wood used for the soundboards of musical instruments », *Acoustic Science and Technology*, vol.22, 2001, p.1-34.
- [38] Obataya, E., et al., « Changes in the vibrational properties of wood coated with urushi lacquer during moisture adsorption and desorption », *Mokuzai Gakkaishi*, vol.47, 2001, p.440-446. (in Japanese)

Texte traduit de l'anglais par Pierre Charras