



HAL
open science

Recherches sur les bois bakélisés. - I. Propriétés physiques et mécaniques. - II. Etude microscopique

Jean Campredon, René Rol

► To cite this version:

Jean Campredon, René Rol. Recherches sur les bois bakélisés. - I. Propriétés physiques et mécaniques. - II. Etude microscopique. Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences Forestières, 1931, 4 (1), pp.083-107. hal-03483830

HAL Id: hal-03483830

<https://hal.science/hal-03483830>

Submitted on 16 Dec 2021

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

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

RECHERCHES SUR LES BOIS BAKÉLISÉS

I. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

par J. CAMPREDON

INSPECTEUR ADJOINT DES EAUX ET FORÊTS
ASSISTANT A LA DEUXIÈME SECTION DE LA STATION DE RECHERCHES
ET EXPÉRIENCES FORESTIÈRES

II. ÉTUDE MICROSCOPIQUE

par R. ROL

INSPECTEUR DES EAUX ET FORÊTS
ASSISTANT A LA DEUXIÈME SECTION DE LA STATION DE RECHERCHES
ET EXPÉRIENCES FORESTIÈRES

RECHERCHES SUR LES BOIS BAKÉLISÉS

I. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

Il n'est pas nécessaire de rappeler ici les multiples usages dont est susceptible le bois. Ce fut de tous temps une des matières premières les plus importantes et les plus employées et, à l'heure actuelle, c'est par plus d'un milliard et demi de mètres cubes que se chiffre la quantité de bois exploitée dans le monde. Cette quantité énorme est utilisée de la manière la plus diverse, chaque essence ayant ses qualités propres, qui la rendent plus ou moins apte à telle ou telle utilisation.

Mais, quelle que soit l'essence employée et l'usage auquel elle est destinée, on sait aussi que, résultant de l'élaboration de cellules vivantes, hétérogène à la fois par la diversité de ses éléments et par les différences de porosité et d'épaisseur des accroissements successifs qui le constituent, le bois est un matériau dont les propriétés sont essentiellement variables, et dont, à côté de qualités indiscutables, il faut bien reconnaître les imperfections.

A côté des défauts provenant des anomalies de structure et que l'on peut éliminer par un choix convenable des échantillons, nous citerons les reproches les plus importants que l'on peut faire au bois mis en œuvre :

a) Il varie dans ses dimensions sous l'influence de l'humidité, ce qui entraîne les phénomènes de retrait et de gonflement, la fente, la désarticulation des assemblages;

b) Il s'altère, soit par les attaques de parasites (champignons et insectes), soit par la fermentation de matières contenues dans certains de ses tissus.

Il y a très longtemps qu'on cherche à remédier à cet état de choses.

Le vieillissement naturel, qui provoque un séchage physique et une modification chimique de certains constituants, par oxydation, a été la méthode la plus anciennement employée, et reste encore la meilleure au point de vue des résultats obtenus. Malheureusement elle exige du temps, de vastes emplacements, et par suite est très onéreuse puisqu'elle oblige à l'immobilisation de capitaux importants. On a donc cherché à l'accélérer par des méthodes artificielles : séchage à l'étuve, sénilisation par électrisation, vieillissement par chauffage et dessevage, vieillissement par l'ozone, etc..., méthodes qui ont donné, dans l'ensemble, des résultats satisfaisants. Pour se mettre à l'abri des altérations, on a eu recours à des procédés d'injection de produits antiseptiques (sulfate de cuivre, bichlorure de mercure, créosote, etc...) qui sont aujourd'hui communément employés.

L'ensemble des procédés que nous venons d'indiquer assurent ainsi au bois une certaine stabilité dans ses dimensions, sa forme, son volume, et une résistance aux altérations, qui sont suffisantes dans la plupart des cas de la pratique.

Mais à mesure que se sont développés les progrès de la technique, les usages du bois se multipliaient. Il était donc naturel qu'en cherchant à augmenter ses qualités propres, on se préoccupât de trouver des procédés de traitement susceptibles de lui donner des qualités nouvelles. C'est surtout à propos de certains emplois spéciaux (industrie chimique et industrie électrique) que les chercheurs furent amenés à essayer des procédés d'imprégnation très divers. Pour les bois utilisés dans l'industrie électrique, par exemple, qui devaient être surtout isolants et indéformables, on utilisa la paraffine, l'huile de lin, l'huile minérale, les substances isolantes tirées des schistes bitumineux, telles que l'ozokérite, etc... Pour protéger les bois employés dans l'industrie chimique (bacs, bobines, etc...) qui devaient être inattaquables par certains agents chimiques, on s'adressa à la paraffine, aux huiles de goudron, au soufre, etc...

Lorsque les résines synthétiques furent produites d'une façon industrielle, on envisagea également leur emploi pour l'imprégnation des bois destinés à l'industrie électrique. C'est de ce

traitement d'imprégnation des bois aux résines synthétiques, des résultats qu'il a donnés, des modifications qui en sont résultées dans les propriétés des bois traités, que nous allons maintenant nous occuper plus spécialement.

L'imprégnation des bois aux résines synthétiques.

Les résines synthétiques sont obtenues en général à partir des produits de distillation de la houille. Nous prendrons comme type la bakélite (du nom de son inventeur, le D^r Baekeland) qui est une des résines les plus employées dans l'imprégnation des bois.

La bakélite. — La bakélite est généralement fabriquée par combinaison du crésol et de la formaldéhyde en présence d'un catalyseur. La condensation a lieu dans le vide. On déshydrate le produit par chauffage et l'on obtient un premier produit de condensation, dit bakélite à l'état A. Transvasé dans des moules, il finit par se solidifier au bout d'un temps plus ou moins long en une masse résineuse. A l'état A, la bakélite peut être dissoute dans certains solvants (alcool, huile, etc.).

Dans ce premier état, la bakélite ne constitue pas un corps stable. Par un simple vieillissement, elle se transforme peu à peu passant par un état intermédiaire, bakélite à l'état B, en un produit final, bakélite à l'état C. De même, si l'on fournit à la bakélite à l'état A une certaine quantité d'énergie, par exemple sous forme de lumière, ou mieux de chaleur, on active sa transformation et on obtient rapidement l'état C.

La bakélite à l'état C jouit des propriétés remarquables suivantes : très dure, non rayée par le saphir, non hygroscopique, mauvais conducteur de la chaleur, insoluble dans l'alcool et tous les solvants connus, c'est un corps très stable, présentant une grande résistance aux agents chimiques, acides ou basiques. C'est enfin un diélectrique de premier ordre, dont la rigidité n'est dépassée que par celle du mica ou du quartz fondu, à grande résistivité superficielle, à pouvoir inducteur spécifique voisin de 8. Pratiquement, et pour ne pas aboutir à des prix

de revient exagérés, on se contente de produire des bakélites légèrement impures, capables de résister dans une certaine mesure à tel produit déterminé.

Cet ensemble de propriétés suffit à montrer l'intérêt qu'il y avait à essayer d'imprégner les bois aux résines synthétiques.

La bakélisation des bois. — Le problème de la réalisation industrielle de cette imprégnation n'est résolu d'une manière satisfaisante que depuis quelques années.

La bakélite à l'état A pouvant être dissoute dans certains solvants, c'est à l'état de solution qu'on l'emploiera pour la faire pénétrer dans les tissus du bois. L'imprégnation se fait dans de vastes autoclaves calorifugés, reliés par des systèmes de canalisations soit avec les pompes à vide, soit avec les cuves contenant la dissolution. Le bois, introduit dans ces enceintes, est soumis, sous certaines conditions de température et de pression, à l'action de la dissolution qui pénètre dans les tissus; la dissolution en excès est, au bout d'un certain temps, renvoyée aux cuves; le solvant est extrait. Dans une seconde phase du cycle opératoire, qui a eu lieu dans les mêmes autoclaves, le bois est soumis à l'action de la chaleur qui polymérise la bakélite à l'intérieur même du bois et la fait passer de l'état A et à l'état C.

L'ensemble de ces opérations met en œuvre un appareillage important grâce auquel le bois bakélinisé est actuellement produit en quantités industrielles.

Énonçons, pour terminer cet aperçu, les propriétés dont se trouvent jouir les bois imprégnés aux résines synthétiques.

On part de bois secs à l'air : les cycles alternés de vide et d'é-tuvage auxquels ils sont soumis ont pour premier effet d'achever leur vieillissement; l'imprégnation de résine les rend peu ou pas hygroscopiques, et par suite les phénomènes de gonflement ou de retrait qu'ils peuvent présenter sont réduits au minimum. Le traitement a, au surplus, pour effet d'aseptiser les bois d'une façon complète, ce qui leur enlève tout danger d'altération par attaque de parasites. Enfin, comme la résine qui a pénétré dans les tissus s'est cristallisée, a été polymérisée dans l'intérieur même du bois et se trouve dans l'impossibilité d'en sortir, à l'inverse de ce qui se passe dans d'autres imprégnations (huiles,

paraffines, etc.), il est permis d'escompter une durée indéfinie des effets de l'imprégnation.

Mais le grand intérêt des bois imprégnés tient surtout aux propriétés spéciales suivantes : ils possèdent en premier lieu de très hautes qualités isolantes ; une tige de 30 centimètres de long convenablement traitée peut, par exemple, tenir dans l'air, sans échauffement, une différence de potentiel de 100.000 volts entre ses extrémités, à la fréquence industrielle. Ils sont très résistants aux bains acides ou basiques mis en œuvre dans certaines fabrications chimiques. Enfin, leurs qualités mécaniques sont notablement modifiées. L'étude de ces modifications va faire l'objet de la suite de notre étude.

Essais mécaniques.

Nous avons effectué, dans le courant de l'année 1930, au laboratoire d'essais des bois de l'École Nationale des Eaux et Forêts, une série d'essais de résistance mécanique, dont le but était de comparer entre eux des échantillons de bois naturels et de bois bakélisés, et de tirer les conclusions d'une telle étude en vue de l'utilisation rationnelle de ces bois.

Mode opératoire. — On sait que, pour une essence déterminée, les propriétés physiques et mécaniques des bois varient dans d'assez notables proportions, et que par suite, les chiffres que l'on obtient à la suite d'essais dépendent de l'individu choisi et, pour le même individu, de la place de prélèvement de l'éprouvette d'essai.

Il convenait donc, pour pouvoir comparer les résultats obtenus sur des bois naturels et des bois bakélisés, de grouper les éprouvettes par paires dont les deux éléments seraient aussi semblables que possible, et dont l'un serait essayé à l'état naturel, l'autre après imprégnation. Le problème a été résolu de la manière indiquée par la figure 1. Trois séries d'éprouvettes L, M, P, ont été prélevées dans un plateau de cœur, sain et régulier, à fibres rectilignes et dans chaque série les éprouvettes provenant de la partie gauche du plateau ont été bakélisées, celles de la partie

droite étant conservées dans l'état naturel. Étant donné par conséquent une paire quelconque d'éprouvettes L_n , LB_n , elles correspondent toutes deux au même arbre, aux mêmes couches annuelles, à la même hauteur dans l'arbre. Elles sont donc aussi comparables que possible.

Nos essais ont été conduits suivant la méthode préconisée par M. le conservateur des Eaux et Forêts Monnin, du Service des Recherches de l'Aéronautique (1).

Les résultats ci-dessous correspondent à une humidité de 15 % pour les bois naturels. Ils indiquent des moyennes.

Les bois essayés étaient le hêtre et le charme, les plus employés dans la pratique de la bakélisation.

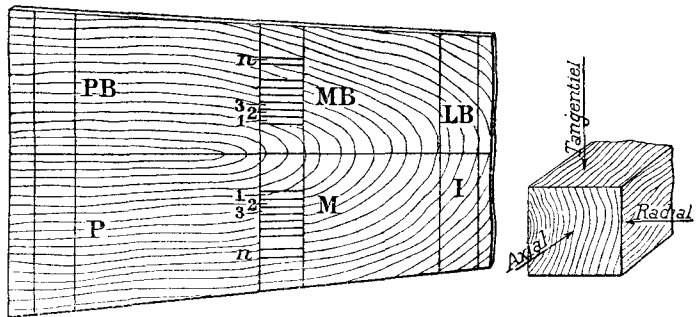


Fig. 1 et 2 (2)

Essais à la compression. — Ils ont été effectués à la machine Amsler, sur éprouvettes de $2 \times 2 \times 3$ centimètres. Le sens de de l'effort a été pris axial, radial ou tangentiel, par rapport aux couches annuelles (fig. 2), ces derniers efforts étant ceux auxquels sont en général soumis les bois bakélisés dans les applications industrielles.

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus. Une première colonne indique l'origine des échantillons (prélèvement dans les séries L, M, P) et, pour les bois bakélisés correspondants,

(1) Voir *Bulletin de la Section technique de l'Aéronautique militaire*. Fasc. 29 et 30, juin-juillet 1919.

(2) Les clichés des figures 1 à 7 nous ont été obligeamment communiqués par la revue *Le Génie Civil*.

la qualité de bakélite employée est indiquée par un numéro (11, 12, 13).

Les colonnes suivantes indiquent les densités et les charges de rupture. Au sujet de la charge C, correspondant à un effort axial, qui permet seul une comparaison précise, nous avons calculé les cotes de qualité :

$\frac{C}{100 D}$, cote de qualité statique, rapportant la résistance à l'unité de poids;

$\frac{C}{100 D^2}$, cote de qualité spécifique, à peu près constante pour une essence donnée, et par suite caractéristique de cette essence.

TABLEAU I.

INDICATION DES ÉCHANTILLONS	DENSITÉ à 15% D	CHARGE EN KILOS PAR CM ² à la rupture suivant effort			COTES de compression axiale	
		Axial C	Radial C'	Tan- gentiel C''	C/100 D	C/100 D ²
<i>1^o Hétre.</i>						
Naturel, Série L	0,630	600	150	100	9.5	15
Bakéllisé, Qualité 13 H	0,895	820	180	125	9.2	10
Naturel, Série M	0,622	475	100	90	7.6	13
Bakéllisé, Qualité 12 H	0,956	850	195	140	8.9	9
Naturel, Série P	0,600	520	140	85	8.7	14
Bakéllisé, Qualité 11 H	0,790	1.200	350	390	15.2	19
<i>2^o Charme.</i>						
Naturel, Série L	0,785	635	275	150	8.1	10
Bakéllisé, Qualité 13 C	0,940	1.050	390	240	11.2	12
Naturel, Série M	0,785	600			7.6	9
Bakéllisé, Qualité 12 C	1,007	1.250			12.4	12
Naturel, Série P	0,743	720	210	125	9.7	13
Bakéllisé, Qualité 11 C	0,765	1.150	360	325	15.1	19

L'examen du tableau ci-dessus montre que :

1^o La charge de rupture a été considérablement augmentée, pour toutes les qualités de bakélites et les trois sens d'applica-

tion des efforts. En compression axiale, elle a été multipliée en moyenne par 2, en compression radiale et tangentielle par 1,5 à 3.

2° La cote de qualité statique dépend de la qualité de la bakélisation : elle est peu influencée par les bakélisations 12 et 13; elle est presque doublée par la bakélisation 11, et cela aussi bien pour le charme que pour le hêtre;

3° La cote de qualité spécifique a suivi à peu près les mêmes variations, avec cependant une tendance à la diminution chez le hêtre bakérisé, à l'augmentation chez le charme. On voit encore la supériorité de la bakélisation 11 C à ce point de vue.

A titre de comparaison, indiquons que C/100 D varie, pour les bois feuillus connus, entre 5 et 10, et C/100 D² entre 8 et 12.

Une deuxième série d'essais à la compression a porté sur des échantillons de bois comprimés et bakérisés, ainsi que sur des bois bakérisés contreplaqués. Le tableau II en indique les résultats. A titre de comparaison, nous avons ajouté des chiffres moyens correspondant à des essais analogues sur bois naturels. Nous ne possédons pas de chiffres concernant des bois comprimés non bakérisés qui pourraient déceler l'influence de la bakélisation sur de tels échantillons.

TABLEAU II.

INDICATION DES ÉCHANTILLONS	DENSITÉ D	CHARGE EN KILOS PAR CM ² suivant effort			COTE de qualité sta- tique C/100 D	COTE de qualité spé- cifique C/100 D ²
		Axial	C	Radial		
<i>1° Hêtre.</i>						
Naturel	0.620	550	120	90	8.5	14
Comprimé bakérisé 21 H. . . .	0.985	1.150	680	500	12	12
— — 22 H. . . .	1.195	1.100	240	240	9.5	7.7
— — 23 H. . . .	1.118	930	200	210	8.5	6.7
Bakérisé contreplaqué 51 H. .	1.100	1.500	1.000	1.500	13.5	12
<i>2° Charme.</i>						
Naturel	0.780	650	250	140	8.5	11
Comprimé bakérisé 21 C	0.956	1.290	600	600	13.5	14
— — 22 C	1.260	1.190			9.5	7.5
— — 23 C	1.175	1.650	360	300	14	12

Par la compression et la bakélisation combinées, on obtient donc des échantillons extrêmement résistants dans les trois sens d'efforts. Si l'on considère que, dans de nombreuses applications, les bois utilisés sont soumis à des efforts radiaux ou tangentiels, on voit l'intérêt que présente le traitement.

Essais à la flexion. — Effectués à la machine Amsler 10 T, sur éprouvettes de 2 × 2 centimètres d'équarrissage, 24 centimètres entre appuis, charge exercée au milieu de la portée.

Le tableau III indique le module de résistance à la rupture $F = \frac{3 P L}{2 b h^2}$. Nous avons indiqué également, suivant la méthode Monnin :

a) Le nombre $F' = \frac{3 P L}{2 b h^{10/6}}$, caractérisant la résistance à la flexion, nombre à peu près indépendant de l'équarrissage des éprouvettes;

TABLEAU III.

INDICATION DES ÉCHANTILLONS	DENSITÉ	CHARGE totale à la rupture kgs	RÉSISTANCE à la flexion		COTE de flexion F/100 D	COTE de ténacité F'/C
			F kgs par cm ²	F'		
<i>1° Hêtre.</i>						
Naturel, Série L	0,630	245	1.100	1.390	22	2,3
Bakéllisé, Qualité 13 H	0,895	300	1.350	1.700	29	2,1
Naturel, Série M	0,622	221	1.000	1.250	20	2,6
Bakéllisé, Qualité 12 H	0,956	320	1.440	1.800	19	2,1
Naturel, Série P	0,600	250	1.130	1.400	23	2,7
Bakéllisé, Qualité 11 H	0,790	360	1.620	2.050	26	1,7
<i>2° Chatme.</i>						
Naturel, Série L	0,875	300	1.350	1.700	22	2,7
Bakéllisé, Qualité 13 C	0,940	400	1.800	2.260	24	2,2
Naturel, Série M	0,875	290	1.300	1.650	21	2,7
Bakéllisé, Qualité 12 C	1,007	400	1.800	2.260	23	1,8
Naturel, Série P	0,743	300	1.350	1.700	23	2,3
Bakéllisé, Qualité 11 C	0,765	420	1.890	2.340	30	2,0

b) La cote de flexion $F'/100 D$, ou flexion rapportée à l'unité de masse.

c) Le rapport $\frac{F' \text{ (flexion)}}{C \text{ (compression axiale)}}$, dit cote de ténacité, permettant de comparer l'aptitude à la flexion de plusieurs échantillons, leur résistances à la compression étant égales.

La bakélisation a eu pour effet de multiplier la résistance à la flexion par un coefficient voisin de 1,5, à peu près le même pour les trois qualités de bakélite. La cote de flexion est peu modifiée; la cote de ténacité est diminuée, la résistance à la flexion n'ayant pas été augmentée dans d'aussi grandes proportions que la résistance à la compression.

A titre de comparaison, indiquons que la cote de flexion varie entre 10 et 25, la cote de ténacité entre 2 et 4, pour la plupart des essences connues.

Comme pour les essais à la compression, nous avons fait une série d'essais à la flexion dans les mêmes conditions que ci-dessus sur des échantillons de bois bakélisés, comprimés et sur des contreplaqués bakélisés. Nos résultats sont indiqués au tableau suivant, tableau IV. A titre de comparaison nous avons indiqué

TABLEAU IV.

INDICATION DES ÉCHANTILLONS	DENSITÉ	CHARGE totale à la rupture kgs	RÉSISTANCE à la flexion		COTE de flexion $F'/100 D$	COTE de ténacité F'/C
			F kgs par cm^2	F'		
<i>1° Hêtre.</i>						
Naturel	0,620	240	1.080	1.350	22	2,4
Comprimé bakélisé 21 H.	0,985	300	1.350	1.700	17	1,5
— — 22 H.	1,195	370	1.670	2.100	17,5	1,9
— — 23 H.	1,118	365	1.640	2.070	19	2,2
Bakélisé contreplaqué 51 H.	"	410	1.850	2.300	"	1,5
<i>2° Charme.</i>						
Naturel	0,780	300	1.350	1.700	21	2,6
Comprimé bakélisé 21 C	0,956	375	1.690	2.120	22	1,7
— — 22 C	1,260	440	1.975	2.500	20	2,1
— — 23 C	1,175	475	2.140	2.700	23	1,6

les chiffres qui correspondraient à des bois moyens. Nous n'avons aucune indication en ce qui concerne des bois simplement comprimés, ou simplement contreplaqués, de sorte que dans les chiffres ci-dessous nous ne pouvons faire la part de la bakélisation.

Essais au choc. — Les essais au choc ont été effectués sur éprouvettes de 2 × 2 centimètres d'équarrissage, 24 centimètres entre appuis, au mouton pendule de 10 kgm de la Section technique de l'Aéronautique. Nous avons indiqué dans le tableau suivant :

1° Le travail de rupture W moyen;

2° Le coefficient de résilience k , calculé suivant la formule indiquée par M. Monnin, $W = k bh \frac{10}{6}$, formule empirique qui détermine assez bien le travail nécessaire à la rupture suivant l'équarrissage;

3° Le quotient $\frac{k}{D^2}$ rapport du coefficient de résilience au

TABLEAU V.

INDICATION DES ÉCHANTILLONS	DENSITÉS	TRAVAIL de rupture Wkgs	COEFFICIENT de résilience K	COTE dynamique k/D ²
<i>1° Hêtre.</i>				
Naturel, Série L.	0,630	2,65	0,42	1
Bakélisté, 13 H.	0,895	2,65	0,42	0,5
Naturel, Série M.	0,622	2,65	0,42	1,1
Bakélisté, 12 H.	0,956	2,50	0,39	0,4
Naturel, Série P.	0,600	2,60	0,41	1,1
Bakélisté, 11 H.	0,790	2,30	0,36	0,6
<i>2° Charme.</i>				
Naturel, Série L.	0,785	3	0,47	0,8
Bakélisté, 13 C.	0,940	3,75	0,59	0,7
Naturel, Série M.	0,785	3,80	0,60	1
Bakélisté, 12 C.	1,007	5	0,78	0,8
Naturel, Série P.	0,743	5	0,78	0,9
Bakélisté, 11 C.	0,765	3,25	0,51	0,9

carré de la densité, dit *cote dynamique*, et caractérisant la résilience de l'échantillon relativement à son poids.

Les bois bakélisés se comportent donc à peu près de la même manière que les bois naturels. Le coefficient de résilience reste en moyenne inchangé; la cote dynamique est légèrement diminuée. Si, à titre de comparaison, on considère les catégories de M. Monnin, d'après la cote dynamique, on constate que le hêtre, catégorie moyenne à l'état naturel (0,8 à 1,2) passe dans la catégorie « cassant » (0,2 à 0,8), le charme, bakélisé ou non, reste dans la catégorie moyenne.

Essais de dureté. — Malgré les inconvénients que présente la bille de Janka pour les essais de dureté relatifs au bois, c'est la méthode que nous avons employée, d'une part parce qu'en ce qui concerne les bois imprégnés, on a affaire à un matériau comparable, au point de vue de la dureté, à un métal; d'autre part, parce que les essais de réception industriels sur ces bois se font en général à la bille.

Le tableau VI indique les chiffres moyens obtenus (charge en kilos nécessaire pour enfoncer dans le bois, jusqu'à son plan diamétral, une bille d'acier de 1 centimètre carré de section droite).

TABLEAU VI.

INDICATION DES ÉCHANTILLONS	DURETÉ JANKA		
	En bout kgs	Radiale kgs	Tangentielle kgs
<i>Hêtre.</i>			
Naturel.	600	500	600
Bakélisé, Qualité 11 H.	2.500	1.500	1.500
— — 12 H.	900	900	750
Comprimé bakélisé 22 H.	1.000	1.000	1.000
Contreplaqué bakélisé 51 H.	3.500	1.200	1.200
<i>Charme.</i>			
Naturel.	690	620	650
Bakélisé, Qualité 11 C.	1.800	1.250	1.400
— — 12 C.	900	900	900
Comprimé bakélisé 22 C.	900	850	1.000

La bakélisation influe d'une manière considérable sur la dureté des bois. Pour les qualités II H et II C on obtient des duretés trois ou quatre fois supérieures à celles des bois naturels. Si l'on fait appel aux contreplaqués bakélisés, on obtient des duretés égales à environ six fois les duretés des bois naturels correspondants.

Autres essais.

Nous avons effectué, à côté de ces essais comparatifs, un certain nombre d'essais sur pièces réelles (tiges, bielles), dans le but de rechercher une réalisation pratique de pièces travaillant à la traction. Il s'agissait, d'une part, de chiffrer la résistance par centimètre carré à la traction que l'on pouvait atteindre; d'autre part, de se rendre compte du mode d'attache le plus favorable pour la fixation des pièces.

On sait, en effet, que pour les bois, c'est le mode de fixation de la pièce dans les mâchoires de la machine d'essais qui conditionne en général l'expérience. Si l'on place par exemple la pièce à essayer entre les mâchoires, ou mordaches, de la machine, il est nécessaire de renforcer les extrémités enserrées, pour éviter leur écrasement. Nous avons utilisé les dispositifs suivants :

a) *Fixation par broches ou clavettes.* — Ces broches sont logées dans un trou percé vers l'extrémité de la pièce (fig. 3 à 5).

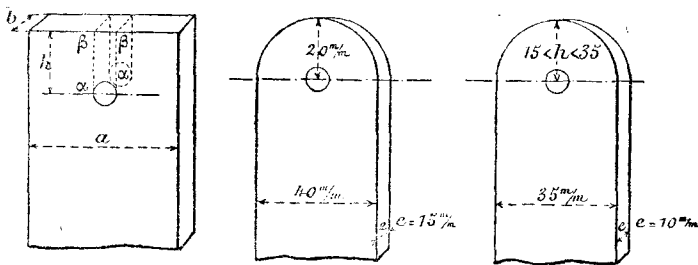


Fig. 3 à 5. — Formes des éprouvettes à leurs extrémités.

En réalité, la broche comprime les bords du trou, et une action de cisaillement s'exerce suivant la surface $\alpha \beta$ (fig. 3). Si

t est la résistance au cisaillement par centimètres carré, T la résistance à la traction, pour éliminer le danger de rupture par cisaillement il faudrait que l'on ait, en négligeant la compression sur les bords du trou :

$$2 hbt > abT, \quad h > \frac{aT}{2t}.$$

Comme $\frac{T}{t}$ est égal à 10 environ, cela conduirait à placer le trou de fixation à une distance du bord supérieure à $5a$, ce qui n'était pas réalisable avec les pièces que nous soumettions aux essais. C'est donc en réalité une résistance au cisaillement que nous avons mesurée.

Une première série d'essais sur bielles de bois bakérisé contreplaqué, fortes épaisseurs (fig. 4), nous a donné une rupture par cisaillement sous un effort de 70 à 100 kilos par centimètre carré. Une deuxième série sur bielles en contreplaqué d'éléments de faibles épaisseurs (fig. 5) a donné, à la rupture, une résistance de 150 à 200 kilos par centimètre carré de surface cisillée. Remarquons que la résistance au cisaillement du hêtre naturel est d'environ 100 kilos.

b) *Fixation par filetage des tiges* (fig. 6). — Les tiges, de 50 millimètres de diamètre, étaient filetées aux extrémités et engagées dans des écrous fixés aux mâchoires de la machine d'essais.

Nous avons obtenu :

1° Dans le cas de pièces à fibres à peu près rectilignes et parallèles à l'axe (bois naturel ou bakérisé), une rupture par cisaillement suivant la surface cylindrique $\alpha\beta$, et arrachement du filetage;

2° Dans le cas de fibres obliques par rapport à l'axe, une rupture par cisaillement dans un plan parallèle aux fibres.

Dans les deux cas, la résistance au cisaillement à la rupture, par centimètre carré, était de 80 à 120 kilos.

En nous supposant placés dans le premier cas, le plus favorable, pour éviter la rupture par cisaillement le long du filetage, il faudrait que :

$$\pi dht > \frac{\pi d^2}{4} T,$$

où t et T sont les résistances à la rupture au cisaillement et à la traction. Cela conduirait à prendre pour hauteur du filetage $h > 2,5 d$: or, pratiquement, on ne peut guère prendre que $h = 1,5 d$.

Ce mode de fixation ne permet donc pas d'éliminer la rupture par cisaillement parallèle aux fibres.

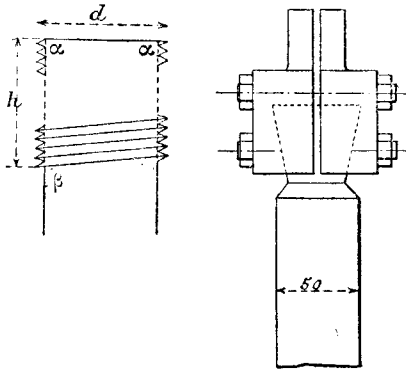


Fig. 6 et 7.

c) *Fixation par portée conique* (fig. 7). — Les tiges de 50 millimètres de diamètre, terminées par des portées tronconiques, étaient fortement serrées par boulons dans des attaches en deux pièces. Nous avons obtenu :

1° Dans le cas de pièces en hêtre naturel, un glissement continu du bois dans le cône d'attache jusqu'à sortie complète de l'extrémité enserrée ou rupture du cône par cisaillement;

2° Dans le cas de pièces en bois bakélinisé-contreplaqué (feuilles de 2 millimètres), une immobilisation de la tige dans ses cônes d'attache, grâce à sa haute résistance à la compression, jusqu'à rupture de la tige par traction, par rupture des fibres. La charge de rupture à la traction était, dans ces conditions, de 700 à 850 kilos par centimètre carré.

On voit qu'il est ainsi possible de réaliser et de fixer des tiges de 50 millimètres de diamètre capables de résister à un effort de traction voisin de 16 tonnes.

Conclusions.

L'ensemble des résultats comparatifs que nous venons d'exposer permet de formuler quelques conclusions.

La grosse amélioration apportée par la bakélisation consiste en un accroissement de la résistance à la compression, aussi bien sous efforts radiaux ou tangentiels que sous efforts axiaux; il y a en même temps, augmentation sensible de la *cote de qualité statique*, ou tout au moins maintien de cette cote à un chiffre égal à celui donné par les bois naturels correspondants. Ce fait est important non seulement au point de vue pratique, mais aussi au point de vue théorique : il montre que l'amélioration n'a pas été obtenue par augmentation de densité par simple incorporation d'une matière dure et résistante. On a obtenu au contraire un matériaux comparable au bois au point de vue des cotes, c'est-à-dire de densité faible par rapport aux valeurs absolues des résistances obtenues, et en même temps de beaucoup supérieur à la plupart des bois connus, au point de vue de la valeur absolue de ces résistances. L'examen des densités des bois traités montre d'ailleurs que la variation de densité entre le bois naturel et le bois imprégné n'est pas seulement fonction de la quantité de bakélite incorporée dans le bois; elle dépend de l'humidité initiale, du mode d'imprégnation, qui modifie la composition des tissus et enlève même certains éléments du bois que l'on trouve dans les résidus d'imprégnation.

L'essai de dureté est à rapprocher de l'essai à la compression. C'est à la mesure de ces deux essais que l'on se rend compte de la manière dont le bois participe des qualités de la bakélite, résine dure et résistante à la compression.

La résistance à la traction n'est pas améliorée. Il en résulte que l'essai à la flexion donne des coefficients d'augmentation plus faibles que ceux de l'essai à la compression. Lors de la rupture des éprouvettes à la flexion, on constate en effet, à la cassure brutale qui se produit, que la rupture est déterminée par épuisement de la résistance à la traction des fibres tendues. Dans le cas des bois naturels, on constate le plus souvent, au

contraire, que c'est la résistance à la compression des fibres supérieures qui est épuisée la première.

L'essai au choc montre enfin que le bois bakélisé est à peu près aussi cassant que le bois naturel, ce qui est en accord avec les conclusions que nous venons de formuler.

C'est là d'ailleurs un fait général, la plupart des traitements que l'on fait subir aux bois ayant pour effet de diminuer, parfois dans d'assez grandes proportions, leur résistance au choc.

Applications des bois imprégnés.

L'étude précédente ne serait pas complète si, à côté des résultats théoriques d'essais, elle ne donnait quelques aperçus sur l'utilisation actuelle par l'industrie des bois imprégnés aux résines synthétiques.

Cette utilisation s'est développée dans des directions très diverses, faisant appel à telle ou telle qualité des bois traités. Cela a entraîné d'ailleurs, suivant le résultat à obtenir, une technique spéciale dans les modes d'imprégnation : une pièce destinée à être utilisée comme simple isolant dans l'industrie électrique ne sera pas imprégnée de la même manière que le bois duquel on tirera un coussinet de laminoir; dans le premier cas, on s'attachera par exemple à obtenir une imprégnation superficielle, un vernis isolant; dans le deuxième une forte résistance à la compression par imprégnation totale. Mais il est des cas dans lesquels c'est un ensemble de qualités que l'on demande au bois imprégné : si nous prenons par exemple le cas d'une éclisse isolante de chemin de fer, destinée à remplacer l'éclisse ordinaire à chaque extrémité des tronçons de voie isolés électriquement les uns des autres, il convient de s'adresser à un matériau présentant de hautes qualités isolantes, mais aussi une résistance mécanique suffisante. Les éclisses en bois bakélisé ont conduit à des résultats satisfaisants.

Nous allons énumérer rapidement les diverses applications industrielles des bois imprégnés aux résines synthétiques, en insistant surtout, pour rester dans le cadre de notre étude, sur

celles qui découlent des qualités mécaniques que nous avons mises en lumière.

Le bois bakélinisé est employé d'abord dans l'industrie électrique : pièces isolantes; organes de protection (écrans isolants, tabourets isolants, patins) et de manœuvre (perches, pinces de coupe-circuit fusibles); panneaux et tableaux porteurs des appareils de distribution et de contrôle; isolateurs et supports d'isolateurs; pièces diverses de transformateurs, etc... Certaines applications électriques demandent des qualités mécaniques spéciales : les tiges de disjoncteur demandent une forte résistance à la traction; nous avons cité dans nos essais le cas de tiges de 50 millimètres de diamètre en bois bakélinisé-contreplaqué, faciles à fixer, et résistant à un effort de traction voisin de 16 tonnes. Citons encore les biellettes isolantes pour commande mécanique à distance des sectionneurs, cales d'encoche d'alternateurs et de turbo-alternateurs, cales de rotors, etc...

Dans l'industrie chimique, nous citerons les bras agitateurs de bains de teinture, les châssis, bâtons, chariots, bacs de teintureries, qui doivent résister à des bains acides ou basiques.

A côté de ces applications spéciales, nous trouvons les applications purement mécaniques, dans lesquelles on recherche un matériau comparable au bois pour sa légèreté, son élasticité, sa facilité d'usinage, et en même temps moins déformable, et capable de résister à des efforts plus considérables.

C'est ainsi que le bois bakélinisé est un intermédiaire entre le bois et le métal pour la fabrication des modèles, en fonderie, des coussinets de fouloir. Il peut servir à la fabrication des coussinets de laminoirs, de pivots, de dents d'engrenages de turbines hydrauliques, remplaçant ainsi des bois très durs comme le gaiac.

Dans l'industrie textile, citons les navettes, bobines, forêts de chasse, etc...; dans l'industrie automobile, les cales utilisées entre ressorts et essieux. Enfin, les chemins de fer essayent à côté des éclisses isolantes que nous avons déjà citées, des semelles de bois bakélinisé, de quelques millimètres d'épaisseur, interposées entre le rail et la traverse et destinées, grâce à leur élasticité, à protéger celle-ci des chocs du rail au moment du passage rapide des charges.

Toutes ces applications mécaniques dérivent surtout de la forte résistance à la compression et de la grande dureté des bois imprégnés aux résines synthétiques (1).

II. — ÉTUDE MICROSCOPIQUE DES BOIS BAKÉLISÉS

L'étude précédente a été complétée par une étude microscopique d'un certain nombre d'échantillons de bois bakélisés, échantillons appartenant à des essences différentes (hêtre, orme, peuplier) et bakélisés à des degrés divers.

Il importe de remarquer tout d'abord que les résultats obtenus varient considérablement suivant le procédé de bakélisation employé. Dans certains échantillons, la bakélisation est complète, et ces échantillons frappent à première vue par leur aspect homogène. Dans d'autres, au contraire, la bakélisation reste superficielle et la partie centrale de l'objet traité ne paraît avoir subi aucune modification.

A l'étude macroscopique, les échantillons bakélisés se reconnaissent immédiatement *par leur couleur*, résultant de la combinaison de la couleur de la bakélite employée (toujours jaune plus ou moins foncé) avec la couleur propre du bois, *par leur aspect* un peu gras, légèrement luisant, et surtout *par leur homogénéité* plus ou moins grande suivant les cas, résultant de l'obturation, en proportion variable d'ailleurs, des lumières des divers éléments cellulaires du bois.

Nous avons effectué, dans les échantillons considérés, un grand nombre de coupes minces suivant trois directions perpendiculaires : transversale, radiale et tangentielle, en vue de rechercher au microscope les modifications apportées à la structure du bois par la bakélisation, et principalement la localisation du produit. On a dit que « la bakélite étant transformée à l'intérieur même des

(1) Les essais dont il s'agit dans la note ci-dessus ont été effectués sur du bois bakélisé fabriqué par la Société « Le Bois bakélisé » à Nancy, qui a bien voulu nous communiquer les renseignements documentaires qui les complètent.

bois se trouve liée à eux dans une véritable combinaison ». Nous avons cherché à vérifier cette assertion en utilisant les réactions colorées des bois et en comparant les coupes faites dans des bois de même espèce ayant subi ou non des injections de bakélite.

Les colorants utilisés ont été choisis parmi ceux qui sont employés couramment en micrographie : solution alcoolique de chrysoïdine, solution aqueuse de vert d'iode, solution ammoniacale de fuchsine.

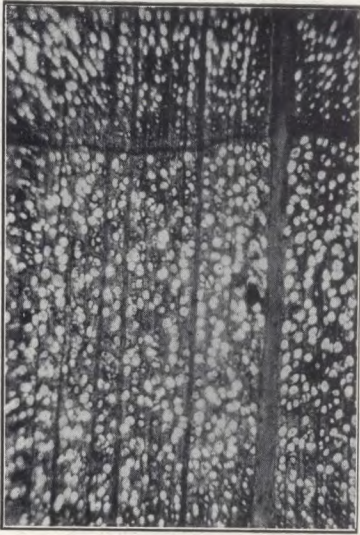
Dans toutes les coupes examinées, la bakélite apparaît sous forme d'inclusions dans les cavités cellulaires, en proportion très variable suivant les échantillons, et dans une même coupe, variable le plus souvent suivant les régions examinées.

Comme on pouvait le supposer, elle remplit de préférence les cavités des éléments conducteurs, et, quand elle n'obstrue pas complètement la cavité d'un vaisseau elle se localise dans la paroi, dans les chambres des ponctuations dont celle-ci est tapissée, les rendant extrêmement visibles. Des vaisseaux, elle gagne parfois, surtout dans les régions voisines de la surface de la pièce, les éléments contigus, principalement les rayons médullaires ou les cellules de parenchyme, presque jamais les fibres.

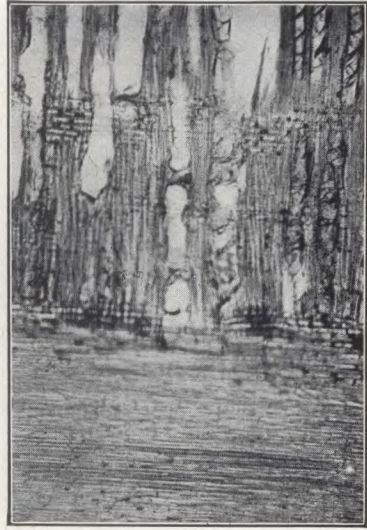
Dans un échantillon de hêtre bakéliné (Pl. I) (1) pris dans la masse, les vaisseaux sont obturés par de la bakélite dans la proportion de 70 %, la proportion étant plus élevée dans le bois de printemps que dans le bois d'été. Il n'y a pas de bakélite dans les autres éléments du bois sauf dans quelques rayons médullaires au voisinage même des vaisseaux.

Dans une plaque mince d'orme comprimée (Pl. I), la bakélite obture environ 50 % des vaisseaux du bois d'été. La zone de bois de printemps très déformée par la compression, a ses vaisseaux à peu près complètement remplis par de la bakélite. Dans la préparation, la zone de bois de printemps revient à sa forme primitive, alors que les bouchons de bakélite gardent leur forme initiale et apparaissent sous forme de lentilles applaties n'obturant que partiellement les lumières des vaisseaux. Aucune

(1) Sur les photographies de coupes minces, la bakélite apparaît de façon très différente suivant l'éclairage et les colorants utilisés, tantôt plus claire, tantôt plus foncée que le tissu ligneux.



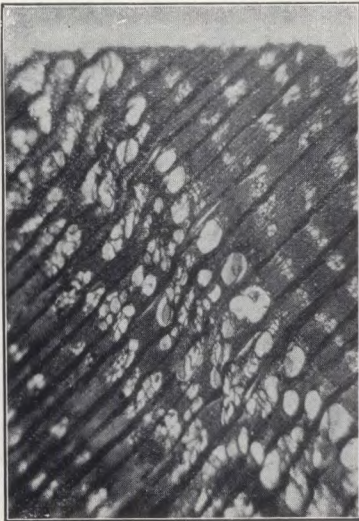
Section transversale.
Localisation de la bakélite dans les vaisseaux.
G = 22.



Section radiale.
Localisation de la bakélite dans les vaisseaux
et dans quelques cellules des rayons médullaires.
G = 60.

BOIS DE HÊTRE (*Fagus sylvatica*) BAKÉLISÉ.

Coloration au vert d'iode.



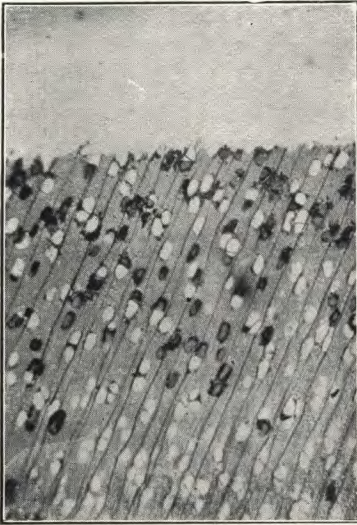
Section transversale.
Localisation de la bakélite dans les vaisseaux.
La forme des amas de bakélite dans les vaisseaux
de printemps est due à la compression.
G = 22.



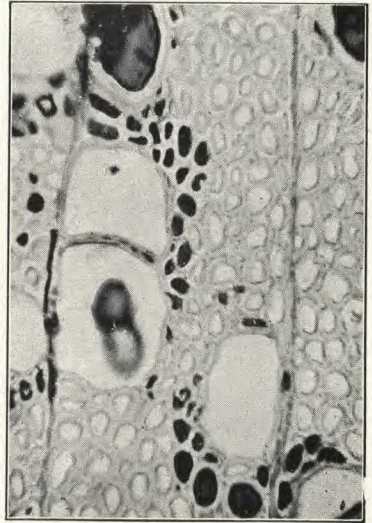
Section tangentielle.
Localisation de la bakélite dans les vaisseaux.
G = 60.

BOIS D'ORME (*Ulmus sp.*) BAKÉLISÉ ET COMPRIMÉ.

Coloration au vert d'iode et à la chrysoïdine.



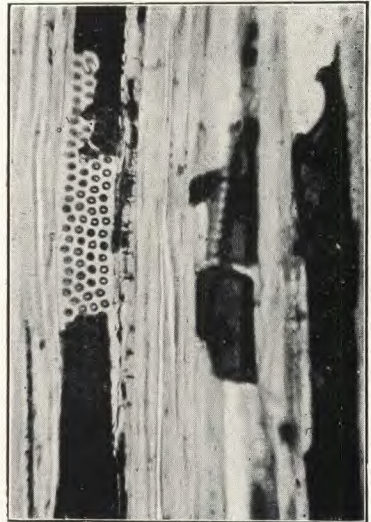
Section transversale.
Pénétration de la bakélite
dans les parties superficielles du bois.
G = 22.
Coloration à la chrysoïdine.



Section transversale.
Localisation de la bakélite dans les vaisseaux
et dans certaines cellules de parenchyme
et des rayons médullaires.
G = 180.
Coloration au vert d'iode.



Section radiale.
Localisation de la bakélite dans les vaisseaux,
certaines cellules de parenchyme
et des rayons médullaires.
G = 60.
Coloration à la chrysoïdine.



Section tangentielle.
Localisation de la bakélite dans les vaisseaux
et dans les chambres des ponctuations.
G = 180.
Coloration au vert d'iode et à la chrysoïdine.

BOIS DE PEUPLIER (*Populus canadensis* [sensu lato]) BAKÉLISÉ.

trace de bakélite ne se voit ni dans les rayons médullaires, ni dans les fibres.

Dans les plaques minces de peuplier (Pl. II), la bakélisation est beaucoup moins poussée et consiste surtout en une imprégnation superficielle, sur quelques millimètres; dans la portion centrale de la plaque, il n'y a aucune trace de bakélite. Par contre, près de la surface, quelques cellules de parenchyme, un certain nombre de fibres et les portions de rayons médullaires se trouvant au voisinage des vaisseaux sont complètement obturés.

La comparaison entre des coupes de bois bakélisés et de bois n'ayant subi aucun traitement préalable n'a permis de constater aucune différence notable, hors de la présence de bakélite dans les cavités cellulaires.

D'après ces observations il ne paraît donc pas qu'il y ait combinaison chimique de la bakélite et des constituants du bois; il semble qu'il y ait simplement imprégnation et remplissage des vides dans une proportion variable. Il est par conséquent difficile d'expliquer le changement de propriété mécaniques qu'entraîne la bakélisation, par des modifications chimiques profondes de la matière ligneuse. Toutefois, certaines phases du traitement que subit le bois bakélisé doivent exercer une influence modificatrice des propriétés du bois en agissant sur les membranes et le contenu cellulaire.

C'est ainsi que les matières de réserve existant dans le bois paraissent être éliminées, au moins en grande partie. Une étude chimique plus approfondie serait nécessaire pour élucider ces questions.

RESEARCHES ON WOODS IMPREGNATED WITH “ BAKELITE ”

Woods impregnated with “bakelite” possess the following properties :

They are artificially made old, a little or not at all hygroscopic, and show phenomena of minimum shrinking and swelling; lastly, they possess good insulating qualities.

The author calls to mind how the impregnation of wood by bakelite is realised and he shows the results of a very great number of mechanical experiments carried out with the purpose of comparing, all other conditions being equal, sample of natural wood and of wood impregnated with the synthetic resins. These results are the following :

- 1) Resistance to crushing : the breakage loads are multiplied by a coefficient which varies from 1,5 to 3 without the density perceptibly increasing.
- 2) Resistance to extension : no change.
- 3) Resistance to flexion is increased by about 1,5.
- 4) Power of resisting shocks : no improvement.
- 5) Hardness : it is from 3,4 to 6 times greater than the hardness of natural wood.

The total of these results explains the multitude of applications of bakelised wood.

Microscopic study has shown that there is no chemical combination but simply partial filling of the cellular cavities.

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DAS MIT BAKELIT GESÄTTIGTE HOLZ

Das mit synthetischem Harz (Bakelit) gesättigte Holz hat folgende Eigenschaften :

Es ist künstlich gealtert, wenig oder gar nicht hygroskopisch und zeigt sehr kleine Zusammenziehungs-oder Dehnungserscheinungen an; endlich hat dieses Holz sehr grosse isolierende Eigenschaften.

Der Verfasser erinnert daran auf welche Weise das Holz mit synthetischem Harz gesättigt wird. Er gibt die Resultate der vielfachen Versuche, die gemacht worden sind um, unter denselben Umständen, Probestücke aus natürlichem und aus mit synthetischem Harz gesättigtem Holz, zu vergleichen. Die Resultate sind folgende :

1) *Druckfestigkeit* : die Bruchlasten sind mit einem Koeffizient, der von 1,5 bis 3 geht, multipliziert ohne dass das spezifische Gewicht auf merkbare Weise zugenommen hat.

2) *Zugfestigkeit* : keine Aenderung.

3) *Die Biegefestigkeit* ist mit 1,5 ungefähr multipliziert.

4) *Stossfestigkeit* : keine Besserung.

5) *Härte*. Sie ist 3,4 bis 6 mal stärker als die des natürlichen Holzes.

Zusammengefasst erklären diese Resultate die vielfachen Anwendungen des mit synthetischem Harz gesättigten Holzes.

Die mikroskopische Untersuchung hat ergeben dass keine chemische Verbindung vorliegt, sondern nur eine teilweise Füllung der Gefässe mit dem synthetischen Harze.
