Analyse du comportement mécanique de composites bois/plastique en utilisant des mesures en surface par stéréo corrélation d'images numériques

T. BEN MBAREK[a, c, e] , L. ROBERT[b], H. SAMMOUDA[a] , B. CHARRIER[c, e], J-J.ORTEU[b], Françoise HUGOT[d]

a. LETTM, Ecole Supérieure des Sciences et de Technologie de H-Sousse, Rue Lamine ElAbbassi 4011 H-Sousse, Tunisie

b. Université de Toulouse; INSA, UPS, Mines Albi, ISAE; ICA (Institut Clément Ader); Campus Jarlard, F-81013 Albi cedex 09, France
c. Sylvadour, IUT des Pays de l'Adour, 371 rue du Ruisseau BP 201 40004 Mont-de-Marsan, France
d. Université de Limoges, ENSIL, 16 rue Atlantis, Parc ESTER Technopole, BP 6804 87068 Limoges, France
e. IPRA, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Avenue de l'Université 64013 Pau, France
bmbtalel@gmail.com

Résumé :

Dans cette étude, les propriétés mécanique et la microstructure du polyéthylène à haute densité (PEHD)/ fibres de bois (Pin maritime) ont été caractérisés. Le comportement en flexion 4 points de composites bois plastique (WPC) a été étudié en utilisant des mesures de champs par stéréo-corrélation d'image numériques. Ces mesures de champ permettent d'observer la répartition spatiale des déformations et d'analyser la capacité de fissuration. De plus, cette méthode optique, nous a permis d'étudier le comportement endommageable et le degré d'hétérogénéité pour différents pourcentage de bois à l'aide des valeurs de l'écart type spatial du champ de déformation longitudinale en traction et en compression à partir d'un essai de flexion 4 points. Par ailleurs, nous avons pu observer et caractériser la morphologie à l'interface de fibre de bois/PEHD du WPC en utilisant un microscope électronique à balayage (MEB).

Abstract :

In this study, the mechanical properties and microstructure of high density polyethylene (HDPE)/wood fibre (pinus pinaster) composites are investigated. The four-bending behaviour of wood-plastic composite (WPC) is studied using full-field strain measurements by 3D digital image correlation. These field strain measurements allow us to observe the spatial distribution of deformation and analyse the capability of cracking. In addition, optical method allowed us to study the damage behavior and the degree of heterogeneity for several percentages of fiber wood-based WPC are analysed thanks to the spatial standard deviation of the longitudinal strain field. With this technology it was possible to study of the mechanical properties in tensile and compression during four bending test. Furthermore, Scanning Electron Microscope (SEM)is used to characterize the morphology of the wood fiber/ HDPE matrix interface.

Mots-clefs : composites bois / plastiques, flexion 4 points, stéréo-corrélation d'images, endommagement, hétérogénéité, traction sous microscope électronique à balayage.

1. Introduction :

Grace à la nouvelle politique européenne concernant l'environnement et qui consiste à limiter les prélèvements de matières non renouvelables [1,2], les performances des matériaux composites à base de polymères ont connu ces dernières années une croissance rapide due à la modification des polymères avec les fibres naturelles. Aujourd'hui, ces composites sont souvent utilisés pour le bâtiment comme la réalisation de terrasses, plages de piscines ainsi que d'autres aménagements extérieurs durables. Dans cet article, nous étudions les matériaux composites bois/polymère (WPC : Wood Polymer Composite) à température ambiante. Ces composites formés d'une matrice plastique (Polyéthylène à haute densité-PEHD) renforcée de fibres de bois (Pin maritime) [3] sont des matériaux recyclables, renouvelables et peu couteux [4]. Généralement, le moyen classique le plus utilisé pour étudier les comportements mécaniques des composites bois/plastique est l'extensométrie mécanique [3,5] qui donne des mesures performantes puisqu'il ne présente pas de difficultés au cours de la mise en œuvre, et permet d'avoir des mesures en temps réels, une bonne résolution ainsi qu'une précision élevée. Par ailleurs, l'extensométrie mécanique fournit des mesures unidirectionnelles et ponctuelles. On observe également une perturbation des mesures par des efforts de parasites liés à la liaison du capteur avec l'échantillon mis en jeu [6]. Le problème de la mesure des déplacements ou des déformations peut exister dans plusieurs domaines concernant le comportement mécanique des matériaux. En raison de leur caractère non intrusif, l'absence de contact, de leur grande résolution spatiale, de leur sensibilité élevée, les techniques optiques se sont largement imposées ces dernières années. Leurs applications ont été élaborées dans de nombreux domaines tels que la mécanique expérimentale, la science des matériaux, le génie civil, l'électronique, le biomédical etc … Dans le domaine de la caractérisation mécanique expérimentale, les mesures optiques connaissent depuis une trentaine d'année un essor considérable. Par exemple, les techniques de corrélation d'images numériques et de stéréo-corrélation ont potentiellement un très grand intérêt en mécanique expérimentale pour de nombreuses applications [7,8]. A notre connaissance, très peu de travaux de recherche sur l'étude du comportement du WPC [6,9] à partir de mesures de champs ont été publiés. Dans cette étude, les essais de flexion 4 points ont servi de support aux observations par la méthode de stéréo-corrélation d'image. En premier lieu, on se propose d'analyser la capacité de la fissuration par la méthode de stéréo-corrélation. Par la suite, afin d'enrichir la caractérisation du WPC avec 10% et 30% de bois, nous avons étudié le degré d'hétérogénéité ainsi que l'endommagement en déterminant l'écart type spatial du champ de déformation en flexion 4 points. Enfin, pour observer et caractériser la morphologie à l'interface fibre de bois/PEHD, nous effectuerons des essais de traction sous microscope électronique à balayage afin d'analyser les faciès de rupture.

2. Matériel :

Dans notre étude, la matrice polymère du WPC est un polymère polyéthylène haute densité (PEHD). Les caractéristiques des fibres de bois (*pinus pinaster*) sont données dans le tableau 1.

Fibres	Taille	Fraction massique
Longueur moyenne (sans fibres fines)	220 µm	
Epaisseur moyenne (sans fibres fines)	30 µm	
Courbure (sans fibres fines)	4.5 %	
Distribution par taille	Fines < 30 µm	76 %
	30 – 150 µm	9.7 %
	150 -250 µm	6.5 %
	250 - 300 µm	1.5 %
	300-450 µm	2.5 %
	450- 680 µm	1.3 %
	680-1030 µm	1.2 %
	> 1550 µm	1.3 %

Tableau 1 : Caractéristiques morphologiques des fibres de bois.

La fabrication des éprouvettes de traction est réalisée par injection sous presse des granulés bois/PEHD extrudés. Les paramètres d'injection sont les suivants : température en sortie de buse 200°C, pression d'injection 100 bars, de maintien 50 bars, vitesse d'injection 47 mm/s, temps de maintien 6 s, temps de refroidissement 25 s, température moule 50°-70°C et pression moule 50 Bars. Les fibres de bois sont mélangées au PEHD avec l'aide ou non d'un additif permettant une meilleure adhésion des chaînes polymères sur le bois. L'additif est du polyéthylène anhydride maléique (MAPE).

3. Méthode :

Essai de flexion 4 points

Les essais de flexion 4 points ont été réalisés sur la machine électromécanique INSTRON 5800R avec une capacité de 500N. Un ordinateur est lié directement à la machine de flexion et on introduit les caractéristiques géométriques ou encore la vitesse de sollicitation pour chaque essai dans le logiciel de pilotage de la machine. Les dimensions sont les suivantes : 10x4x80 mm3 pour les éprouvettes, une distance l entre appuis supérieurs de 26 mm et une distance L entre les appuis inférieurs de L= 60 mm (figure 46). Ces caractéristiques géométriques sont issues de la norme NF EN ISO 178-1. Les essais sont pilotés par un déplacement de la traverse de 2mm/min. De la même manière les essais de tractions purs, cinq essais sont réalisés à température ambiante pour chaque formulation de WPC.

Stéréo-corrélation d'images

Les éprouvettes sont texturées par projection de peinture (mouchetis blanc sur fond noir) car le contraste d'image dû aux fibres de bois dans la matrice PEHD n'est pas suffisant. Les images sont prises à l'aide d'un banc stéréoscopique constitué de deux caméras CCD Dolphin F-145-B de résolution 1392x1040, 8 bits, munies d'objectifs Nikon 100 mm ouverture 11, à une fréquence d'acquisition 1 images/ 5s (0,2 Hz). Pour le calibrage nous avons utilisé une mire d'étalonnage (9x9, 2 mm) pour une zone d'étude de dimension 26x4 mm2. Le calibrage et le traitement d'images sont faits avec le logiciel Vic-3D™ (Correlated Solutions Inc., 2007) à l'aide d'une mire d'étalonnage (méthode d'optimisation globale, erreur de calibrage de l'ordre de 0,05 pixels). Pour la corrélation et le calcul des déformations et pour tous les essais, les paramètres choisis sont : fenêtre de corrélation de 19x19 pixels, facteur d'échelle de 16,1 pixels/mm d'où résolution spatiale en déplacement de 1,18 mm et résolution spatiale en déformation (taille de jauge) de 1,5 mm. Tous les calculs ont été réalisés avec une fenêtre de corrélation 21x21 pixels, un pas p=5 pixels et un filtre f=5 point. Le facteur d'échelle de 30 pixels/mm d'où une résolution spatiale en déformation de 0,7 mm et une résolution spatiale en déformation de 0,8 mm.

Microscope électronique à balayage

Le MEB est équipé d'un détecteur d'électrons secondaires, d'un détecteur d'électrons rétrodiffusés et nécessitant un vide secondaire dans la chambre d'observation (10-6 mbar). Nous avons effectué des essais de traction sous MEB sur des éprouvettes de dimension 30x4x3mm3 pour visualiser et suivre la propagation de la fissure au cours du temps.

4. Résultats et discussion :

Analyse de la capacité du WPC à se multi-fissurer

L'analyse de la fissuration par la méthode de stéréo-corrélation donne des informations précieuses qui alimentent notre étude. Les essais de flexion 4 points ont servi de support aux observations par la méthode de stéréo-corrélation d'image. La figure 1 permet de visualiser le champ de déformation longitudinale en fonction de l'effort lors de l'essai sur une éprouvette de iWPCf10. La zone observée se situe entre les deux appuis supérieurs. On peut constater que pour les trois premiers champs de déformation (figure 1. a. b. c) plusieurs sites de localisation distant d'un pas assez régulier sont visibles. Ils apparaissent avec des déformations positives pour des niveaux d'effort peu élevés variant de 3 jusqu'à 10 N (σ variant de 1 à 3,5MPa) dans la partie inférieure de la face latérale en traction. Dans la partie supérieure en compression (déformations négatives) on observe une déformation homogène. Cela dit à ces niveaux faibles de

déformation, il faut être prudent car le bruit de mesure se manifeste aussi de cette façon. Il apparaît que l'endommagement favorise l'apparition de plusieurs sites de fissuration. La stéréo-corrélation montre quand même que l'endommagement s'initie plutôt sur la face sollicitée en traction car cela correspond physiquement à une multi-fissuration et donc à des sites de localisation de la déformation. En effet, les fibres de bois subissent une contrainte de traction, ce qui favorise la désorption des chaînes macromoléculaire de PEHD / limite l'accrochage physique. Sur la face en compression, les fibres de bois sont d'autant plus « tenues mécaniquement » que la contrainte de compression est importante, ce qui est finalement une hypothèse raisonnable. Ce mode d'endommagement dit de multi-fissuration apparait bien avant le pic de charge et explique que la déformation globale mesurée diverge de la déformation calculée pour un matériau élastique non endommagé [10]. Par conséquent, on peut avancer l'hypothèse de faibles perturbations pour ajuster le module à l'élasticité sur une partie quasi-linèaire. D'autre part, nous observons qu' à partir d'un effort 11N (σ =3,5MPa) (figure 1.d) et jusqu'au pic de la force 39,5N (σ =12,6MPa) (figure 1. e) le champ de déformation semble toujours discontinue sur la face sollicitée en traction tandis que sur la face sollicitée en compression le champ reste toujours plus homogène.

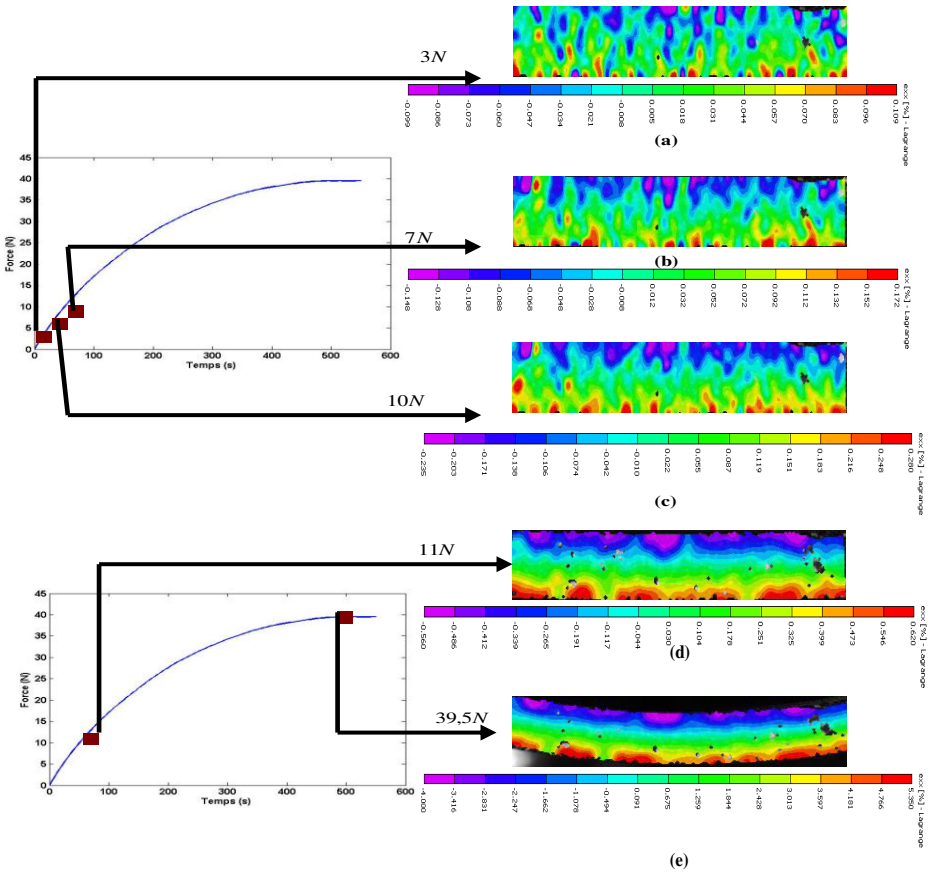


FIG. 1 - Confrontation des champs de déformations locales mesurée par stéréo-corrélation en flexion 4 points sur iWPCf10 avec le niveau d'effort correspondant

Etude de l'hétérogénéité et de l'endommagement en flexion 4 points par stéréo-corrélation

Afin d'enrichir la caractérisation des propriétés mécaniques, nous avons étudié dans cette partie le degré d'hétérogénéité ainsi que l'endommagement pour les formulations iWPCf10 et iaWPCf30 en flexion 4 points. Les figures 2.b et 2.c présentent l'évolution de la valeur moyenne et de l'écart type spatial de la déformation en traction et en compression au cours du temps, sur les lignes L+ et L respectivement, comme présenté dans la figure 2.a. Comme attendu, les niveaux de déformation en traction pour un temps donné sont plus importants qu'en compression. Sur la figure 2.b, la valeur de l'écart type spatial sur la

déformation longitudinale pour 10% de fibre de bois est relativement importante : environ 5% de la valeur moyenne de la déformation en traction. Pour 30% de fibre (figure 2.c), la valeur de l'écart type devient importante (environ 20% en traction). A l'issue de ces résultats, nous pouvons conclure que le degré d'hétérogénéité est proportionnel au pourcentage de bois du composite et que l'endommagement est d'autant plus important que le pourcentage de bois est important.

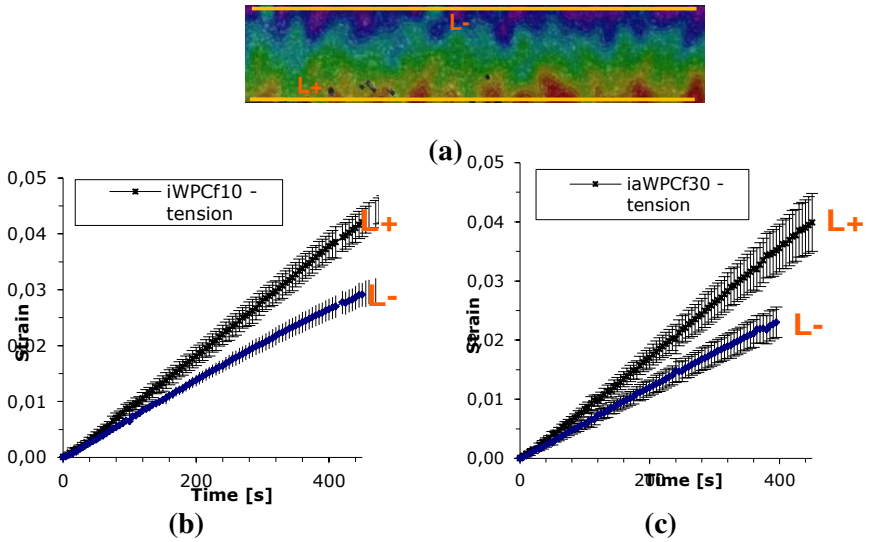


FIG. 2 - Evolution de la valeur moyenne et de l'écart type spatial de la déformation (strain) en flexion 4 points (traction et compression.) au cours du temps (time). b. iWPCf10 et c.iWPCf30

Etude morphologique du WPC

La microstructure du composite bois/PEHD à l'état initial (après injection) observée à l'aide d'un microscope électronique à balayage est présentée dans la figure 3.a, on y reconnait la matrice PEHD (en gris foncé), et les fibres de bois (en gris clair) qui sont nettement visibles, ainsi que des pores produits au cours du procédé. Lorsque l'éprouvette est sollicitée au cours d'un essai de traction sous microscope électronique à balayage, on peut observer la progression de la macrofissure débutant du bord de l'éprouvette (figure 3. b). L'image MEB de la figure 3.c représente la microstructure de l'éprouvette sur un faciès de rupture à l'issue d'un essai de traction uni-axial macroscopique à grandissement x131. Après la rupture, on observe ce qui pourrait être des fibrilles de PEHD qui correspondent à des macromolécules étirées qui relient à de fortes déformations des petits blocs cristallins[11]. Les fibrilles sont classiquement observées dans ce genre de composite à base de PEHD et sont orientées aléatoirement dans les trois directions de l'espace et ont une taille moyenne de l'ordre du micron. De plus, cette microstructure laisse apparaitre des fibres de bois cassées. La présence de ces fibres de bois rompues indique une rupture dans le bois et non à l'interface bois-matrice. Cette observation confirmerait la bonne tenue mécanique de l'interface bois-résine en présence de MAPE selon les observations usuellement rencontrées dans les composites bois-plastiques [12].

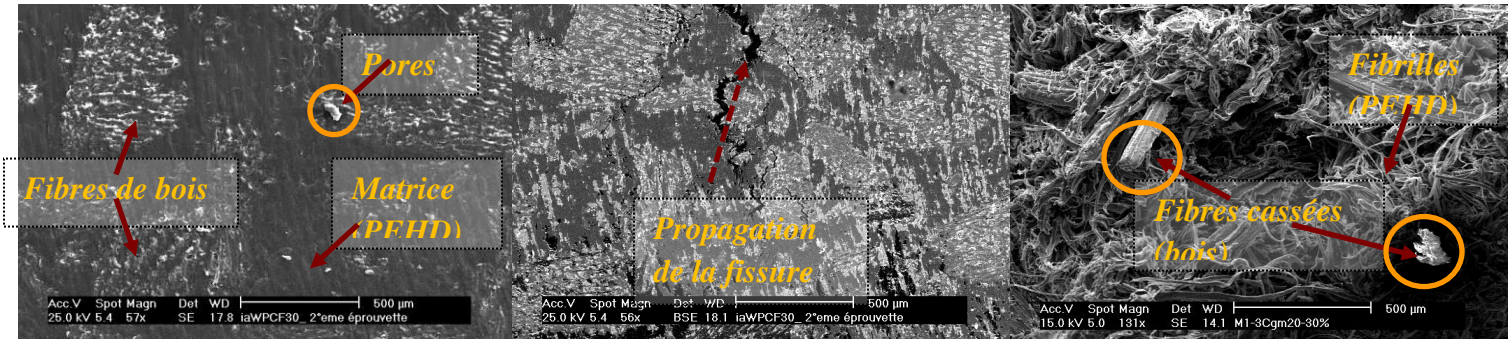


FIG. 3 - a. Microstructure du iaWPCf30 vue au MEB. b. Microstructure du iaWPCf30 au cours d'un essai de traction sous MEB. c. Microstructure du iaWPCf30 sur un faciès de rupture.

5. Conclusion :

Cette étude a détaillé l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus par la méthode de mesure des champs par stéréo-corrélation d'images, pour différentes formulations de composites fibres de bois (Pin maritime)/PEHD, lors d'un essai de flexion 4-points. Les mesures de champ permettent d'observer la répartition spatiale des déformations, d'analyser la capacité de fissuration ainsi que de montrer l'hétérogénéité de la déformation. De plus, ces mesures de champ permettent de montrer l'hétérogénéité de la déformation lors des essais de flexion 4 points. D'autre part, le degré d'hétérogénéité, calculée par l'écart type spatial de la déformation et qui est une manière de caractériser l'endommagement, augmente avec le pourcentage de bois du composite de manière non linéaire : il est d'autant plus important que le pourcentage de bois l'est aussi. Par contre, il semble se manifester plus en traction qu'en compression au cours d'un essai de flexion 4 points car la traction favorise l'ouverture par la création des microfissures interfaciales alors que la compression s'y oppose. Par ailleurs, l'observation sous microscope électronique à balayage confirme la bonne tenue mécanique de l'interface bois-résine à cause de la présence de MAPE selon les observations usuellement rencontrées dans les composites bois-plastiques.

Références :

[1] J. Biagiotti, S. Fiori, L. Torre, M. A. Lopez-Manchado and J. M. Kenny (2004) *Polym. Compos.* **25** 26-36.
[2] B. Wielage, Th. Lampke and H. Utschick (2003) *J. Mater. Process. Techn* **139** 140-146.
[3] F. Hugot. and G. Cazaurang (2008) Mechanical Properties of an Extruded Wood Plastic Composite: Analytical Modeling *Journal of Wood Chemistry and Technology* **28** 283 – 295.
[4] R. Karnani, M. Krishnan and R. Harayan (1997) *Polym. Engng. & Sci.,* **37** 476-48.
[5] F. Michaud and F. Hugot (2007) Mechanical behaviour of Wood Plastic Composite product for decking application *in Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Composite Materials (ICRACM)*, New Delhi, India.
[6] T. Ben M'Barek, L. Robert, F. Hugot, J.-J. Orteu (2011) Mechanical behavior of wood-plastic composites investigated by 3D digital image correlation Journal of Composite Materials **45**(26) 2751-2764.
[7] M. Mulle, J. N. Périé, L. Robert, F. Collomb, Y. H. Grunevald (2004) Mesures de champs par stéréocorrélation sur structures composites instrumentées par capteurs à fibre optique à réseaux de 142 Bragg : comparaison et validation des mesures, *Instrumentation, Mesure, Métrologie* **4** 167-192.
[8] L. Robert, F. Nazaret, T. Cutard and J. –J. Orteu (2007) Use of 3-D Digital Image Correlation to characterize the mechanical behavior of a Fiber Reinforced Refractory Castable. *Experimental Mechanics* **47** 761-773.
[9] A. Godara, D. Raabe, I. Bergmann, R. Putz, U. Muller (2009) Influence of additives on the global mechanical behavior and the microscopic strain localization in wood reinforced polypropylene composites during tensile deformation investigated using digital image correlation *Composites Science and Technology* **69** (2) 139-146.
[10] T. B. Mbarek (2011) Utilisation d'une méthode optique sans contact pour décrire le comportement mécanique des composites bois/plastique WPC. *Thèse de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour*.
[11] R. Arieby (2007) Carcatérisation mécanique et modélistation thermodynamique du comportement anisitrope du polyethylene à haute densité. *Thèse doctorat de l'Institut National Polytechnique De Lorraine, Nancy-Université*.
[12] D. J. Gardner, M. P. Wolcott, L. Wilson, Y. Huang, M. Carpenter (1995) Our understanding of wood surface chemistry *Proceeding of Wood Adhesive*, Ed. by A.W. Christansen and A.H. Conner, *Forest Products Society*, **29** 7296.