

ÉTUDE DE L'APTITUDE DES ESSENCES TROPICALES A L'EMPLOI EN TRAVERSES DE CHEMIN DE FER A PARTIR DE RÉSULTATS D'ESSAIS EN LABORATOIRE

par

Gérard DEON

*Ingénieur de Recherches
Division de Préservation
Centre Technique Forestier Tropical*

et

F. CAILLEZ et N. BLANC

*Division de Biométrie
du Centre Technique Forestier Tropical*



Photo Fougerousse.

Entre Jebba et Minna (Nigeria), voie ferrée sur traverses en bois.

SUMMARY

A STUDY OF THE SUITABILITY OF TROPICAL SPECIES FOR USE AS RAILWAY SLEEPERS, ON THE BASIS OF THE RESULTS OF LABORATORY TESTS

This article deals with the suitability of a number of tropical woods for making railway sleepers, on the basis of the results of standardized laboratory tests (physical and mechanical properties, natural durability, and aptitude for impregnation).

It is shown that multidimensional data analysis, notably principal component analysis and cluster analysis, prove to be very useful decision-making instruments.

RESUMEN

ESTUDIO DE LA APTITUD DE LAS ESPECIES TROPICALES PARA SU EMPLEO COMO TRAVIESAS DE FERROCARRIL, A PARTIR DE LOS RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO

Este estudio trata de la aptitud de cierto número de maderas tropicales para la obtención de traviesas (durmientes) de ferrocarril, fundándose en los resultados de pruebas normalizadas de laboratorio (características físicas y mecánicas, propiedades de durabilidad natural y de aptitud para la impregnación).

Se demuestra que los métodos de análisis de los datos, y en particular el análisis de los componentes principales y, asimismo, la clasificación automática, constituyen instrumentos de decisión sumamente útiles.

INTRODUCTION

La Division de Préservation du CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL a été à plusieurs reprises consultée par les gouvernements de pays africains pour juger de l'aptitude des essences tropicales à fournir des traverses de chemin de fer pour les réseaux nationaux.

L'acceptation ou le refus d'une essence donnée est le résultat d'une mûre réflexion ; le jugement est porté après étude des multiples propriétés du bois. L'appréciation finale n'est pas toujours très facile et ceci pour trois raisons :

— la première est en rapport avec la personne qui doit porter le jugement et qui n'a humainement pas la possibilité intellectuelle de faire la synthèse globale de la quinzaine de critères généralement retenus ;

— la seconde est la variabilité inhérente au matériau-bois ;

— la troisième est la difficulté de fixer des limites très précises aux valeurs des critères utilisés.

En fait, le choix qui devrait être strictement objectif ne l'est jamais. C'est consciente de cet

état de choses que la Division de Préservation du CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL ne conseille dans ses projets de spécifications techniques que des essences présentant le maximum de garanties et ne fait pas mention de celles pour lesquelles un doute, même assez minime, pourrait subsister.

De ce fait se trouvent éliminées un certain nombre d'essences parfois abondantes et dont l'emploi pour d'autres usages n'est pas toujours possible.

Il a donc paru utile d'entreprendre une étude plus approfondie visant, à partir des données de laboratoire disponibles, à affiner les pronostics relatifs à l'aptitude d'un bois à être utilisé dans la fabrication de traverses de chemin de fer.

On examinera d'abord brièvement :

— les risques d'altération et d'usure des traverses en bois,

— les propriétés du bois qui doivent servir de critères pour le choix des essences.

On exposera ensuite les méthodes de travail utilisées et les résultats obtenus.

LES RISQUES D'ALTÉRATION ET D'USURE DES TRAVERSES EN BOIS

Les causes de détérioration des traverses de chemin de fer en bois peuvent être groupées en trois catégories :

- les causes mécaniques,
- les causes physiques,
- les causes biologiques.

LES CAUSES MÉCANIQUES

Le passage des convois engendre des efforts d'une grande intensité dont l'application répétée à une fréquence élevée inflige aux traverses des contraintes qui se localisent :

— aux surfaces d'appui des rails, dans le cas de pose directe, ou des selles, en entraînant une détérioration des couches superficielles du bois aggravée par des effets de friction et d'abrasion ;

— aux faces latérales des épaulements de l'entaille, en cas de pose directe du rail, en provoquant l'écrasement en bout des fibres, sous l'influence des efforts transversaux ;

— dans les alvéoles des tirefonds où l'action des efforts verticaux et transversaux entraîne des déformations nuisibles à la bonne tenue des attaches et en particulier le phénomène d'ovalisation :

— aux faces inférieures et latérales et aux extrémités des traverses, parties qui répercutent au ballast les efforts subis par la traverse particulièrement dans les courbes de la voie et dans les zones de freinage.

Outre ces contraintes, les traverses subissent également des efforts de flexion et de torsion au passage des convois ou accidentellement (dénivellations locales, déraillements).

LES CAUSES PHYSIQUES

Les variations de température et d'humidité peuvent provoquer des effets de retrait et des déformations qui se traduisent généralement par l'apparition de fentes et par un gauchissement des supports. Ces déformations sont évidemment

nuisibles à la bonne tenue des traverses ; de plus la formation de fentes, même étroites, peut faciliter la pénétration dans le bois des agents biologiques de destruction et particulièrement des champignons.

LES CAUSES BIOLOGIQUES

L'usure d'origine biologique des traverses en bois résulte des altérations et de la décomposition causées par les champignons et de la destruction par les insectes xylophages.

C'est sans conteste l'attaque des champignons lignivores que l'on peut redouter le plus. Sous forme de mycélium ou de spores, ceux-ci peuvent

s'introduire dans le bois sous forme microscopique en profitant de conditions favorables (chaleur, humidité, fentes, gerces...) et s'y développer.

Il ne faut pas cependant négliger le risque d'attaque par les insectes et en particulier par les termites (là où ils existent), notamment sur les voies peu empruntées, mal entretenues...

PROPRIÉTÉS DU BOIS QUI DOIVENT SERVIR DE CRITÈRES POUR LE CHOIX DES ESSENCES

Les considérations développées dans le paragraphe précédent montrent que le choix des essences pour la fourniture de traverses en bois doit être déterminé :

- d'une part, en fonction de caractéristiques physiques et mécaniques,
- d'autre part, en fonction des caractéristiques

de durabilité naturelle et d'aptitude à l'imprégnation par les produits de préservation.

Etant donné la difficulté d'éliminer *a priori* telle ou telle propriété du bois, il a semblé préférable d'utiliser toutes les caractéristiques dont on pouvait disposer quitte à constater par la suite la redondance de certaines.

CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

Ont été retenues :

- DEN : la densité du bois à 12 % d'humidité (NF B 51005),
- DUR : la dureté mesurée par la méthode de Chalais Meudon (NF B 51013),
- RVT : la rétractibilité volumétrique totale (NF B 51006),
- RTA : la rétractibilité linéaire tangentielle (NF B 51006),

- RRA : la rétractibilité linéaire radiale (NF B 51006),
- FEN : la résistance au fendage (NF B 51011),
- TPP : la résistance à la rupture en traction perpendiculaire aux fibres (NF B 51010),
- RES : la résistance à la rupture en flexion dynamique ou résilience (NF B 51009),
- CAX : la résistance à la rupture en compression de fil (NF B 51007),
- FST : la résistance à la rupture en flexion statique (NF B 51008).

CARACTÉRISTIQUES DE DURABILITÉ ET D'IMPRÉGNABILITÉ

Ont été retenues :

- LEN : les pertes de masse (exprimées en %) mesurées sur des éprouvettes de dimensions

50 × 25 × 15 mm après attaque pendant 16 semaines par une culture pure de *Lentinus squarrosulus*, agent de pourriture blanche,

— POR : les pertes de masse (exprimées en %) observées après attaque (dans les mêmes conditions que précédemment) de *Poria* sp., agent de pourriture cubique,

— COR : les pertes de masse obtenues après

attaque de *Coriolus versicolor*, agent de pourriture blanche,

— ABS : l'absorption en créosote exprimée en kg/m³ obtenue sur des éprouvettes de dimensions 100 × 10 × 10 cm imprégnées par le procédé Bethell ou procédé dit « à cellules pleines ».

MÉTHODES D'ANALYSE

CHOIX DES ESSAIS

On a procédé aussi bien dans la Division de Préservation que dans la Division d'Essais et d'Emploi des Bois à un certain nombre d'expérimentations. On a recensé ces divers essais et on a éliminé ceux qui étaient incomplets, et ceux portant sur des bois présentant des défauts (nœuds, fentes, échauffures, présence de parties aubieuses...); après ce tri préalable, on disposait de 171 essais complets concernant 86 essences (voir annexe E).

Si chaque arbre échantillon, chaque individu comme on l'appellera par la suite, était caractérisé par deux valeurs, on pourrait le représenter par un point dans un espace à deux dimensions, c'est-à-dire un plan, en portant en abscisse la première valeur et en ordonnée la seconde. S'il était caractérisé par trois valeurs, on pourrait le représenter par un

point dans le classique espace à trois dimensions et ainsi de suite.

Dans le cas présent chaque individu étant caractérisé par 14 valeurs, il peut être représenté par un point dans un espace à 14 dimensions où ses coordonnées sont les valeurs des 14 caractères mesurés sur lui.

La visualisation de l'ensemble des essais dans un espace à 14 dimensions est impossible. Pourtant, elle apporterait une vue globale fort intéressante de l'ensemble des résultats.

Le travail exposé ici a pour but d'extraire sous forme d'un graphique classique (à deux dimensions) la plus grande partie possible de l'information contenue dans le tableau des 171 × 14 = 2.394 données.

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

Méthode.

La méthode d'analyse la plus utile pour représenter cette information est l'analyse en composantes principales. Il n'est pas dans le but de cet article d'exposer *in extenso* la théorie de cette méthode. Ceci a déjà été fait dans de nombreux ouvrages et particulièrement par F. CAILLIEZ et P. GUÉNEAU (*).

Il n'est pas cependant inutile de rappeler que le but final de cette analyse est de projeter le nuage des points de l'espace à 14 dimensions dans un sous-espace de dimensions plus faibles (un plan de préférence) de façon que le nuage projeté ressemble le plus possible au nuage initial. L'analyse en composantes principales n'a pas pour but d'expliquer; elle permet surtout de visualiser les données et de les « simplifier » moyennant, il est vrai, une certaine distorsion qui est seulement rendue la plus faible possible.

Pour s'affranchir de l'influence de l'hétérogénéité des unités de mesure des différentes variables, on a

effectué l'analyse après avoir divisé la valeur de chaque variable initiale par l'écart-type de cette variable, ce qui revient à effectuer l'analyse en composantes principales sur « matrice de corrélation » (cf. F. CAILLIEZ et P. GUÉNEAU).

Le programme utilisé par l'ordinateur fournit :

— les moyennes, écarts-types et coefficients de variation des variables initiales,

— les coefficients de corrélation entre variables initiales,

— la variance des nouveaux caractères que sont les composantes principales,

— les cosinus directeurs des vecteurs unitaires des axes principaux,

— les coefficients de corrélation des 5 premières composantes principales avec les variables initiales,

— les valeurs des 5 premières composantes principales pour chacun des 171 individus,

— les graphiques à grande échelle représentant la projection du nuage initial des 171 points sur les plans engendrés par la première et la deuxième composantes principales d'une part, et par la pre-

(*) Voir bibliographie [1].

mière et la troisième composantes principales d'autre part,

— la qualité de la représentation de chaque individu sur les axes et les plans principaux.

Résultats.

MOYENNES, ÉCARTS-TYPES ET COEFFICIENTS DE VARIATION DES VARIABLES INITIALES.

Ces valeurs sont données dans le tableau 1.

COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE VARIABLES INITIALES.

Ils sont fournis dans le tableau 2 (valeurs multipliées par 1.000).

Ce tableau indique par exemple que :

— les propriétés physiques et mécaniques sont fortement et positivement corrélées au point d'être parfois redondantes (exemple : CAX et FST) ;

— les caractéristiques de durabilité naturelle sont également fortement corrélées entre elles ;

— en général une propriété physique ou mécanique est corrélée négativement et faiblement avec une propriété de durabilité naturelle.

CONTRIBUTION DES PREMIÈRES COMPOSANTES PRINCIPALES A L'EXPLICATION DE LA VARIATION (tableau 3).

TABLEAU 3

Composante	Contribution (%) = *	Contribution cumulée (%)
1	51,96	51,96
2	17,79	69,75
3	8,86	78,61
4	5,36	83,97
5	4,43	88,40

$$* = \frac{\text{Variance de la composante principale}}{14 (\text{Nombre de variables})}$$

L'examen de ce tableau montre que l'analyse en

TABLEAU 1

Variables		Moyennes	Écarts-types	Coefficients de variation %
1	LEN : <i>Lentinus squarrosulus</i>	32,05	25,330 03	79,01
2	POR : <i>Poria</i> sp.....	23,46	23,108 18	98,85
3	COR : <i>Coriolus versicolor</i>	23,16	17,665 52	76,24
4	ABS : Absorption kg/m ³	180,63	170,175 92	89,73
5	DUR : Dureté.....	5,57	4,414 93	79,17
6	DEN : Densité.....	72	0,186 96	25,72
7	RVT : Rétractibilité volumétrique totale.....	14,62	3,656 60	24,99
8	RTA : Rétractibilité tangentielle.....	9,15	2,490 41	27,20
9	RRA : Rétractibilité radiale.....	4,94	1,699 06	34,34
10	FEN : Cohésion transversale fendage.....	19,70	7,321 15	37,15
11	TPP : Cohésion transversale traction.....	28,75	9,029 70	31,40
12	RES : Résilience (k).....	47	0,227 36	47,78
13	CAX : Compression axiale.....	621,72	182,440 86	29,34
14	FST : Flexion statique.....	1.588,40	492,935 84	31,03

TABLEAU 2

MATRICE DES COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE VARIABLES INITIALES

LEN	1	1.000															
POR	2	738	1.000														
COR	3	771	718	1.000													
ABS	4	257	372	449	1.000												
DUR	5	-377	-819	-487	-329	1.000											
DEN	6	-430	-373	-529	-566	852	1.000										
RVT	7	-93	15	-174	-49	370	586	1.000									
RTA	8	-32	31	-64	13	241	498	817	1.000								
RRA	9	-103	-103	-220	-228	533	705	738	722	1.000							
FEN	10	-151	-156	-296	-349	542	684	385	351	451	1.000						
TPP	11	-134	-86	-251	-289	558	754	528	479	571	905	1.000					
RES	12	-240	-139	-292	-267	572	719	517	427	509	578	641	1.000				
CAX	13	-377	-322	-491	-325	764	907	573	472	639	625	719	641	1.000			
FST	14	-320	-261	-436	-300	765	911	591	506	691	636	719	775	909	1.000		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
		LEN	POR	COR	ABS	DUR	DEN	RVT	RTA	RRA	FEN	TPP	RES	CAX	FST		

composantes principales se révèle dans ce cas un excellent moyen de « simplification » des données car le pourcentage d'inertie expliquée par le premier plan principal est de 70 % environ.

COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DES PREMIÈRES COMPOSANTES PRINCIPALES AVEC LES VARIABLES INITIALES (tableau 4).

Ces coefficients de corrélation sont représentés sur la figure 1.

L'examen de la figure 1 montre que la composante n° 1 est fortement et positivement corrélée avec la densité, la dureté, les résistances à la rupture en compression de fil, en flexion statique et en traction perpendiculaire aux fibres. Cette composante peut donc être regardée comme une composante de force, une composante de solidité. La composante n° 2 est corrélée positivement et assez fortement avec la sensibilité des bois aux attaques de champignons et également avec les caractéristiques de rétractibilité. C'est donc un caractère défavorable, un caractère de faiblesse.

COSINUS DIRECTEURS DES VECTEURS UNITAIRES DES AXES PRINCIPAUX.

Ces valeurs données dans le tableau 5 permettent de construire les graphiques représentés en figures 2 et 3.

La figure 2 fournit l'interprétation des déplacements dans diverses directions du plan $Y_1 Y_2$ (1^{re} et 2^e composantes principales). L'interprétation est d'autant plus juste que le vecteur unitaire d'une variable initiale donnée est, dans l'espace, plus proche du plan $Y_1 Y_2$, c'est-à-dire que la longueur de sa projection sur ce plan est plus proche de l'unité.

A ce point de vue les variables POR, LEN et COR sont les mieux représentées, les variables FEN et ABS les moins bien.

De même, la figure 3 fournit l'interprétation des déplacements dans diverses directions du plan $Y_1 Y_3$ (1^{re} et 3^e composantes principales).

Les valeurs des cosinus directeurs des vecteurs unitaires des axes principaux permettent également de calculer les premières composantes principales

TABLEAU 4

Variables initiales		Composantes principales				
		N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5
1	LEN : <i>Lentinus squarrosulus</i>	— 0,437	0,729	0,322	— 0,133	0,193
2	POR : <i>Poria</i> sp.	— 0,378	0,776	0,230	0,072	0,137
3	COR : <i>Coriolus versicolor</i>	— 0,560	0,896	0,178	0,066	0,078
4	ABS : Absorption kg/m^3	— 0,414	0,398	— 0,350	0,681	— 0,241
5	DUR : Dureté	0,800	— 0,149	0,151	0,269	0,333
6	DEN : Densité	0,962	— 0,039	0,035	0,119	0,093
7	RVT : Rétractibilité volumétrique totale	0,876	0,458	— 0,427	— 0,144	— 0,056
8	RTA : Rétractibilité tangentielle	0,588	0,520	— 0,476	— 0,211	— 0,156
9	RRA : Rétractibilité radiale	0,764	0,342	— 0,281	— 0,193	0,202
10	FEN : Cohésion transversale fendage	0,746	0,118	0,483	— 0,057	— 0,402
11	TPP : Cohésion transversale traction	0,811	0,240	0,347	— 0,022	— 0,334
12	RES : Résilience (k)	0,769	0,134	0,143	0,145	0,013
13	CAX : Compression axiale	0,917	— 0,004	0,016	0,128	0,129
14	FST : Flexion statique	0,926	0,072	0,047	0,168	0,147

TABLEAU 5

Variables initiales		Composantes principales				
		N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5
1	LEN : <i>Lentinus squarrosulus</i>	— 0,162	0,462	0,298	— 0,153	0,245
2	POR : <i>Poria</i> sp.	— 0,140	0,492	0,212	0,083	0,174
3	COR : <i>Coriolus versicolor</i>	— 0,208	0,441	0,165	0,064	0,090
4	ABS : Absorption kg/m^3	— 0,153	0,252	— 0,324	0,787	— 0,306
5	DUR : Dureté	0,297	— 0,095	0,140	0,311	0,423
6	DEN : Densité	0,357	— 0,024	0,033	0,138	0,124
7	RVT : Rétractibilité volumétrique totale	0,251	0,200	— 0,395	— 0,166	— 0,071
8	RTA : Rétractibilité tangentielle	0,218	0,320	— 0,440	— 0,243	— 0,199
9	RRA : Rétractibilité radiale	0,283	0,217	— 0,242	— 0,229	0,257
10	FEN : Cohésion transversale fendage	0,277	0,072	0,428	— 0,065	— 0,510
11	TPP : Cohésion transversale traction	0,301	0,152	0,321	— 0,025	— 0,424
12	RES : Résilience (k)	0,285	0,085	0,133	0,167	0,017
13	CAX : Compression axiale	0,340	— 0,003	0,015	0,148	0,164
14	FST : Flexion statique	0,343	0,046	0,044	0,194	0,187

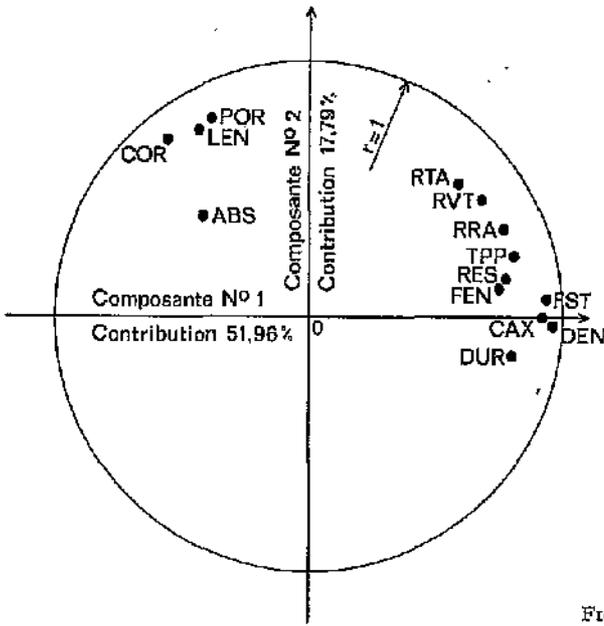


FIG. 1.

Représentation des variables initiales par leurs coefficients de corrélation avec les trois premières composantes principales.

FIG. 2.

Projection dans le premier plan principal des vecteurs unitaires de l'ancien système de référence (variables initiales).

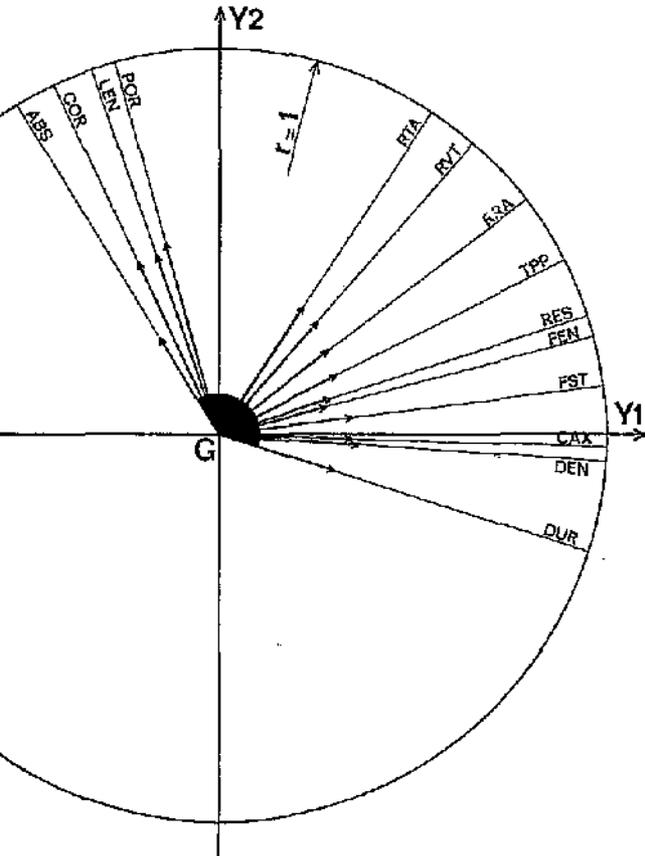
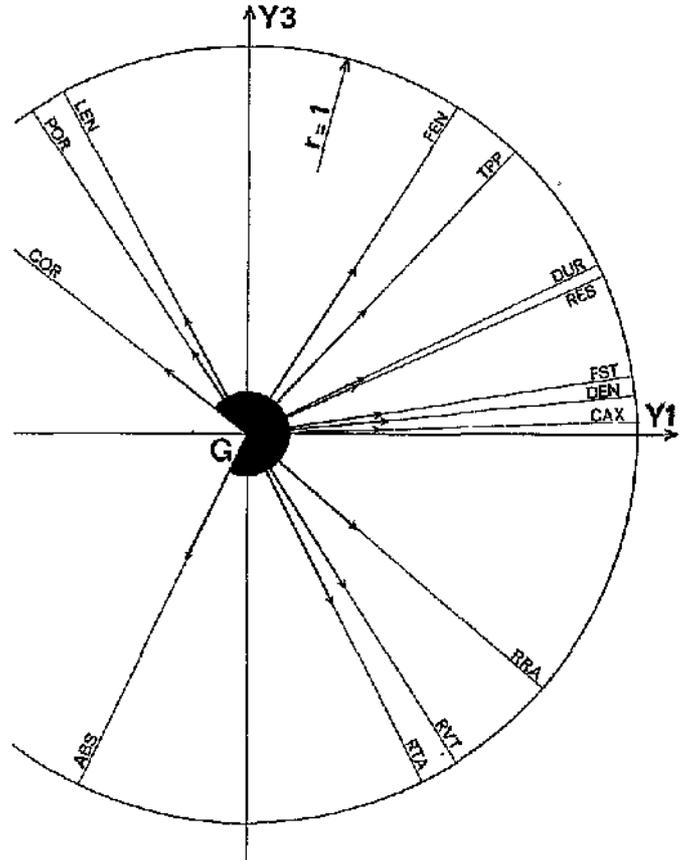


FIG. 3.

Projection dans le second plan principal des vecteurs unitaires de l'ancien système de référence (variables initiales).



de nouveaux individus, à partir de résultats d'essais de laboratoire effectués postérieurement à la présente analyse.

En appelant :

— $a_1, a_2 \dots a_{14}$ les valeurs des 14 variables obtenues sur un nouvel essai,

— $A_1, A_2 \dots A_{14}$ les moyennes données dans le tableau 1,

— $\sigma_1, \sigma_2 \dots \sigma_{14}$ les écartis-types correspondants, également donnés dans le tableau 1,

la première composante principale est égale à :

$$Y_1 = -0,162 \left(\frac{a_1 - A_1}{\sigma_1} \right) - 0,140 \left(\frac{a_2 - A_2}{\sigma_2} \right) + \dots + 0,343 \left(\frac{a_{14} - A_{14}}{\sigma_{14}} \right).$$

De même :

$$Y_2 = 0,462 \left(\frac{a_1 - A_1}{\sigma_1} \right) + 0,492 \left(\frac{a_2 - A_2}{\sigma_2} \right) + \dots + 0,046 \left(\frac{a_{14} - A_{14}}{\sigma_{14}} \right).$$

VISUALISATION DES INDIVIDUS.

Les figures 4 et 5 représentent la projection du nuage initial des 171 points sur les plans engendrés respectivement par la première et la deuxième composantes principales et par la première et la troisième composantes principales.

Les individus sont représentés par des points et repérés par des numéros ; la correspondance entre les numéros et le nom des individus est fournie en annexe I.

Sur la figure 4 est tracé, en tirets, un polygone délimité par les points 47, 66, 68, 84, 38, 132 et 130. Ce polygone englobe les essences tropicales qui sont reconnues depuis longtemps, et par l'usage, aptes à fournir des traverses de chemin de fer en climat tropical. Ces essences sont données dans le tableau 6.

Se trouvant englobés dans ce polygone les individus suivants (tableau 7).

Néanmoins, il faut remarquer qu'en ce qui concerne certaines essences pour lesquelles on dispose de plusieurs essais, certains d'entre eux figurent dans le polygone et d'autres sont à l'extérieur. Ces essences sont données dans le tableau 8.

En ce qui concerne *Newtonia suaveolens*, *Ocotea rubra* et *Piptadeniastrum africanum*, le pourcentage de points se trouvant à l'intérieur du polygone, ainsi que la proximité des points « extérieurs » à celui-ci permettent de présumer que ces essences sont aptes à fournir des traverses de chemin de fer.

Les cas de *Newtonia leucocarpa*, *Qualea albiflora*, *Qualea rosea* et *Terrietia densiflora* sont plus délicats ; un nombre supplémentaire d'essais serait nécessaire pour que puisse être porté un jugement définitif.

TABLEAU 6

N°	Nom botanique	Nom commercial
13	<i>Baillonella toxisperma</i>	Moabi
18-19-20	<i>Calpocalyx heitzii</i>	Miama
36-37-38	<i>Cylicodiscus gabonensis</i>	Okan
43-44	<i>Desbordesia glaucescens</i>	Alep
46-47-48	<i>Disthemonanthus benhamianus</i>	Moyingui
53	<i>Erythrophleum ivorense</i>	Tali
66	<i>Guibourlia tessmannii</i>	Kévazingo
67	<i>Guibourlia arnoldiana</i>	Mutenye
68	<i>Guibourlia demesii</i>	Ehana
69-70-71	<i>Guibourlia ehle</i>	Ovangkol
75-76	<i>Klainedoxa gabonensis</i>	Eveuss
77-78-79	<i>Lecomtedoxa klaineana</i>	Okolan-gourna
80	<i>Lelestua durissima</i>	Congotali
81	<i>Librevillea klainei</i>	Ngaba
82-83-84	<i>Lophira alata</i>	Azobé
93-94	<i>Nauclera diderichii</i>	Bilinga
107-108	<i>Odontodendron normandii</i>	Nruga
129-130-131-132	<i>Pterocarpus soyauvii</i>	Padouk
140	<i>Sacoglottis gabonensis</i>	Ozouga

TABLEAU 7

N°	Nom botanique	Nom commercial
49	<i>Dumoria heckellii</i>	Makoré
50	<i>Entandrophragma utile</i>	Sipo
54	<i>Eschweilera odora</i>	Manbarklak
55	<i>Eschweilera sagotiana</i>	Manbarklak
64-65	<i>Goupia glabra</i>	Goupi
86	<i>Mimosa sp.</i>	Tendrokazo
96	<i>Newtonia leucocarpa</i>	Ossimiale
97-98-99-101	<i>Newtonia suaveolens</i>	Alimiao
102-103-105-106	<i>Ocotea rubra</i>	Grignon
114	<i>Parinari glabra</i>	Iranc
117-118-119-120	<i>Piptadeniastrum africanum</i>	Aramon
121-122-124		Dabéma
125-126	<i>Platonia insignis</i>	Parcourl
133	<i>Qualea albiflora</i>	Gonfolo
135-136	<i>Qualea rosea</i>	Gonfolo
144	<i>Sindoropsis lelestui</i>	Gheombi
147	<i>Strombosia glaucescens</i>	Poé
150-152-154	<i>Terrietia densiflora</i>	Niangon
155	<i>Terminalia amazonia</i>	Anangossi
169	<i>Weinmannia sp.</i>	Lalona

TABLEAU 8

Nom botanique	N° à l'intérieur du polygone	N° à l'extérieur du polygone
<i>Newtonia leucocarpa</i> .	96	95
<i>Newtonia suaveolens</i> ..	97-98-99-101	100
<i>Ocotea rubra</i>	102-103-105-106	104
<i>Piptadeniastrum africanum</i>	117-118-119-120 121-122-124	123
<i>Qualea albiflora</i>	133	134
<i>Qualea rosea</i>	135-136	137
<i>Terrietia densiflora</i> ..	150-152-154	151-153

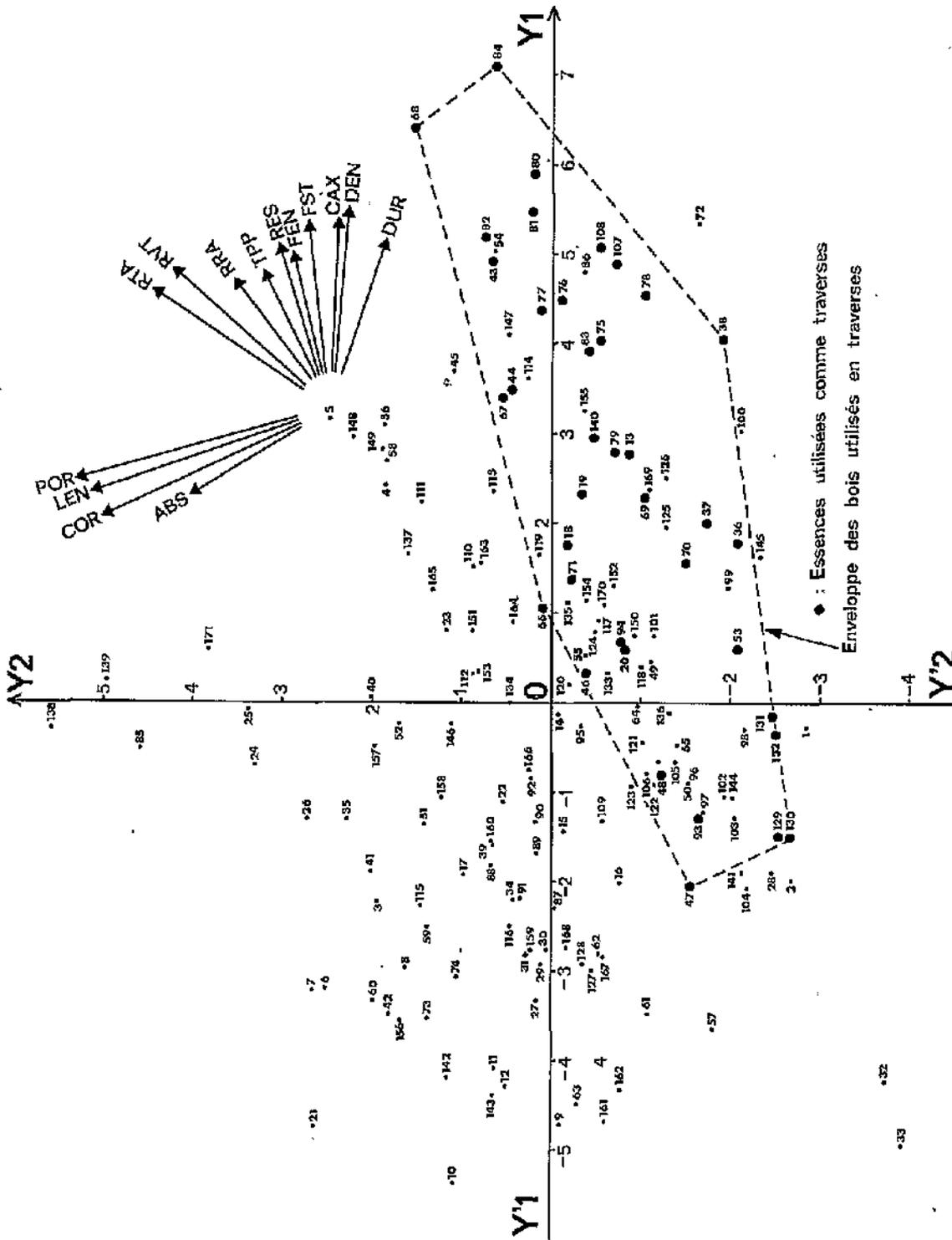


FIG. 4.

Le nuage des 171 points dans le plan des deux premières composantes principales.

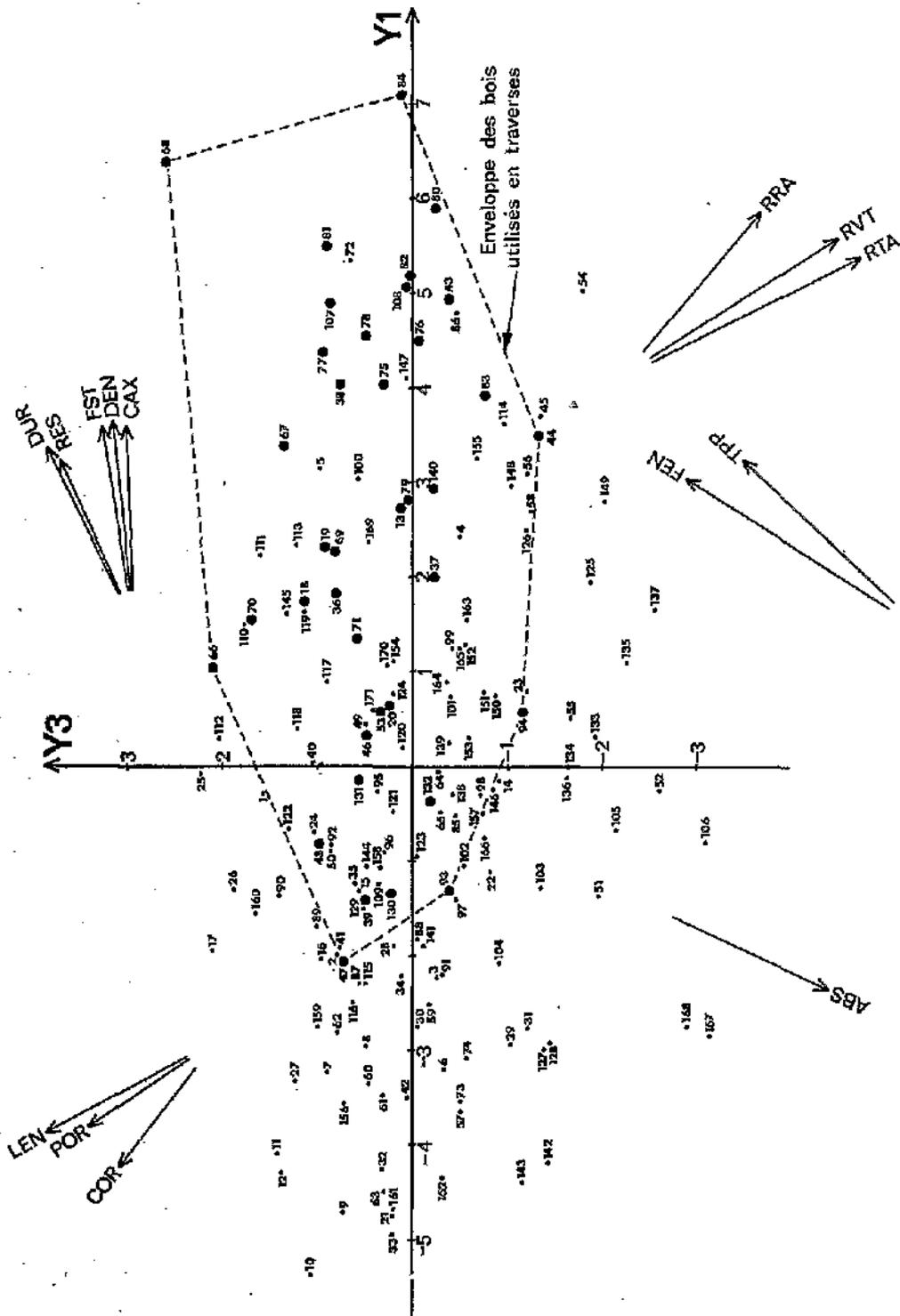


FIG. 5.

Le nuage des 171 points dans le plan défini par les première et troisième composantes principales.

On peut en fait classer les bois en trois catégories :

- dans le quadrant $Y_1 O Y_2$; les bois sont « faibles » à tout point de vue,
- les bois situés à l'intérieur du polygone ainsi que les bois n^{os} 1, 72, 100, 145 ont toutes les chances de fournir de bonnes traverses,
- les bois situés entre les deux groupes précédents pour lesquels le doute subsiste.

On ne doit pas perdre de vue un aspect du problème et non des moindres : la proximité de deux bois en projection sur le premier plan principal n'implique leur proximité réelle dans l'espace à 14 dimensions que si l'on vérifie la bonne qualité de leur représentation. Cette vérification peut être faite point par point en consultant le listing des distances des points au premier plan principal.

Il est également intéressant de voir où se trouvent le Hêtre (*Fagus sylvatica*) et le Chêne (*Quercus* sp.), qui fournissent des traverses d'utilisation courante en France, à l'intérieur du nuage des 171 points.

Si le Chêne (point n^o 170) se trouve bien à l'intérieur du polygone des bois aptes à fournir des traverses de chemin de fer (avec une bonne qualité de représentation), le Hêtre (point n^o 171) se trouve très loin de celui-ci. Si l'on reprend les valeurs des variables initiales de ces deux essences, on constate que seules les caractéristiques de durabilité naturelle et d'imprégnabilité diffèrent entre elles, les propriétés physiques et mécaniques étant sensiblement identiques.

Cette constatation conduit à la conclusion qu'il serait souhaitable d'étudier en priorité les essences situées entre le Hêtre et le « polygone des bois aptes ».

La figure 5 représente le nuage des points dans le deuxième plan principal, engendré par la première

et la troisième composantes principales, ainsi que le polygone des bois reconnus aptes à fournir des traverses et dont la liste a été donnée dans le tableau 6. Cependant, cette représentation est moins fidèle que celle de la figure 4, le pourcentage d'inertie expliquée par le second plan principal n'étant que de 60,31 % au lieu de 89,75 % pour le premier.

Conclusion sur l'analyse en composantes principales.

L'analyse en composantes principales s'est révélée dans le cas présent très utile, non pas comme instrument de décision, mais plutôt comme outil de travail et de réflexion.

Cette méthode a permis en particulier de porter un jugement sur le Dabéma (*Piptadeniastrum africanum*). Cette essence est très variable et c'est cette variabilité qui l'avait fait rejeter des listes d'essences recommandées pour l'emploi en traverses. Il est raisonnable maintenant de penser que le Dabéma, très intéressant du point de vue de l'exploitation parce qu'abondant et se présentant sous forme de fûts de gros diamètre, doit pouvoir fournir des traverses de bonne qualité.

Ce type d'analyse permet en outre :

- d'éliminer rapidement un certain nombre d'essences,
- d'en choisir d'autres avec toute la sûreté voulue,
- de diriger d'une façon éclairée l'exécution d'essais industriels en vraie grandeur (résistance à l'arrachement des tirefonds, essais d'imprégnation de traverses grandeur nature...),
- de compléter l'échantillonnage des espèces qu'elle révèle prometteuses.

CLASSIFICATION AUTOMATIQUE DES 171 ESSAIS

Dans l'ensemble des méthodes d'analyse des données, on regroupe sous le terme de classification automatique les techniques visant à répartir un ensemble d'individus en un certain nombre de groupes homogènes. Ces techniques peuvent être sommairement divisées en deux types :

• Les méthodes de classification hiérarchique qui fournissent une description de l'ensemble des individus sous forme d'un arbre de classification représentant une suite de partitions « emboîtées », allant de la partition la plus fine (chaque individu est tout seul dans une classe) à la partition la moins fine (une seule classe contient tous les individus). Un exemple d'arbre de classification portant sur une population de 6 individus est donné en figure 6.

Cet arbre représente les 5 partitions suivantes des 6 individus :

Partitions	Classes
(A)	(1), (2), (3), (4), (5), (6)
(B)	(1, 2), (3), (4), (5), (6)
(C)	(1, 2, 3), (4), (5), (6)
(D)	(1, 2, 3), (4, 5, 6)
(E)	(1, 2, 3, 4, 5, 6)

• Les méthodes de classification non hiérarchique qui fournissent simplement une ou plusieurs partitions qui ne sont pas forcément « emboîtées » comme dans le cas précédent.

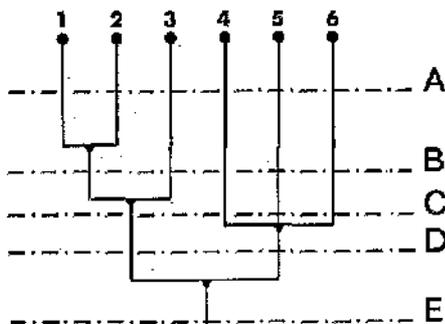


Fig. 6.

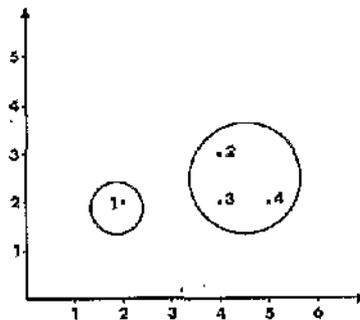


Figure 7

	1	2	3	4
1	0	$\sqrt{5}$	2	3
2	$\sqrt{5}$	0	1	$\sqrt{2}$
3	2	1	0	1
4	3	$\sqrt{2}$	1	0

Tableau des distances

Des méthodes de classification de chaque type ont été appliquées à l'ensemble des 171 essais. Le point de départ de ces méthodes est un tableau de distances entre les individus : la distance choisie a été calculée à partir des 5 premières composantes principales (qui contiennent pratiquement toute l'information) selon la formule suivante :

$$d(i, j) = \sqrt{\sum_{k=1}^5 (x_{ik} - x_{jk})^2}$$

où x_{ik} et x_{jk} désignent la valeur de la k -ième composante principale respectivement chez l'individu i et l'individu j .

Classification hiérarchique.

Le programme utilisé procède par fusions successives de deux classes, le point de départ étant la partition à 171 classes. On obtient ainsi successivement des partitions à 170, 169, 168... 3, 2, 1 classes. L'annexe II représente l'arbre de classification obtenu, limité pour des raisons pratiques à sa partie inférieure.

On a mesuré la qualité d'une partition P par la grandeur :

$$f(P) = \frac{\text{Somme des } d(i, j)}{\text{Nombre des couples } (i, j)}$$

où i et j sont dans une même classe de P .

Voici un exemple simple de calcul de f : une population de 4 individus décrits par deux caractères est représentée dans la figure 7.

Pour la partition P formée des deux classes (1) et (2, 3, 4) on a :

$$f(P) = \frac{0 + 2(1 + \sqrt{2} + 1)}{1 + 9}$$

La valeur $f(P)$ représente la distance moyenne entre deux individus réunis dans une même classe de la partition P .

A chaque étape de la construction de l'arbre, on passe en revue toutes les partitions obtenues en fusionnant deux classes de la partition précédente et on retient la meilleure au sens du critère (f minimum) ; c'est cette valeur de f qui est portée en ordonnée dans l'annexe II.

Sur l'arbre de classification donné en annexe II, y-a-t-il une partition plus intéressante que les autres ?

Ceci semble *a priori* peu probable car le nuage des 171 points sur le plan principal (fig. 4) semble homogène (peu de zones vides ni de zones très denses). Les résultats de la classification hiérarchique fournissent des éléments de réponse à ce problème : pour chaque partition P_k (k désignant le nombre de classes), le programme calcule le rapport :

$$\frac{f(P_{k-1})}{f(P_k)}$$

et la partition pour laquelle ce rapport est le plus grand, est regardée comme la meilleure. Selon cette règle empirique, c'est la partition en trois classes qui est la meilleure dans le cas présent. Cette partition est représentée en annexe III où les individus sont représentés par leur projection dans le plan principal.

Classification non hiérarchique.

La méthode de classification non hiérarchique qui a été utilisée s'apparente à la méthode de FORAY (*). Contrairement aux méthodes de classification hiérarchique, le nombre de classes à obtenir est ici fixé au départ à un nombre C .

Dans la population à classer, on choisit ou on tire au hasard C individus appelés noyaux et on agglomère autour : un individu plus proche du

(*) Voir bibliographie [2].

i-ième noyau que des autres noyaux appartient à la *i*-ième classe de la partition. Dans chaque classe de cette partition on recherche alors un individu plus « représentatif » de ladite classe que le noyau autour duquel la classe a été formée. Les *C* individus ainsi trouvés jouent maintenant le rôle de noyaux. Par agglomération autour de ces derniers, on obtient par le même procédé une nouvelle partition et ainsi de suite. La partition finale est celle pour laquelle on ne peut plus améliorer la « représentativité » des noyaux ; ces derniers sont alors appelés les centres de classes.

Cette méthode a été appliquée suivant deux variantes correspondant à deux modes d'évaluation de la représentativité d'un individu par rapport à une classe.

— *Première variante.*

Pour une classe donnée, appelons « représentativité » d'un individu la moyenne des distances entre cet individu et les individus de la classe ; l'individu (ou l'un des individus) le plus représentatif d'une classe est appelé centre de classe.

La qualité d'une classe est mesurée par la représentativité de son centre. La qualité de la partition est mesurée par la moyenne pondérée des qualités des classes où le poids donné à une classe est le nombre d'individus qu'elle contient ; la qualité d'une partition est donc la distance moyenne d'un individu au centre de la classe à laquelle il appartient.

— *Deuxième variante.*

Pour une classe donnée, on appelle ici « représentativité » d'un individu, la distance entre cet individu et l'individu de la classe dont il est le plus éloigné ; le centre d'une classe est l'individu (ou l'un des individus) le plus représentatif de cette classe et l'on mesure la qualité d'une classe par la représentativité de son centre. La qualité d'une partition est mesurée par la qualité de la plus mauvaise classe.

Résultats.

Les résultats obtenus sont donnés sous forme de

graphiques en annexes IV, V et VI pour la première variante et en annexe VII pour la deuxième variante. On remarque que, pour un nombre donné de classes (3), les résultats obtenus avec les deux variantes de classification non hiérarchique (annexes VI et VII) et la méthode de classification hiérarchique (annexe III) sont sensiblement identiques. Il a cependant paru intéressant de chercher les individus qui, quelle que soit la méthode employée, se trouvent toujours associés : c'est pourquoi on a appelé « forme forte » un tel groupe d'individus.

Ces formes fortes, au nombre de 14, sont représentées dans la figure 8 et décrites dans le tableau 9.

TABLEAU 9

Formes fortes (*)	Numéros des individus
A	4, 5, 38, 43, 44, 45, 54, 56, 58, 67, 68, 72, 75, 76, 77, 78, 80, 81, 82, 83, 84, 86, 100, 107, 108, 114, 140, 147, 148, 149, 155.
B	13, 19, 79, 111, 113, 126, 169.
C	137, 163.
D	28, 151, 165.
E	37, 69, 125.
F	1, 2, 14, 18, 20, 28, 36, 46, 49, 50, 53, 55, 64, 65, 66, 70, 71, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 110, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 129, 130, 131, 132, 133, 135, 136, 141, 144, 145, 150, 152, 154, 164, 170.
G	24, 25, 28, 52, 85, 138, 139, 157, 171.
H	22, 134, 146, 153, 166.
I	3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 17, 21, 27, 29, 30, 31, 34, 35, 39, 40, 41, 42, 59, 60, 63, 73, 74, 87, 91, 115, 118, 127, 128, 142, 143, 156, 158, 159, 160, 167, 168.
J	51, 88.
K	89, 90.
L	15, 16, 47, 48, 92, 109.
M	57, 61, 161, 162.
N	32, 33.

(*) Restent isolés les numéros 62 et 112.

PROPOSITION DE SYNTHÈSE

Les développements qui précèdent ont décrit deux méthodes d'approche pour l'étude globale de l'aptitude de 86 essences à fournir des traverses de chemin de fer en climat tropical. La figure 9 repré-

sente une synthèse brute des résultats de chaque étude. On y a représenté par :

□ : les essences non utilisables pour la confection de traverses,

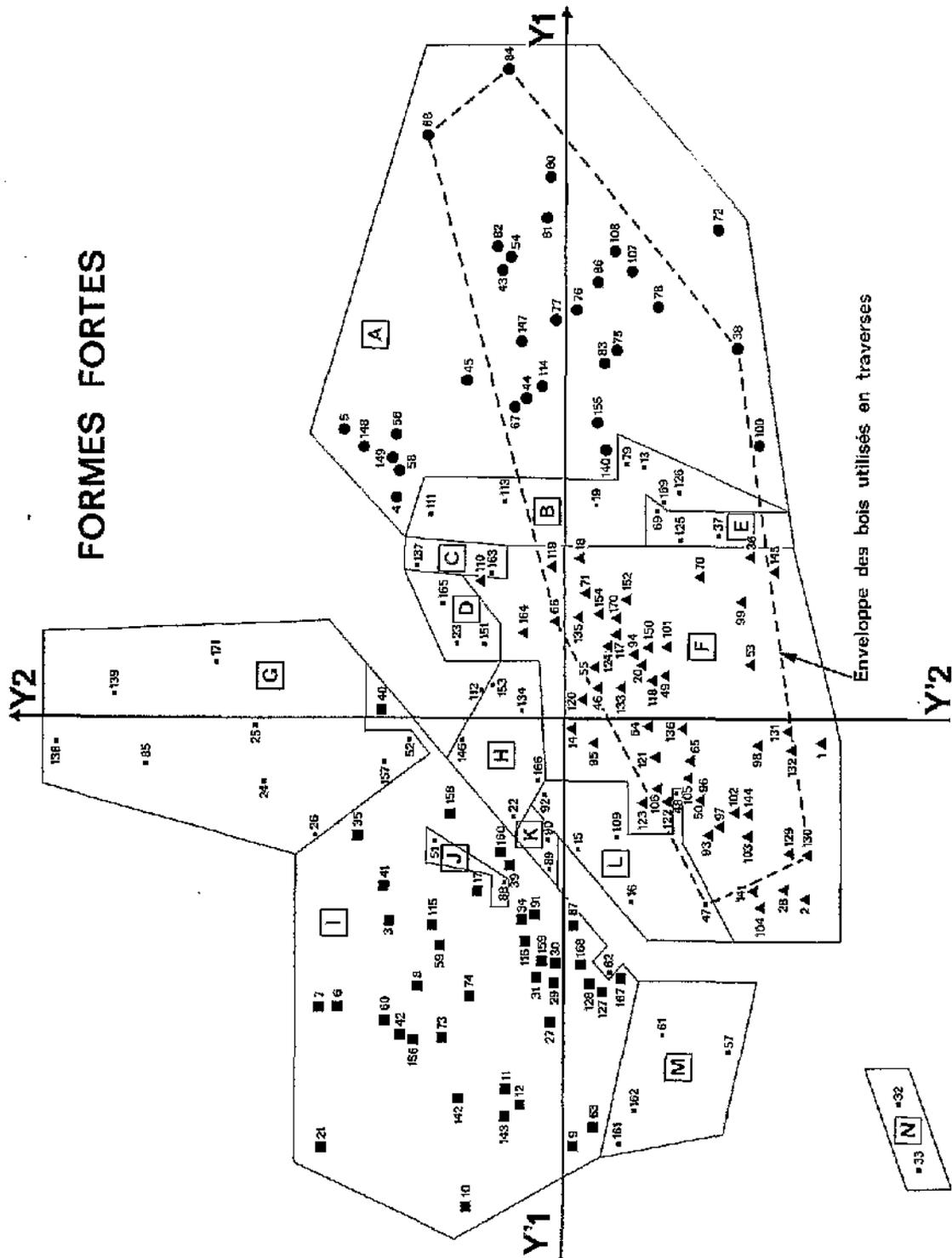


FIG. 8
Formes fortes.

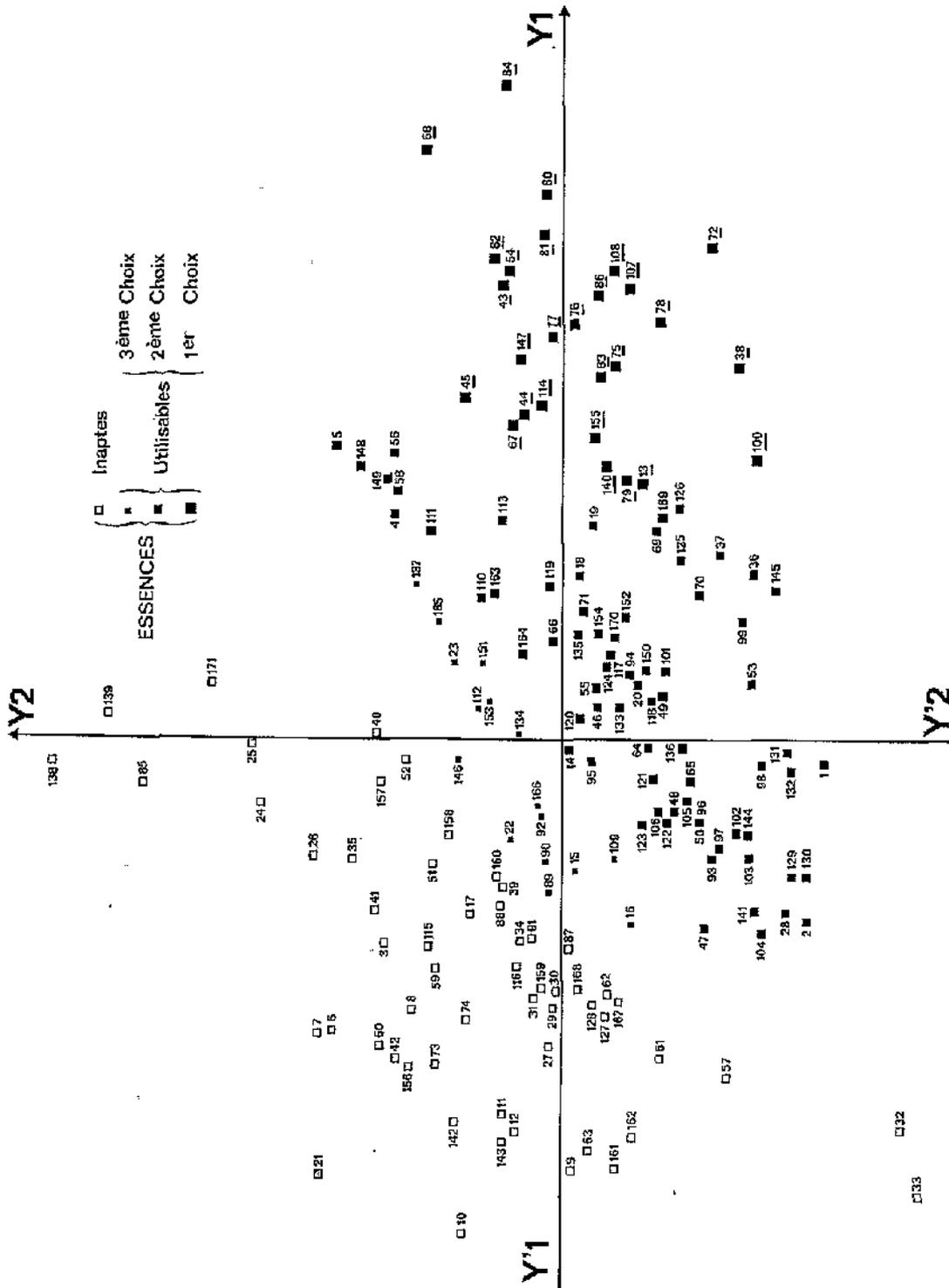


FIG. 8.
Proposition de synthèse.

■ ■ ■ : les essences susceptibles de fournir des traverses, réparties selon trois degrés de qualité allant de ■ (traverses à utiliser de préférence pour les voies à faible trafic, les voies de garage...) à ■ (traverses de qualité supérieure).

Il va de soi que ces propositions doivent être nuancées.

— En effet, les caractéristiques physiques et mécaniques utilisées dans cette étude ne rendent pas complètement compte du comportement réel du bois. Un cas frappant est celui du Niové (*Staudtia stipitata*). Celui-ci est classé selon la figure 9 dans la liste des bois susceptibles de fournir des traverses de 2^e choix. Or, la Société Nationale des Chemins de Fer Français a été conduite à rejeter cette essence. Quelle est la cause de cette contradiction ? Il se trouve que le défaut rédhibitoire de ce bois est sa grande fissilité, défaut qui n'a pas été pris en compte dans notre analyse, la résistance au fendage mesurée selon la norme NF B 51011 n'étant absolument pas représentative de la fissilité naturelle du bois.

D'autres exemples peuvent montrer les imperfections de la méthode.

— Le Bodioa (*Anopyxis klaineana*) avait été conseillé lors de l'étude du Chemin de Fer Transcamerounais comme bois à traverses (dans notre analyse il est d'ailleurs classé en essence de 2^e choix). Il possède, en effet, des propriétés physiques et mécaniques satisfaisantes, une bonne imprégnabilité permettant de compenser une durabilité naturelle assez faible. Or, on a constaté ultérieurement que le séchage de ce bois, (le séchage est une opération préliminaire nécessaire à une bonne imprégnation des traverses) s'accompagnait d'altérations graves entraînant un pourcentage de rejet très grand de traverses blanches et que le traitement temporaire des traverses par trempage dans un bain

fungicide et insecticide était pratiquement inopérant. C'est pourquoi, il apparaît nécessaire de déconseiller l'emploi d'essences de durabilité naturelle insuffisante à assurer elle-même la bonne conservation du bois pendant le séchage.

— Les caractéristiques utilisées concernent uniquement le bois parfait. Il se trouve malheureusement que les traverses comportent souvent des parties aubieuses très importantes et qu'il n'y a pas toujours de corrélation entre propriétés de l'aubier et propriétés du duramen notamment en ce qui concerne la durabilité et l'imprégnabilité. Il faut ici citer les cas de l'Alep (*Desbordesia glaucescens*) et de l'Eveuss (*Klainedoxa gabonensis*) qui présentent une large couronne d'aubier. Si le bois parfait de ces deux essences ne pose aucun problème de conservation pendant le séchage, il n'en est pas de même pour les aubiers qui, au cours de celui-ci, s'altèrent gravement et doivent être éliminés avant imprégnation à la créosote. Ceci explique que les spécifications techniques pour la fourniture de traverses blanches limitent strictement la proportion d'aubier pour de telles essences et que les tolérances d'aubier correspondent exactement aux tolérances de flaches.

— Toutes les propriétés du bois n'ont pas été prises en compte dans cette étude. Les *Dialium*, qui n'ont pas été étudiés ici, présenteraient toutes les garanties nécessaires (dureté, densité, durabilité naturelle...). Ils seraient sans coup férir, classés en première catégorie. Mais qui oserait sélectionner des bois présentant d'énormes difficultés de sciage dues à de fortes teneurs en silice ?

Ces quelques réflexions présentées ainsi en conclusion montreront au lecteur que les méthodes d'analyse modernes ne peuvent et ne doivent être que des instruments de travail et de réflexion et qu'en définitive l'appréciation finale ne peut être faite que par l'ingénieur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CAILLIEZ (F.) et GUÉNEAU (P.). — Analyse en composantes principales des propriétés technologiques des bois malgaches. Cahiers scientifiques du Centre Technique Forestier Tropical n° 2 (1972).
- [2] CAILLIEZ (F.) et PAGES (J. P.). — Introduction à l'analyse des Données, 1975. SMASH, 9, rue Duban, 75016, Paris.

Annexe I

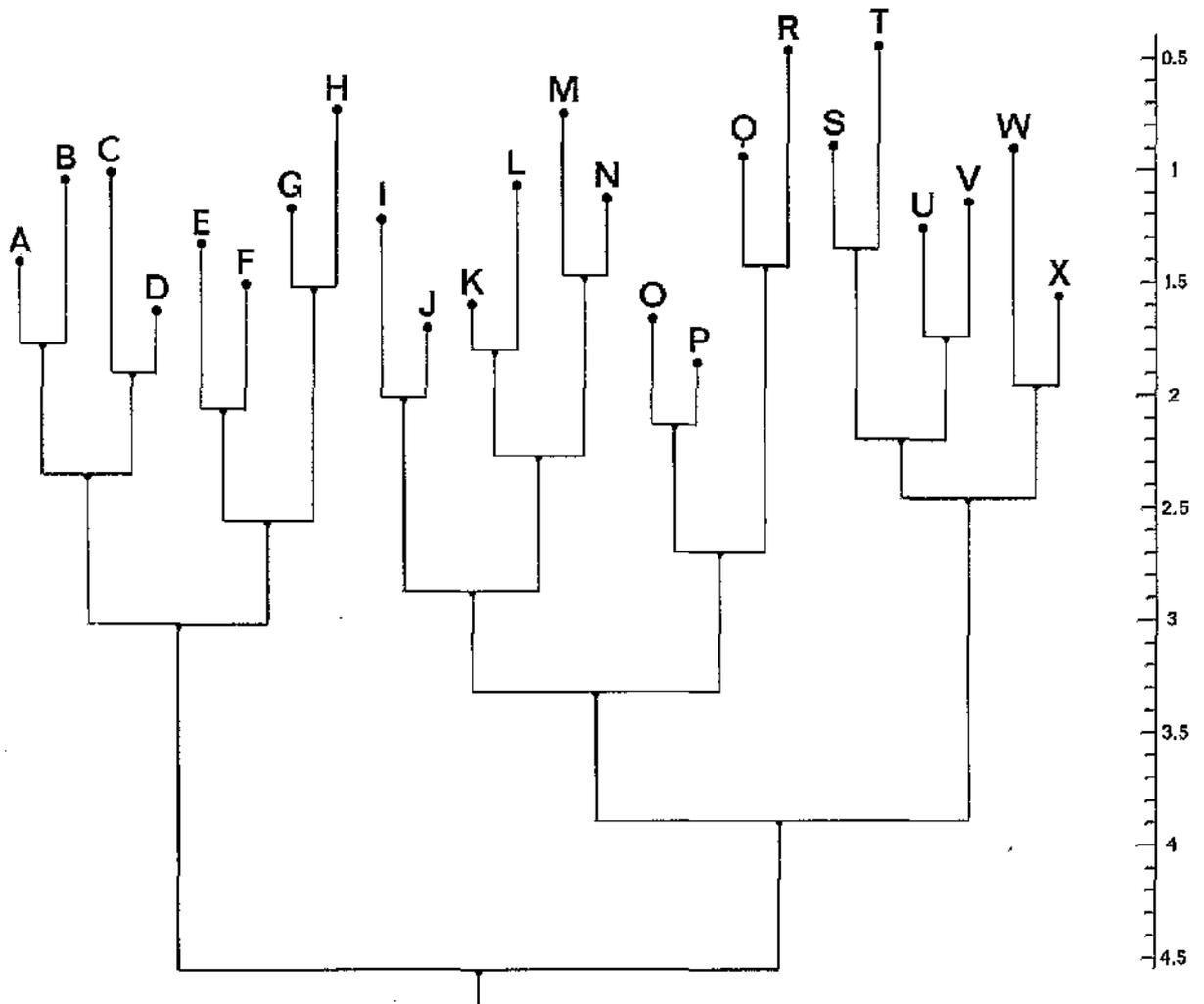
LISTE DES ESSAIS

Ordre	N° C. T. F. T.	Nom botanique	Nom commercial	Provenance
1	13963	<i>Azelia africana</i> (Smith.)	Doussié	Côte-d'Ivoire
2	13965	<i>Albizia ferruginea</i> (Benth.)	Sifou-Sifou	Moyen-Congo
3	17606	<i>Aningaeria robusta</i> (Aubrev. et Pellegrin)	Agnégré	Côte-d'Ivoire
4	10303	<i>Anopyxis klaineana</i> (Engl.)	Bodioa	R. C. A.
5	13990	<i>Anopyxis klaineana</i> (Engl.)	Bodioa	Côte-d'Ivoire
6	15387	<i>Arihostema madagascariense</i> (Baillon)	Baby	Madagascar
7	15399	<i>Arihostema madagascariense</i> (Baillon)	Baby	Madagascar
8	11360	<i>Aucoumea klaineana</i> (Pierre)	Okoumé	Gabon
9	11361	<i>Aucoumea klaineana</i> (Pierre)	Okoumé	Gabon
10	11362	<i>Aucoumea klaineana</i> (Pierre)	Okoumé	Gabon
11	14579	<i>Aucoumea klaineana</i> (Pierre)	Okoumé	Congo
12	14814	<i>Aucoumea klaineana</i> (Pierre)	Okoumé	Congo
13	19036	<i>Ballonella tozoperma</i> (Pierre)	Moabi	Gabon
14	11358	<i>Berlinia acuminata</i> (Scand.)	Ebiara	Cameroun
15	18022	<i>Brachystegia cynometroides</i> (Harms)	Naga	Cameroun
16	15624	<i>Brachystegia laurentii</i> (Louis)	Bomanga	Gabon
17	15628	<i>Brachystegia laurentii</i> (Louis)	Bomanga	Gabon
18	15299	<i>Calpocalyx heitzii</i> (Pellegr.)	Miama	Gabon
19	15647	<i>Calpocalyx heitzii</i> (Pellegr.)	Miama	Gabon
20	15654	<i>Calpocalyx heitzii</i> (Pellegr.)	Miama	Gabon
21	11115	<i>Canarium schweinfurthii</i> (Engl.)	Alélé	Cameroun
22	17072	<i>Carapa densifolia</i> (Mart.)	Tamacoari	Guyane
23	17073	<i>Carapa densifolia</i> (Mart.)	Tamacoari	Guyane
24	16206	<i>Celtis bryeyii</i> (De Wild.)	Diania	R. C. A.
25	16209	<i>Celtis bryeyii</i> (De Wild.)	Diania	R. C. A.
26	16210	<i>Celtis bryeyii</i> (De Wild.)	Diania	R. C. A.
27	11300	<i>Chlorophora excelsa</i> (Benth & Hook. F.)	Iroko	Cameroun
28	11388	<i>Chlorophora excelsa</i> (Benth & Hook. F.)	Iroko	Gabon
29	16203	<i>Calocaryon preussii</i> (Warb.)	Ekoune	R. C. A.
30	16204	<i>Calocaryon preussii</i> (Warb.)	Ekoune	R. C. A.
31	16205	<i>Calocaryon preussii</i> (Warb.)	Ekoune	R. C. A.
32	16128	<i>Commiphora</i> sp.	Arofy	Madagascar
33	16138	<i>Commiphora</i> sp.	Arofy	Madagascar
34	18039	<i>Crossostylis multiflora</i> (Brong et Gris.)	Hêtre rose	Nouvelle Calédonie
35	16121	<i>Croton oligandrus</i> (Hiuton.)	Ngeul	Gabon
36	15632	<i>Cylicodiscus gabunensis</i> (Harms)	Okan	Gabon
37	15644	<i>Cylicodiscus gabunensis</i> (Harms)	Okan	Gabon
38	15645	<i>Cylicodiscus gabunensis</i> (Harms)	Okan	Gabon
39	16972	<i>Daeryodes excelsa</i> (Vahl)	Gommier	Guadeloupe
40	16973	<i>Daeryodes excelsa</i> (Vahl)	Gommier	Guadeloupe
41	16974	<i>Daeryodes excelsa</i> (Vahl)	Gommier	Guadeloupe
42	17210	<i>Daniella thurifera</i> (Benn.)	Faro	Guinée
43	15680	<i>Desbordestia glaucescens</i> (van Tiegh.)	Alep	Gabon
44	15786	<i>Desbordestia glaucescens</i> (van Tiegh.)	Alep	Gabon
45	15358	<i>Ditoebea thourarsii</i> (R. & S.)	Vivaona	Madagascar
46	18752	<i>Distemonanthus benthamianus</i> (Baill.)	Movingui	Cameroun
47	18869	<i>Distemonanthus benthamianus</i> (Baill.)	Movingui	Cameroun
48	18912	<i>Distemonanthus benthamianus</i> (Baill.)	Movingui	Côte-d'Ivoire
49	14470	<i>Dumoria heckeltii</i> (A. Chev.)	Makoré	Côte-d'Ivoire
50	13848	<i>Entandrophragma utile</i> (Sprague)	Sipo	Côte-d'Ivoire
51	15297	<i>Eriomadelphus esul</i> (Mildbr.)	Angoa	Madagascar
52	15298	<i>Eriomadelphus esul</i> (Mildbr.)	Angoa	Gabon
53	15018	<i>Erythrophloeum torense</i> (A. Chev.)	Tali	Cameroun
54	18163	<i>Eschweilera odora</i> (Miers)	Manbarklak	Guyane
55	18147	<i>Eschweilera sagotiana</i> (Miers)	Manbarklak	Guyane
56	15977	<i>Faucheria</i> sp.	Nato	Madagascar
57	16181	<i>Fillaeopsis discophora</i> (Harms.)	Nienk	Gabon
58	15367	<i>Faeltia</i> sp.	Rangomafetra	Madagascar
59	17605	<i>Gambeya gigantea</i> (Aubrev. et Pellegrin)	Koanandio	Côte-d'Ivoire
60	17607	<i>Gambeya gigantea</i> (Aubrev. et Pellegrin)	Koanandio	Côte-d'Ivoire
61	18021	<i>Gossweilerodendron balsamiferum</i> (Harms)	Tola	Gabon
62	18075	<i>Gossweilerodendron balsamiferum</i> (Harms)	Tola	Gabon
63	18077	<i>Gossweilerodendron balsamiferum</i> (Harms)	Tola	Gabon
64	18136	<i>Goupta glabra</i> (Aubl.)	Goupi	Guyane
65	18151	<i>Goupta glabra</i> (Aubl.)	Goupi	Guyane
66	15288	<i>Guibourtia lessmannii</i> (J. Léonard)	Kévazingo	Gabon
67	15336	<i>Guibourtia arnoldiana</i> (J. Léonard.)	Mutenyo	Congo
68	15788	<i>Guibourtia demeuzii</i> (J. Léonard.)	Ebana	Gabon
69	15641	<i>Guibourtia ehie</i> (J. Léonard.)	Ovangkol	Gabon
70	15642	<i>Guibourtia ehie</i> (J. Léonard.)	Ovangkol	Gabon
71	15643	<i>Guibourtia ehie</i> (J. Léonard.)	Ovangkol	Gabon
72	15366	<i>Humbertia madagascariensis</i> (Lamk.)	Endranendrana	Madagascar
73	18032	<i>Kermadectia sinuata</i> (Brong. et Gris)	Hêtre gris	Nouvelle Calédonie
74	18033	<i>Kermadectia sinuata</i> (Brong. et Gris)	Hêtre gris	Nouvelle Calédonie

Ordre	N° C. T. F. T.	Nom botanique	Nom commercial	Provenance
75	14986	<i>Klatnedoxa gabonensis</i> (Pierre)	Èveuss	Gabon
76	15679	<i>Klatnedoxa gabonensis</i> (Pierre)	Èveuss	Gabon
77	15333	<i>Lecomtedoxa klaineana</i> (Dubard.)	Okolangouma	Gabon
78	15342	<i>Lecomtedoxa klaineana</i> (Dubard.)	Okolangouma	Gabon
79	15349	<i>Lecomtedoxa klaineana</i> (Dubard.)	Okolangouma	Gabon
80	13977	<i>Lelestua durissima</i> (H. Lec.)	Congotali	Congo
81	15678	<i>Librevillea klainei</i> (Oyle)	Ngaba	Gabon
82	9258	<i>Lophira alata</i> (Banks)	Azobé	Cameroun
83	10281	<i>Lophira alata</i> (Banks)	Azobé	R. C. A.
84	16343	<i>Lophira alata</i> (Banks)	Azobé	Gabon
85	15375	<i>Mauloutchia</i> sp.	Mahafotra	Madagascar
86	15368	<i>Mitrusops</i> sp.	Tendrokazo	Madagascar
87	15779	<i>Monopetalanthus durandii</i> (F. Hallé et Normand)	Andoung de Durand	Gabon
88	15780	<i>Monopetalanthus durandii</i> (F. Hallé et Normand)	Andoung de Durand	Gabon
89	15781	<i>Monopetalanthus durandii</i> (F. Hallé et Normand)	Andoung de Durand	Gabon
90	15784	<i>Monopetalanthus durandii</i> (F. Hallé et Normand)	Andoung de Durand	Gabon
91	15786	<i>Monopetalanthus durandii</i> (F. Hallé et Normand)	Andoung de Durand	Gabon
92	16473	<i>Monopetalanthus durandii</i> (F. Hallé et Normand)	Andoung de Durand	Gabon
93	10241	<i>Nauclea diderrichii</i> (Merrill)	Bilinga	Côte-d'Ivoire
94	10304	<i>Nauclea diderrichii</i> (Merrill)	Bilinga	R. C. A.
95	15300	<i>Newtonia leucocarpa</i> (Gilbert et Boutique)	Ossimiale	Gabon
96	15304	<i>Newtonia leucocarpa</i> (Gilbert et Boutique)	Ossimiale	Gabon
97	16627	<i>Newtonia suaveolens</i> (Miq.) (Brenan)	Alimiao	Guyane
98	16640	<i>Newtonia suaveolens</i> (Miq.) (Brenan)	Alimiao	Guyane
99	17428	<i>Newtonia suaveolens</i> (Brenan)	Alimiao	Guyane
100	17429	<i>Newtonia suaveolens</i> (Brenan)	Alimiao	Guyane
101	17430	<i>Newtonia suaveolens</i> (Brenan)	Alimiao	Guyane
102	16633	<i>Ocotea rubra</i> (Mez)	Grignon franc	Guyane
103	16642	<i>Ocotea rubra</i> (Mez)	Grignon franc	Guyane
104	17424	<i>Ocotea rubra</i> (Mez)	Grignon franc	Guyane
105	17425	<i>Ocotea rubra</i> (Mez)	Grignon franc	Guyane
106	17433	<i>Ocotea rubra</i> (Mez)	Grignon franc	Guyane
107	15783	<i>Oddoniodendron normandii</i> (Aubrev.)	Nkaga	Gabon
108	15785	<i>Oddoniodendron normandii</i> (Aubrev.)	Nkaga	Gabon
109	18134	<i>Oxyptigma oxypyllum</i> (J. Léon.)	Tchitola	R. P. Congo
110	15331	<i>Paraberlinia bifoliolata</i> (Pelleg.)	Awoura	Gabon
111	15625	<i>Paraberlinia bifoliolata</i> (Pelleg.)	Awoura	Gabon
112	15631	<i>Paraberlinia bifoliolata</i> (Pelleg.)	Awoura	Gabon
113	15636	<i>Paraberlinia bifoliolata</i> (Pelleg.)	Awoura	Gabon
114	9935	<i>Partnari glabra</i> (Oliv.)	Aramon	Côte-d'Ivoire
115	17212	<i>Parkia bicolor</i> (A. Chev.)	Kongul	Guinée
116	17215	<i>Parkia bicolor</i> (A. Chev.)	Kongul	Guinée
117	15301	<i>Piptadeniastrum africanum</i> (Brenan)	Dabéma	Gabon
118	15306	<i>Piptadeniastrum africanum</i> (Brenan)	Dabéma	Gabon
119	15650	<i>Piptadeniastrum africanum</i> (Brenan)	Dabéma	Gabon
120	15653	<i>Piptadeniastrum africanum</i> (Brenan)	Dabéma	Gabon
121	17235	<i>Piptadeniastrum africanum</i> (Brenan)	Dabéma	Côte-d'Ivoire
122	17236	<i>Piptadeniastrum africanum</i> (Brenan)	Dabéma	Côte-d'Ivoire
123	17808	<i>Piptadeniastrum africanum</i> (Brenan)	Dabéma	R. P. Congo
124	17872	<i>Piptadeniastrum africanum</i> (Brenan)	Dabéma	Côte-d'Ivoire
125	18662	<i>Platonia insignis</i> (Mart.)	Parcourl	Guyane
126	17388	<i>Platonia insignis</i> (Mart.)	Parcourl	Guyane
127	18106	<i>Poga oleosa</i> (Pierre)	Ovoga	Gabon
128	18107	<i>Poga oleosa</i> (Pierre)	Ovoga	Gabon
129	10306	<i>Pterocarpus soyauxii</i> (Taub.)	Pañouk	R. C. A.
130	11357	<i>Pterocarpus soyauxii</i> (Taub.)	Pañouk	Cameroun
131	10360	<i>Pterocarpus soyauxii</i> (Taub.)	Pañouk	Gabon
132	10530	<i>Pterocarpus soyauxii</i> (Taub.)	Pañouk	Gabon
133	16635	<i>Qualea albiflora</i> (Warm.)	Gonfolo	Guyane
134	17070	<i>Qualea albiflora</i> (Warm.)	Gonfolo	Guyane
135	16620	<i>Qualea rosea</i> (Aubl.)	Gonfolo	Guyane
136	17064	<i>Qualea rosea</i> (Aubl.)	Gonfolo	Guyane
137	17065	<i>Qualea rosea</i> (Aubl.)	Gonfolo	Guyane
138	15355	<i>Ravensara</i> sp.	Tavolo	Madagascar
139	15357	<i>Ravensara</i> sp.	Tavolo	Madagascar
140	10523	<i>Sacoglottis gabonensis</i> (Urb.)	Ozonga	Gabon
141	18043	<i>Shorea singkawang</i> (Burck.)	Singkawang	Sumatra
142	18696	<i>Simarouba amara</i> (Aubl.)	Marupa	Guyane
143	18704	<i>Simarouba amara</i> (Aubl.)	Marupa	Guyane
144	15777	<i>Sindoropsis lelesui</i> (J. Léonard)	Gheombi	Gabon
145	18302	<i>Staudtia stipitata</i> (Warb.)	Niové	Cameroun
146	11114	<i>Sterculia oblonga</i> (Mast.)	Eyong	Cameroun
147	9932	<i>Strombosia glaucescens</i> (Engl.)	Poé	Côte-d'Ivoire

Ordre	N° C. T. F. T.	Nom botanique	Nom commercial	Provenance
148	15386	<i>Symphonia</i> sp.	Hazinina	Madagascar
149	15398	<i>Symphonia</i> sp.	Hazinina	Madagascar
150	11284	<i>Tarriella densiflora</i> (Aubrev. et Normand)	Niangon	Gabon
151	11285	<i>Tarriella densiflora</i> (Aubrev. et Normand)	Niangon	Gabon
152	11286	<i>Tarriella densiflora</i> (Aubrev. et Normand)	Niangon	Gabon
153	11287	<i>Tarriella densiflora</i> (Aubrev. et Normand)	Niangon	Gabon
154	11288	<i>Tarriella densiflora</i> (Aubrev. et Normand)	Niangon	Gabon
155	18166	<i>Terminalia amazonia</i> (Exell)	Anangossi	Guyane
156	11750	<i>Terminalia superba</i> (Engl. & Diels)	Limba	Cameroon
157	16467	<i>Tetraberlinia bifoliolata</i> (Hauman)	Ekaba	Gabon
158	16468	<i>Tetraberlinia bifoliolata</i> (Hauman)	Ekaba	Gabon
159	16474	<i>Tetraberlinia bifoliolata</i> (Hauman)	Ekaba	Gabon
160	16475	<i>Tetraberlinia bifoliolata</i> (Hauman)	Ekaba	Gabon
161	17233	<i>Triplachiton scleroxyton</i> (K. Schum.)	Samba	Côte-d'Ivoire
162	17234	<i>Triplachiton scleroxyton</i> (K. Schum.)	Samba	Côte-d'Ivoire
163	15374	<i>Uapaca</i> sp.	Voapaka	Madagascar
164	15378	<i>Uapaca</i> sp.	Voapaka	Madagascar
165	15379	<i>Uapaca</i> sp.	Voapaka	Madagascar
166	17214	<i>Uapaca guineensis</i> (Müll. Arg.)	Rikio	Guinée
167	17426	<i>Vochysia tomentosa</i> (D. C.)	Wanakouali	Guyane
168	17427	<i>Vochysia tomentosa</i> (D. C.)	Wanakouali	Guyane
169	15356	<i>Weinmannia</i> sp.	Lalona	Madagascar
170	11760	<i>Quercus</i> sp.	Chêne	France
171	11510	<i>Fagus sylvatica</i> (L.)	Hêtre	France

ANNEXE II



Annexe II bis

LISTE DES INDIVIDUS
COMPOSANT CHAQUE CLASSE

A : 15, 16, 17, 47, 48, 89, 90, 92, 109, 160.

B : 30, 34, 62, 87, 91, 116.

C : 3, 6, 7, 42, 59, 60, 156.

D : 8, 35, 39, 40, 41, 112, 115, 158.

E : 9, 10, 11, 12, 21, 27, 159, 161, 162.

F : 32, 33, 57, 61, 63.

G : 29, 31, 127, 128, 167, 168.

H : 73, 74, 142, 143.

I : 1, 93, 129, 130, 131, 132.

J : 2, 28, 46, 50, 64, 65, 95, 96, 97, 98, 102, 103, 104,
121, 122, 123, 141, 144.

K : 13, 18, 19, 66, 69, 70, 71, 79, 110, 111, 113, 117,
169.

L : 20, 49, 118, 119, 120, 124, 170.

M : 36, 37, 53, 145.

N : 99, 101, 125, 126, 150, 152.

O : 14, 22, 51, 52, 55, 88, 105, 106, 133, 134, 166.

P : 23, 94, 135, 136, 137, 146, 151, 153, 154, 157,
163, 164, 165.

Q : 24, 25, 26, 171.

R : 85, 138, 139.

S : 4, 5, 56, 58.

T : 148, 149.

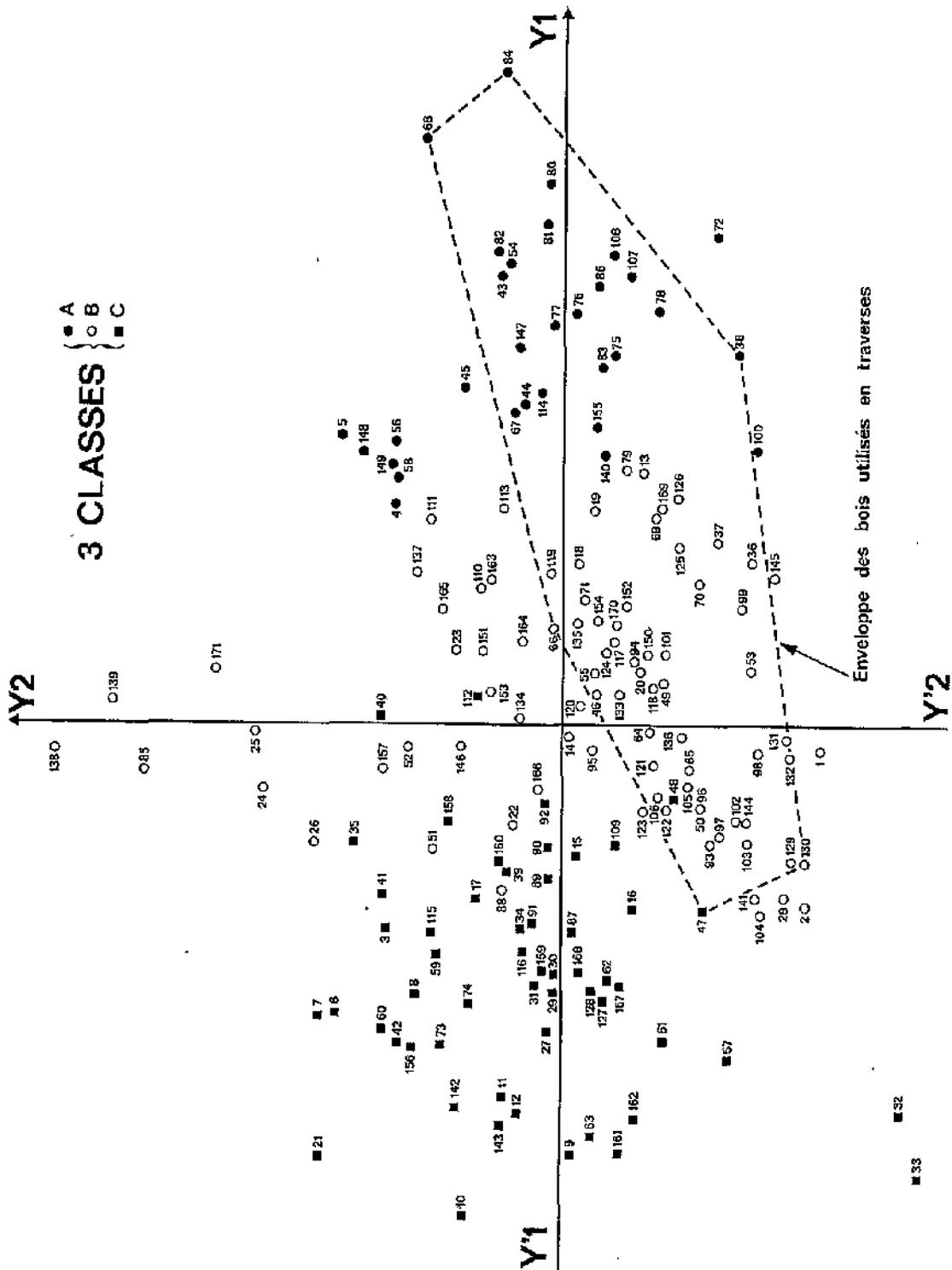
U : 44, 45, 54, 83, 114, 140, 147, 155.

V : 75, 76, 78, 81, 86, 107, 108.

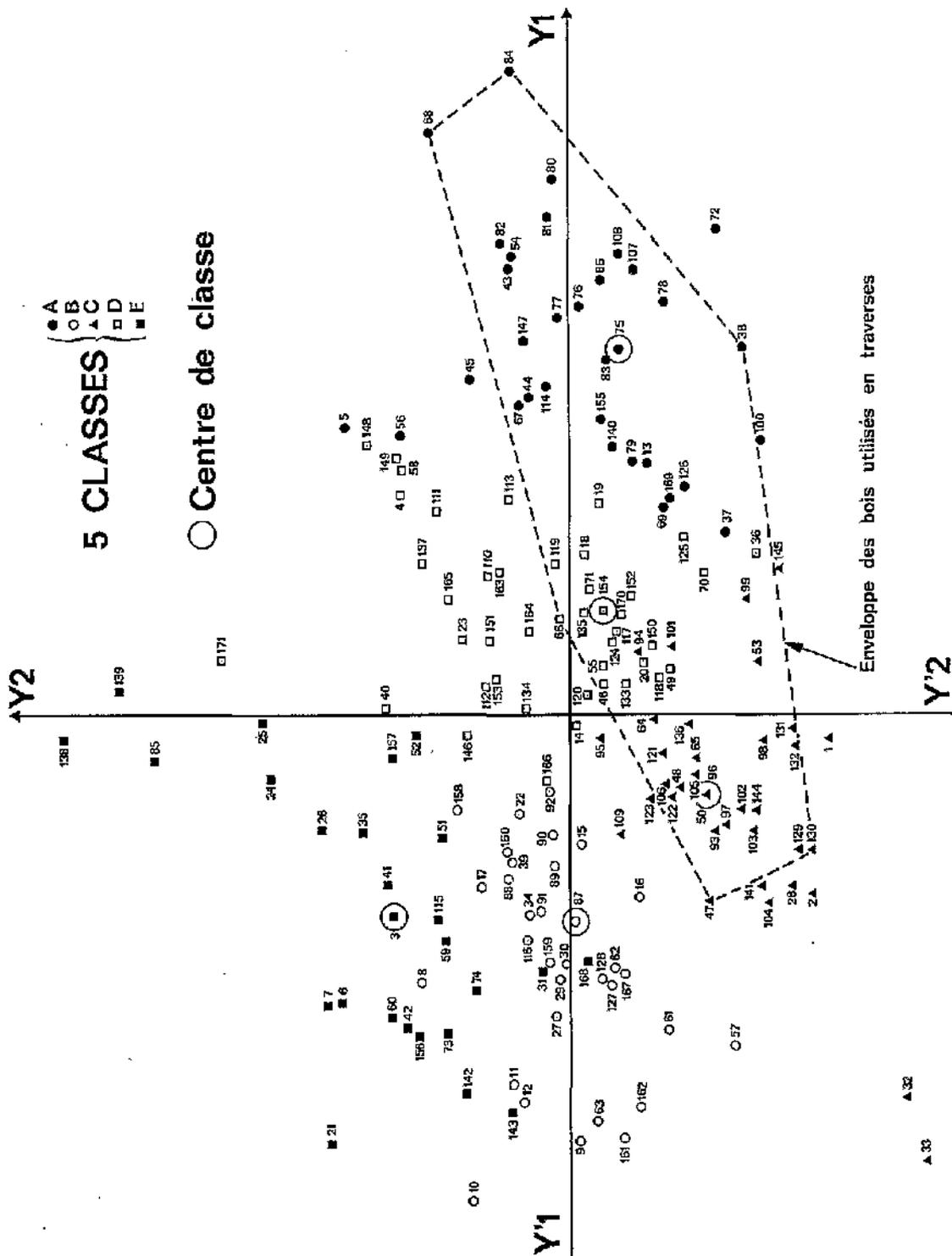
W : 38, 72, 100.

X : 43, 67, 68, 77, 80, 82, 84.

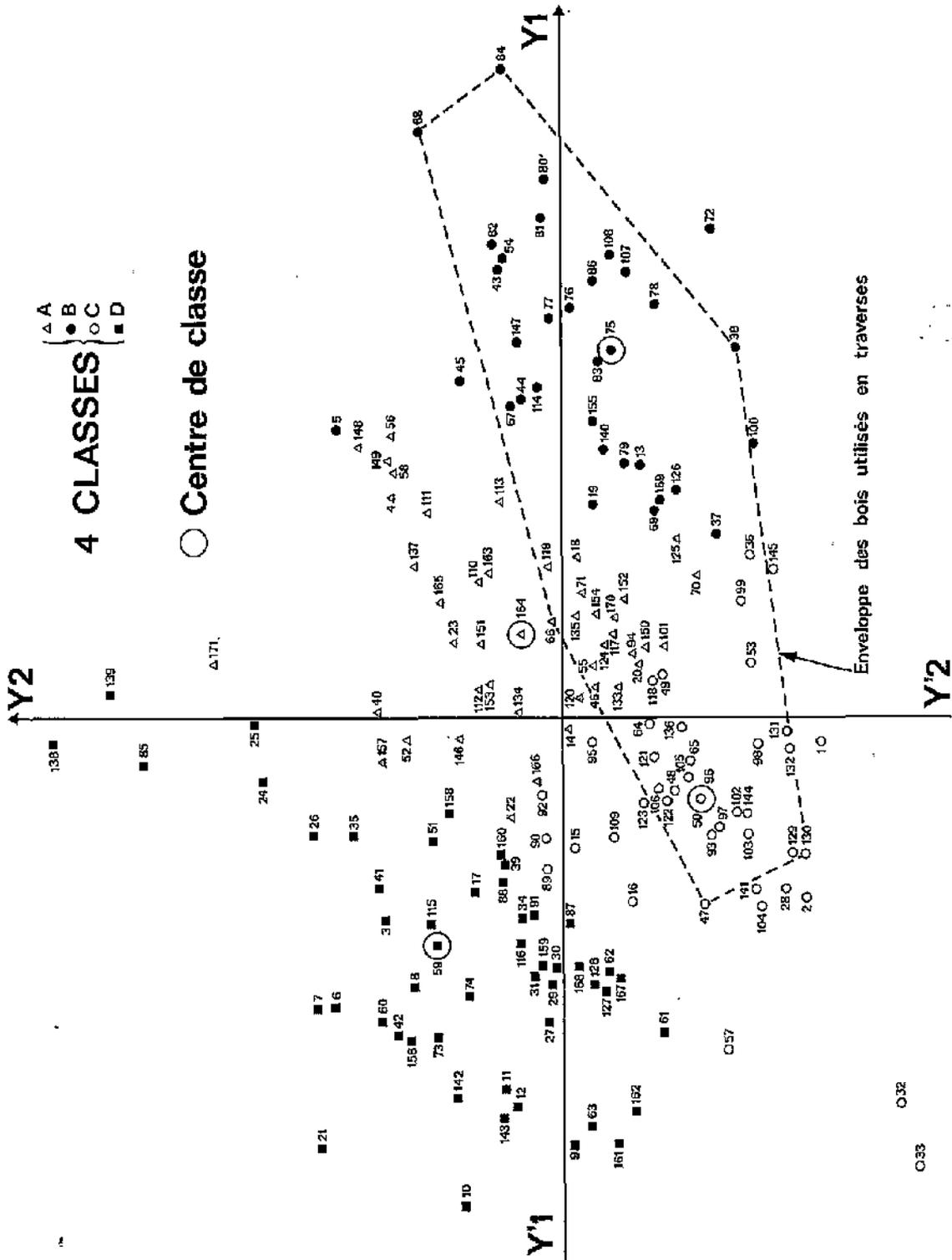
ANNEXE III



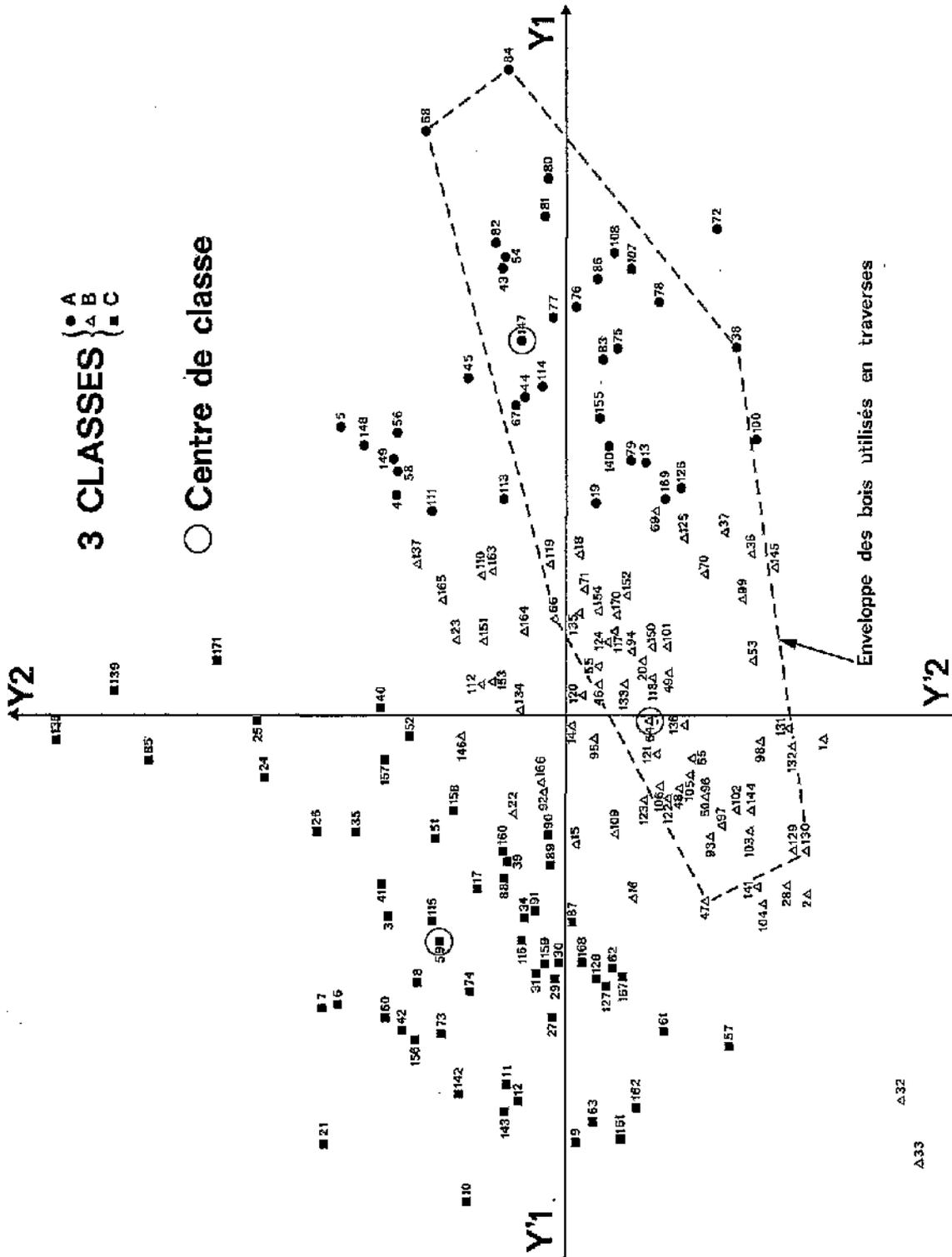
Représentation de la partition à 3 classes extraite de l'arbre de classification construit par la méthode de classification hiérarchique.



Classification non hiérarchique (première variante).

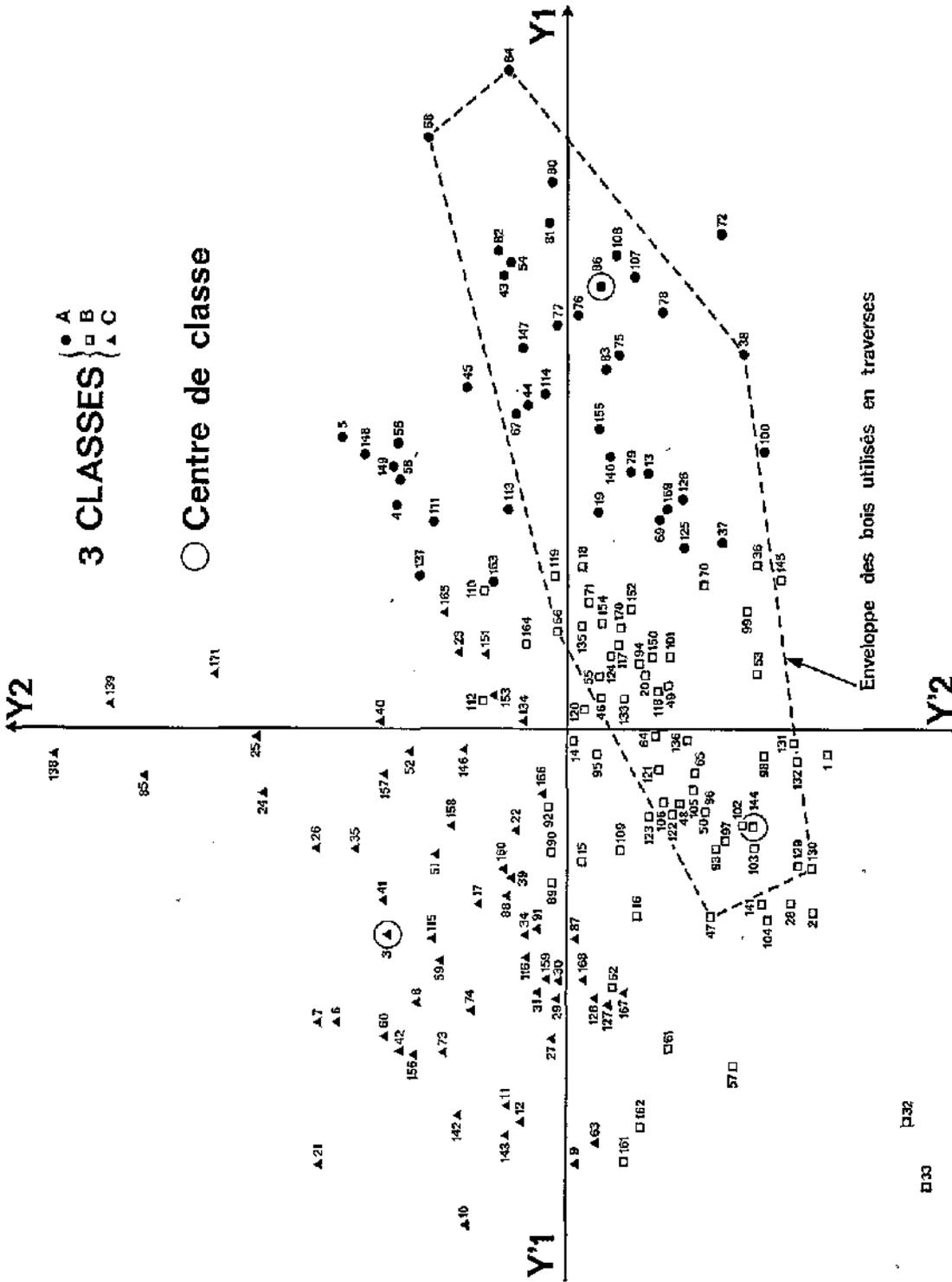


Classification non hiérarchique (première variante).



Classification non hiérarchique (première variante).

ANNEXE VII



Classification non hiérarchique (deuxième variante).