

POSSIBILITÉS DE COLLAGE EN MÉLANGE DE PLUSIEURS ESPÈCES AFRICAINES DE « BOIS ROUGES »

par J. GUISCAFRE et C. SALES

Division d'Essais et Emplois du Bois
du Centre Technique Forestier Tropical.

SUMMARY

A STUDY OF THE POSSIBILITIES OF BLENDING SEVERAL SPECIES OF AFRICAN REDWOODS

Between the standing tree and the undressed timber there occur a succession of stages in the course of which waste products are produced, in most cases useable only as raw materials and not as lumber.

This study reveals certain possibilities of making profitable use of such wood in the form of reconstituted elements possessing mechanical strength at least equivalent to that of the undressed timber.

RESUMEN

ESTUDIO DE LAS POSIBILIDADES DEL ENGOLADO EN MEZCLA DE VARIAS ESPECIES AFRICANAS DE MADERAS ROJAS

Entre el árbol y la madera maciza, existe una sucesión de etapas generadoras de desechos que, en la mayor parte de los casos, se utiliza como materia prima y no como materiales.

El estudio que figura a continuación ha permitido hacer resaltar algunas de las posibilidades de revalorización de estas maderas, en forma de elementos reconstituidos, y que poseen resistencias mecánicas que son, por lo menos, equivalentes a las de la madera maciza.

INTRODUCTION

Entre, d'une part, l'arbre, produit de la nature, fournissant le matériau bois et, d'autre part, le bois usiné, produit fini, il existe toute une série d'opérations de transformation destinées à le rendre apte à l'utilisation à laquelle on le destine.

D'une manière générale, les usinages successifs, plus ou moins nombreux selon le produit désiré, engendrent, sous différentes formes, la production, involontaire mais inévitable, de déchets pour une quantité parfois importante du volume initial de bois que représente l'arbre. Parmi ceux-ci, les pièces sciées de dimensions très faibles, difficilement ou même pas du tout commercialisables comme bois d'œuvre, provenant de la transformation des rondins en bois avivés, peuvent représenter un volume de bois utilisable relativement important. Ce bois est actuellement, le plus souvent perdu en tant que bois d'œuvre.

Le CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL avait, depuis plusieurs années, inscrit, au programme des recherches de la division d'Essais et Emplois des bois, l'étude des possibilités de reconstituer des éléments massifs de dimensions importantes à partir de pièces trop petites pour être employées. Il a paru intéressant, pour commencer ces études, d'en rechercher une application pratique dans la valorisation des déchets de scierie de « bois nobles ». En effet, leur prix élevé permet d'envisager l'emploi de techniques qui risquent d'être, au moins dans un premier stade, relativement coûteuses pour la fabrication d'un matériau reconstitué obtenu à partir d'une matière première à valeur commerciale pratiquement nulle.

En outre, on pouvait espérer parvenir, par la même technique à regrouper et utiliser sous la forme d'un matériau homogène différentes espèces

sous réserve que leur aspect soit suffisamment voisin du point de vue esthétique pour le permettre.

Les espèces qui ont paru répondre le mieux à tous ces critères sont celles actuellement utilisées en menuiserie de bâtiment, déjà confondues sous la dénomination commune de « bois rouges » (parmi lesquelles le Sipo, du genre *Entandrophragma* est particulièrement apprécié).

Elles se placent, en effet, parmi les plus demandées car elles offrent de bonnes qualités technologiques et leur aspect (couleur-grain...) correspond aux exigences et au goût du moment. Ces qualités entraînent une demande importante et contribuent à en faire, sur le marché, des bois chers pour lesquels l'impossibilité d'utiliser les déchets sous forme de bois d'œuvre massif entraîne, d'une part, une perte économique importante et, d'autre part, le plus souvent, une utilisation peu rationnelle de la matière première disponible.

Ainsi, la recherche des possibilités d'utilisation optimale du matériau bois et les conséquences économiques qui pourraient en découler ont amené la division d'Essais et Emplois des bois à entreprendre des études destinées à étudier les possibilités d'utilisation du Sipo et des bois provenant des espèces voisines du genre des *Entandrophragma* pour la fabrication d'éléments massifs obtenus par des techniques de reconstitution s'apparentant à celles du lamellé-collé.

Par ailleurs, il a semblé intéressant d'y ajouter deux genres : Acajou d'Afrique (*Khaya sp.*) et Makoré (*Tieghemella sp.*). Ceux-ci n'appartiennent pas au genre des *Entandrophragma* mais leur aspect est relativement voisin et ils sont, de plus, déjà couramment utilisés et appréciés en menuiserie.

CARACTÉRISTIQUES DU BOIS DE CHAQUE ESPÈCE ;

ANALYSE COMPARATIVE

ET ÉTUDE DES POSSIBILITÉS DE GROUPEMENT

CARACTÉRISTIQUES DES BOIS

Les espèces retenues pour cette étude, l'ont été essentiellement à cause de leur aspect très semblable et de leur emploi déjà confirmé en menuiserie de bâtiment ; elles font partie de trois genres botaniques différents et sont les suivantes :

Genre *Entandrophragma* :

<i>Entandrophragma angolense</i>	Tiama
<i>Entandrophragma candollei</i>	Kosipo
<i>Entandrophragma cylindricum</i>	Sapelli
<i>Entandrophragma utile</i>	Sipo

Genre *Khaya* :

Khaya anthotheca,
Khaya grandifoliola,
Khaya ivorensis.

Les bois provenant de ces trois espèces sont déjà confondus sous la dénomination d'acajou d'Afrique et utilisés indifféremment pour les mêmes emplois.

Genre *Tieghemella* :

Tieghemella africana,
Tieghemella heckelii.

Ces deux espèces sont commercialisées sous la même appellation « Makoré » et leur bois, que l'on ne peut différencier que d'après la provenance, est utilisé sans distinction.

Caractéristiques du bois de Sipo.

Le Sipo est un bois d'une belle couleur brun rose, parfois un peu violacée ; elle peut être plus ou moins foncée, et présenter quelquefois des reflets moirés. L'aubier, plus clair, est blanc rosé, parfois légèrement grisâtre. Le grain est assez fin. Le contre-fil est modéré et donne, lorsqu'il existe, aux faces sur maille un aspect rubané assez régulier par plages relativement larges.

La masse volumique du bois de Sipo le classe à la limite des bois légers à mi-lourds. Il est plutôt tendre. Son retrait est moyen. Les résistances mécaniques sont moyennes en valeur absolue mais, par contre, elles apparaissent bonnes si on les rapporte à la densité. Les valeurs de ces caractéris-

tiques physiques et mécaniques sont indiquées dans le tableau ci-joint. Elles ont été obtenues à partir d'essais effectués au Centre Technique Forestier Tropical sur des échantillons provenant de quatre pays : Cameroun, Congo, Côte-d'Ivoire, République Centrafricaine.

Le bois parfait de Sipo possède une durabilité naturelle moyenne. Elle est suffisante pour permettre son utilisation sans traitement de préservation dans les emplois ne l'exposant pas de façon importante aux dégradations par pourriture, comme par exemple en menuiseries extérieures.

Par ailleurs, le Sipo se scie généralement sans difficulté. Toutefois, il peut être, quelquefois, un peu abrasif et, ainsi désaffûter plus rapidement les outils. Les opérations d'usinage (rabotage, toupillage, etc...) ne présentent pas de difficultés particulières.

Caractéristiques du bois de KOSIPO.

Le Kosipo est un bois de couleur brun rouge violacé assez sombre. L'aubier, de couleur grisâtre, est bien différencié. Le grain est plutôt fin. Le contre-fil est assez fréquent, il donne alors, sur quartier, un aspect rubané.

Le Kosipo est un bois mi-dur et mi-lourd. Son retrait est faible ; toutefois, la présence du contre-fil cause souvent des déformations, particulièrement sur les bois mis en œuvre insuffisamment secs et les débits de faible épaisseur. Les résistances mécaniques sont moyennes. Le bois est assez élastique, mais plutôt cassant. Les valeurs de ses caractéristiques physiques et mécaniques sont rassemblées dans le tableau suivant. Elles ont été obtenues à partir d'essais effectués au Centre Technique Forestier Tropical sur des échantillons en provenance de Côte-d'Ivoire. Le Kosipo a une assez bonne durabilité naturelle, comparable à celle du Sipo.

Le Kosipo se scie généralement sans difficulté. Toutefois, il peut parfois être un peu abrasif et désaffûter plus rapidement les outils de coupe. Les opérations d'usinage ne présentent pas de difficultés particulières si le bois n'est pas trop contre-filé.

TABLEAU N° 1

Caractéristiques physiques et mécaniques du *Sipo*

	Unités	Mini	—	Maxi	Moyenne	Coefficient de variation en %
Caractéristiques physiques						
Dureté (Chalais-Meudon)	sans	2,3	—	3,5	3,0	15
Densité à 12 % d'humidité	sans	0,55	—	0,68	0,62	6
Rétractibilité volumétrique totale	%	10,2	—	14,5	12,4	12
Coefficient de rétractibilité volumétrique	%	0,35	—	0,51	0,42	14
Rétractibilité tangentielle	%	5,4	—	7,6	6,8	11
Rétractibilité radiale	%	3,7	—	5,9	4,8	16
Rapport T/R	sans	1,2	—	2,1	1,5	22
Caractéristiques mécaniques						
Fendage. Résistance moyenne	N/m	11,2.10 ³	—	23,0.10 ³	17.10 ³	18
Traction. Résistance moyenne	Pa	14,0.10 ⁵	—	30,8.10 ⁵	22,8.10 ⁵	16
Cisaillement. Résistance moyenne	Pa	48.10 ⁵	—	102.10 ⁵	73.10 ⁵	23
Compression axiale à 12 % d'humidité	Pa	547.10 ⁵	—	640.10 ⁵	547.10 ⁵	11
Cote statique. C/100 D /	sans	8,3	—	9,8	9,1	8
Flexion statique à 12 % d'humidité	Pa	895.10 ⁵	—	1.493.10 ⁵	1.185.10 ⁵	12
Cote de flexion. F/100 D	sans	15,2	—	23,3	19,6	9
Module d'élasticité apparent	Pa	90.10 ⁸	—	141.10 ⁸	111.10 ⁸	39
Résilience	Pa	1,30.10 ⁴	—	4,00.10 ⁴	2,55.10 ⁴	31
Cote dynamique. K/D ²	sans	0,32	—	0,84	0,64	26

TABLEAU N° 2

Caractéristiques physiques et mécaniques du *Kosipo*

	Unités	Mini	—	Maxi	Moyenne	Coefficient de variation en %
Caractéristiques physiques						
Dureté (Chalais-Meudon)	sans	2,6	—	4,0	3,3	18
Densité à 12 % d'humidité	sans	0,60	—	0,78	0,69	11
Rétractibilité volumétrique totale	%	11,8	—	14,5	13,1	10
Coefficient de rétractibilité volumétrique	%	0,33	—	0,53	0,43	20
Rétractibilité tangentielle	%	6,0	—	8,2	7,1	/ *
Rétractibilité radiale	%	4,6	—	5,1	5,0	/ *
Rapport T/R	sans	1,3	—	1,5	1,4	/ *
Caractéristiques mécaniques						
Fendage. Résistance moyenne	N/m	10,7.10 ³	—	21,6.10 ³	13,9.10 ³	37
Traction. Résistance moyenne	Pa	14,6.10 ⁵	—	27,4.10 ⁵	21,2.10 ⁵	20
Cisaillement. Résistance moyenne	Pa	59.10 ⁵	—	78.10 ⁵	69.10 ⁵	/ *
Compression axiale à 12 % d'humidité	Pa	473.10 ⁵	—	621.10 ⁵	531.10 ⁵	12
Cote statique. C/100 D	sans	6,7	—	9,3	7,9	14
Flexion statique à 12 % d'humidité	Pa	1.026.10 ⁵	—	1.385.10 ⁵	1.222.10 ⁵	14
Cote de flexion. F/100 D	sans	15,0	—	20,8	18,2	13
Module d'élasticité apparent	Pa	80.10 ⁸	—	100.10 ⁸	90.10 ⁸	/ *
Résilience	Pa	2,6.10 ⁴	—	4,5.10 ⁴	3,7.10 ⁴	21
Cote dynamique. K/D ²	sans	0,58	—	0,82	0,73	15
* Echantillonnage insuffisant pour permettre le calcul d'un coefficient de variation.						

Caractéristiques du bois de SAPELLI.

Son bois est brun rosé : il a tendance à foncer à l'air, et sa teinte prend un aspect brun rouge cuivré très agréable. L'aubier, de couleur gris rosâtre, est

distinct et bien limité. Le grain est plutôt fin. Le bois présente souvent un contrefil en plages, en général étroites ; ce contre-fil donne aux débits sur plein quartier un aspect finement rubané, très régulier.

TABLEAU N° 3

Caractéristiques physiques et mécaniques du Sapelli

	Unités	Mini	—	Maxi	Moyenne	Coefficient de variation en %
Caractéristiques physiques						
Dureté (Chalais-Mendon)	sans	3,0	—	6,2	4,2	25
Densité à 12 % d'humidité	sans	0,77	—	0,59	0,69	7
Rétractibilité volumétrique totale	%	9,5	—	17,2	13,1	15
Coefficient de rétractibilité volumétrique	%	0,36	—	0,56	0,46	13
Rétractibilité tangentielle	%	5,9	—	9,4	7,8	15
Rétractibilité radiale	%	3,9	—	6,4	5,3	15
Rapport T/R	sans	1,2	—	1,8	1,5	11
Caractéristiques mécaniques						
Fendage. Résistance moyenne	N/m	14,5.10 ³	—	27,3.10 ³	19,2.10 ³	19
Traction. Résistance moyenne	Pa	22,6.10 ⁵	—	39,5.10 ⁵	27,5.10 ⁵	17
Cisaillement. Résistance moyenne	Pa	26.10 ⁶	—	106.10 ⁶	76.10 ⁶	28
Compression axiale à 12 % d'humidité	Pa	511.10 ⁵	—	735.10 ⁵	630.10 ⁵	11
Cote statique. C/100 D	sans	9,3	—	10,3	9,2	9
Flexion statique à 12 % d'humidité	Pa	1.206.10 ⁵	—	1.680.10 ⁵	1.463.10 ⁵	11
Cote de flexion. F/100 D	sans	17,1	—	25,9	21,3	10
Module d'élasticité apparent	Pa	91.10 ⁸	—	141.10 ⁸	120.10 ⁸	13
Résilience	Pa	1,8.10 ⁴	—	4,7.10 ⁴	3,6.10 ⁴	21
Cote dynamique. K/D ²	sans	0,40	—	1,26	0,76	25

TABLEAU N° 4

Caractéristiques physiques et mécaniques du Tiama

	Unités	Mini	—	Maxi	Moyenne	Coefficient de variation en %
Caractéristiques physiques						
Dureté (Chalais-Meudon)	sans	1,6	—	3,2	2,3	24
Densité à 12 % d'humidité	sans	0,53	—	0,54	0,56	8
Rétractibilité volumétrique totale	%	11,6	—	15,6	13,3	10
Coefficient de rétractibilité volumétrique	%	0,27	—	0,52	0,40	20
Rétractibilité tangentielle	%	6,2	—	9,6	7,9	16
Rétractibilité radiale	%	4,0	—	6,6	4,9	23
Rapport T/R	sans	1,4	—	2,1	1,7	19
Caractéristiques mécaniques						
Fendage. Résistance moyenne	N/m	14,2.10 ³	—	25.10 ³	18,2.10 ³	22
Traction. Résistance moyenne	Pa	21.10 ⁵	—	30,8.10 ⁵	23,8.10 ⁵	15
Cisaillement. Résistance moyenne	Pa	39.10 ⁶	—	101.10 ⁶	72.10 ⁶	28
Compression axiale à 12 % d'humidité	Pa	483.10 ⁵	—	601.10 ⁵	492.10 ⁵	13
Cote statique. C/100 D	sans	7,3	—	10,6	8,9	11
Flexion statique à 12 % d'humidité	Pa	1.009.10 ⁵	—	1.317.10 ⁵	1.169.10 ⁵	10
Cote de flexion. F/100 D	sans	13,4	—	24,8	21,4	9
Module d'élasticité apparent	Pa	78.10 ⁸	—	107.10 ⁸	90.10 ⁸	11
Résilience	Pa	2,05.10 ⁴	—	3,72.10 ⁴	2,74.10 ⁴	25
Cote dynamique. K/D ²	sans	0,70	—	0,96	0,87	11

Le Sapelli est un bois mi-lourd et mi-dur. Son retrait est moyen. Ses résistances mécaniques sont moyennes et même très bonnes en compression et en flexion statique. Par contre, il est plutôt cassant et résiste mal au choc.

La durabilité naturelle du bois de Sapelli est moyenne, mais comme pour le Sipo, elle est suffisante pour que dans les emplois modérément exposés aux dégradations par pourriture, comme en menuiserie extérieure, sa conservation n'exige

pas de traitement de préservation.

Les caractéristiques physiques et mécaniques du Sapelli sont indiquées dans le tableau n° 3. Elles ont été obtenues à partir d'essais effectués au Centre Technique Forestier Tropical sur des échantillons qui provenaient de trois pays : Cameroun, République Centrafricaine, Côte-d'Ivoire.

Le Sapelli se scie et se travaille sans difficulté avec le matériel et les outils de coupe couramment utilisés.

Caractéristiques du bois de TIAMA.

Le Tiama a une couleur brun rouge plus ou moins foncé. L'aubier, plus clair, est nettement différencié. Le grain est assez fin. Le bois présente souvent du contrefil qui peut être très important et gênant lors du séchage et de la mise en œuvre.

Le Tiama est plutôt tendre et léger. Son retrait est moyen. Les résistances mécaniques sont également moyennes ; le bois est assez élastique ; par contre, il est plutôt cassant et résiste mal au choc. Ces caractéristiques ont été obtenues à partir d'essais effectués au Centre Technique Forestier Tropical sur des échantillons provenant de trois pays différents : Congo, Côte-d'Ivoire, République Centrafricaine.

La durabilité naturelle du bois de Tiama est moyenne mais suffisante pour tous les emplois où le bois n'est pas exposé de façon permanente à des risques importants d'attaques fongiques.

Par ailleurs, le bois est peu abrasif et se scie assez facilement avec les outils couramment utilisés. Les opérations d'usinage ne présentent pas de difficulté particulière sauf si le contrefil est très important.

Les caractéristiques physiques et mécaniques sont indiquées dans le tableau n° 4.

Caractéristiques du bois d'ACAJOU.

La couleur du bois, quelle que soit l'espèce, est homogène, brun-rose à rouge plus ou moins foncé, avec assez souvent des reflets satinés. Il arrive que certains bois soient très richement figurés en rai-

son de la présence d'un contrefil plus ou moins important mais ce caractère est peu fréquent et ne constitue pas de façon spécifique une gêne pour son emploi. Le grain est plutôt fin.

L'Acajou est un bois plutôt tendre et léger. Son retrait est faible. Ses résistances mécaniques sont assez bonnes. Le bois est élastique et assez résilient. Les valeurs des caractéristiques physiques et mécaniques sont indiquées dans le tableau n° 5. Elles ont été obtenues à partir d'essais effectués au Centre Technique Forestier Tropical sur des échantillons provenant de : Côte-d'Ivoire, Gabon, Cameroun.

L'Acajou a, par ailleurs, une assez bonne durabilité naturelle dans des conditions normales d'emploi.

D'une manière générale, le bois des différentes espèces de *Khaya* se scie aisément. En outre, il se travaille bien quand il n'est pas trop contrefilé.

Caractéristiques du bois de MAKORÉ.

Le bois a une couleur brun rosé. L'aubier nettement différencié est plus clair. Le contrefil est assez rare. Le grain est fin.

Le bois de Makoré est mi-dur et mi-lourd. Son retrait est assez faible. Ses résistances mécaniques sont moyennes. Il est assez élastique mais sa résistance au choc est plutôt faible. Les valeurs de ses caractéristiques sont indiquées dans le tableau n° 6. Elles ont été obtenues à partir d'essais effectués au Centre Technique Forestier Tropical sur des échantillons qui provenaient de trois pays différents : Congo, Côte-d'Ivoire, Gabon.

Le Makoré possède, en outre, une très bonne durabilité naturelle.

TABLEAU N° 5

Caractéristiques physiques et mécaniques de l'Acajou

	Unités	Mini	—	Maxi	Moyenne	Coefficient de variation en %
Caractéristiques physiques						
Dureté (Chalais-Meudon)	sans	1,3	—	10,6	3,8	47
Densité à 12 % d'humidité	sans	0,46	—	0,90	0,64	20
Rétractibilité volumétrique totale	%	8,0	—	13,9	11,1	12
Coefficient de rétractibilité volumétrique	%	0,19	—	0,53	0,39	15
Rétractibilité tangentielle	%	4,5	—	7,5	5,9	12
Rétractibilité radiale	%	2,2	—	6,3	4,6	21
Rapport T/R	sans	1,0	—	2,3	1,3	26
Caractéristiques mécaniques						
Fendage. Résistance moyenne	N/m	8,8.10 ³	—	25,7.10 ³	18,9.10 ³	29
Traction. Résistance moyenne	Pa	14,9.10 ⁵	—	32,6.10 ⁵	22,9.10 ⁵	20
Cisaillement. Résistance moyenne	Pa	53.10 ⁵	—	101.10 ⁵	82.10 ⁵	17
Compression axiale à 12 % d'humidité	Pa	342.10 ⁵	—	716.10 ⁵	489.10 ⁵	17
Cote statique. C/100 D	sans	5,8	—	9,7	7,9	13
Flexion statique à 12 % d'humidité	Pa	812.10 ⁵	—	1.497.10 ⁵	1.123.10 ⁵	17
Cote de flexion. F/100 D	sans	10,0	—	22,7	18,2	16
Module d'élasticité apparent	Pa	72.10 ⁸	—	108.10 ⁸	94.10 ⁸	11
Résilience	Pa	0,49.10 ⁴	—	5,0.10 ⁴	2,94.10 ⁴	33
Cote dynamique. K/D ²	sans	0,07	—	1,94	0,82	46

TABLEAU N° 6

Caractéristiques physiques et mécaniques du Makoré

	Unités	Mini	—	Maxi	Moyenne	Coefficient de variation en %
Caractéristiques physiques						
Dureté (Chalais-Meudon)	sans	3,1	—	5,4	3,6	22
Densité à 12 % d'humidité	sans	0,62	—	0,72	0,68	6
Rétractibilité volumétrique totale	%	11,6	—	14,8	12,9	9
Coefficient de rétractibilité volumétrique	%	0,40	—	0,53	0,47	9
Rétractibilité tangentielle	%	7,2	—	8,7	7,9	7
Rétractibilité radiale	%	5,0	—	6,8	5,9	14
Rapport T/R	sans	1,1	—	1,5	1,3	12
Caractéristiques mécaniques						
Fendage. Résistance moyenne	N/m	16,9.10 ³	—	27,4.10 ³	20,6.10 ³	21
Traction. Résistance moyenne	Pa	21,6.10 ⁵	—	32,1.10 ⁵	27,7.10 ⁵	15
Cisaillement. Résistance moyenne	Pa	72.10 ⁵	—	115.10 ⁵	93.10 ⁵	21
Compression axiale à 12 % d'humidité	Pa	448.10 ⁵	—	672.10 ⁵	565.10 ⁵	14
Cote statique. C/100 D	sans	6,5	—	10,1	8,5	14
Flexion statique à 12 % d'humidité	Pa	1.022.10 ⁵	—	1.513.10 ⁵	1.310.10 ⁵	14
Cote de flexion. F/100 D	sans	14,9	—	22,7	19,6	12
Module d'élasticité apparent	Pa	95.10 ⁸	—	125.10 ⁸	107.10 ⁸	11
Résilience	Pa	1,47.10 ⁴	—	4,21.10 ⁴	2,64.10 ⁴	30
Cote dynamique. K/D ²	sans	0,39	—	0,75	0,56	23

Par contre, il présente un sciage assez difficile. Le bois est abrasif et désaffûte rapidement les outils de coupe. L'emploi de lames stellitées est absolument nécessaire. De la même façon, le bois

désaffûte rapidement tous les outils d'usinage ou de débit second. L'emploi d'outils à mise de carbure est pratiquement indispensable.

ÉTUDE DES POSSIBILITÉS DE GROUPEMENT D'ESSENCES PAR L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

Les bois que l'on vient de décrire apparaissent assez proches les uns des autres, tant par leurs caractéristiques physiques et mécaniques que par leur durabilité. Les différences qui apparaissent pour l'usinage ne sont pas, dans l'industrie, vraiment gênantes, la plupart des machines étant équipées systématiquement d'outils à mise de carbure. En outre, elles sont déjà utilisées indifféremment, dans de nombreux cas, pour les mêmes emplois.

Cependant, avant d'étudier leur utilisation en groupement pour la reconstitution de bois massifs, il a paru indispensable de s'assurer de leur similitude de façon objective et mathématique par la méthode d'analyse en composantes principales.

Présentation de la méthode.

Le but de l'analyse en composantes principales est de donner une représentation visuelle globale de l'ensemble des caractéristiques d'un échantillon de bois. L'analyse de la totalité des bois ainsi représentés permet, tout d'abord de les comparer entre

eux, ensuite d'étudier les possibilités de les grouper par rapport à certains critères, en particulier des exigences correspondant aux diverses utilisations.

Les essais physiques et mécaniques de laboratoire permettent de mesurer un certain nombre de caractéristiques technologiques du bois. Certaines ont une influence déterminante pour l'emploi. D'autres, sont plus fondamentales : systématiquement mesurées, elles permettent de comparer les essences entre elles. Dans l'analyse en composantes principales effectuée au Centre Technique Forestier Tropical, 12 caractères ont été retenus :

On peut imaginer que chaque arbre-échantillon soit ainsi représenté par un point dans un espace à 12 dimensions ayant pour coordonnées les 12 caractères mesurés.

Toutefois, un tel espace ne peut pas être visualisé. La méthode la mieux adaptée pour représenter concrètement les nuages de points que l'on obtiendrait alors dans l'espace à 12 dimensions est l'analyse en composantes principales. Elle consiste à projeter le nuage dans un sous-espace de dimension

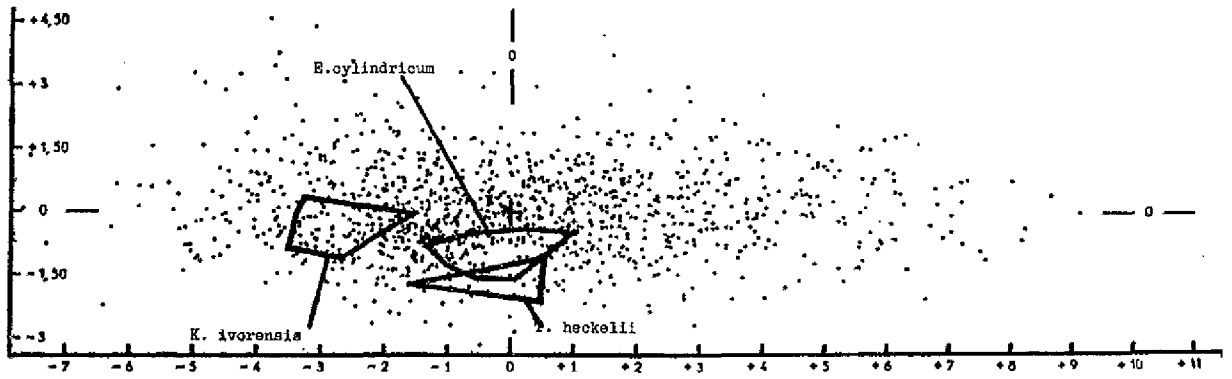


FIG. 1. — Analyse en composantes principales des données physiques et mécaniques.
Nuage de points dans le plan des 2 premières composantes principales.

FIG. 2.

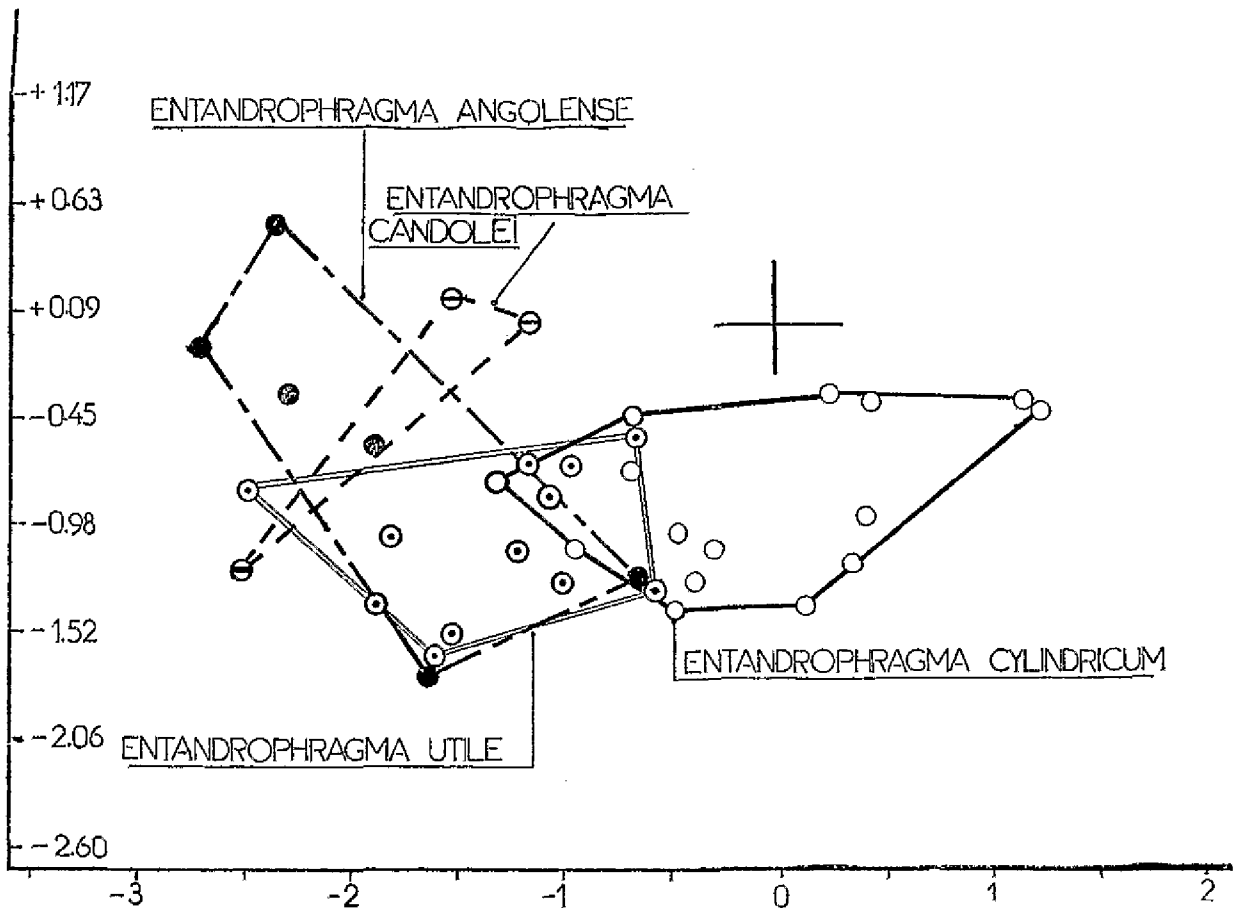


FIG. 3.

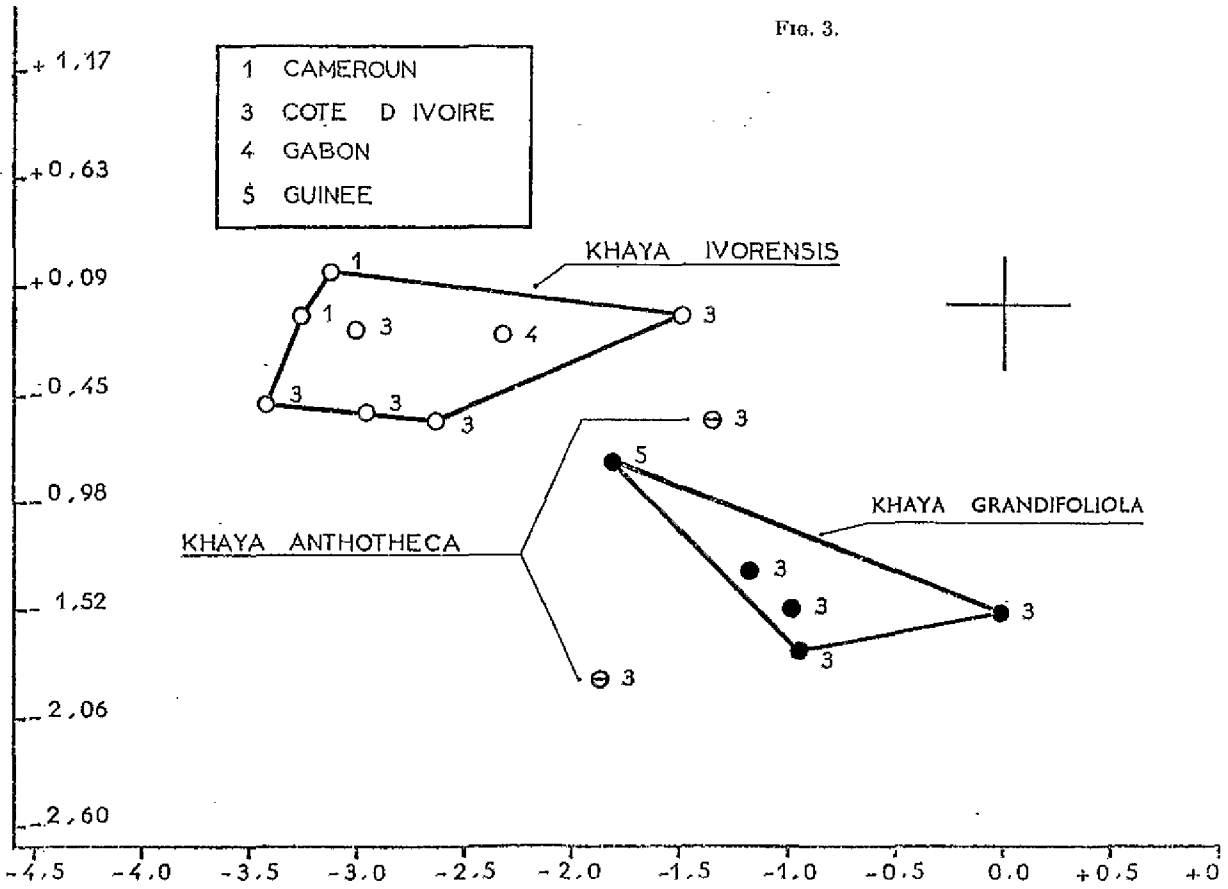
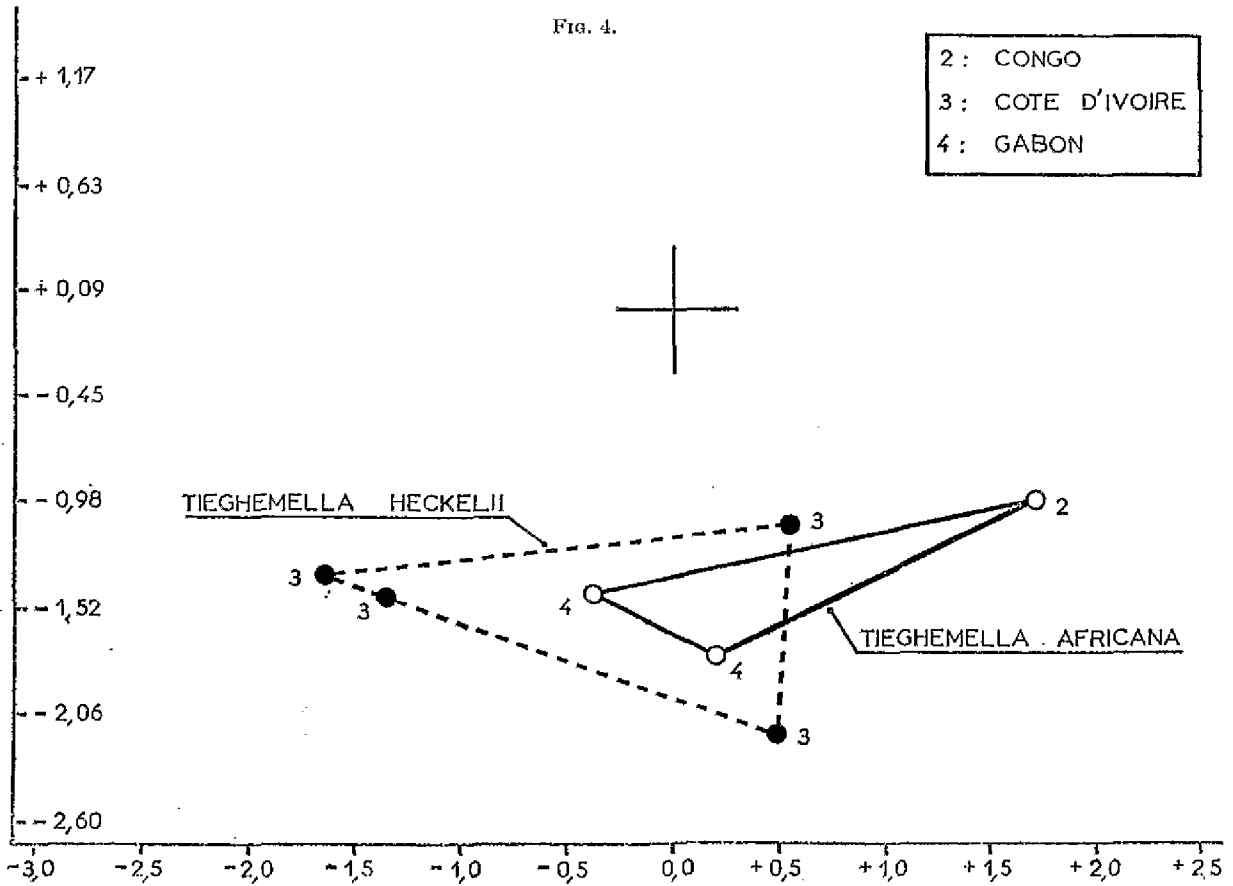


FIG. 4.



Caractéristiques	Abréviations
Dureté	N
Densité à 12 % d'humidité	D
Retrait volumétrique total	B _v
Coefficient de rétractibilité volumétrique	v
Rapport des rétractibilités linéaires	T/R
Fendage	Fend
Traction	Tpp
Cisaillement	Cis
Compression de fil	C
Flexion statique	F
Module d'élasticité	E
Coefficient de résilience	K

plus faible, représentable graphiquement, et tel que le nuage projeté ressemble le plus fidèlement possible au nuage initial.

Dans le cas présent, l'analyse en composantes principales a permis une représentation dans un espace à deux dimensions ; elle a, certes, entraîné une certaine distorsion, mais celle-ci est grâce à la méthode utilisée, la plus faible possible.

La figure n° 1 donne la représentation de l'ensemble des points.

Etude du groupe des *Entandrophragma*.

Les représentations graphiques fournies par l'analyse en composantes principales pour les quatre espèces sont reproduites sur la figure n° 2.

Leur examen met en évidence les points suivants :

— les polygones correspondant à chaque espèce sont très proches ; en particulier celui représentant l'espèce *Entandrophragma utile* recouvre une partie de ceux de toutes les autres espèces,

— si des différences existent entre ces espèces : le Sapelli, *Entandrophragma cylindricum*, est « plus solide » que les trois autres. Le Tiama, *Entandrophragma angolense*, et le Kosipo, *Entandrophragma candolei* ont une rétractibilité supérieure ; celle-ci rapportée à l'ensemble des bois, apparaît faible.

Les représentations de ces quatre espèces indiquent des bois très proches du centre de gravité de la représentation de tous les bois tropicaux (indiqué par la croix) ; leur retrait moyen est voisin et légèrement inférieur à la moyenne ; leur solidité (qui indique globalement le comportement mécanique) varie, mais entre des limites très resserrées et elles sont toutes voisines également de la moyenne.

Les conclusions confirment celles que le simple examen des résultats des essais physiques et mécaniques permettait déjà d'envisager : les bois de ces quatre espèces ont des caractéristiques suffisamment proches pour non seulement convenir pour les mêmes emplois, mais aussi pouvoir être utilisés en mélange sans craindre des comportements différents pour chacune d'elles.

Etude du groupe des *Khaya*.

Les résultats graphiques fournis par l'étude des trois espèces de *Khaya* sont reproduits sur la figure n° 3.

Les polygones représentatifs de deux espèces : *Khaya ivorensis* et *Khaya anthotheca* sont assez voisins. En outre, ils sont très proches des deux points correspondant aux essais effectués sur *Khaya anthotheca*.

Le *Khaya ivorensis* apparaît un peu moins solide que les précédents et possède, en outre, une rétractibilité très légèrement plus élevée. Toutefois, ces différences restent faibles en comparaison des variations inter-espèces apparues dans la représentation du nuage de points de l'étude générale.

D'une façon générale, la représentation de ces trois espèces par l'analyse en composantes principales indique des bois proches du centre de gravité de la représentation générale (indiqué par une croix). Leur retrait est dans l'ensemble légèrement inférieur à la moyenne des bois tropicaux. Leur solidité (comportement mécanique global) varie peu et indique un bois moyennement résistant présentant, toutefois, un comportement légèrement inférieur à la moyenne.

Ces conclusions confirment que les caractéristiques de ces différentes espèces sont suffisamment voisines pour que l'on envisage de les utiliser non seulement pour les mêmes emplois mais aussi en mélange, et sans que l'on ait à craindre des comportements trop différents.

En outre, si l'on compare leur situation par rapport à celle des *Entandrophragma*, on peut constater une certaine coïncidence avec les polygones représentatifs de ce genre confirmant les similitudes existant entre les propriétés du bois et que par ailleurs l'examen des résultats des essais physiques et mécaniques laissait supposer.

Etude du groupe des *Tieghemella*.

La représentation graphique des deux espèces du genre des *Tieghemella* est donnée figure n° 4.

Les polygones représentatifs de chacune des deux espèces sont en partie confondus. Ils indiquent des bois aux propriétés très voisines, sinon identiques et confirment bien le fait que ces deux espèces que l'on ne peut en fait différencier que par la provenance, soient regroupées et utilisées sous une même appellation commerciale.

La représentation du Makoré par l'analyse en composantes principales est assez voisine du centre de gravité moyen de l'ensemble. En solidité, le bois apparaît comme un bon bois moyen et sa rétractibilité est assez nettement inférieure à la moyenne.

Par ailleurs, les polygones représentatifs des deux espèces de *Tieghemella* si on compare leur

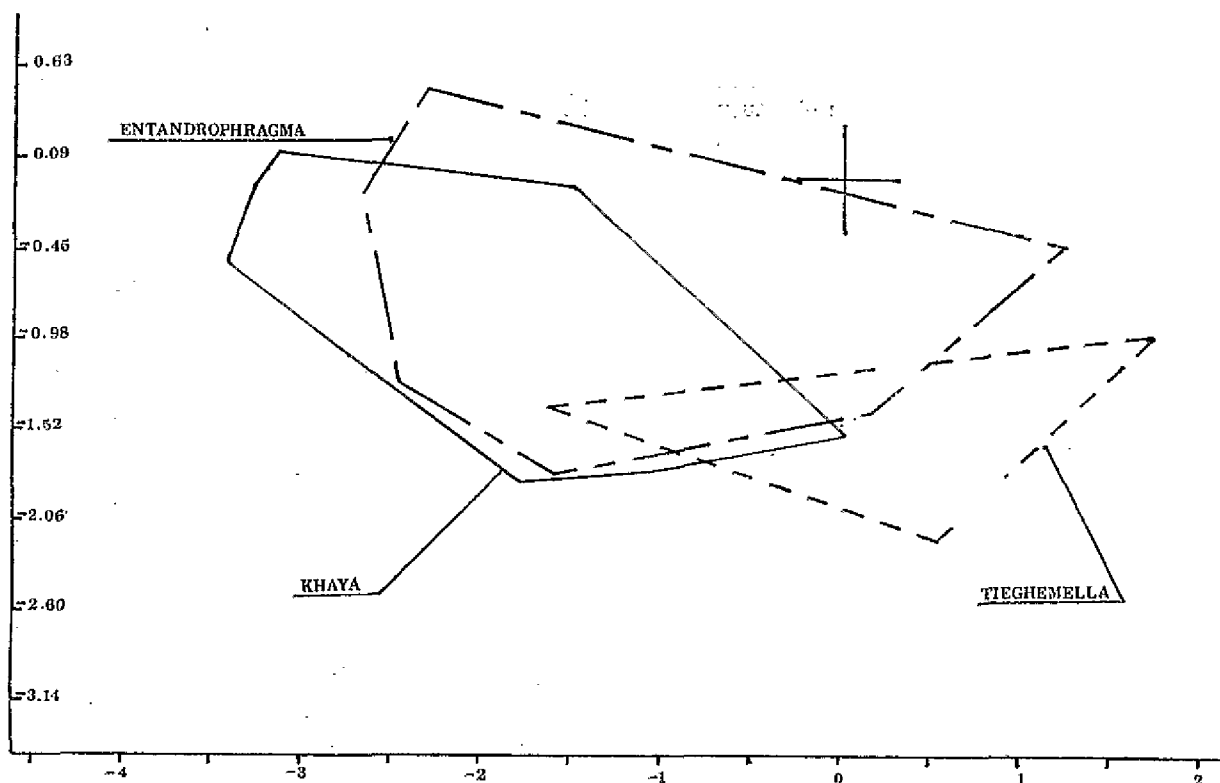


FIG. 5.

position à celle des polygones des espèces précédentes, apparaissent très voisins et en partie confondus avec eux. Ils indiquent des caractéristiques suffisamment proches des *Khaya* et des *Entandrophragma* pour que l'on puisse envisager leur mélange sans avoir à craindre des comportements trop différents.

L'analyse confirme donc nettement, du point de vue des caractères physiques et mécaniques, les deux hypothèses formulées au début de cette étude :

— les bois des différentes espèces de chaque genre ont des propriétés très voisines et peuvent donc être employés indifféremment, et même sans risque, en mélange.

— les bois des trois groupements ainsi constitués peuvent à leur tour être regroupés, les caractères physiques et mécaniques étant assez proches et même souvent les mêmes.

Les polygones de dispersion ont été tracés pour chaque genre ; leur représentation est donnée sur la figure n° 5. L'examen de ces graphiques montre qu'ils se recouvrent sur une grande partie. L'hypothèse initiale était donc bien exacte et les caractères de tous ces bois sont, objectivement et d'une façon globale, suffisamment voisins pour que l'on puisse raisonnablement envisager de regrouper avec succès toutes ces espèces pour la fabrication d'un matériau reconstitué.

CONCLUSION

L'étude détaillée des caractéristiques des différentes espèces retenues dans les trois genres : *Entandrophragma*, *Khaya* et *Tieghemella* ainsi que l'analyse en composantes principales permettent de formuler les appréciations suivantes :

— les bois correspondant aux six appellations commerciales : Sipo, Sapelli, Kosipo, Tiama, Acajou et Makoré sont tous utilisés en menuiserie de bâti-

ment. Toutefois, certaines espèces comme le Kosipo ou le Tiama sont assez fréquemment contrefilées et leur emploi n'est pas toujours bien accepté par les utilisateurs,

— l'aspect de ces différents bois (couleur, grain...) est très voisin. Les caractéristiques mécaniques et les propriétés physiques, principalement le retrait, varient peu d'une espèce à l'autre. Leur durabilité

naturelle permet, en outre, de les utiliser pour les mêmes emplois. Dans tous les cas, les bois se peignent et se vernissent aisément. Ils se clouent et se vissent sans difficulté. Le matériau obtenu pourra donc être considéré, quelles que soient les essences le constituant, comme homogène du point de vue de sa mise en œuvre et les travaux correspondants pourront être exécutés sans précaution particulière,

— le séchage en mélange des quatre espèces d'*Entandrophragma* ne devrait pas poser de problèmes. En séchage traditionnel, à température et humidité contrôlées et ventilation forcée, la même table est utilisée indifféremment.

En outre, les déformations entraînées par un éventuel contrefil plus prononcé sur certaines pièces devraient être négligeables en raison de la faible dimension des pièces provenant des déchets de scierie. L'Acajou, comme le Makoré, sèche également bien et sans difficulté particulière. Toutefois, les tables utilisées en séchoir traditionnel sont différentes. Ce mode de séchage est donc difficile à appliquer dans ce cas, dans la mesure où il ne sera techniquement pas possible d'effectuer un tri systématique des pièces avant séchage, il sera

par suite nécessaire de choisir un mode de séchage permettant un certain mélange d'espèces et des débits d'épaisseurs différentes, ou d'opérer très lentement en prenant la table correspondant au bois et à l'épaisseur les plus difficiles.

Enfin, si le sciage et l'usinage des *Entandrophragma* et des *Khaya* doivent pouvoir être effectués sans trop de difficulté à l'aide d'outils ordinaires non traités, il n'en est pas de même des *Tieghemella*. De plus, le produit fabriqué et la méthode de travail qui en découle ne permettront probablement pas de procéder à un tri des pièces assurant un usinage séparé en deux groupes bien distincts. Dans ces conditions, un matériel puissant équipé de lames stellites ou d'outils au carbure doit être prévu pour l'usinage des pièces destinées à la fabrication du matériau reconstitué.

Dans ces conditions, la fabrication par la technique du lamellé-collé d'un matériau composite, mais toutefois très homogène, devrait être possible à partir des mélanges :

— d'une part, des quatre espèces d'*Entandrophragma*.

— d'autre part, des six appellations commerciales considérées : Sipo, Sapelli, Kosipo, Tiama, Makoré et Acajou d'Afrique.

Tableau récapitulatif des caractéristiques des espèces retenues pour l'étude

Nom vernaculaire Nom scientifique	Sipo <i>Entandrophragma utile</i>	Sapelli <i>Entandrophragma cylindricum</i>	Kosipo <i>Entandrophragma candollei</i>	Tiama <i>Entandrophragma angolense</i>	Acajou <i>Khaya spp.</i>	Makoré <i>Tieghemella spp.</i>
Couleur	Brun rose	Brun rose	Brun rose	Brun rose	Rose à brun rouge	Brun rose
Grain	Moyen	Assez fin	Assez moyen	Moyen	Moyen	Assez fin
Contrefil	Rare	Léger quand il existe	Assez fréquent	Parfois assez marqué	Parfois	Rare
Propriétés physiques	Léger à mi-lourd Tendre Retrait moyen	Mi-lourd Mi-dur Retrait moyen	Léger à mi-lourd Tendre à mi-dur Retrait moyen	Léger Tendre Retrait moyen	Léger à mi-lourd Tendre à mi-dur Retrait moyen	Mi-lourd Mi-dur Retrait moyen
Propriétés mécaniques	Moyennes	Moyennes à assez bonnes	Moyennes	Moyennes	Moyennes	Moyennes à assez bonnes
Durabilité naturelle	Moyenne	Moyenne	Assez bonne	Assez moyenne	Bonne	Très bonne
Difficultés à l'usage	Sans	Sans	Un peu désaffûtant	Sans	Sans	Abrasif. Nécessite l'emploi d'outils spéciaux
Principales utilisations actuelles ou possibles du bois massif	Menuiseries de bâtiment Ameublement	Menuiseries de bâtiment Ameublement et décoration	Menuiseries de bâtiment	Menuiseries de bâtiment	Menuiseries de bâtiment Ameublement	Menuiseries de bâtiment

ÉTUDE DES POSSIBILITÉS DE RECONSTITUTION PAR LA TECHNIQUE DU LAMELLE-COLLE

DESCRIPTION DES ESSAIS

Aucune méthode normalisée n'existe en France pour porter un jugement sur les possibilités d'utilisation d'un bois par la technique du lamellé-collé. Toutefois, un protocole des essais et des spécifications a été mis au point par les laboratoires spécialisés du Centre Technique du Bois. Le Centre Technique Forestier Tropical s'y est référé pour toutes les études menées dans ce domaine sur les bois tropicaux.

Deux essais permettent d'étudier l'aptitude au collage :

- un essai de cisaillement,
- un essai de délamination.

L'essai de cisaillement est utilisé pour déterminer, tout d'abord, le rapport entre la charge de rupture dans le plan de collage et la charge de rupture dans le bois massif. Il est considéré comme positif si le rapport, exprimé en %, est supérieur à 90. Il permet de déceler ainsi si les joints de colle sont ou non des zones de faiblesse au sein du matériau reconstitué.

On détermine également, par le même essai, le coefficient d'adhérence. On estime, après la cassure, le rapport exprimé en %, entre la surface des fibres arrachées hors du plan de collage et la surface totale du plan de cisaillement. L'essai est considéré comme positif si le coefficient d'adhérence est supérieur à 50 %. Il permet d'apprécier la qualité du collage du point de vue de l'adhérence entre la colle et le bois.

L'essai de cisaillement est réalisé à partir d'éprouvettes en forme d'escalier. Six couples d'éprouvettes de cisaillement dans le bois massif ou éprouvettes de cisaillement dans le plan de collage, sont découpés face à face, de part et d'autre de l'axe longitudinal de la poutre élémentaire.

Les éprouvettes de cisaillement dans le plan de collage, sont découpées de telle manière que l'effort s'exerce suivant ce plan ; celles de cisaillement dans le bois massif sont décalées pour que l'effort s'applique dans le bois.

L'essai de délamination permet d'apprécier le comportement dans le temps du matériau lorsqu'on le soumet à des conditions provoquant un vieillissement accéléré. Son principe est de soumettre les éprouvettes dans un autoclave rempli d'eau à des cycles d'injection sous pression et sous vide, entrecoupés de périodes de ressuyage, créant des tensions au niveau du joint de colle dont on peut ainsi juger la tenue. Ces cycles sont au nombre de trois et comprennent chacun :

- une mise sous vide initiale,
- une injection sous pression dans l'eau à température ambiante selon le schéma suivant :
 - une mise sous pression à 6 bars pendant 2 heures,
 - un cycle de pompage pour mise sous vide pendant 15 mn,
 - une mise sous pression de 6 bars pendant 2 heures.
- les éprouvettes sont ensuite séchées pendant 3 à 4 jours dans les conditions de température et d'humidité du laboratoire, puis stabilisées une dizaine de jours en salle climatisée à 22 °C et 60 % d'état hygrométrique.

Lorsque les 3 cycles sont terminés, on détermine le coefficient de délamination. Il est égal au rapport entre la longueur de joint décollé et sa longueur totale. Les éprouvettes sont découpées dans les mêmes poutres que celles utilisées pour l'essai de cisaillement. Elles mesurent 7,5 cm dans le sens du fil, 10 cm de large et 11,4 cm de haut.

RÉALISATION DES ESSAIS

Il était important, avant d'étudier l'aptitude des différentes espèces à être utilisées en mélange, de savoir si une ou plusieurs d'entre elles présentaient des difficultés particulières pouvant nuire à son utilisation en lamellé-collé.

Définition des schémas de fabrication des poutres échantillons.

Cinq poutres échantillons ont été fabriquées pour chaque espèce à l'exception de l'Acajou (*Khaya sp.*)

pour lequel la faible quantité de bois disponible n'a permis de réaliser que deux poutres. Ceci permettait de disposer, pour chacune d'entre elles, de 30 valeurs pour le calcul des coefficients de résistance et 30 pour les coefficients d'adhérence. Les moyennes par essence ont donc été calculées sur 150 résultats ce qui permet d'obtenir une représentation statistique valable du comportement du bois étudié.

Pour l'étude de l'aptitude au collage en mélange le problème est plus complexe. En effet, et si l'on

exclut l'Acajou pour lequel la faible quantité de bois disponible a réduit le nombre d'éprouvettes, il reste cinq espèces pour lesquelles on a recherché les compositions optimum et le nombre minimum de poutres à fabriquer.

Le nombre de combinaisons possibles 2 à 2 parmi les cinq espèces retenues revient à calculer le C_m^p (où $m = 5$ et $p = 2$) selon la relation classique de l'analyse combinatoire :

$$C_m^p = \frac{m!}{p!(m-p)!} = \frac{5!}{2!3!} = \frac{20}{2} = 10$$

En effet, il est évident que l'ordre choisi dans une combinaison, par exemple Sipo-Sapelli ou Sapelli-Sipo, n'a aucune influence sur le résultat ; elles peuvent être considérées comme identiques.

Des essais antérieurs effectués au Centre Technique Forestier Tropical sur l'aptitude des bois tropicaux à l'utilisation en lamellé-collé ont montré que le nombre minimum de valeurs permettant de qualifier valablement l'aptitude au collage d'une combinaison d'espèces devrait être de 100, soit un total de 1000 pour les cinq espèces. Chaque poutre élémentaire fournissant 30 valeurs, leur nombre total minimum est donc de 33.

Une première série de poutres a été réalisée en ne considérant tout d'abord que le mélange des espèces 2 à 2. Trois poutres ont été fabriquées pour chaque combinaison possible (10 au total) soit 30 en tout. Le nombre minimum de 33 a été atteint par la suite, grâce à la fabrication de poutres en mélange total, c'est-à-dire composée d'au moins une lamelle de chaque essence. En réalité, la quantité de bois disponible a permis de dépasser le nombre théorique minimum de poutres élémen-

taires. Ainsi, on a fabriqué 42 poutres auxquelles sont venues s'ajouter 8 poutres en mélange total, chaque lamelle étant composée d'une essence différente, y compris l'Acajou. De telles poutres donnent naissance à 5 combinaisons possibles soit un total de 40. Ceci revient, en théorie, à calculer les combinaisons possibles de 6 objets pris 2 à 2, selon la relation de l'analyse combinatoire :

$$C_6^2 = \frac{6!}{2!4!} = 15$$

Chaque combinaison se retrouvera donc au moins deux fois dans les 8 poutres précédemment citées. Les résultats seront calculés sur au moins 10 valeurs d'essais par couple d'essences. Ils n'auront bien sûr pas le même critère de fiabilité que ceux obtenus sur les 42 poutres élémentaires ne contenant pas de lamelle d'Acajou mais contribueront toutefois à compléter les observations fournies par cette étude.

Le détail de constitution des différentes poutres élémentaires fabriquées pour essai est donné dans le tableau suivant.

CODE UTILISÉ

- A = Acajou
- Si = Sipo
- S = Sapelli
- T = Tiama
- K = Kosipo
- M = Makoré

Les détails des compositions dans lesquelles ne figurent que deux lettres (ex : T — K) indiquent un mélange alterné de ces deux espèces.

N° de poutre	Composition	N° de poutre	Composition	N° de poutre	Composition
1	A	28	Si	55	T Si
2	T A S A S A	29	S T	56	T Si
3	Si A K A T A	30	Si	57	K M
4	T K M S A Si	31	Si	58	K M
5	K M S A Si T	32	T	59	K Si
6	M S A Si T K	33	T	60	K Si
7	S A Si T K M	34	T	61	K Si
8	A Si T K M S	35	T	62	M Si
9	Si T K M S A	36	T	63	M Si
10	A	37	K	64	S Si
11	T K	38	K	65	S Si
12	T K	39	K	66	S Si
13	T K	40	K	67	T K S Si T K
14	T M	41	K	68	K S Si T K S
15	T M	42	M	69	S Si T K S Si
16	T M	43	M	70	Si T K S Si T
17	T S	44	M	71	T S Si K T S
18	K S	45	M	72	S Si T K T S
19	K S	46	M	73	Si K Si S T S
20	K S	47	S	74	K Si K S T S
21	K M	48	S	75	M T M K M S
22	M Si	49	S	76	M Si M T M K
23	M S	50	S	77	M S M Si M T
24	M S	51	S	78	M T K M S Si
25	M S	52	T S	79	M Si T M K S
26	Si	53	T S	80	M S Si M T K
27	Si	54	T Si	81	M K S M Si T

Fabrication des poutres élémentaires.

Un contrôle d'humidité par prélèvement au hasard d'un échantillonnage témoin représentant 5 % du volume de bois disponible dans chaque espèce a montré que l'humidité des pièces déchets de sciage était suffisamment basse pour permettre le bon déroulement des opérations de collage sans séchage préalable.

Les poutres élémentaires sont constituées de 6 lamelles débitées aux dimensions suivantes :

— longueur	800 mm
— largeur	150 mm
— épaisseur	19 mm

L'encollage est réalisé au moyen d'un rouleau encolleur. Le grammage est d'environ 400 g/m², pour un encollage double face. Les temps d'assemblage ouverts et fermés indiqués par le fabricant de colle ont été rigoureusement respectés. La colle utilisée est une résorcine. Le pressage est assuré au moyen de presses à chaîne espacées de 30 cm environ. Des cales épaisses en bois très dur, placées de part et d'autre des poutres, répartissent le serrage par point en une pression uniforme de 12 kg/cm². Les poutres sont maintenues 24 heures sous presse à la température minimum de 21 °C. Elles sont ensuite placées en salle climatisée pour stabilisation. Ce n'est qu'après cette période que l'on procède à leur débit pour préparer les éprouvettes qui serviront aux divers essais.

RÉSULTATS

Introduction.

Les résultats obtenus après réalisation des essais sur les différentes poutres élémentaires ont été rassemblés en 5 groupes faisant intervenir des critères différents :

- Résultats par espèce.
- Résultats par couple d'essences associées 2 à 2 dans les poutres échantillons.
- Résultats par mélange des quatre espèces d'*Entandrophragma*.
- Résultats par mélange des quatre espèces d'*Entandrophragma* et du Makoré.
- Résultats pour le mélange total des six espèces ou genres retenus pour cette étude.

Les résultats sont tous regroupés dans les tableaux joints en annexe.

Toutes les valeurs numériques caractérisant les tests d'aptitude au collage sont le résultat de la moyenne d'une série de mesures. Dans ces conditions, il est absolument nécessaire de caractériser la dispersion des valeurs autour de chaque moyenne. Pour cela, on calcule pour chaque série de résultats l'écart-type et le coefficient de variation.

Toutefois, lorsque le nombre de valeurs servant à calculer la moyenne est trop faible les résultats sont donnés sans calcul statistique.

Résultats par espèce.

ACAJOU (*Khaya spp.*).

Étant donné la faible quantité de bois dont on disposait, deux poutres élémentaires ont seulement pu être réalisées. Les résultats sont donnés sans écart-type ni coefficient de variation.

La moyenne des rapports des résistances est égale à 92 %. De la même façon, le coefficient

d'adhérence est égal à 85 %. Ces résultats sont nettement supérieurs aux valeurs minimum exigées. En outre, les coefficients de délamination, pour chaque poutre, sont identiques et égaux à 0 %. Ils indiquent un comportement excellent du matériau lamellé-collé puisqu'on ne peut obtenir un meilleur résultat que ce coefficient de 0 %.

Ces essais permettent de conclure à une très bonne aptitude du bois d'Acajou (*Khaya spp.*) à l'utilisation en lamellé-collé.

— MAKORÉ (*Tieghemella spp.*).

Les valeurs absolues des rapports des résistances, des coefficients d'adhérence et des coefficients de délamination varient peu.

L'analyse statistique ne fait pas apparaître de fortes dispersions et permet de conclure à un comportement homogène du bois :

Rapport des résistances	99 %
Ecart-type	8 %
Coefficient de variation	8 %
Coefficient d'adhérence	91 %
Ecart-type	9 %
Coefficient de variation	10 %
Coefficient de délamination	0,6 %
Ecart-type	1,3 %

Les résultats obtenus pour les rapports des résistances sont excellents. Pris individuellement par poutre-élémentaire, ils sont supérieurs à la valeur minimum de 90 % ce qui nous donne une moyenne très élevée et un coefficient de variation relativement faible. Pour l'étude de l'adhérence, les résultats sont plus dispersés mais ils restent tous excellents. Enfin, l'écart-type calculé en délamination peut paraître relativement important pour la moyenne obtenue. Cela est dû à la différence élevée entre la valeur maximum mesurée qui était de 4 %

et le très grand nombre de résultats nuls obtenus sur des éprouvettes n'ayant présenté aucune délamination. Le coefficient de variation ne présente dans ces conditions aucun intérêt car il est sans signification physique.

D'une manière générale, les résultats indiquent, comme pour l'Acajou, un comportement excellent aux essais et une très bonne aptitude à l'utilisation en lamellé-collé.

— SapeLLI (*Entandrophragma cylindricum*).

Les résultats des essais effectués avec le bois de Sapelli sont un peu moins bons que dans le cas du Makoré mais ils restent, toutefois, satisfaisants et très bons :

Rapport des résistances	95 %
Ecart-type	7 %
Coefficient de variation	7 %
Coefficient d'adhérence	88 %
Ecart-type	4 %
Coefficient de variation	4 %
Coefficient de délamination	0,5 %
Ecart-type	1,6 %

Les résultats sont bons en valeur absolue. En outre, et à l'exception de la délamination pour des raisons identiques à celles des essais sur le Makoré, l'écart-type est faible vis-à-vis de la valeur moyenne de la caractéristique mesurée. De la même façon, les coefficients de variation sont très faibles et indiquent un comportement très homogène. Enfin, 90 % des éprouvettes ne présentent aucune trace de délamination. Le coefficient le plus élevé, mesuré sur éprouvette ayant présenté le plus mauvais comportement, est de 6,8 %.

— Sipo (*Entandrophragma utile*).

Le comportement du Sipo est très voisin de celui du Sapelli pour l'essai de cisaillement. Pour la résistance à la délamination, il a présenté le meilleur comportement de tous les bois retenus dans cette étude.

Rapport des résistances	94 %
Ecart-type	5 %
Coefficient de variation	5 %
Coefficient d'adhérence	89 %
Ecart-type	6 %
Coefficient de variation	7 %
Coefficient de délamination	0,2 %
Ecart-type	0,7 %

Les moyennes des rapports des résistances et les coefficients d'adhérence sont nettement supérieurs aux valeurs minimum exigées. En outre, les écarts-types calculés sont peu importants et les coefficients de variation relativement faibles indiquent un comportement très homogène du bois.

Les coefficients de délamination sont en moyenne voisins de 0 %. Ce résultat excellent indique que le Sipo est le bois qui semble parmi ceux étudiés ici,

le mieux résister au phénomène de délamination ce qui est peut être lié à son retrait qui est le plus faible.

— Kosipo (*Entandrophragma candollei*).

Le comportement du Kosipo à l'essai de cisaillement est remarquablement homogène. L'analyse statistique fait apparaître une dispersion peu importante des résultats qui sont, par ailleurs, excellents en valeur absolue.

Rapport des résistances	93 %
Ecart-type	2 %
Coefficient de variation	2 %
Coefficient d'adhérence	94 %
Ecart-type	4 %
Coefficient de variation	4 %
Coefficient de délamination	0,4 %
Ecart-type	1,3 %

Le Kosipo présente un comportement excellent et très homogène. Son aptitude à l'utilisation en lamellé-collé peut être qualifiée d'excellente.

— Tiama (*Entandrophragma angolense*).

Le Tiama est l'espèce, parmi celles retenues dans le cadre de cette étude, qui a présenté le comportement le moins bon aux essais d'aptitude à l'utilisation en lamellé-collé. D'une manière générale, la dispersion des résultats est plus importante et les moyennes calculées sur l'ensemble des poutres-échantillons sont moins bonnes, tout en étant généralement suffisantes pour que l'on puisse qualifier les résultats d'assez bons.

Rapport des résistances	90 %
Ecart-type	5 %
Coefficient de variation	5 %
Coefficient d'adhérence	71 %
Ecart-type	9 %
Coefficient de variation	12 %
Coefficient de délamination	2,8 %
Ecart-type	6,7 %

La moyenne des rapports des résistances est juste acceptable puisque, égale à la valeur minimum exigée. Toutefois, la dispersion des résultats est peu importante pour cette caractéristique. Par suite, les résultats pourront être considérés comme assez satisfaisants.

Les coefficients d'adhérence sont tous supérieurs à la valeur minimum exigée.

Les coefficients de délamination sont, en moyenne, nettement supérieurs à ceux mesurés sur les autres espèces d'*Entandrophragma* ce qui pourrait être en rapport avec le retrait plus élevé du bois de Tiama. Toutefois, le coefficient de délamination moyen, égal à 2,8 %, est nettement inférieur à la valeur maximum admissible de 10 %, ce qui étant donné l'écart-type de 6,7 % peut être considéré comme satisfaisant.

Le Tiama présente une assez bonne aptitude à l'utilisation en lamellé-collé. Toutefois, les essais montrent que le bois peut parfois présenter certaines difficultés mais qui ne devraient pas pour autant le faire exclure des bois utilisables dans la fabrication d'un matériau reconstitué par la technique du lamellé-collé.

Résultats par couples d'espèces.

Les coefficients de variation des caractéristiques mesurées à partir de poutres constituées par le mélange de deux essences font apparaître une dispersion importante et nettement supérieure à celle des poutres composées d'une seule essence.

— Cas de l'Acajou.

Le bois d'Acajou (*Khaya sp.*) présente une très bonne aptitude à l'utilisation en lamellé-collé en mélange avec les espèces du genre des *Entandrophragma*. En effet quelle que soit l'espèce associée, les rapports des résistances sont tous égaux ou supérieurs à 100 %. Par ailleurs, les coefficients d'adhérence et les coefficients de délamination sont excellents.

De plus, les rapports des résistances mesurées sur les poutres constituées d'un mélange Acajou-*Entandrophragma* sont nettement supérieurs à ceux mesurés sur les poutres composées d'une seule essence. Les coefficients de délamination sont par contre légèrement supérieurs à ceux mesurés sur les poutres d'une seule essence, mais restent toutefois très inférieurs à la valeur maximum admissible.

— Cas du Makoré.

Le Makoré a présenté en mélange avec les quatre autres espèces d'*Entandrophragma* une aptitude à l'utilisation en lamellé-collé très convenable. Les résultats sont excellents avec le Sapelli, le Kosipo et le Tiama. Les rapports des résistances calculés dans le cas du Sipo, sont, par contre, tout juste acceptables puisque égaux en moyenne à 90 %. Les coefficients d'adhérence et de délamination sont toutefois toujours excellents.

Contrairement à l'Acajou, les résultats des essais effectués sur poutres en mélange d'essences ne sont pas supérieurs à ceux enregistrés avec le Makoré seul. Ils sont très voisins en délamination mais par contre légèrement inférieurs pour les deux caractéristiques mesurées à l'essai de cisaillement.

— Cas du Sipo.

À l'exception du collage avec le Makoré qui a présenté, sans raison apparente, un rapport moyen des résistances à peine suffisant, le Sipo se caractérise, de façon générale, par une très bonne aptitude au collage en mélange avec les autres espèces. Les rapports des résistances, les coefficients d'adhérence et les coefficients de délamination sont tous excel-

lents et sensiblement voisins de ceux mesurés sur les éprouvettes constituées uniquement de Sipo. Par contre, la dispersion des résultats est relativement importante. Elle apparaît comme une caractéristique essentielle des poutres en mélange d'essences pour lesquelles les différences de caractéristiques introduisent une certaine hétérogénéité du matériau.

— Cas du Sapelli.

Le Sapelli n'a présenté aucune difficulté de collage en mélange avec les quatre autres espèces ou genres retenus pour l'étude.

En effet, les rapports des résistances mesurées sur les éprouvettes en mélange sont tous supérieurs au rapport moyen calculé à partir des éprouvettes composées uniquement de Sapelli. Les résultats sont, par contre, très voisins en ce qui concerne les coefficients d'adhérence.

En délamination, tous les résultats sont excellents. Un seul mélange, Acajou-Sapelli, présente un coefficient de délamination supérieur à 1 % ce qui est, toutefois, nettement inférieur à la valeur maximum admissible de 10 %.

— Cas du Kosipo.

Les assemblages réalisés à partir de la technique du lamellé-collé entre le Kosipo et les cinq autres espèces retenues dans l'étude ont présenté aux essais un comportement tout à fait remarquable. En outre, les résultats obtenus sont, pour les rapports des résistances, toujours supérieurs à ceux des poutres composées uniquement de lamelles de Kosipo.

Les coefficients d'adhérence sont tous très bons mais, par contre, toujours inférieurs à ceux des poutres de Kosipo.

Enfin, les coefficients de délamination, voisins de 0 à l'exception du couple Tiama-Kosipo (1,1 %) sont excellents, ils restent donc tous nettement inférieurs au maximum admissible.

La dispersion des résultats est également assez importante et les coefficients de variation sont tous supérieurs à 10 %.

— Cas du Tiama.

Le Tiama est l'espèce pour laquelle l'utilisation en mélange d'essences dans la fabrication d'éléments reconstitués par la technique du lamellé-collé semble du plus grand intérêt.

En effet, les essais effectués sur les poutres échantillons de Tiama avaient fait apparaître une certaine faiblesse au cisaillement et les rapports des résistances obtenus alors étaient juste acceptables. Les mêmes essais ont, par contre, donné des résultats excellents à partir des mélanges de lamelles de Tiama alternant avec l'une des cinq autres espèces retenues pour l'étude. Les moyennes des rapports des résistances sont alors toutes supérieures à 95 %.

De la même façon, les coefficients d'adhérence sont supérieurs en moyenne à 80 % contre 71 % pour le Tiama seul.

Enfin, le coefficient de délamination le plus élevé 1,3 %, obtenu à partir du mélange Tiama-Acajou, est inférieur à celui de l'essai d'aptitude du Tiama (2,8 %).

L'association du Tiama et d'une des cinq autres espèces semble donc améliorer nettement l'aptitude du bois au collage en augmentant de façon très sensible la résistance des plants de collage au cisaillement et à la délamination.

En résumé, on peut dire que les résultats des essais d'aptitude au collage effectués sur des poutres échantillons composées de lamelles de bois de deux espèces différentes permettent pour les espèces ou genres retenus dans cette étude de formuler les appréciations suivantes :

— l'hétérogénéité introduite par la présence dans la même poutre de lamelles de bois aux propriétés différentes augmente très sensiblement la variabilité des valeurs mesurées,

— les rapports des résistances mesurées à l'essai de cisaillement sont, pour les poutres en mélange, supérieurs à ceux mesurés sur les poutres composées d'une seule essence. Il semble que l'introduction dans une poutre échantillon d'une deuxième espèce choisie parmi les cinq restantes augmente la résistance au cisaillement du plan de collage. Par contre, aucune différence significative n'a été constatée pour les coefficients de délamination et d'adhérence qui sont toujours très bons,

— enfin, dans le cas du Tiama, espèce qui avait présenté un comportement assez bon mais non excellent aux essais d'aptitude à l'utilisation en lamellé-collé les assemblages réalisés à partir du collage avec une autre espèce ont permis d'améliorer de manière très sensible les résultats obtenus aux tests d'aptitude au collage.

Résultats par mélanges de plus de deux espèces.

Les valeurs moyennes de chaque caractéristique sont calculées à partir des valeurs moyennes mesurées sur chaque plan de collage.

On retrouve dans cette série d'essais le même caractère de variabilité des résultats que dans le cas du mélange par couples d'essences.

MÉLANGE DES QUATRE ESPÈCES D'ENTANDROPHRAGMA.

Chaque poutre échantillon est composée d'au moins une lamelle de chaque espèce d'*Entandrophragma*. Elles sont réparties de manière à obtenir au total le même nombre d'assemblages pour chaque couple élémentaire.

Les valeurs absolues des rapports des résistances, des coefficients d'adhérence et de délamination sont excellentes.

L'analyse statistique fait, toutefois, apparaître une assez forte dispersion des résultats en rapport probablement avec la composition relativement hétérogène des poutres-échantillons.

Rapport des résistances :

Nombre de plans de collage testés	40 *
Moyenne des résultats	98 %
Ecart-type.....	12 %
Coefficient de variation	12 %

Coefficient d'adhérence :

Moyenne des résultats	82 %
Ecart-type.....	13 %
Coefficient de variation	16 %

Coefficient de délamination :

Nombre d'éprouvettes.....	30
Moyenne des résultats	1,0 %
Ecart-type.....	2,7 %

Ces essais montrent donc que l'on peut envisager d'utiliser en mélange les quatre espèces du groupe des *Entandrophragma* pour la fabrication d'éléments reconstitués par la technique du lamellé-collé.

MÉLANGE DU MAKORÉ (*Tieghemella sp.*) AVEC LES QUATRE ESPÈCES D'*Entandrophragma*.

A la suite de l'excellente tenue aux essais d'aptitude à l'utilisation en lamellé-collé des quatre espèces d'*Entandrophragma*, il était important d'étudier l'inclusion de lamelles de Makoré dans les éléments reconstitués.

Les poutres échantillons sont composées d'au moins une lamelle de chaque *Entandrophragma* ainsi que de Makoré réparti de telle manière que ce dernier soit au moins en contact avec chacune des espèces d'*Entandrophragma*.

De façon générale, et bien que la moyenne des rapports des résistances soit assez sensiblement inférieure à celle obtenue avec les seuls *Entandrophragma*, on peut considérer dans leur ensemble les tests d'aptitude au collage comme tout à fait positifs.

Rapports des résistances :

Nombre de plans de collage testés	34
Moyenne des résultats	93 %
Ecart-type.....	11 %
Coefficient de variation	11 %

Coefficient d'adhérence :

Moyenne des résultats	84 %
Ecart-type.....	19 %
Coefficient de variation	22 %

Coefficient de délamination :

Nombre d'éprouvettes.....	24
Moyenne des résultats	1,0 %
Ecart-type.....	1,8 %

* Un plan de collage est testé par cinq essais de cisaillement.

Les valeurs moyennes des trois caractéristiques d'aptitude au collage sont bonnes ; toutefois, la dispersion des résultats est assez importante.

Ils montrent cependant, qu'il est possible d'envisager la fabrication d'éléments reconstitués par la technique du lamellé-collé en mélangeant indifféremment le bois des cinq appellations commerciales suivantes : Sipo, Sapelli, Tiama, Kosipo et Makoré.

MÉLANGE TOTAL DES SIX ESPÈCES OU GENRES RETENUS DANS L'ÉTUDE.

Chaque poutre échantillon est composée, dans ce cas, de lamelles de nature différente. En effet, aux lamelles provenant des cinq appellations précédentes il en a été ajouté une, Acajou, de manière à ce que chaque espèce ait le même nombre de plans de collage avec chacune des cinq autres.

L'analyse des résultats fait apparaître un comportement excellent des poutres ainsi constituées malgré une certaine dispersion mise en évidence par l'étude statistique. La moyenne des rapports des résistances, voisine de 100 %, indique une très bonne résistance du plan de collage en rapport avec la très bonne aptitude des bois utilisés. Ce résultat est confirmé par ailleurs par l'excellente

valeur moyenne des coefficients d'adhérence ainsi que par la très bonne résistance à la délamination.

Rapport des résistances :

Nombre de plans de collage testés	30
Moyenne des résultats	101 %
Ecart-type.....	10 %
Coefficient de variation	10 %

Coefficient d'adhérence :

Moyenne des résultats	89 %
Ecart-type.....	15 %
Coefficient de variation	17 %

Coefficient de délamination :

Nombre d'éprouvettes.....	33
Moyenne des résultats	0,5 %
Ecart-type.....	1,8 %

Ces résultats obtenus à partir d'essais portant sur un très grand nombre de poutres échantillons largement suffisant pour fournir une représentation statistiquement valable de toutes les possibilités d'assemblage montrent qu'il est techniquement possible d'envisager la fabrication d'éléments reconstitués en utilisant en mélange « tout venant » le bois de Makoré, Acajou, Sipo, Sapelli, Tiama et Kosipo.

CONCLUSION

Les essais d'aptitude au collage réalisés sur Sipo, Sapelli, Tiama, Kosipo, Acajou et Makoré, dans un premier temps essence par essence, puis en mélange, ont montré que la fabrication d'éléments reconstitués par la technique du lamellé-collé à partir de lamelles de ces différentes espèces prises « tout venant » est techniquement réalisable.

En outre, l'aspect relativement voisin de ces différents bois (couleur, grain, etc...) confère aux produits finis une certaine homogénéité ne nécessitant pas de traitements de finition particuliers tels que peintures ou produits égalisateurs de teinte au moment de leur utilisation.

Toutefois, l'application d'une telle technique de récupération ou de revalorisation ne semble envisageable au moins actuellement que sur des bois ayant une valeur commerciale suffisante pour permettre la fabrication d'éléments reconstitués à des prix compétitifs vis-à-vis de ceux que l'on obtiendrait en bois massif à partir des mêmes essences. Par ailleurs, le matériau ainsi fabriqué posséderait bien sûr toutes les propriétés avantageuses des éléments lamellé-collés :

- dimensions quasiment illimitées,
- séchage très homogène et donc très grande stabilité même pour les très fortes sections,

— possibilité d'obtenir des profils géométriques variés,

— conservation au matériau ainsi fabriqué des caractéristiques propres au bois massif.

En outre, les possibilités d'améliorer la qualité technologique du matériau par l'adjonction de lamelles d'un bois plus performant n'est pas à négliger et reste à approfondir.

Enfin, ces résultats confirment les possibilités d'utilisation de cette technique dans un but de revalorisation des sciages de faibles dimensions, soit qu'ils proviennent de déchets de scierie, soit d'arbres de faibles dimensions.

Son application pourrait donner naissance à la fabrication d'un matériau bois se présentant sous forme de poutres de dimensions standardisées dans lesquelles les utilisateurs du bois débiteraient les pièces qu'ils désirent obtenir comme ils le font par ailleurs dans le bois massif. Il serait ainsi réalisé une grosse économie de matière, due, d'une part, à la récupération de pièces de bois jusqu'alors inutilisées en tant que matériau bois, d'autre part, à l'usinage d'éléments parfaitement stabilisés et aux dimensions standardisées que l'on peut débiter aux plus justes dimensions avec un minimum de pertes.

ANNEXE I

Appellations commerciales	Caractéristiques									
	Nombre de poutres échantillons	Rapport des résistances %	Ecart type %	Coefficient de variation %	Adhérence %	Ecart type %	Coefficient de variation %	Délamination %	Nombre d'éprouvettes	Ecart type %
Acajou	2	92	—	—	85	—	—	0	8	0
Makoré	5	97	8	8	91	9	10	0,6	20	1,3
Sipo	5	94	5	5	89	6	7	0,2	17	0,7
Sapelli	5	95	7	7	88	4	4	0,5	21	1,6
Kosipo	4	83	2	2	94	4	4	0,4	19	1,3
Tiama	5	90	5	5	71	9	12	2,8	19	6,7

ANNEXE II

Appellations commerciales	Caractéristiques									
	Nombre d'assemblages élémentaires	Rapport des résistances %	Ecart type %	Coefficient de variation %	Adhérence %	Ecart type %	Coefficient de variation %	Délamination %	Nombre d'éprouvettes	Ecart type %
Acajou-Tiama	3	105	12	11	81	7	7	1,3	12	2,7
Acajou-Sipo	6	102	19	19	94	7	7	0	12	0
Acajou-Sapelli	9	101	10	10	89	10	11	1,5	15	2,8
Acajou-Kosipo	2	110	—	—	78	—	—	0	8	0
Sipo-Kosipo	20	95	14	15	73	13	18	1,8	11	2,4
Sipo-Tiama	26	95	16	16	81	21	26	0,9	12	2,4
Sipo-Sapelli	25	97	11	11	79	18	23	0	12	0
Sipo-Makoré	22	90	12	13	82	16	19	0	10	0
Sapelli-Tiama	27	103	16	16	82	16	19	0,1	11	0,4
Sapelli-Kosipo	23	100	11	11	81	21	26	0	12	0
Sapelli-Makoré	26	97	10	11	92	10	11	0,2	8	0,6
Kosipo-Tiama	30	98	10	10	83	20	24	1,1	11	2
Kosipo-Makoré	26	95	9	9	90	13	14	0,5	12	1,3
Tiama-Makoré	23	95	16	17	83	30	24	0	13	0

N. D. L. R. — Nous publierons la suite de cette étude dans un prochain numéro de notre Revue. Elle sera consacrée aux résultats obtenus lors de tests de fabrication en laboratoire de quelques prototypes d'éléments reconstitués industriellement utilisables.