

Photo : Shell.

L'« Iridina » spécialisé dans le transport du butadiène liquéfié est équipé de cuves en azobé.

RÉSISTANCES COMPARÉES DU BOIS ET DES STRATIFIÉS POLYESTERS A LA TEMPÉRATURE AMBIANTE ET AUX BASSES TEMPÉRATURES

par P. SALLENAYE,
*Chef de la Division de Technologie
du Centre Technique Forestier Tropical.*

WOOD AND POLYESTER LAMINATES

(A comparative study of their characteristics at normal and very low temperatures).

Transportation of natural gas in liquefied form raises serious problems. In the course of laboratory tests the author has compared the characteristics of four species of natural wood : AZOBE, BETE, NORTHERN PINE, OREGON PINE, of improved plywoods, and of two grades of polyester glass laminates (MAT and ROVING type).

It appears that as regards the main stresses (flexion, compression, hardness) the resistance of woods considerably increases when temperature is lowered, whilst it remains unchanged as regards dynamic flexion.

Taking into account the difference in densities, the results tend to show that wood exhibits a superiority that should cause it to be preferred to the polyesters.

MADERAS Y ESTRATIFICADOS POLIESTERES

(Estudios comparados de sus características a temperatura normal y a temperaturas muy reducidas.)

El transporte de gases en forma líquida plantea graves problemas. El autor ha comparado, durante el transcurso de ensayos de laboratorio, las categorías de cuatro especies de maderas naturales « AZOBE, BETE, PINO DEL NORTE y PINO DEL OREGON », las de maderas laminares mejoradas y, asimismo, las de dos variedades de vidrio poliéster estratificado (tipo MAT & ROVING).

Según se deriva de estos ensayos, cuando se trata de las principales sollicitaciones (flexión, compresión, dureza), las resistencias de las maderas aumentan de modo considerable con la reducción de la temperatura, mientras que las mismas se mantienen por lo que respecta a la flexión dinámica.

Si se tienen en cuenta las densidades en el registro de los resultados, se aprecia de manera clara que la madera acusa una superioridad que debería hacerla preferir a los poliésteres.

L'utilisation des gaz naturels prend chaque jour plus d'importance : gaz combustible comme le Butane, le Propane, - gaz servant dans l'industrie des plastiques et caoutchoucs synthétiques comme le Butadiène, le Méthane, etc...

Mais toute utilisation nécessite des transports et le gaz n'est pas un matériau de transport facile.

Certes, le Butane et le Propane voyagent par camion, comprimés en bouteille d'acier. Ils alimentent ainsi la plupart des foyers domestiques des campagnes. Mais ce sont là petites utilisations et petits transports.

De même, le gaz de Lacq est transporté dans toute la France par des pipe-lines et ce réseau débordera bientôt nos frontières.

Mais, si le transport de gaz est relativement simple sur les continents, il en va différemment lorsque le gaz est produit au delà des mers.

On ne peut envisager la construction de pipe-lines que sous des mers très étroites et peu profondes (détroit de Gibraltar, Pas-de-Calais). Pour des distances plus grandes, seuls des bateaux spécialement aménagés peuvent être utilisés.

Le transport, sous forme de gaz comprimé en

bouteille d'acier n'est pas économique, le poids mort de ces emballages étant trop élevé.

Aussi, la technique actuelle consiste-t-elle à transporter ces gaz sous forme liquide à basse température, dans des bateaux-citernes spéciaux.

Les cuves de ces bateaux sont assez particulières. Elles doivent résister à des efforts assez considérables, aussi bien statiques (pression hydrostatique sur les fonds des cuves, pression des gaz en surface du liquide), que dynamiques (mouvement du bateau dans la houle). Elles doivent être très isolantes, les gaz liquéfiés devront être maintenus très froids à l'aide de réfrigérateurs aussi réduits que possible. Elles doivent être construites en matériaux non attaquables par les liquides transportés, dont certains sont très corrosifs.

En vue de l'équipement de pétroliers pour le transport du Méthane liquide, le laboratoire du Gaz de France (Centre d'essais et de recherches du Landy) a demandé au Centre Technique Forestier Tropical d'entreprendre un travail en collaboration pour rechercher quel était le meilleur matériau devant entrer dans la construction des cuves de ces bateaux.

LES MATÉRIAUX

Six matériaux ont été étudiés :

Bois. — Quatre essences de bois naturel et un échantillon de bois lamellé.

I. — Azobé : *Lophira alata*.

II. — Bété : *Mansonia altissima*.

III. — Sapin Blanc du Nord : *Picea abies*.

IV. — Pin d'Orégon : *Pseudotsuga taxifolia*.

V. — Bois lamellé amélioré.

Verre polyester stratifié :

VI. — Mat et Roving.

VII. — Roving.

Le choix de ces divers matériaux a donné lieu à des échanges de vues entre les Ingénieurs du Gaz de France et ceux du Bois. On s'est limité à six types de matériaux, chacun d'eux semblant présenter des qualités particulières.

L'Azobé (*Lophira alata*) est très abondant et a déjà été utilisé pour construire des citernes à bord de deux pétroliers devant transporter du Butadiène liquide. Il a donné satisfaction.

Le Bété (*Mansonia altissima*) est un bois mi-dur, ayant de très bonnes résistances en flexions statique et dynamique. Il n'est malheureusement pas très abondant.

Le sapin blanc du Nord (*Picea abies*) est en fait l'Épicéa. C'est un bois léger, tendre, ayant d'excellentes résistances en flexion statique et dynamique.

Le pin d'Orégon (*Pseudotsuga taxifolia*) est une essence d'origine américaine, très estimée en construction navale.

Le bois lamellé amélioré est un matériau manufacturé, composé de feuilles de bois de Hêtre (*Fagus sylvatica*) de 1,5 mm d'épaisseur environ, collées à l'aide d'une résine et densifiées par forte compression.

Les deux verres polyesters stratifiés, le « Mat et Roving » et le « Roving » sont des matériaux entièrement fabriqués en usine. Ils ont été choisis sur les dires de fournisseurs, pour leur grande résistance mécanique et leur parfaite conservation

Nous pensons qu'il est nécessaire de donner quelques renseignements généraux sur les « verres polyesters stratifiés ». Ce sont en effet des matériaux qui, dans beaucoup d'emplois, prennent un développement considérable, souvent semble-t-il au détriment du bois.

Un « verre polyester stratifié » est un *matériau complexe* composé d'une résine polyester polymérisée, armée de fibre de verre, disposée en nappes parallèles, d'où le qualificatif de « stratifié ».

Les *résines polyesters* sont thermodurcissables. Ce sont des mélanges plus ou moins visqueux, qui se polymérisent à la chaleur, de façon irréversible et donnent un solide, dur, transparent et légèrement coloré, ayant l'aspect du verre. La polymérisation qui se déclenche sous l'influence d'un catalyseur ou « durcisseur » (peroxydes organiques : peroxyde de benzoyle, de méthyléthylcétone, de cyclohexanone, etc...), est accélérée, soit par la température (100°), soit par des accélérateurs. Elle se fait sans dégagement de gaz, ou d'eau, et les pièces peuvent être moulées sans pression.

Il existe une grande variété de résines polyesters qui présentent, après polymérisation, des caractéristiques physiques et mécaniques variées : résine rigide ou souple, résistance à la flexion ou au choc plus ou moins grande, résistance aux acides, aux bases, résine auto-extinguible, etc...

Les *fibres de verre* qui « arment » les pièces de « polyesters stratifiés » peuvent être de qualités très variées.

Les fours-filières servant à la fabrication de ces fibres, sont constitués par des creusets en platine, comportant des trous de 1 à 2 mm. à la partie inférieure. Le chauffage est réalisé par effet Joule. Le verre en fusion s'écoule en filament par les trous. Dans l'*étrirage mécanique*, ces filaments sont enroulés sur des broches tournant à grande vitesse. Les fibres ainsi obtenues sont continues et ont un diamètre de 5 à 13 microns. Ces fibres de verre sont appelées *sillionne*.

Les fibres peuvent être produites par un jet d'air violent soufflant sous le creuset, qui entraîne des filaments de verre en fusion et les étire sous forme de fibre d'une longueur de 5 à 80 cm. et d'un diamètre de 7 à 10 microns. Ces fibres portent le nom de *verranne*.

Les fibres de sillionne sont réunies sans torsion en fils qui portent le nom de *roving*. Ces fils peuvent être tissés de diverses façons : on obtiendra des tissus de « gros roving » (900 g/m² par exemple), de satin de roving, du taffetas de roving, etc...

De même, les fibres de verranne peuvent être réunies en mèches ou fils tordus ou non tordus. Par tissage, elles donnent toute une série de tissus de verranne. Des tissus mixtes, roving et verranne, peuvent être confectionnés.

Enfin, les fibres de verre coupées peuvent être réunies en nappe de feutre, plus ou moins épaisses, liées par un liant soluble dans la résine polyester. Ces feutres de fibre de verre sont appelés « *maïs* ».

On voit donc que par la combinaison des diverses résines et des tissus (tissu de roving, tissu de verranne, tissu roving-verranne, feutre de mat, etc...), par les diverses techniques de fabrication (la liaison résine-tissu de verre pose des problèmes assez délicats), on peut réaliser des matériaux ayant des qualités physiques et mécaniques très variées.

On peut être assuré que les fabricants qui nous ont fourni les matériaux d'essai (épreuves et plaques de polyester) ont soigné particulièrement leur fabrication et ont recherché les meilleures combinaisons résine-tissu de verre.

Les éprouvettes « *roving* » ont été débitées dans des plaques de 2 cm. d'épaisseur constituées d'une façon homogène par des nappes de tissus de verre roving, enrobées dans la résine.

Les éprouvettes « *mat* et *roving* » sont tirées de plaques de 2 cm. d'épaisseur, formées de deux feuilles de Roving de 7 à 8 mm. d'épaisseur, une sur chaque face, et d'une âme moins compacte, en résine et feutre de verre mat.

LES ESSAIS

I. — Afin que tous les résultats soient comparables, il a été décidé que, pour les six matériaux utilisés, les essais seraient conduits suivant les prescriptions des *Normes Françaises d'essai des bois* (NF B.51.002 à 51.013).

II. — Les mesures ont été effectuées, pour la plupart des essais, aux trois températures, + 20° C, — 80° C, — 196° C. Les essais de traction de fil et les mesures de densité et d'humidité ont été effectués à 20° C seulement.

III. — *Les caractéristiques étudiées et dimensions des éprouvettes.*

	<i>Dimensions des éprouvettes en centimètres</i>
	—
Flexion statique.....	2 × 2 × 34 cm.
» dynamique	2 × 2 × 30 cm.
Compression de fil	2 × 2 × 6 cm.
Dureté (essais effectués sur les éprouvettes de flexion)	2 × 2 × 8 à 12 cm.
<i>Éprouvettes spéciales</i>	
Traction de fil	3 × 1 × 28 cm.
Dilatation	2 × 1 × 40 cm.
Compression « de flanc » des stratifiés et du bois lamellé.....	2 × 2 × 2 cm.

Les éprouvettes de bois naturel ont été usinées

dans les ateliers du Centre Technique Forestier Tropical.

Les éprouvettes de bois lamellé et des stratifiés (roving et mat et roving) ont été usinées par les fournisseurs ou par l'atelier du Centre d'essais et de Recherches du Landy.

Interprétation des résultats

Les résultats des essais mécaniques (flexion statique, flexion dynamique, compression de fil, traction de fil) sont donnés, d'une part, en **valeur unitaire des charges de rupture**, exprimée en kg/cm^2 pour la flexion statique, la compression de fil et la traction de fil et en $\text{m.}/\text{kg}/\text{cm}^2$ pour la flexion dynamique, d'autre part, en **cote** (cote de flexion statique, cote dynamique, cote de compression, cote de traction). Ces *cotes*, prescrites par les Normes françaises d'essais de bois, sont le rapport de la charge de rupture à la densité du matériau. Elles sont indispensables pour comparer entre eux des matériaux de densité aussi diffé-

rente que les divers bois (sapin blanc : densité 0,5 -- Azobé : densité 1,05) et que les polyesters (densité 1,2 à 1,8). Pour la plupart des emplois (aéronautique, navires, charpente terrestre, etc...), on choisira en effet les matériaux qui, pour une résistance donnée, sont les plus légers, c'est-à-dire ceux qui ont les « *cotes* » les plus élevées.

Il est à noter que les matériaux légers sont en général les plus intéressants au point de vue calorifique.

Résultats des essais

Chaque essai étant fait sur plusieurs éprouvettes, pour chaque sollicitation, les résultats sont donnés par leur valeur moyenne.

Pour les bois, chaque essai a été effectué sur 10 éprouvettes, car ces matériaux naturels peuvent ne pas être très homogènes.

Pour les bois améliorés et les polyesters, chaque essai a été effectué sur 5 éprouvettes seulement, ces matériaux étant en général bien homogènes.

FLEXION STATIQUE

I. — Conditions d'essai

Les éprouvettes de 34 cm. \times 2 cm. \times 2 cm. reposent sur deux appuis formés de couteaux de 1,5 cm. de rayon, distants de 28 cm. d'axe en axe. La charge est appliquée au milieu de la portée par un couteau de même rayon et croît lentement jusqu'à la rupture. Les courbes représentant les déformations (ou flèches) en fonction des charges sont enregistrées d'une façon continue par la machine d'essai.

La charge est appliquée :

— sur les éprouvettes de bois, sur une face sur maille, c'est-à-dire parallèlement aux zones d'accroissement du bois,

— sur les éprouvettes de bois amélioré et de polyester, perpendiculairement au plan de lamellation.

II. — Formules utilisées

La valeur F , *résistance unitaire*, est calculée par la formule générale de la flexion qui donne dans les conditions de l'essai :

$$F \text{ kg}/\text{cm}^2 = \frac{3 PL}{2 b h^3}$$

avec P kg charge de rupture

L = 28 cm. longueur fléchie

b = 2 cm. largeur de l'éprouvette

h = 2 cm. hauteur de l'éprouvette.

La *densité* D des éprouvettes est déduite de la mesure de leurs 3 dimensions et de leurs poids avant essai.

L'*humidité* H des éprouvettes de bois a été mesurée au moment de l'usinage. Chaque éprouvette étant pesée on s'est assuré que cette humidité ne changeait pas au cours de divers essais.

Le *module apparent d'élasticité* $E \text{ kg}/\text{cm}^2$ a été déduit des courbes de déformation enregistrées par la machine (tangente à la courbe du départ).

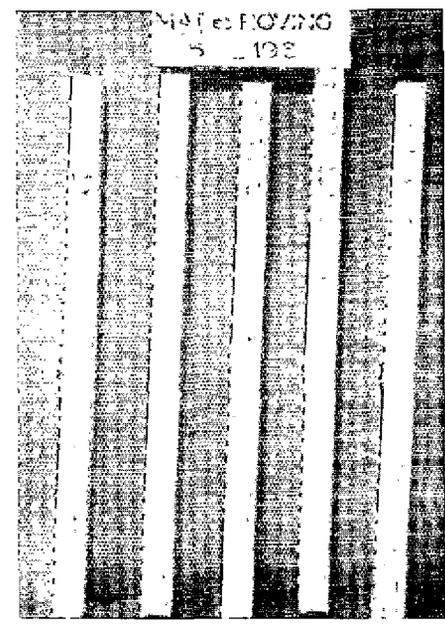
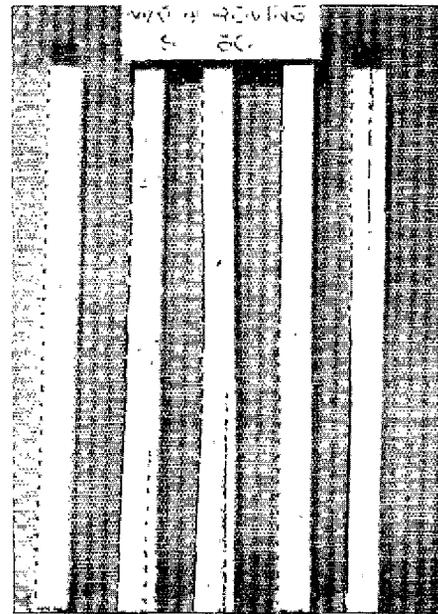
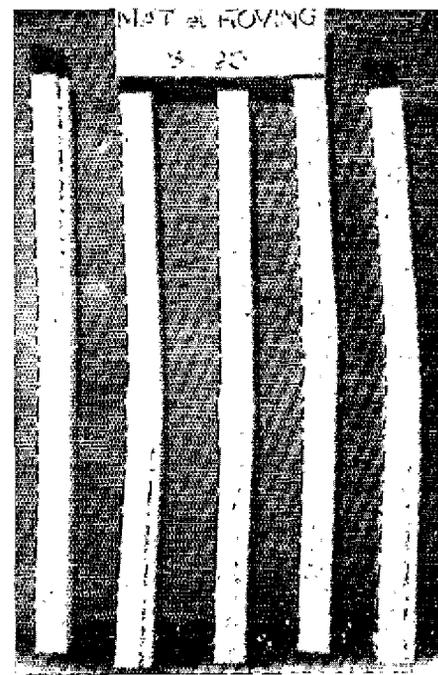
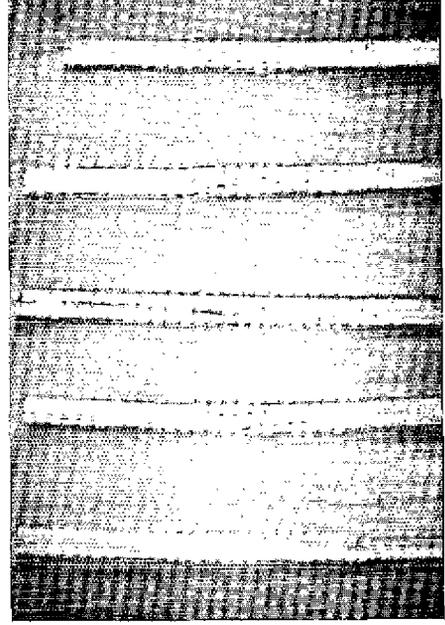
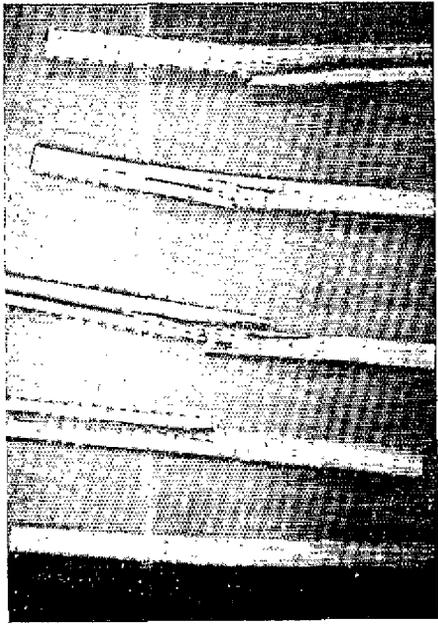
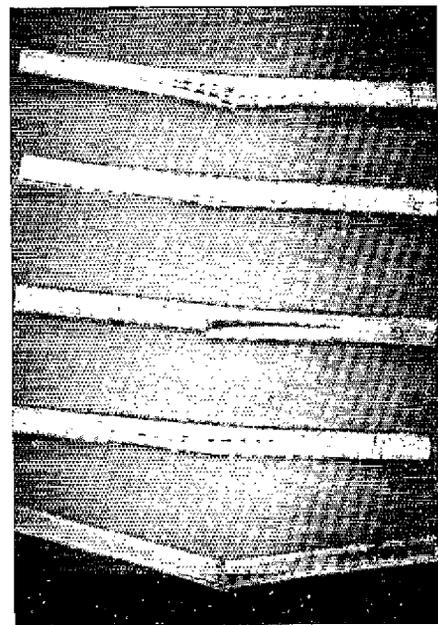
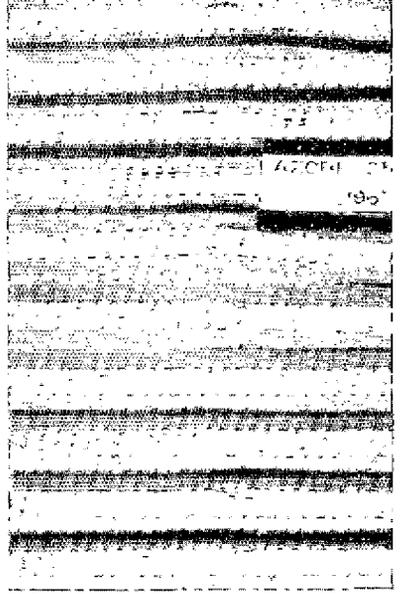
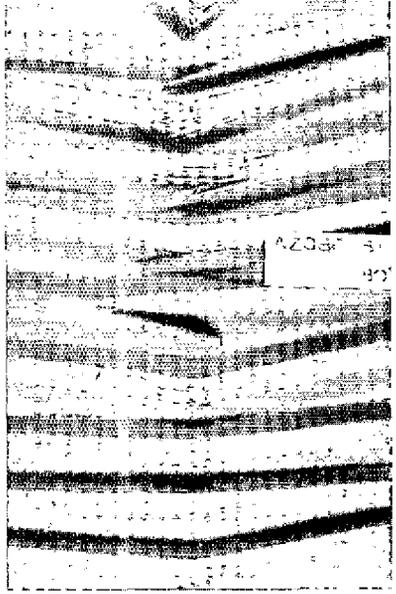
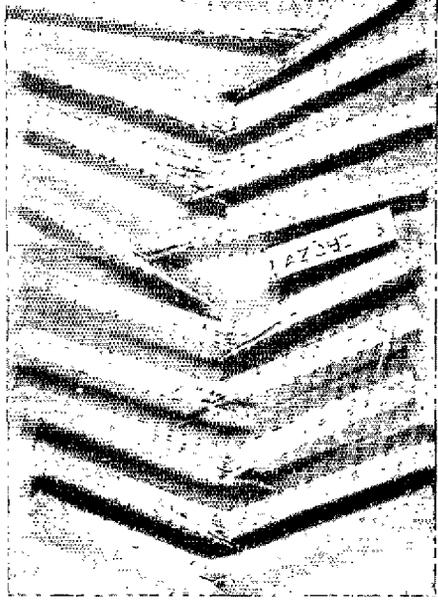
III. — Influence de la température et forme de cassures

Pour les 4 bois, la résistance unitaire à la flexion F augmente régulièrement lorsque la température diminue. Les 3 points (F 20° — F — 80° — F — 196°) sont presque en ligne droite, sur les courbes de résistance en fonction de la température.

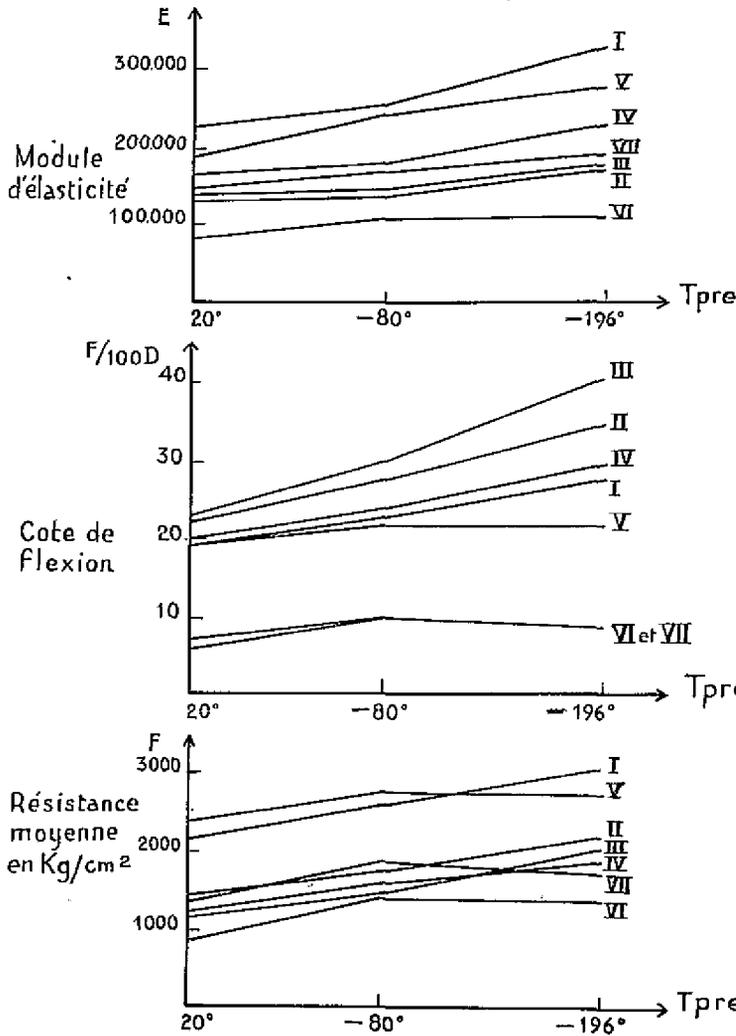
Pour le *bois lamellé amélioré* et pour les *polyesters* (Mat et Roving — Roving), la résistance unitaire à la flexion F augmente jusqu'à — 80°, puis est sensiblement égale ou diminue un peu pour — 196°.

Les *deux bois feuillus* (Azobé et Bété) ont des cassures qui deviennent de plus en plus fibreuses avec l'abaissement de température. Les cassures se produisent dans les fibres tendues des éprouvettes tandis que les fibres comprimées paraissent résister de mieux en mieux avec le froid.

Les *deux bois du conifère* (Epicéa et Pin d'Orégon) ont des cassures normales à la température ordinaire. A — 80° et surtout à — 196°, les éprouvettes périssent par cisaillement longitudinal. Il semble que la cohésion transversale de ces bois



FLEXION STATIQUE



- I. Azobé.
- II. Bété.
- III. Epicea.
- IV. Pin d'Orégon.
- V. Bois lamellé amélioré.
- VI. Verre polyester : mat et roving.
- VII. Verre polyester : roving.

augmente peu avec l'abaissement de température alors que la cohésion longitudinale (compression de fil et traction de fil) augmente beaucoup.

Le bois lamellé amélioré donne des éprouvettes qui périssent en général par fendage longitudinal même à la température ordinaire. L'abaissement de la température paraît ne pas augmenter la tenue des plans de collage et favoriser le clivage de l'éprouvette.

Les polyesters donnent des éprouvettes qui périssent toujours par cisaillement longitudinal, quelle que soit la température. Ce sont des matériaux qui paraissent avoir une cohésion transversale très faible, les nappes de tissu de verre formant des plans de moindre résistance, la résine polyester et les fibres de verre ayant une mauvaise adhérence.

Les bois feuillus (Azobé, Bété) et les résines polyesters (Roving et Mat et Roving) paraissent être plus élastiques aux basses températures.

IV. — Graphiques

Les graphiques donnent le classement des matériaux étudiés aux trois températures : 20°, - 80°, - 196° :

Premier graphique : *module d'élasticité E*

Deuxième graphique : *Cote de flexion*, ou résistance unitaire divisée par la densité.

Troisième graphique : *Résistance unitaire*.

FLEXION STATIQUE

	20°				- 80°				- 196°			
	Densité D	Résist. moy. en Kg/cm² F	Cote de Flex. F/100D	Modul d'élast. appar. en Kg/cm² E	D	F	F/100D	E	D	F	F/100D	E
Azobé	1,10	2 137	19	228 000	1,10	2 600	23	254 000	1,11	3 086	28	336 000
Bété	0,64	1 412	22	133 000	0,63	1 782	28	140 000	0,64	2 211	35	181 000
Epicea	0,50	1 144	23	140 000	0,50	1 488	30	148 000	0,50	2 047	41	183 000
Pin d'orégon	0,60	1 230	20	165 000	0,65	1 591	24	184 000	0,63	1 886	30	237 000
Bois lamelle amélioré	1,26	2 386	19	192 000	1,26	2 762	22	249 000	1,23	2 731	22	286 000
Mat et roving	1,38	868	6	88 000	1,38	1 420	10	113 000	1,41	1 363	9	118 000
Roving	1,79	1 346	7	145 000	1,78	1 878	10	172 000	1,74	1 586	9	200 000

I. — Conditions d'essai

Les éprouvettes de 30 cm. × 2 cm. × 2 cm. reposent sur deux appuis formés de couteaux arrondis de 1,5 cm. de rayon, distants de 24 cm. d'axe en axe. Le choc du mouton-pendule est appliqué au milieu de la portée par un couteau de même rayon. Le travail W nécessaire à la rupture de l'éprouvette est lu directement sur la graduation du mouton-pendule. Il est exprimé en kg. par cm².

Le choc est appliqué :

sur les éprouvettes de bois, sur une face sur maille, c'est-à-dire parallèlement aux zones d'accroissement du bois.

— sur les éprouvettes de bois lamellé amélioré et de polyester, perpendiculairement au plan de lamination.

II. — Formules utilisées

En application de la Norme Française B.51.009, le travail unitaire K de rupture au choc est donné par la formule :

$$K = \frac{W^{kgm.}}{b \times h \frac{10}{6}}$$

avec W^{kgm.} Travail mesuré

b = 2 cm. largeur de l'éprouvette

h = 2 cm. hauteur fléchie

La cote dynamique $\frac{K}{D^2}$ quotient du travail unitaire par le carré de la densité du matériau, permet de comparer entre eux des matériaux de densité différente.

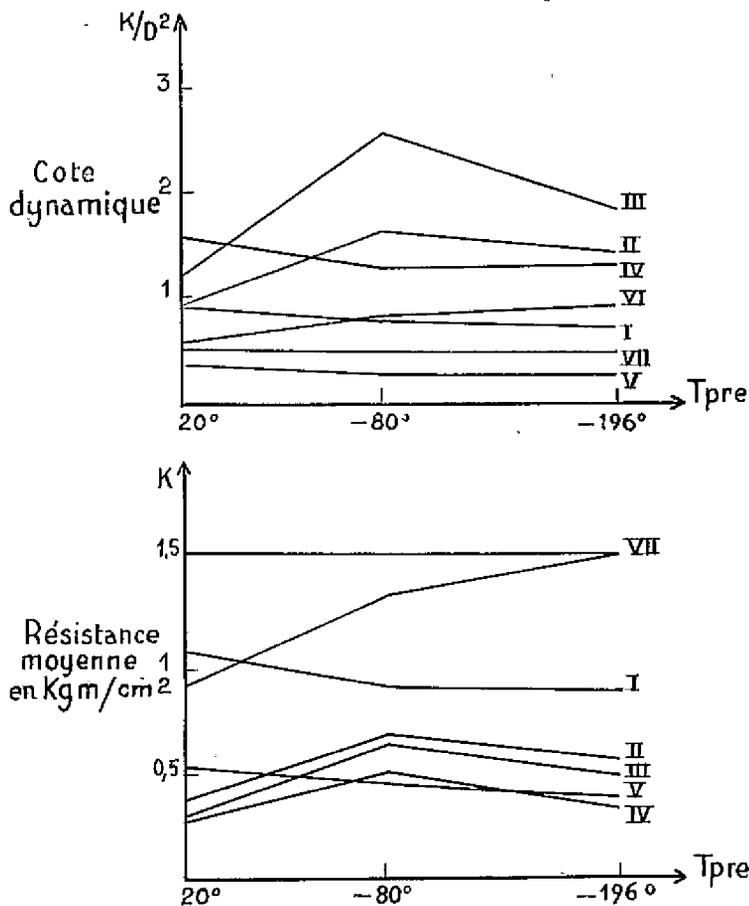
La densité et l'humidité des éprouvettes ont été déterminées comme pour les éprouvettes de flexion statique.

III. — Influence de la température et forme des cassures

Pour l'**Azobé** et le **bois lamellé amélioré**, la résistance au choc a légèrement diminué avec l'abaissement de température. Les formes de cassures sont à peu près les mêmes aux trois températures.

Pour le **Bété**, l'**Epicea** et le **Pin d'Orégon**, la résistance au choc a augmenté entre 20° et - 80°

FLEXION DYNAMIQUE

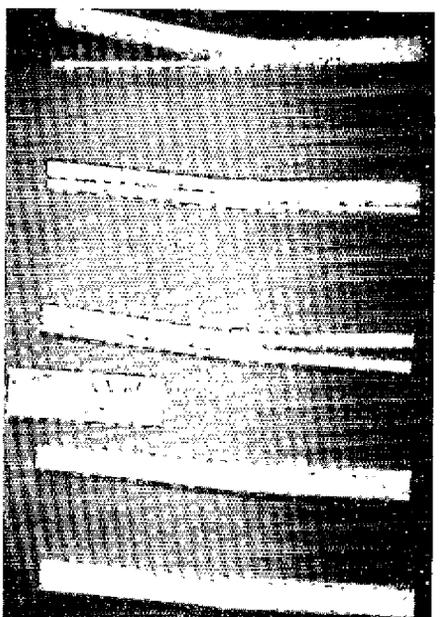
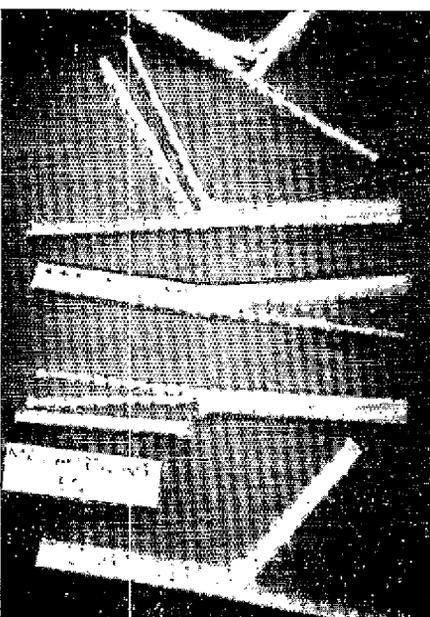
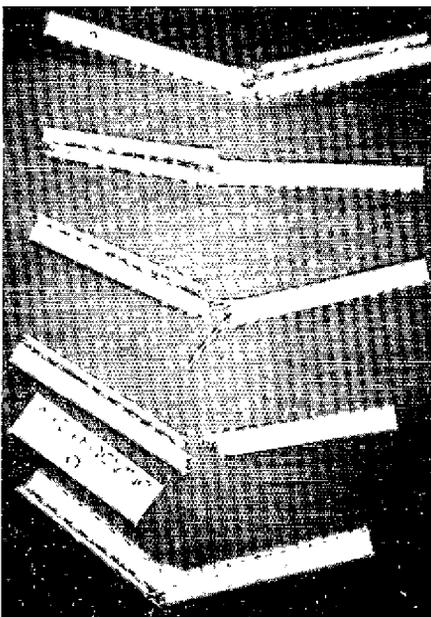
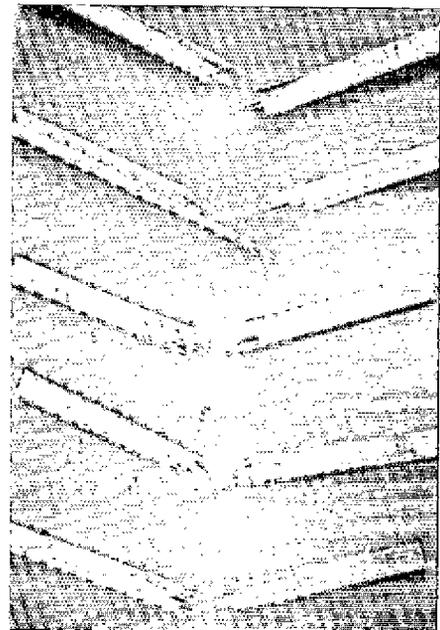
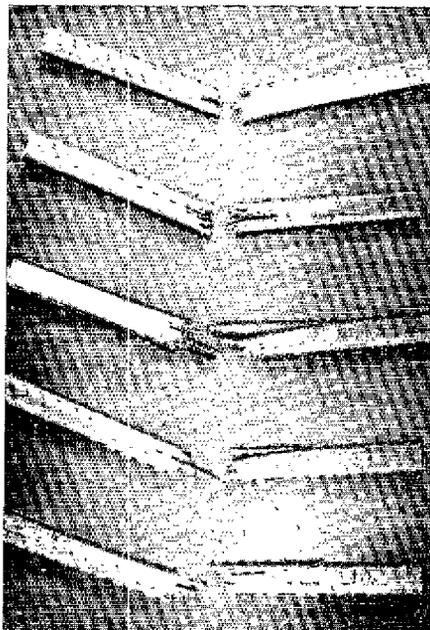
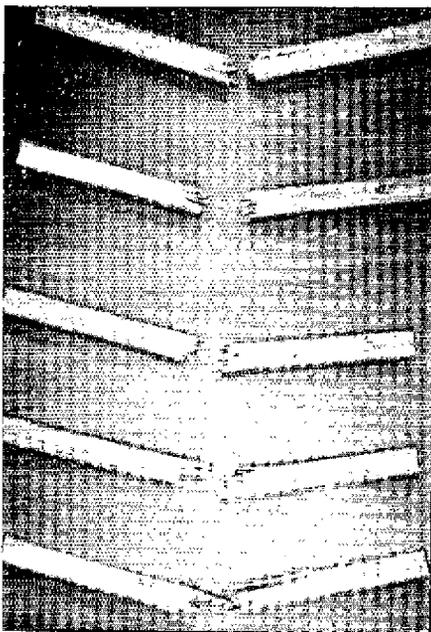
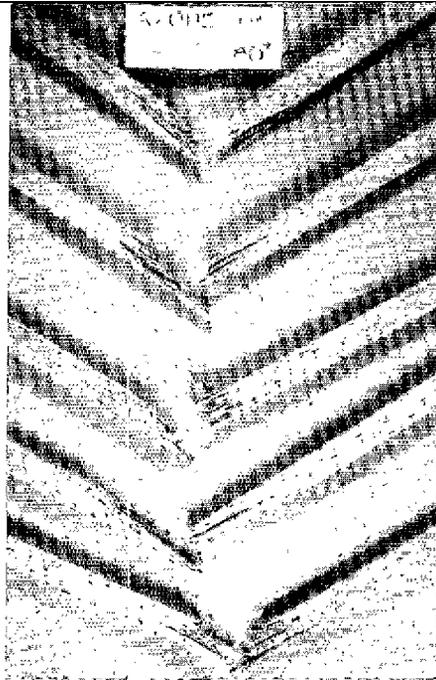
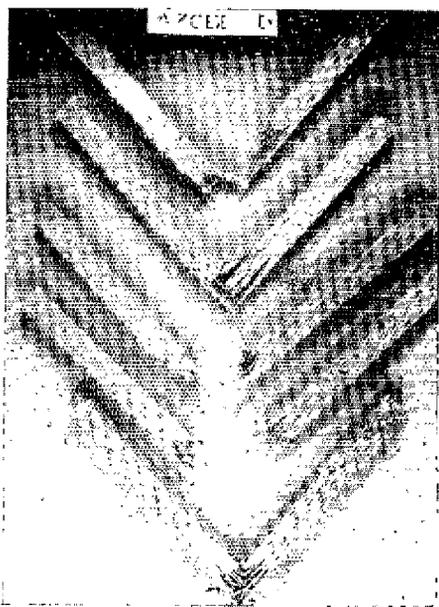


- I. Azobé.
- II. Bété.
- III. Epicea.
- IV. Pin d'Orégon.
- V. Bois lamellé amélioré.
- VI. Verre polyester : mat et roving.
- VII. Verre polyester : roving.

puis légèrement diminué entre - 80° et - 196°. Les cassures deviennent plus fibreuses avec l'abaissement des températures.

Pour le **mat** et **roving** la résistance au choc a fortement augmenté entre 20° et - 80° puis entre - 80° et - 196°. Les éprouvettes périssent par fente longitudinale.

Les éprouvettes de **roving** ont calé le mouton-pendule à la température ambiante en périssant par fente longitudinale, les nappes de tissu de verre



donnant des plans de faible résistance. Aux températures de -80° et -196° , le mouton-pendule a été calé de la même façon, les éprouvettes périssant toujours par fente longitudinale. Cependant, les formes de cassures montrent qu'il y a une légère augmentation de résistance au choc avec l'abaissement de la température.

IV. — Graphiques

Les deux graphiques donnent le classement des matériaux étudiés, aux trois températures 20° , -80° , -196° .

Premier graphique : Cote dynamique, ou résistance unitaire divisée par le carré de la densité.

Deuxième graphique : Résistance unitaire au choc.

FLEXION DYNAMIQUE

	20°			-80°			-196°		
	D	Résist. moyenne en $\frac{\text{Kgm}}{\text{cm}^2}$ K	Cote $\frac{\text{K}}{\text{D}^2}$	D	K	$\frac{\text{K}}{\text{D}^2}$	D	K	$\frac{\text{K}}{\text{D}^2}$
Azobé	1,10	1,10	0,91	1,09	0,93	0,78	1,11	0,91	0,74
Bété	0,63	0,37	0,93	0,65	0,70	1,63	0,63	0,59	1,48
Epicéa	0,49	0,28	1,18	0,50	0,66	2,60	0,53	0,52	1,87
Pin d'orégon	0,48	0,27	1,60	0,62	0,51	1,31	0,51	0,36	1,38
Bois lamellé amélioré	1,27	0,54	0,34	1,27	0,46	0,28	1,27	0,41	0,26
Mat et roving	1,30	0,92	0,54	1,29	1,38	0,82	1,29	1,57	0,94
Roving	1,75	1,57	0,51	1,75	1,57	0,51	1,75	1,57	0,51

COMPRESSION

I. — Conditions d'essais

Les éprouvettes des 4 bois (*Azobé*, *Bété*, *Epicéa*, *Pin d'Orégon*) et celles du *bois lamellé amélioré* ont 6 cm. de long et 2 cm. \times 2 cm. d'équarrissage.

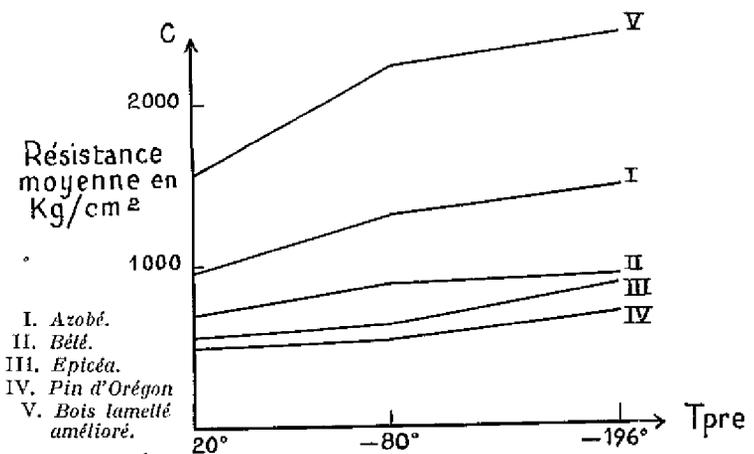
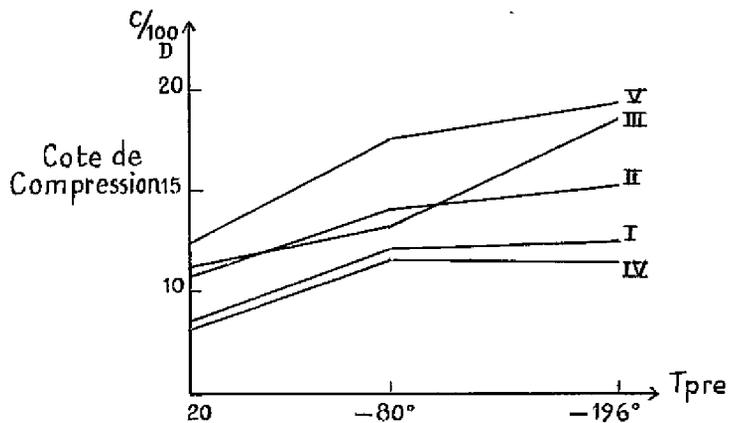
Ces éprouvettes sont comprimées dans le sens de la longueur (fil du bois) entre les plateaux de la machine. On note la charge de rupture de l'éprouvette.

Les éprouvettes de *roving* et de *mat et roving* ainsi que d'autres éprouvettes de *bois lamellé amélioré* ont été livrées sous forme de cube de $2 \times 2 \times 2$ cm. Une moitié de ces éprouvettes ont été comprimées par une pression parallèle au plan de placage ou de stratification et l'autre moitié par une pression perpendiculaire au plan de placage ou de stratification.

II. — Formules utilisées

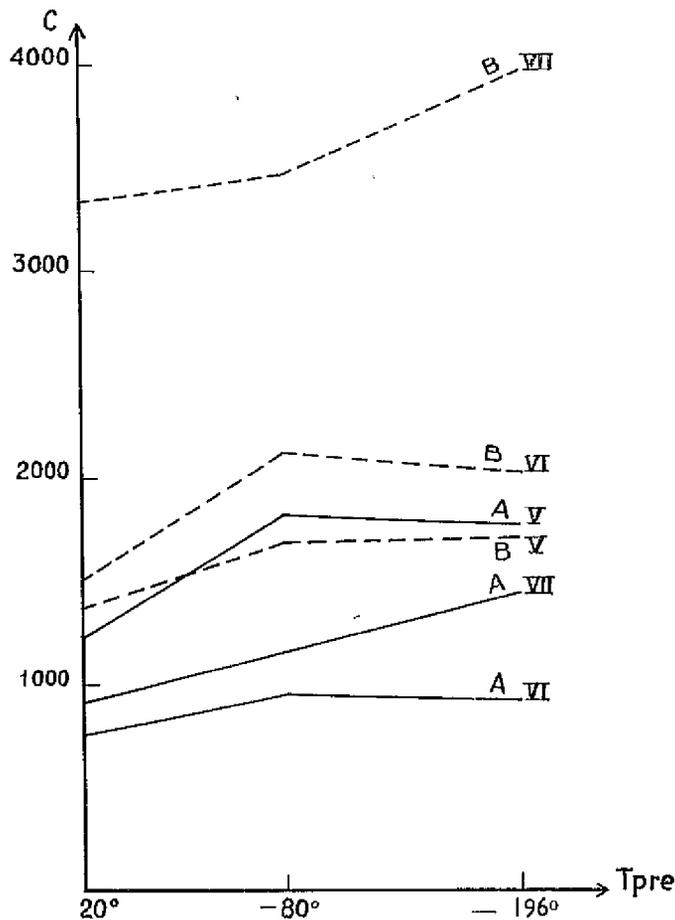
Les équarrissages de toutes les éprouvettes étant de 2×2 cm., toutes les résistances de rupture ont été ramenées au centimètre

COMPRESSION SUR ÉPROUVETTES NORMALISÉES (6^{cm} x 2 x 2)



I. *Azobé*.
 II. *Bété*.
 III. *Epicéa*.
 IV. *Pin d'Orégon*.
 V. *Bois lamellé amélioré*.

COMPRESSION SUR CUBES DE 2 cm



V. Bois lamellé amélioré.
 VI. Roving.
 VII. Mat et Roving.

carré (résistance unitaire) en divisant par 4 les charges de rupture données par la machine.

Les densités et les humidités des éprouvettes ont

été déterminées comme pour les éprouvettes de flexion.

III. — Influence de la température et forme des cassures

Les résistances à la compression des 4 bois (Azobé, Bété, Epicéa, Pin d'Orégon) et celles du bois lamellé amélioré augmentent avec l'abaissement de la température.

Les cassures des bois naturels se font à 20° et à -80° par écrasement des extrémités des éprouvettes ou par glissement des fibres suivant un plan presque perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette. A -196°, plusieurs éprouvettes de bois se cassent par fentes longitudinales.

Les cassures des éprouvettes de bois lamellé amélioré se font par fentes longitudinales suivant les plans de collage. Aux basses températures (-80°, -196°), les éprouvettes sont complètement désorganisées, la photographie en a été impossible.

IV. — Graphique

Les deux premiers graphiques (éprouvettes de 2 × 2 × 6) donnent le classement des 4 bois et du bois amélioré aux trois températures 20°, -80°, -196° soit d'après la cote de compression, soit d'après la résistance unitaire à la compression.

Les deux autres graphiques (éprouvettes de 2 × 2 × 2) donnent le classement du bois amélioré et des résines polyester, soit d'après les cotes de compression, soit d'après les résistances unitaires.

COMPRESSIONS DE FIL SUR ÉPROUVETTES 6 cm. × 2 × 2

	20°		-80°		-196°	
	Résistance moyenne en Kg/cm ² C	Cote C/100 D	Résistance moyenne en Kg/cm ² C	Cote C/100 D	Résistance moyenne en Kg/cm ² C	Cote C/100 D
Azobé.	942	8,6	1 336	12,1	1 509	13,6
Bété.	682	10,7	904	14,1	971	15,2
Epicéa.	557	11,1	642	13,2	925	18,6
Pin d'orégon.	487	8,1	557	11,6	744	11,4
Bois lamellé amélioré.	1 576	12,4	2 224	17,6	2 466	19,40

COMPRESSION DE FLANC SUR ÉPROUVETTES 2 × 2 × 2.

A. Compression parallèle au plan de stratification

B. Compression perpendiculaire au plan de stratification

	20°		- 80°		- 196°	
	A	B	A	B	A	B
	Résistance moyenne en Kg/cm ² C	Résist. moy. en Kg/cm ² C	C en Kg/cm ²			
Bois lamellé amélioré	1 245	1 377	1 817	1 689	1 775	1 719
Roving	906	3 342	1 156	3 462	1 442	3 942
Mat et roving	3 750	1 519	3 944	2 100	3 898	2 026

DURETÉ

I. — Conditions d'essai

Suivant le N. F. B 51.013 la dureté est mesurée par l'inverse de la flèche de pénétration d'un cylindre d'acier de 1,5 cm de rayon, sous une charge de 100 kg par cm. de largeur d'éprouvette, dans la face sur maille des éprouvettes, l'axe du cylindre étant perpendiculaire au fil du bois.

Mais par suite des variations de dureté sur la surface des panneaux de bois lamellé et des irrégularités de surface sur les panneaux polyester, cet essai n'a pas permis de mesure valable sur ces deux matériaux.

II. — Formule utilisée

La largeur de l'empreinte du cylindre sur les bois est mesurée. Des tables donnent directement la dureté N en fonction de cette mesure.

La densité et l'humidité des éprouvettes ont été mesurées comme pour les éprouvettes de flexion statique.

III. — Influence de la température

Paraît varier avec les bois.

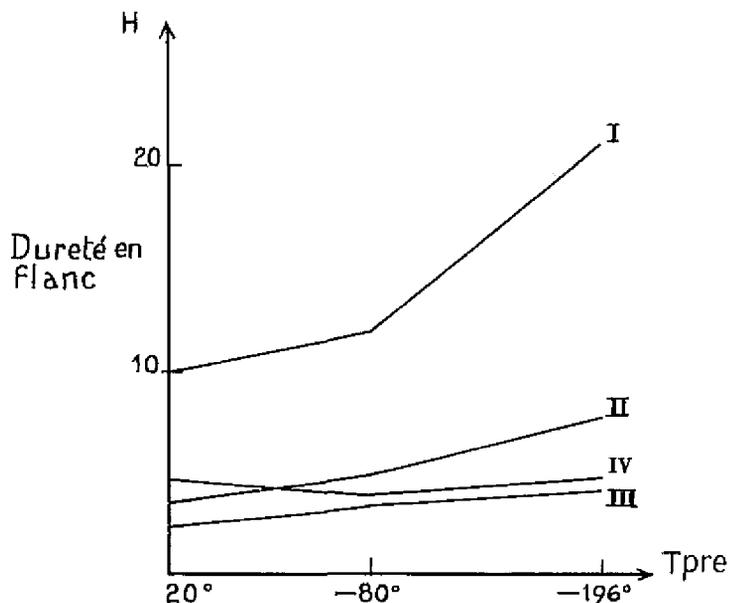
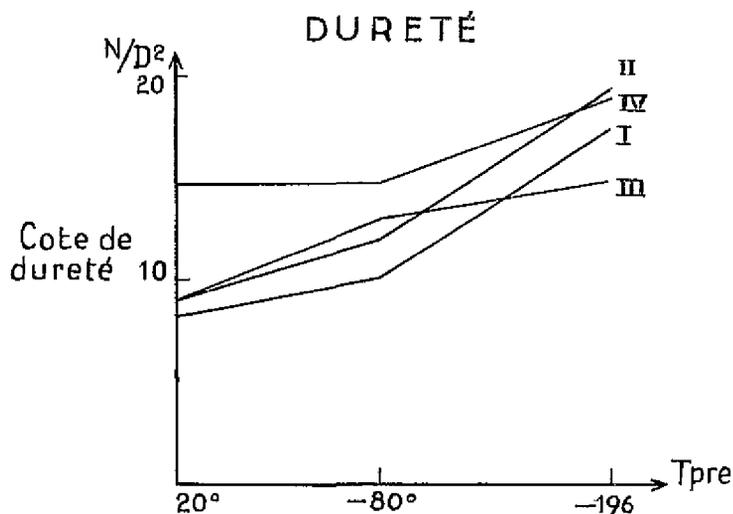
Azobé — forte augmentation de la dureté entre 20° et - 196°.

Bété — augmentation assez forte de la dureté entre 20° et - 196°.

Epicéa — légère augmentation de la dureté entre 20° et - 196°.

Pin d'Orégon — légère diminution de la dureté entre 20° et - 196°.

La dureté superficielle des bois lamellés et des polyesters paraît être très élevée, supérieure à celle des bois durs.



- I. Azobé.
- II. Bété.
- III. Epicéa.
- IV. Pin d'Orégon.

DURETÉ

	20°		- 80°		- 196°	
	Dureté en flanc N	Cote de dureté N/D²	N	N/D²	N	N/D²
Azobé.....	9,9	8,2	12,0	10,0	21,0	17,4
Bété.....	3,5	8,9	4,9	11,9	7,8	19,3
Epicéa.....	2,3	8,9	3,3	13,1	4,1	14,8
Pin d'orégon.....	4,7	14,6	3,8	14,6	4,6	19,0

ESSAI DE TRACTION

Pin d'Orégon.

Eprouvtes obtenues par fendage. Très bonne qualité. Résistances et cassures remarquables.

Bois lamellé amélioré.

Matériau assez homogène. Bonne cassure. Mais cassure sans fil, ni esquille.

Mat et roving.

Eprouvtes bien taillées. Matériau assez homogène.

Roving

Eprouvtes bien taillées. Matériau homogène. Bonne résistance.

Azobé.

Bois à fil enchevêtré : les éprouvtes sont difficiles à faire et cassent en général par cisaillement longitudinal et non par traction pure. Les charges obtenues sont donc trop faibles.

Bété.

Bois de droit fil. Eprouvtes obtenues par fendage de bonne qualité. Une éprouvte provenait de bois voisin du cœur (« cœur mou »).

Epicéa.

Eprouvtes obtenues par fendage. Assez bonne cassure. Mais bois irrégulier. Certaines parties très tendres ont des résistances faibles.

ESSAIS DE DILATATION LONGITUDINALE

Les mesures ont été effectuées sur des barres de 40 cm. de longueur et de 2 x 1 cm. de côté.

Les longueurs ont été mesurées au cathétomètre à la température ambiante θ (20° C environ) et à la température de l'azote liquide θ' (196° C).

Le coefficient de dilatation α est donné par la formule

$$\alpha = \frac{1}{l} \cdot \frac{l' - l}{\theta' - \theta}$$

l — longueur à la température ambiante θ (20° C environ)

l' — longueur à la température de l'azote liquide θ' (- 196° C.)

Le tableau suivant donne les résultats de ces essais sur les sept matériaux utilisés.

Matériaux	Coefficient de dilatation au 20° et - 196°
Roving.....	1×10^{-5}
Mat et roving.....	$1,7 \times 10^{-5}$
Pin d'orégon.....	$0,5 \times 10^{-5}$
Epicéa.....	$0,3 \times 10^{-5}$
Bois lamellé.....	$1,1 \times 10^{-5}$
Bété.....	$0,7 \times 10^{-5}$
Azobé.....	1×10^{-5}

RÉSISTANCE EN TRACTION DE FIL

Essence et densité	Charge unitaire de rupture T en Kg/cm²		Cote de Traction $\frac{T}{100 D}$
	des éprouvtes	moyenne	
Azobé, D : 1,100.....	1.520 Kg/cm² 1.940 2.260 2.460 2.550 2.900	2.270 kg/cm²	20,6

Matériau et densité	Charge Unitaire de rupture T Kg/cm ²		Cote de Traction $\frac{T}{100 D}$
	Des éprouvettes	Moyenne	
Bété, D : 0,65	810 1.300 1.400 1.510 1.630 1.770	1.400	21,5
Epicéa, D : 0,50	610 730 840 850 940 980 1.050 1.090 1.100 1.140 1.230	960	19,2
Pin d'Orégon, D : 0,60	1.340 1.340 1.420 1.540 1.700 1.830 1.950 2.070	1.650	27,5
Bois amélioré, D : 1,25	1.840 2.010 2.030 2.080 2.150 2.180 2.180 2.190 2.300	2.100	16,8
Mat et roving, D : 1,33	1.740 1.770 1.870 1.950 2.020	1.870	13,3
Roving, D : 1,80	2.670 2.930 3.000 3.010 3.230	2.970	17,1

CONCLUSION

Cette série d'essais nous paraît particulièrement intéressante. Elle donne des renseignements sur les résistances mécaniques des bois aux très basses températures. Comme on pouvait s'y attendre, pour les principales sollicitations, flexion statique, compression de fil, dureté superficielle, les résistances des bois augmentent de façon considérable avec l'abaissement de température. En flexion dynamique, certains bois montrent une augmentation de résistance nette (**Bété**, **Epicéa**, **Pin d'Orégon**) tandis que l'**Azobé** et le **bois lamellé amélioré** ont des résistances au choc qui diminuent légèrement aux très basses températures.

On peut regretter que des essais de cohésion de flanc (traction perpendiculaire aux fibres, fendage, cisaillement longitudinal) n'aient pas été en-

trepris. Cependant, l'examen des cassures en flexion et en compression montre que, malgré une forte augmentation des résistances, les éprouvettes se rompent sans fendage longitudinal, sauf pour quelques éprouvettes de **Bété** et d'**Epicéa** (flexion statique et dynamique) et quelques éprouvettes d'**Azobé**, **Bété** et **Pin d'Orégon** (compression). Il semble donc que les résistances en cisaillement longitudinal ne soient pas diminuées et soient plutôt augmentées avec la température.

Un autre résultat important de ces études est la comparaison entre les résistances mécaniques des bois et celles des stratifiés polyesters.

Comparaison des densités : la densité du bois le plus lourd : l'**Azobé** est 1,05, celle des autres bois 0,64 (**Bété**), 0,50 (**Epicéa**), 0,57 (**Pin d'Orégon**),

tandis que les densités des **stratifiés polyesters** sont en moyenne de 1,33 pour le **Mat** et **Roving** et 1,76 pour le **Roving**. Ainsi les **polyesters stratifiés** sont 1,3 et 1,15 fois plus denses que le bois d'**Azobé**, et 2,52 à 3,5 fois plus denses que l'**Epicéa**.

Mais les résistances mécaniques principales de ces matériaux ne sont pas dans les mêmes proportions.

Les cotes de flexion statique (rapport de la résistance mécanique à la densité) varient à la température ordinaire de 19 (**Azobé**) à 23 (**Epicéa**). Elles sont de 19 pour le **bois lamellé amélioré**. Mais elles ne sont que de 6 à 7 pour les **polyesters**. Ainsi, à poids égal, le bois est en moyenne 3 fois plus résistant que les **polyesters** pour cette sollicitation.

En flexion dynamique, les avantages du bois sont moins marqués. Tandis que la cote dynamique (à 20° C) varie de 0,91 (**Azobé**) à 1,60 (**Pin d'Orégon**), elle est seulement de 0,51 et 0,53 pour les **polyesters** qui sont cependant réputés pour leur bonne résistance au choc.

En fait, l'examen des cassures en flexion statique et dynamique montre que les **stratifiés polyesters** ont une très faible cohésion transversale : la résine adhère mal aux tissus de verre.

En traction de fil, le bois montre également une nette supériorité sur les **polyesters**, quoique les éprouvettes de bois soient difficiles à réaliser et se cassent souvent, non par traction pure, mais par

cisaillement longitudinal. La « cote de traction » varie pour les bois de 19,2 (**Epicéa**) à 27,5 (**Pin d'Orégon**), mais n'est que de 13,3 et 17,1 pour les deux **polyesters** essayés.

Les essais de compression ne sont guère comparables. Alors que les bois ont été essayés en *compression de fil*, les éprouvettes de polyester que nous avons reçues étaient des cubes de $2 \times 2 \times 2$ que nous avons dû essayer en compression de flanc. Ces matériaux sont en effet livrés en plaques de faible épaisseur et les efforts de compression qu'ils ont à supporter sont presque toujours des compressions de flanc. Pour cette sollicitation, les **polyesters** ont donné des résistances très élevées, tandis que les résistances des bois en compression de flanc sont faibles (300 à 350 kg/cm² pour l'**Azobé**).

Ainsi, même en envisageant les résistances mécaniques, le bois naturel montre une supériorité très marquée sur ces matériaux tant vantés que sont les **stratifiés polyesters**.

Mais les bois sont très variés et ils doivent être choisis pour être adaptés à l'emploi considéré (bois léger, bois lourd, etc...). Les pièces présentant des défauts doivent être éliminées. Les bois doivent être mis en œuvre suivant les règles de l'art : être bien séchés, bien usinés, protégés si cela est nécessaire.

Ils montreront alors leur supériorité qui devrait les faire préférer souvent à des matériaux artificiels.

