

Prédiction par simulation numérique du vieillissement de patrimoines en bois soumis à des conditions climatiques ambiantes variables

Hubert Maigre, Pierre Chassagne, Jean-François Jullien : LaMCoS, INSA-Lyon CNRS UMR-5259, F69621 Villeurbanne

Le bois est un matériau couramment utilisé dans la construction aussi ses propriétés mécaniques sont relativement bien connues. Cependant ce sont surtout ses propriétés dans le sens longitudinal qui sont étudiées. Pour certaines applications comme le séchage ou la conservation de panneaux peints ce sont au contraire les propriétés transverses qui comptent le plus. Notre objectif est donc l'étude du comportement mécanique transverse du bois notamment quand celui-ci est soumis à des variations hydriques et thermiques. Nous avons aussi développé des techniques d'observation par corrélation d'images pour mesurer les champs de déformation et caler les modèles développés.

Wood is commonly used as an engineering material and his mechanical properties are relatively well known. However only The longitudinal properties are studied in detail. For some applications like drying or preservation of wood painting transversal properties are more crucial. Our goal is the study of the transversal mechanical behaviour of wood particularly when it is subjected to temperature and moisture variations. We have also developed observation techniques using image correlation to measure deformation fields to adjust our models.

I Introduction :

1.1 Problématique

Le bois, matériau naturel et renouvelable, est un matériau utilisé dans la construction pour ses bonnes propriétés mécaniques. Cependant son usage reste freiné par les contraintes réglementaires de plus en plus restrictives qui imposent après transformation une teneur en eau définie, un classement mécanique et une variabilité déterminée.

Cette difficulté provient essentiellement de la présence de l'eau dans le bois. En effet, le bois vert, juste après abattage des troncs, est gorgé d'eau, (avec des teneurs allant jusqu'à 100% selon les essences) puis il est séché soit naturellement soit artificiellement pour obtenir un bois sec avec des teneurs en eau inférieures à 20% voire 10% pour certaines applications. Or cette eau interagit fortement avec le bois et affecte de manière importante son comportement mécanique soit à travers sa résistance mécanique soit à travers

des distorsions géométriques (phénomène de retrait-gonflement). De plus les teneurs hydriques dans le bois dépendent des conditions hydriques ambiantes lesquelles dépendent fortement de la température.

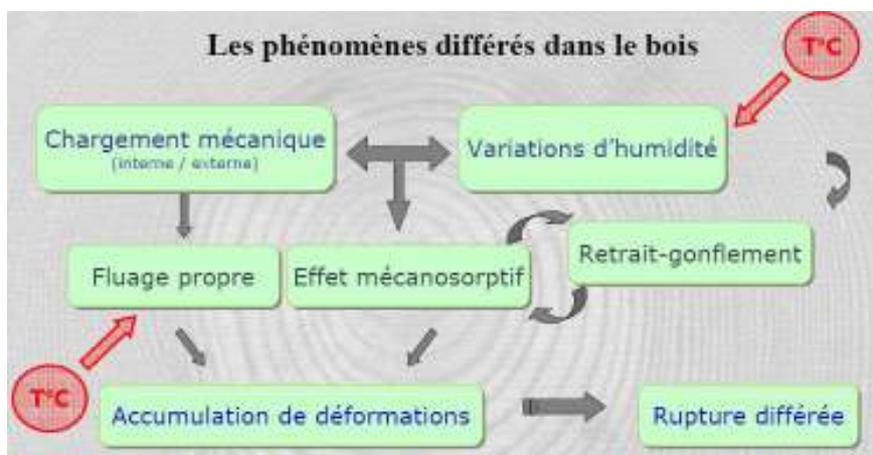
Les conséquences sont importantes dans les opérations industrielles de séchage car il s'agit de sécher au plus vite tout en obtenant un maximum de produits exempts de défaut pour lesquels les opérations de rabotage doivent être réduites au maximum. Les conséquences en usage sont aussi de première importance puisqu'il faut garantir qu'à long terme (plusieurs dizaines d'années) les structures bois résisteront malgré les variations climatiques qu'elles pourront subir.

Ce qui est vrai pour les structures du génie civil l'est aussi pour les objets en bois du patrimoine. Ils ont subi de la même façon des opérations de séchage qui ont pu endommager le bois et subissent ensuite des variations climatiques parfois importantes qui risquent à long terme de provoquer des distorsions irréversibles voire des fissures. C'est le cas par exemple des tableaux peints sur des panneaux en bois et exposés dans des églises à l'intérieur desquelles les amplitudes hydriques et thermiques sont très importantes tout au long de l'année.

1.2 Objectifs scientifiques

Notre objectif est de comprendre le comportement mécanique du bois soumis à diverses sollicitations. Les premières études réalisées consistaient à examiner expérimentalement l'effet de différents cycles de séchage (humidification, déshumidification, températures faibles à élevées) sur les éventuelles déformations et fissurations dans le bois. Cette méthode non seulement onéreuse reste limitée et ses conclusions sont difficilement généralisables.

Les recherches se sont alors orientées vers la compréhension du comportement mécanique du bois associée au développement de lois mathématiques capables d'intégrer des mécanismes physiques et chimiques agissant au sein du matériau lors d'opérations de séchage.



Les avancées en terme d'outils de résolution numérique ont largement contribué à l'adoption d'approches de modélisation, telles que la méthode des éléments finis. L'intérêt de la simulation est la possibilité d'examiner, sur des temps très réduits, la réaction du bois en fonction de différentes procédures de séchage en vue d'une optimisation. La complexité de ce moyen d'investigation réside d'une part dans la formulation de lois de comportement nécessitant une compréhension complète des phénomènes thermo-hydro-mécaniques couplés et découplés, et agissant à différentes échelles du matériau ; et d'autre part dans la prise en compte de paramètres d'hétérogénéité du matériau liés à la croissance de l'arbre (orthotropie cylindrique, mode de débit, orientation des fibres longitudinales, conicité de croissance,...).

II Modèles développés à l'INSA

En dépit des différences observées en terme de cinétique et d'amplitude des phénomènes de fluage dans les directions transversale et longitudinale, les similarités entre les mécanismes physico-chimiques observés permettent d'admettre que l'origine des effets mécanosorptifs s'exprime avec le modèle qualitatif développé à l'INSA de Lyon [1, 2, 3]. En d'autres termes, la rigidité et la stabilité de la paroi cellulaire du bois dans les directions radiale et tangentielle sont de la même manière affectées par les variations d'humidité aux niveaux micro et ultra-structurels. Un modèle de Maxwell généralisé à 7 branches a été employé pour la représentation du comportement global.

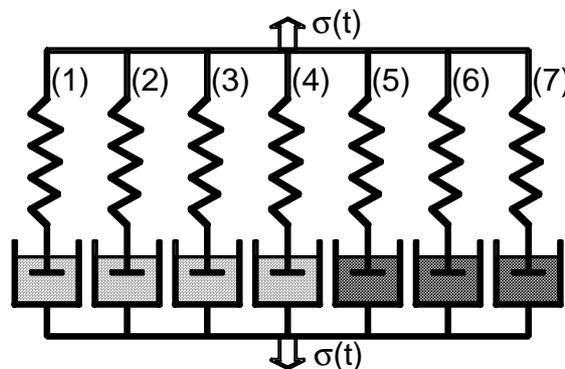


Figure 1. Modèle de Maxwell généralisé à 7 branches utilisé dans le modèle.

Les 7 branches consécutives sont fonctions de 3 paramètres prépondérants sur la réponse mécanosorptive : l'histoire et le taux de variation d'humidité subie, ainsi que le niveau de contrainte généré. À des niveaux de températures plus élevés, ce dernier devra intervenir dans la définition des fonctions d'activation de fluage relatives à chaque branche de Maxwell, ainsi que dans les calculs de transferts de masse, considérés selon la seconde loi de Fick.

Associé à cela, un comportement fortement non-linéaire dans les directions R et T a été introduit. Dans un premier temps, les comportements en traction et

en compression sont considérés de manière assez simpliste et les non-linéarités en R et T traitées comme un problème de plasticité. Le seuil d'activation de cette « plastification » est atteint pour une valeur égale au tiers de la contrainte de rupture, aussi bien en traction qu'en compression ; traction et compression pouvant avoir des limites de rupture différentes. Une « zone d'écrouissage » du matériau est obtenue au-delà du seuil ainsi défini, où la rigidité du bois devient quatre fois moins importante. Dans cette phase, l'hypothèse est faite que si les contraintes diminuent, leur décharge est effectuée élastiquement (avec la rigidité initiale) aussi bien en traction qu'en compression.

III Application à l'étude du tuilage lors de séchage

Lors d'une opération de séchage, quatre types de distorsions, dépendant d'hétérogénéités liées à la croissance de l'arbre, se manifestent et altèrent la géométrie des pièces de bois : le tuilage, le gauchissement, les flèches de face et de chant.



Figure 2. Différentes distorsions de planches lors de séchage

L'importance de ses distorsions dépend avant tout des coefficients de retrait-gonflement β_L , β_R , β_T , lesquels sont très différents dans les directions longitudinale (L), radiale (R) et transverse (T). De nombreux autres paramètres influent sur l'amplitude de ces variations géométriques : mode de débit des planches, position de prélèvement dans le billon (aubier ou duramen par exemple), angle de fibre (écart de la direction des fibres par rapport à l'axe vertical de l'arbre)... La prédiction des variations dimensionnelles est donc a priori très délicate dans la mesure où l'on ne dispose généralement pas de données expérimentales suffisamment nombreuses pour l'identification de tous ces paramètres. Toutefois, par simulation numérique on peut calculer les effets

de chacun des paramètres et estimer une fourchette de résultats selon l'incertitude que l'on a de ces paramètres.

Nous présentons ici quelques exemples que nous avons étudiés [4, 5] :

III.1 Simulation 2D du tuilage

On représente ici une section de planche rectangulaire et on suppose que tous les phénomènes physiques se produisent dans cette section. On néglige notamment les transferts dans le sens longitudinal, la dimension dans cette direction étant supposée bien plus grande que les dimensions transverses.

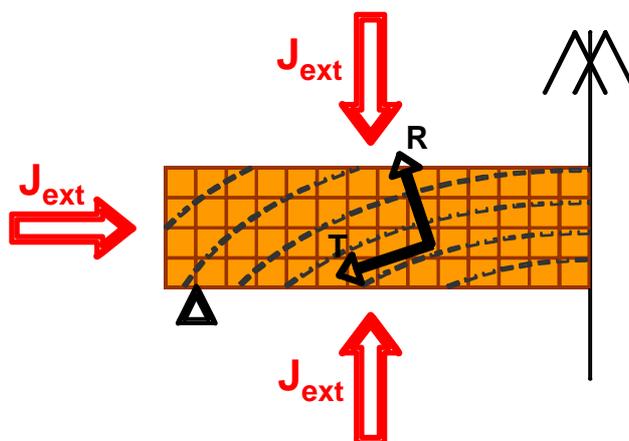


Figure 3. Modèle de séchage d'une demi-planche avec la description de la répartition de cernes de croissance

On réalise ensuite une modélisation par éléments finis. Cette modélisation faite, on calcule un cycle de séchage, ici en l'occurrence on part d'une planche saturée en eau que l'on place dans une atmosphère chaude et sèche. Le résultat obtenu est l'ensemble des évolutions au cours du temps, des teneurs en eau des contraintes internes, des déformations de la planche.

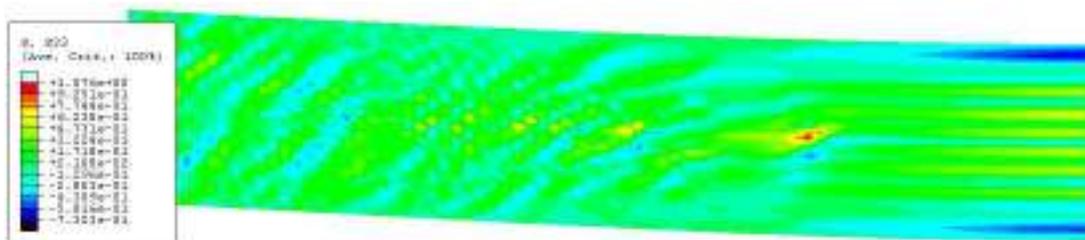


Figure 4. Champ de contrainte tangentielle en fin de séchage représenté sur la planche déformée

Sur la figure précédente, on constate que le champ de contrainte interne en fin de séchage n'est pas nul. Il s'aligne presque parfaitement le long des cernes et cela parce que le bois d'été et le bois de printemps n'ont pas les mêmes

coefficients de retrait-gonflement. Le résultat obtenu est important car il permet ensuite de prévoir les risques de fissuration à venir celle-ci se produisant principalement dans les zones où les tensions sont les plus fortes.

III.2 Tuilage en fonction des coefficients de retrait-gonflement

Nous nous intéressons ici à l'importance de la connaissance relative des coefficients de retrait-gonflement dans les directions transverse et radiale. Nous calculons donc le tuilage lors d'une variation de l'humidité relative du milieu ambiant dans lequel se trouve la planche. Deux calculs sont réalisés pour deux rapports β_T/β_R des coefficients de retrait gonflement.

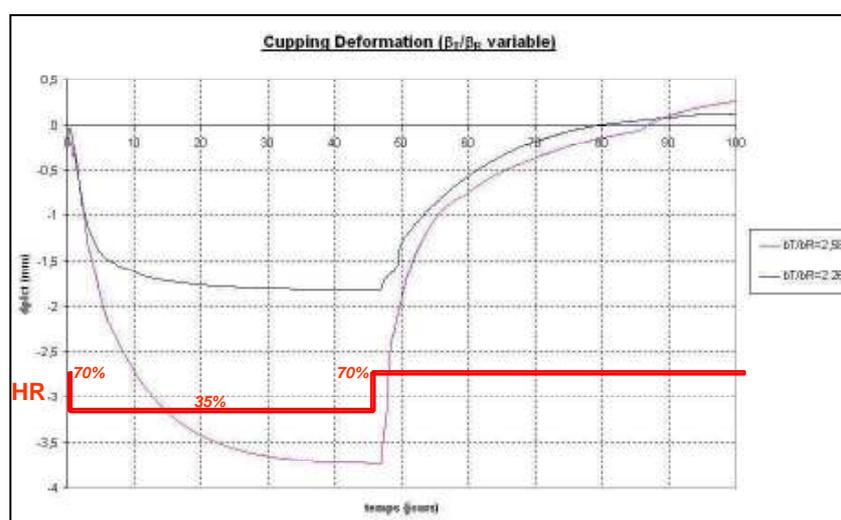


Figure 5. Evolutions du tuilage au cours du temps en fonction du rapport des coefficients de retrait-gonflement

On constate alors que le tuilage est essentiellement dû à la différence entre les coefficients de gonflement-retrait des directions tangentielle et radiale puisqu'il augmente fortement lorsque ce rapport augmente.

III.3 Tuilage en fonction du débit

Dans cet exemple, les deux calculs ont été réalisés en supposant un prélèvement plus ou moins éloigné du cœur. La sollicitation est une variation de l'humidité relative pendant 45 jours.

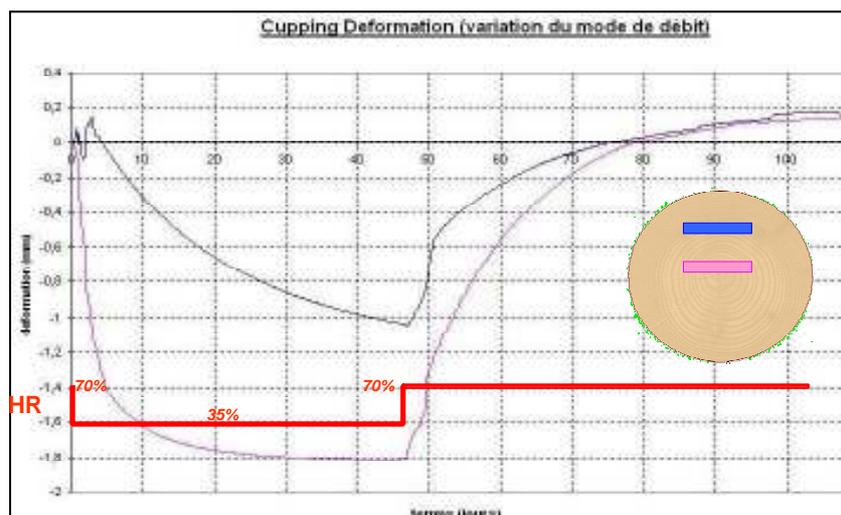


Figure 6. Effet de la position de prélèvement sur le tuilage

III.4 Tuilage en fonction des modes d'échange

Ici, on s'intéresse aux surfaces qui réalisent les échanges hydriques avec le milieu extérieur. Dans le premier calcul, les échanges se produisent par les deux surfaces supérieure et inférieure (séchage symétrique). Dans le second calcul, les échanges ne sont possibles que par la face supérieure (séchage dissymétrique). Ce deuxième mode de séchage s'apparente parfaitement au cas des panneaux de bois peints pour lesquels la face peinte bloque les échanges hydriques ceci ne pouvant se produire que par la face arrière.

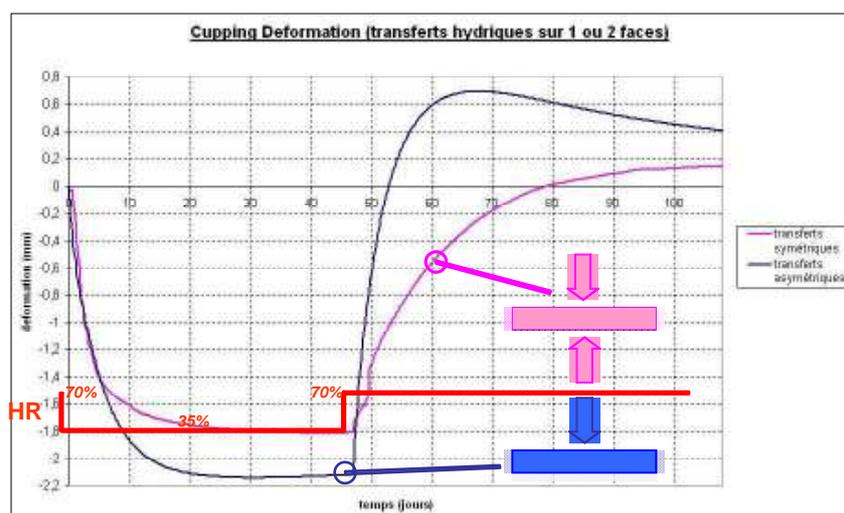


Figure 7. Tuilage selon le mode d'échange.

IV Application à la sphère armillaire d'Antonio Santucci

IV.1 Description

Ces outils de simulation ont été mis en œuvre pour simuler les déformations observées sur la sphère armillaire d'Antonio Santucci du XVI^e siècle qui se trouve au musée d'Histoire de la science à Florence en Italie [6].



Figure 8. Sphère armillaire d'Antonio Santucci

Cette sphère est un assemblage de différents cercles en bois représentant la voûte céleste et le mouvement des planètes. Mécaniquement, un cercle principal dans un plan vertical soutient l'ensemble qui est fixé autour d'un axe incliné de l'inclinaison de la terre par rapport au plan de l'écliptique. Ce cercle principal est renforcé par un cercle ceinture, horizontal à mi-hauteur. Initialement tous les cercles étaient mobiles les uns par rapport aux autres mais au cours du temps, les cercles se sont affaiblis et les rotations se sont bloquées. C'est donc le cercle principal qui a fait l'objet d'une simulation car il est celui qui supporte le plus de charge.



Figure 9. Anneau principal, anneau ceinture et axe porteur
Les cercles sont constitués de lamelles de bois clouées entre elles.



Figure 10. Vue des 5 lamelles principales constituant les cercles

IV.2 Modèle de simulation

Un modèle de poutre a été utilisé pour la simulation numérique. Il reprend les efforts appliqués aux appuis ainsi que la rigidité conférée par le cercle ceinture.

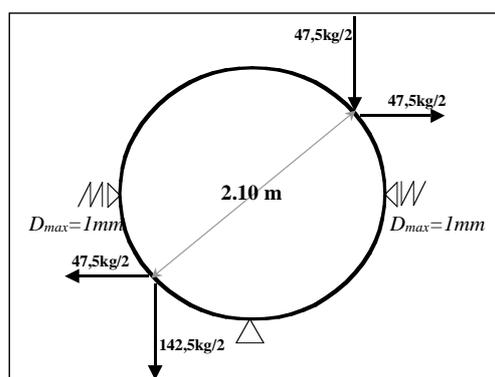


Figure 11. Modélisation de l'anneau principal.

La simulation numérique a consisté ensuite à calculer le fluage pendant 180 années à humidité relative ambiante pilotée, constante pendant certaines périodes, variable pendant d'autres.

IV.3 Résultat de la simulation

Les résultats de la simulation sont la forme du cercle principal, ainsi que les efforts internes dans les lamelles.

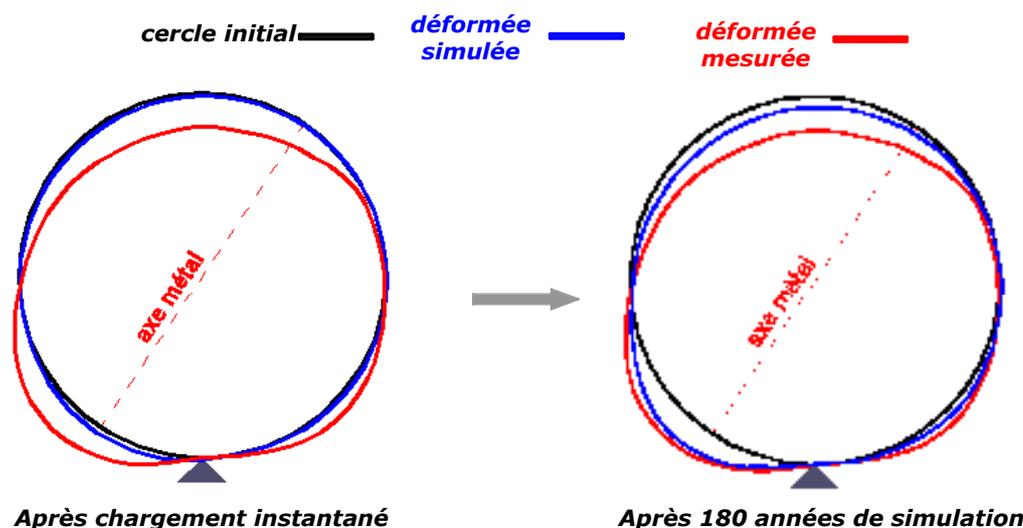


Figure 12. Comparaison de la déformée simulée à la déformée mesurée du cercle principal

On constate d'abord qu'au moment de la mise en charge, le cercle se déforme très peu. Son affaissement est ensuite provoqué par son comportement différé. On remarque aussi que la simulation retrouve bien la forme inférieure mais moins la forme supérieure qui est moins sollicitée. Cela s'explique par les nombreuses hypothèses qui ont été faites sur la nature du bois et de son comportement. L'analyse de l'affaissement au cours du temps est aussi très riche d'enseignement. On voit que le cercle se déforme constamment mais que cette déformation accélère lorsqu'il est placé dans une atmosphère à humidité relative variable et ce d'autant plus que la variation d'humidité est grande. Dès que l'on maintient l'humidité à un taux constant le fluage est pratiquement stoppé. Ceci nous confirme bien qu'il est essentiel de conserver de tels objets dans des conditions climatiques les plus constantes possible pour retarder la venue des désordres géométriques.

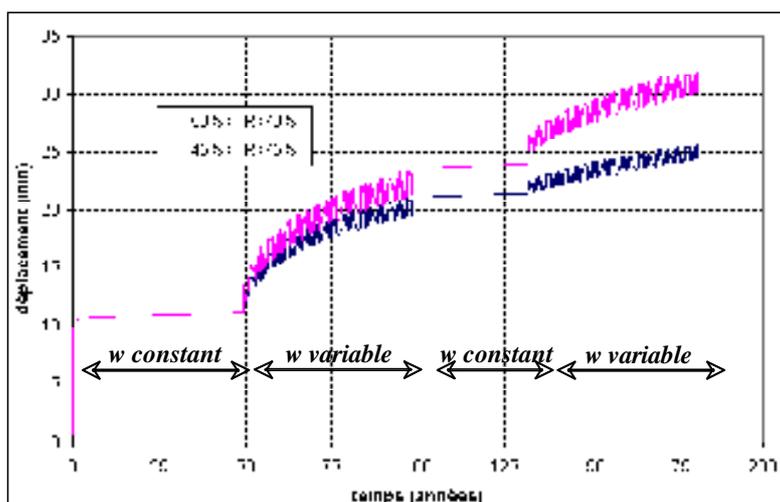


Figure 13. Évolution de la forme du cercle principal au cours du temps.

V Mesure de déformation par corrélation d'images

Disposer d'un code de calcul performant et d'un modèle de comportement représentatif de l'essence de l'objet à étudier ne suffit généralement pas pour évaluer les risques de ruine et les déformations futures de l'objet. Pour mener à bien ces calculs il nous faudrait une connaissance précise de l'état initial de l'objet ainsi que l'historique détaillé de toutes les sollicitations qu'il a pu subir aussi bien en terme mécanique qu'en terme de conditions climatiques thermo-hydriques. Pour des œuvres de plusieurs siècles, cette connaissance est impossible à obtenir, aussi il faut se contenter d'observations et de mesures faites à l'heure actuelle. Même ces mesures ou ces observations sont délicates à réaliser. Au contraire d'autres structures, on ne peut pas intervenir facilement pour y installer des capteurs ou les déplacer pour les examiner. Nous avons donc mis au point une technique d'observation optique qui permet de suivre les déformations de panneaux de bois, typiquement des peintures sur bois, sans avoir à les préparer.

V.1 Stéréo photographie compensée

Typiquement, pour mesurer la géométrie d'un objet plan, on utilise deux points de vue assez éloignés l'un de l'autre comme le fait l'œil humain. Les points de vue retenus sont deux caméras numériques reliées à un ordinateur. Nous disposons de logiciels de corrélation d'images qui comparent les images issues des deux points de vue pour en déduire la forme exacte de l'objet observé. Cette comparaison ne marche bien que si le panneau présente des motifs très fins et très contrastés sur l'ensemble du panneau ce qui n'est jamais le cas pour les peintures sur bois. Comme nous ne pouvons pas dessiner directement de motif sur le panneau nous nous servons d'un vidéoprojecteur qui éclaire le

panneau avec un motif aléatoire adapté à la corrélation d'images. Cependant les panneaux présentent souvent de larges zones sombres à côtés de larges zones claires ce qui restreint la corrélation à l'une ou l'autre zone. Pour ne pas être ainsi limités nous employons le vidéoprojecteur en combinaison avec une troisième caméra qui repère sur le tableau les zones sombres et commande au vidéoprojecteur de les éclairer plus et inversement commande au vidéoprojecteur de réduire l'éclairage des zones claires. Ainsi le tableau renvoie une lumière presque uniforme que nous modulons ensuite pour créer un motif aléatoire favorable à la corrélation d'images.



Figure 14. Dispositif de stéréo-corrélation avec compensation de lumière

V.2 Application au Couronnement d'épine

Notre première application en condition réelle est un tableau, *Le Couronnement d'épine* 1563, se trouvant dans l'église Saint-Didier à Avignon.



Figure 15. Tableau *Le Couronnement d'épine* sous éclairage uniforme

Il est accroché dans le cœur à environ 1,5 m du sol et ne peut être manipulé sans l'installation d'un échafaudage. Notre technique était donc bien adaptée à cette situation. Nous avons pu installer les moyens de vidéo-projection et d'observation à une dizaine de mètres du tableau et presque dans son axe.

L'église étant naturellement sombre nous n'avons pas rencontré de problème dû à un éclairage ambiant trop puissant. La première étape a consisté à éclairer le tableau de manière à ce qu'il renvoie une lumière uniforme.

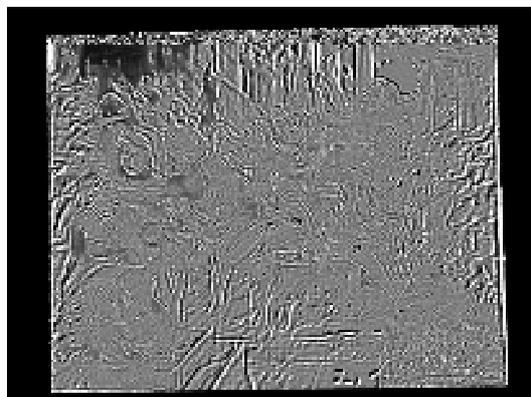


Figure 16. Aspect du tableau avec un éclairage compensé

Ensuite nous l'avons éclairé avec un motif aléatoire.

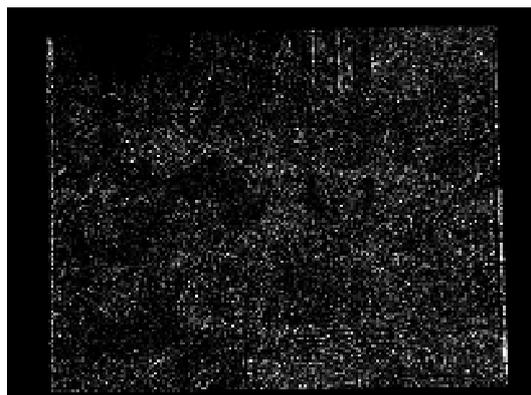


Figure 17. Aspect du tableau renvoyant une image d'un motif aléatoire

Nous prenons alors deux vues stéréographiques et par corrélation d'images nous en déduisons la topographie du tableau. L'examen de la carte du relief nous confirme que le tableau est bien constitué de trois planches horizontales dont on voit le tuilage. À ce stade de l'examen, les conclusions restent limitées quant aux dégradations subies par le tableau et surtout les risques qu'il court dans l'avenir. Si l'on veut estimer plus précisément ces dégradations il faut procéder à plusieurs examens semblables dans des intervalles de temps assez longs (quelques mois) voire faire plusieurs examens dans une journée afin de voir les mouvements du tableau au cours du temps et notamment lors des changements de condition climatique journalier et saisonnier.

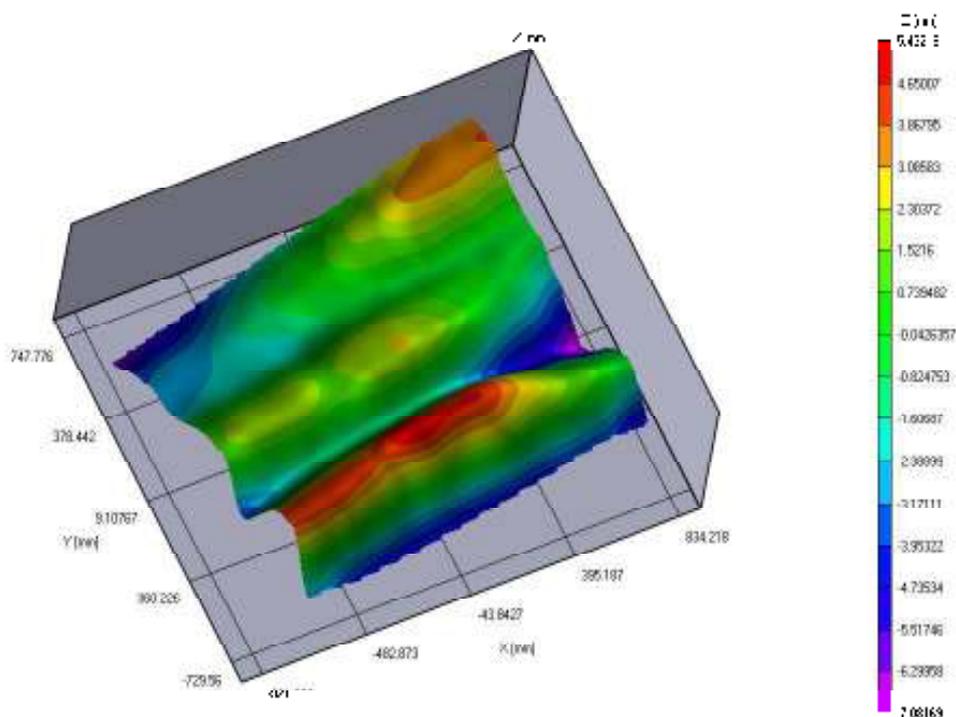


Figure 18. Carte du relief du tableau

VI Conclusions

Nous venons de voir que nous commençons à disposer d'outils pour évaluer l'état et aider à la conservation d'objets en bois du patrimoine culturel. Ce sont des outils de simulation numérique qui prennent en compte non seulement les sollicitations mécaniques mais aussi les conditions thermo-hydriques ambiantes et ce sont des outils d'observation sans contact pour suivre les évolutions géométriques au cours du temps. Ces outils ne sont pas encore suffisamment opérationnels et ils ont besoins d'être alimentés par de nombreux essais de caractérisation sur différentes essences de bois sous différentes conditions thermo-hydro-mécanique et aussi bien sur des temps courts (réponse instantanée) que sur des temps longs (fluage sur plusieurs années).

Bibliographie

- [1] Bou Said, E., « Contribution à la modélisation des effets différés du bois et béton sous conditions climatiques variables. Application aux structures bois-béton », PhD Thesis, INSA de Lyon, France, 2003
- [2] Bou Said, E, Jullien, J.F., « Numerical analysis of timber structures under variable humidity », 2nd International Conference of the European Society of Wood Mechanics, Stockholm, Sweden, 25/05/2003-28/05/2003
- [3] Chassagne, P., Bou Said, E., Jullien, J.F., Galimard, P., « Three dimensional creep model for wood under variable humidity – Numerical analyses at different material scales », Journal of Mechanics of Time-Dependent Materials, vol. 9, n°4, pp. 1-21, 2006.
- [4], Chassagne, P., Vidal-Salle, E., Jullien, J.F., « Modélisation de phénomènes couplés Thermo-Hydro-Mécaniques. Application au séchage du bois », 17^e Congrès Français de Mécanique, Troyes, France, septembre 2005.
- [5] Chassagne, P., « Contribution à la prédiction des conséquences mécaniques des phénomènes thermo-hydriques couplés : application au bois », Ph.D. thesis, INSA Lyon, France, 2006.
- [6] Chassagne, P., Bou Said, E., Ceccotti, Jullien, J.F., Togni, M., «The Contribution of numerical simulation for the diagnosis of the conservation of art objects: Application to Antonio Santucci's armillary sphere of the 16th century ». Journal of Cultural Heritage, à paraître.