

Photo Durand.

*Vue d'ensemble d'un séchoir expérimental à thermohygrométrie variable
(laboratoire de technologie du bois du C.T.F.T. - Côte-d'Ivoire).*

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE LA DÉTERMINATION DES TABLES DE SÉCHAGE À PARTIR DES CARACTÈRES PHYSIQUES DU BOIS

par Patrick Y. DURAND
*Division de Technologie et Préservation
Centre Technique Forestier Tropical de Côte-d'Ivoire*

SUMMARY

The purpose of this paper is to develop an investigatory methodology by which the kiln schedules can be theoretically computed from the main physical properties of wood characterizing its drying behaviour.

Multiple regression formulae are proposed to this end. A Canonical analysis concerning the 4 independent variates featuring wood and the 2 components of the kiln-drying schedules allows a graphic interpretation of these interrelations.

These results have then been applied to 50 timbers from Ivory Coast, and led to a tentative grouping of these species into 7 working kiln schedules.

RESUMEN

CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LA DETERMINACIÓN DE LAS TABLAS DE SECADO TOMANDO COMO PUNTO DE PARTIDA LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA MADERA

El objeto del presente estudio consiste en proponer un método de investigación que permita determinar los programas teóricos de secado por termohigrometría variable, a partir de las principales propiedades de la madera, que caracterizan su comportamiento en la fase de secado.

Ciertas fórmulas de regresión múltiple permiten alcanzar tales resultados. Un análisis canónico referente a cuatro variables independientes que caracterizan la madera y las dos componentes que definen los programas típicos de secado, permite conseguir una representación gráfica del problema.

Acto seguido, se han aplicado estos resultados a 50 especies de madera procedentes de Costa de Marfil que han tenido como resultado una reagrupación de estas maderas en forma de siete programas típicos de secado por termohigrometría variable.

INTRODUCTION

Le Centre Technique Forestier Tropical de Côte-d'Ivoire a inscrit à son programme de recherche l'étude du séchage artificiel des essences secondaires ivoiriennes encore peu commercialisées. L'objectif à atteindre est, dans un premier temps, de définir une méthodologie d'investigation qui permette d'orienter les recherches sur le séchage artificiel de ces essences tout en limitant le coût, aussi bien en temps chercheurs qu'en fonctionnement. Il semble, en effet, peu réaliste et fastidieux de vouloir procéder à des essais systématiques par tâtonnements successifs sur la quarantaine d'espèces ivoiriennes pour le séchage desquelles on ne dispose d'aucune donnée de départ.

C'est la raison pour laquelle nous avons élaboré une méthode, que nous exposons ici, qui permet de déterminer, tout au moins sur le plan théorique, la table de séchage d'une essence à partir des

caractéristiques physiques qui définissent son comportement au séchage.

Il est important de souligner que le groupement d'essences en programme type de séchage qui est proposé dans la dernière partie de cet article doit être considéré davantage comme une illustration de ce que l'on peut obtenir en appliquant cette méthode d'investigation, plutôt que comme des résultats définitifs.

En effet, l'analyse statistique des corrélations entre caractéristiques physiques du bois et les programmes de température et de gradient de séchage est fondée sur des données expérimentales certes valables mais qui découlent d'un type de séchoir donné et qui pourraient éventuellement être modifiées du fait d'amélioration des techniques de séchage.

LE SÉCHAGE DU BOIS PAR THERMOHYGROMÉTRIE VARIABLE

Dynamique du séchage du bois

Le bois est un matériau poreux organique constitué pour en moyenne 42 % par des macromolécules de cellulose chimiquement très hydrophiles (KOLLMANN-

COTE, 1968). Cette affinité pour l'eau est d'ailleurs favorisée par la structure capillaire du bois. De ce fait, le taux d'humidité du bois (1) variera en fonction des

(1) Taux d'humidité d'un bois = quantité d'eau qu'il renferme exprimée en % de son poids anhydre (AFNOR NFB 51-004).

conditions climatiques ambiantes (température et pression de vapeur relative). Concrètement, dans un climat humide, un bois sec absorbera de l'humidité (absorption) et dans un climat sec, un bois contenant de l'eau perdra de son humidité (désorption). Dans les deux cas, un état d'équilibre est atteint que l'on nomme taux d'humidité d'équilibre (T.H.E.).

Dans un bois fraîchement scié, l'humidité est plus ou moins uniformément répartie dans toute la masse. Mais, au cours du séchage, le bois sèche d'abord en surface, et se crée alors un gradient d'humidité ΔH entre la zone interne et la zone superficielle de la planche. C'est cette différence d'humidité qui conditionne le processus même de séchage :

- Si ΔH est trop faible, le séchage sera lent.
- Si au contraire ΔH est trop élevé, le flux d'humidité allant du cœur de la planche vers la zone superficielle devient trop rapide et irrégulier, il entraîne l'apparition de contraintes internes de séchage, à l'origine de fentes de surface, de collapses et de déformations globales parfois importantes.

• Dans le cas où les taux d'humidité en surface et à l'intérieur du bois sont tous deux égaux au taux d'humidité d'équilibre (THE), pour des conditions de température et d'hygrométrie données,

$$H_{interne} = H_{superficiel} = H_{moyen} = THE.$$

Dans ce cas, $\Delta H = H_{interne} - H_{superficiel} = 0$.

Il n'y a plus de mouvement d'eau dans le bois et de ce fait le processus de séchage est arrêté.

Ce gradient d'humidité ΔH qui régit le séchage est maintenu tant qu'il existe une différence entre le taux d'humidité moyen H_m et la valeur théorique d'équilibre THE qui correspond aux conditions thermohygrométriques données.

Le rapport $\frac{H_m}{THE}$ est appelé **GRADIENT DE SÉCHAGE**

GE = GS (KEYLWERTH, 1951). C'est de ce rapport que dépend la vitesse et la qualité du séchage.

Il a été démontré que, quel que soit le programme de séchage choisi, le gradient de séchage GS tend à être constant (KOLLMANN, 1968).

Exemple de détermination du gradient de séchage GS : à un instant donné au cours du séchage, le taux d'humidité moyen du bois est $H_m = 25\%$. A cet instant, la température sèche est $t_s = 45^\circ C$, et la différence thermohygrométrique est $\Delta t = 5^\circ C$. L'humidité relative de l'air dans ces conditions est de 75% (fig. 1) et le taux d'humidité d'équilibre théorique (THE) est de 13%.

$$GS = \frac{H_m}{THE} = \frac{25}{13} = 1,9.$$

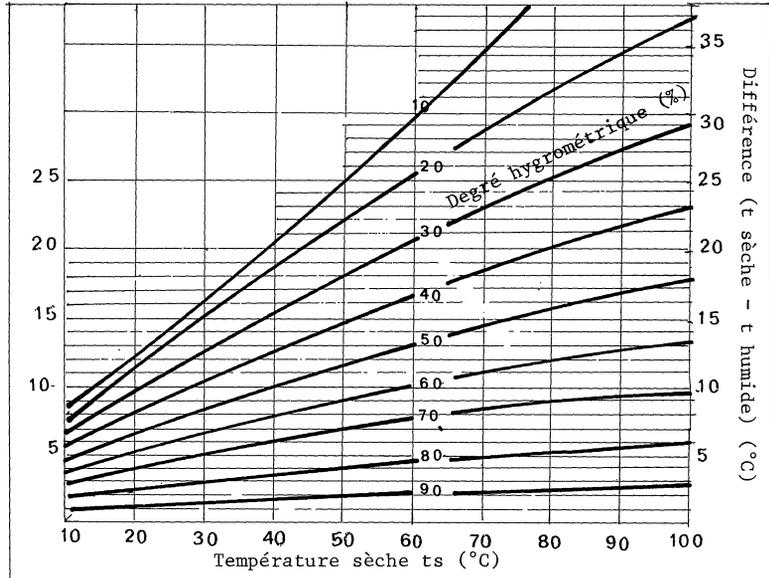


FIG. 1. — Degré hygrométrique de l'air en fonction de la température sèche (t_s) et de la différence ($t_{sèche} - t_{humide}$).

Conditions thermohygrométriques du séchoir

De l'exemple qui précède, on constate que le gradient de séchage GS dépend non seulement de l'humidité du bois, mais aussi de la température et de l'humidité relative de l'air, c'est-à-dire des conditions thermohygrométriques du séchoir.

D'après KOLLMANN (1970), le temps moyen de séchage peut être calculé à partir de la formule empirique suivante :

$$d_{séchage} \text{ (heures)} = \frac{1}{k_s} \text{Log} \frac{H_i}{H_f} \frac{(e)^{1,35}}{25} \cdot \frac{65}{T_s}$$

où k_s = coefficient de séchage du bois (valeur moyenne : 0,026 5 pour les Feuillus) qui dépend de l'essence, de l'orientation de la pièce de bois, de la vitesse de l'air, de la forme du séchoir.

H_i = taux d'humidité initial du bois à sécher (%).

H_f = taux d'humidité final désiré (%).

e = épaisseur du bois (mm).

t_s = température sèche ($^\circ C$ elsius).

Il en résulte que la durée du séchage est inversement proportionnelle à la température, et pour obtenir une vitesse de séchage maximale, il convient donc d'utiliser une température aussi élevée que possible.

Programme « Température »

Lorsque les bois séchés ont un taux d'humidité inférieur à 25 %, on peut, pendant toute la durée du séchage, utiliser la température la plus haute que peut supporter le bois sans risque de fentes, collapses, exsudations de résine, et discolorations. Cette température peut aller jusqu'à 80° voire 90° dans certains cas.

En revanche, pour des bois en sève ($H \% > 30 \%$), une température trop élevée peut provoquer des réactions chimiques sur la lignine et les pentosanes, notamment, entraînant ainsi des discolorations inacceptables. Dans ce cas, il convient de « pré-sécher » le bois à une température initiale généralement inférieure à 60-70 °C, selon les essences, jusqu'à ce que le taux d'humidité descende au-dessous de 30 %.

Partant de ces considérations, on peut établir des programmes-« TEMPÉRATURE », de T_1 à T_9 , préconisés par KOLLMANN (1970).

Le programme température moyen est T_5 ou T_6 (50-60 à 80 °C). Pour les bois délicats à sécher, il convient de choisir un programme T qui tende vers T_1 , tandis que pour les bois ne présentant aucun problème de séchage, les programmes T tendant vers T_9 , sont mieux appropriés.

REMARQUES :

- Il existe un programme température T_{10} à haute température ($ts_1 = 90$ °C et $ts_2 = 120$ °C) que nous n'étudions pas dans ce document.

TABEAU 1

PROGRAMME « TEMPÉRATURE »
(d'après KOLLMANN, 1970)

N° programme	Température initiale ts_1 (°C)	Température limite ts_2 (°C)	Types d'essences
T_1	30	50	Chêne
T_2	30	70	
T_3	40	60	Tali
T_4	50	70	Dabéma
T_5	50	80	Iroko
T_6	60	80	Acajou
T_7	70	80	Fraké
T_8	70	90	Bahia
T_9	80	90	Samba

- Les valeurs mentionnées dans le tableau 1 concernent exclusivement les planches d'épaisseur inférieure ou égale à 30 mm. Pour des épaisseurs plus fortes, il convient de diminuer les températures ts_1 et ts_2 de 5 à 10 °C. Pour la suite de notre étude, nous ne considérons que le cas des épaisseurs inférieures ou égales à 30 mm.

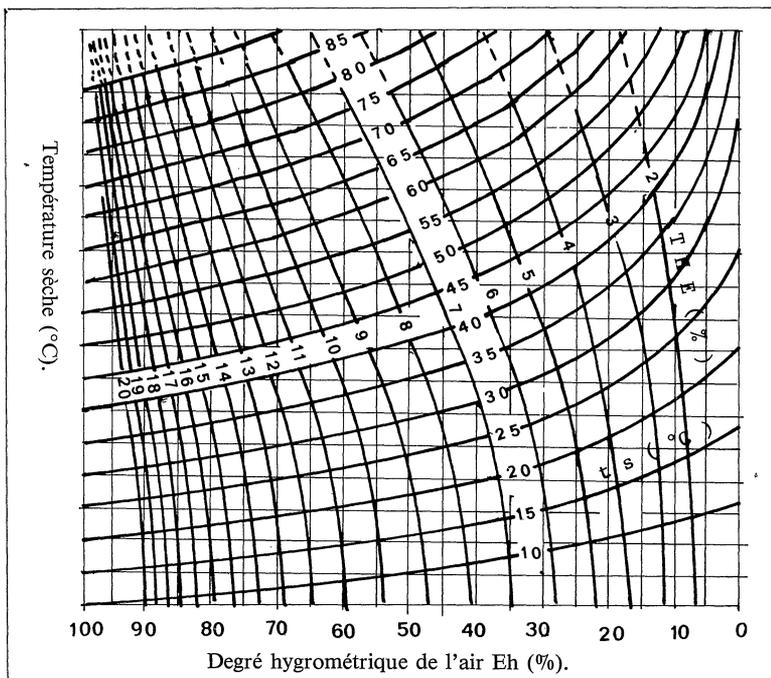


FIG. 2. — Taux d'humidité d'équilibre (THE) en fonction de la température sèche (ts) et du degré hygrométrique (Eh) de l'air.

Programme « Gradient »

L'humidité relative de l'air de séchoir Eh est déterminée, par définition, à la fois par la température sèche ts et par la différence thermohygrométrique $\Delta t = ts - th$, comme le montre la formule suivante :

$$Eh = \frac{f}{F} - \frac{0,52}{F} (ts - th),$$

où f et F sont les tensions de vapeur (en mm Hg) correspondant à la température humide th et à la température sèche ts , respectivement.

Le degré hygrométrique Eh est généralement déterminé à l'aide d'un psychromètre ; deux thermomètres composent cet instrument. Le premier donne la température sèche ts , et le second, dont le réservoir est entouré d'une mousseline maintenue constamment humectée d'eau, indique la température humide th : par suite de l'évaporation qui se produit à la surface du réservoir, les deux thermomètres indiquent une différence de température $\Delta t = ts - th$ qui est

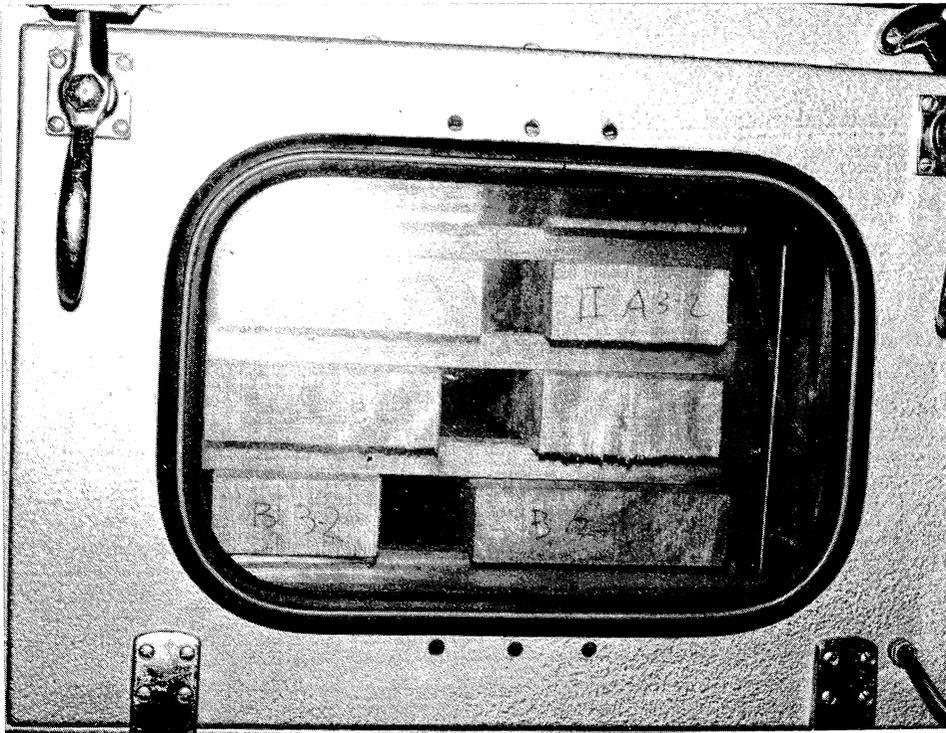


Photo Durand.

*Enceinte de séchage : on notera la faible capacité (0,087 5 m³ de volume utile).
A droite, on aperçoit les câbles reliant les sondes au xylohygromètre et à l'armoire de régulation.*

d'autant plus forte que l'évaporation est plus rapide, c'est-à-dire que l'air est plus sec. Des tables hygrométriques donnent directement E_h en fonction de t_s et Δt (fig. 1).

Cependant, dans la pratique du séchoir à régulation automatique, semi-automatique ou même manuelle, la connaissance de cet état hygrométrique de l'air E_h n'est pas d'une utilité immédiate, et on a souvent recours à la mesure directe du taux d'humidité d'équilibre (THE) qui en dépend, grâce à une cartouche spéciale de cellulose ou à un très mince placage de bois. La conversion entre E_h et THE peut se faire par simple lecture d'un graphique $THE = f(t_s, E_h)$ tel que celui présenté en figure 2. C'est en effet cette valeur instantanée de THE qui, jumelée au gradient de séchage choisi GS, régit le processus de séchage.

Pour des bois délicats à sécher, on utilise un gradient de séchage très bas ($GS < 2$) tandis que pour des essences séchant sans problème, on peut choisir des gradients de séchage supérieurs à 3 ou 4.

A partir de ce principe, on peut élaborer des programmes « gradient de séchage ». Le tableau 2, p. 68, indique les programmes « gradient » avec les taux d'humidité d'équilibre THE correspondants en fonction du taux d'humidité du bois H_m , pour différentes valeurs de GS, allant de 1,2 (séchage délicat) à 5,2 (séchage très rapide) (KOLLMANN, 1970).

Dans ce tableau, sont mentionnées parallèlement les

différences thermohygrométriques Δt qui caractérisent l'humidité relative que doit avoir le séchoir, et qui peuvent être utilisées dans le cas de certains types de séchoirs à contrôle manuel ou semi-automatique.

Programmes de séchage

La conjugaison de ces deux programmes « Température » et « Gradient » permet de constituer une série de tables de séchage, allant du séchage très lent adaptable aux essences délicates à sécher, au séchage très rapide et brutal convenant à certains bois.

Le tableau 3 (voir p. 68) indique les 7 programmes types les plus courants.

REMARQUES TRÈS IMPORTANTES

1) Cas des grosses épaisseurs : ces programmes sont applicables pour une vitesse moyenne de l'air de 2 m/s, uniquement à des épaisseurs de planches inférieures ou égales à 30 mm. Lorsqu'il s'agit d'épaisseurs plus importantes, il y a lieu de diminuer la température sèche de 5 à 10 °C par rapport à celle indiquée dans le programme température choisi. De même, il convient d'augmenter le programme gradient de 1 ou 2 classes selon les cas (cela revient à diminuer le gradient de séchage).

TABLEAU 2

PROGRAMMES GRADIENT EN FONCTION DU GRADIENT DE SÉCHAGE GS ET DE L'HUMIDITÉ MOYENNE DU BOIS
SÉCHAGE RAPIDE SÉCHAGE LENT

N° programme	G ₁		G ₂		G ₃		G ₄		G ₅		G ₆		G ₇	
	GS	6	5,2	4,4	3,9	3,4	3,1	2,8	2,6	2,3	2,1	1,9	1,8	1,6
Hm	THE	Δt	THE	Δt	THE	Δt	THE	Δt	THE	Δt	THE	Δt	THE	Δt
Hi-60	9,5	8	11	6	13	4	16	3	18	2	20	2	20	2
60-50	9	9	10	7	12	5	15	4	17	2	19	2	20	2
50-40	8	10	9	8	11	6	13	5	16	3	18	2	19	2
40-30	7	12	8	8	10	7	11,5	6	14	4	16	3	18	2
28-25	6	15	7	12	8,5	8	10	7	12,5	5	14,5	3	17,5	2
25-23	5	18	6	15	8	10	9	8	11,5	6	13,5	4	16	3
23-21	4,5	21	5,5	18	7	12	8,5	10	10,5	7	12	5	15	3
21-19	4	24	5	20	6,5	14	7,5	12	9,5	8	11	6	13,5	4
19-17	3,5	27	4,5	22	6	16	7	14	8,5	10	10	7	12	5
17-15	3	30	4	24	5,5	18	6	16	7,5	12	9	9	11	6
15-13	2,5	30	3,5	27	4,5	21	5,5	18	6,5	15	8	11	9,5	8
13-11	2,5	30	3	30	4	24	4,5	21	5,5	18	6,5	14	8	11
11-9	2,5	30	2,5	30	3	27	4	25	5	20	5,5	18	6,5	14

TABLEAU 3

PROGRAMME TYPES DE SÉCHAGE PAR THERMOHYGROMÉTRIE VARIABLE
FORMÉS PAR LA COMBINAISON DES PROGRAMMES « TEMPÉRATURE » ET « GRADIENT » DE SÉCHAGE

M.C.	TRÈS LENT (T ₃ + G ₇)				LENT (T ₄ + G ₆)				PLUTÔT LENT (T ₄ + G ₅)			
	ts	th	THE	GS	ts	th	THE	GS	ts	th	THE	GS
60	40	38	20	3,0	50	48	20	3,0	50	48	18	3,3
60-50	40	38	20	2,7	50	48	19	2,9	50	48	17	3,2
50-40	40	38	19	2,4	50	48	18	2,5	50	47	16	2,8
40-30	40	38	18	1,9	50	47	16	2,2	50	46	14	2,5
28-25	60	58	17,5	1,5	70	67	14,5	1,8	70	65	12,5	2,1
25-23	60	57	16	1,5	70	66	13,5	1,8	70	64	11,5	2,1
23-21	60	57	15	1,6	70	65	12	1,8	70	63	10,5	2,1
21-19	60	56	13,5	1,5	70	64	12,1	1,8	70	62	9,5	2,1
19-17	60	55	12	1,5	70	63	10	1,8	70	60	8,5	2,1
17-15	60	54	11	1,45	70	61	9	1,8	70	58	7,5	2,1
15-13	60	52	9,5	1,5	70	59	8	1,75	70	55	6,5	2,15
13-11	60	49	8	1,5	70	56	6,5	1,85	70	52	5,5	2,2
11-9	60	46	6,5	1,5	70	52	5,5	1,8	70	50	5,0	2,0

MOYEN (T ₅ + G ₅)					PLUTÔT RAPIDE (T ₆ + G ₄)			
M.C.	ts	th	THE	GS	ts	th	THE	GS
60	50	48	18	3,3	60	57	16	3,7
60-50	50	48	17	3,2	60	56	15	3,6
50-40	50	47	16	2,8	60	55	13	3,4
40-30	50	46	14	2,5	60	54	11,5	3,0
28-25	80	75	12,5	2,1	80	73	10	2,7
25-23	80	74	11,5	2,1	80	72	9	2,7
23-21	80	73	10,5	2,1	80	70	8,5	2,6
21-19	80	72	9,5	2,1	80	68	7,5	2,7
19-17	80	70	8,5	2,1	80	66	7	2,6
17-15	80	68	7,5	2,15	80	64	6	2,7
15-13	80	65	6,5	2,15	80	62	5,5	2,5
13-11	80	62	5,5	2,2	80	59	4,5	2,7
11-9	80	60	5	2,0	80	55	4	2,5

RAPIDE (T ₇ + G ₃)					TRÈS RAPIDE (T ₈ + G ₂)			
M.C.	ts	th	THE	GS	ts	th	THE	GS
60	70	66	13	4,6	70	64	11	5,4
60-70	70	65	12	4,6	70	63	10	5,5
50-40	70	64	11	4,1	70	62	9	5,0
40-30	70	63	10	3,5	70	62	8	4,3
28-25	80	72	8,5	3,1	90	78	7	3,8
25-23	80	70	8	3,0	90	75	6	4,0
23-21	80	68	7	3,1	90	72	5,5	4,0
21-19	80	66	6,5	3,1	90	70	5	4,0
19-17	80	64	6	3,0	90	68	4,5	4,0
17-15	80	62	5,5	2,9	90	66	4	4,0
15-13	80	59	4,5	3,1	90	63	3,5	4,0
13-11	80	56	4	3,0	90	60	2,5	4,0
11-9	80	53	3	3,3	90	60	2,5	4,0

2) Il n'est pas fait mention dans cette étude du séchage à haute température (température sèche de vapeur = 110 °C à 130°).

3) Lorsque l'humidité du bois passe de 30 à 28 %, la température sèche n'augmente pas aussi brusquement

de ts₁ à ts₂ qu'il est indiqué sur les programmes types. Ce passage est d'ailleurs amplifié ou atténué selon les essences par un système correctif d'amplification que l'on trouve sur certains modèles de régulation automatique.

RELATIONS ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES DU BOIS ET LES PROGRAMMES DE SÉCHAGE

Le bois et ses caractéristiques de comportement au séchage

Certains bois sèchent plus facilement que d'autres, suivant leur densité, leur rétractibilité, leur nervosité et leur aptitude à la déformation. On se propose de déterminer de façon précise quelles sont les relations éventuelles qui existent entre les programmes de séchage définis précédemment et les principales caractéristiques physiques du bois.

Dans la présente étude, nous avons retenu 4 caracté-

ristiques physiques. Sans doute aurait-il été intéressant de faire aussi intervenir la résistance à la traction perpendiculaire au fil du bois qui, dans une certaine mesure, peut traduire les phénomènes de collapse apparaissant au cours de séchage trop violent, lorsque les contraintes internes, perpendiculaires aux fibres, dépassent les forces de cohésion transversale du bois. Mais cette donnée, mesurée sur des éprouvettes spéciales selon une méthode normalisée, est très approximative et surtout d'une grande variabilité intraspécifique.

Les 4 caractéristiques physiques étudiées sont les suivantes :

• Densité (D) = rapport de la masse au volume, tous deux mesurés à 12 % d'humidité.

• Rétractibilité volumétrique (B) = variation moyenne (en %) du volume du bois qui passe de l'état saturé d'eau à l'état anhydre.

• Coefficient de rétractibilité volumétrique (V) = variation du volume de bois sec à l'air, exprimée en %, pour une variation de son taux d'humidité de 1 %. Ce coefficient traduit la « nervosité » du bois.

• Rapport (T/R) = rapport des retraits linéaires totaux tangentiel T et radial R. Ce rapport mesure le risque de déformation et de fentes. Quand il tend vers 1, les risques sont faibles ; quand T/R est supérieur à 2, le séchage d'un bois s'accompagne généralement de déformations et de fentes.

Ces données physiques caractérisant le comportement du bois au séchage, ont été classées selon le schéma ci-dessous.

Densité (D)	Classes	Rétractibilité (B)	Classes
0,300 à 0,499	1	Inférieur à 10 %	1
0,500 à 0,649	2	10 à 12,5 %	2
0,650 à 0,799	3	12,5 à 15 %	3
0,800 à 0,959	4	15 à 17,5 %	4
Supérieur à 0,950	5	Supérieur à 17,5 %	5
Nervosité (V)	Classes	Rapport T/R	
de 1 à 0,35 %	3	Valeurs numériques moyennes	
de 0,55 à 0,35 %	2		
de 0,35 à 0,15 %	1		

Essences de référence

Pour pouvoir établir les relations existant entre les caractéristiques physiques d'un bois et son programme type de séchage, nous disposons d'un certain nombre d'essences ivoiriennes pour lesquelles le séchage a été étudié de façon approfondie (KOLLMANN, 1970). Ce sont ces essences qui serviront de référence à notre étude (voir nomenclature en annexe 5).

En tenant compte du système de classement défini ci-dessus, on a établi un tableau de données correspondant à 25 essences de référence à 6 variables : D, B, V, T/R, T et G (tabl. 4).

REMARQUE : Lorsque la valeur d'une variable chevauche deux classes, on convient de prendre la moyenne. Exemple, pour le FRAKÉ (*Terminalia superba*), le programme G est soit 4, soit 5 : on note $G = 4,5$.

— Régressions multiples.

Pour définir les relations entre les caractéristiques physiques d'un bois et les programmes T et G qui lui conviennent, nous avons étudié les régressions multiples entre les variables T et G, d'une part, et les 4 variables physiques D, B, V, T/R, d'autre part, sur les 25 essences de référence du tableau 4 (CAILLIEZ, 1978).

La relation entre T et les 4 caractéristiques physiques est donnée par la formule :

$$\hat{T} = 10,6598 - 1,13147D - 0,65203V - 0,06673B - 0,44246T/R.$$

TABLEAU 4

CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET PROGRAMMES TEMPÉRATURE ET GRADIENT DES 25 ESSENCES IVOIRIENNES DE RÉFÉRENCE

Noms ivoiriens	N°	Sigle	D	B	V	T/R	T	G
Bahia	1	BAH	2	3	2	2,2	8	3
Fraké	2	FRK	2	2	2	1,4	6,5	4,5
Doussié	3	DOU	3	1	1,5	1,4	6	4
Ako	4	AKO	1	2,5	1,5	1,7	8	2
Avodiré	5	AVO	2	2,5	1,5	1,8	6	3
Azobé	6	AZO	5	5	3	1,5	3	7
Movingui	7	MOV	3	2,5	2,5	1,6	5	5
Kondroti	8	KON	1	2	1,5	1,9	5	4
Fromager	09	FRO	1	2,5	1,5	2,2	9,5	1
Dabéma	10	DAB	3	3	2,5	2,4	4	5
Kotibé	10	KOT	3	3	2	1,5	4,5	5,5
Makoré	12	MAK	3	3	2	1,3	6	5
Tiama	13	TIA	2	3	2	1,7	4,5	5,5
Bossé	14	BOS	2	2,5	2	1,7	5	4
Framiré	15	FRM	1,5	1	2	1,5	7,5	3
Ilomba	16	IDO	1	3	2	1,9	7	3
Iroko	17	IRO	2,5	1,5	2	1,5	6	4
Tali	18	TAL	4	3	2	1,8	3	6,5
Samba	19	SAM	1	1,5	1,5	1,7	9,5	1,5
Kosipo	20	KOS	3	3	2	1,4	4,5	5,5
Badi	21	BAD	3	3	2,5	1,8	5	5
Sapelli	22	SAP	3	2,5	2	1,5	6	4,5
Sipo	23	SIP	2	2,5	2	1,5	6	4
Bi	24	BI	3	4	2,5	2,5	4	5
Dibétou	25	DIB	2	2	2	1,9	4,5	4

Coefficient de corrélation multiple = 0,76.
 Coefficient de variation résiduelle = 21,4 %.

C'est la variable D (densité qui joue le plus grand rôle dans l'estimation de \hat{T} , comme le montrent les valeurs du t de STUDENT des coefficients de régression partielle :

$$D = 2,796 ; V = - 0,563 ; T/R = - 0,465 ; \\ B = - 0,149.$$

La qualité de l'ajustement est donnée par le tableau des résidus qui figure en annexe 1.

On peut remarquer d'après ces résultats, que l'ajustement n'est pas toujours excellent, notamment pour les essences telles que Azobé (31,7 %), Bahia (26 %), Bossé (- 23,5 %), Dibétou (- 36 %), Tali (- 27,8 %) et Tiama (- 36,4 %). Des facteurs d'ordre anatomique ou chimique pourraient peut-être expliquer ces écarts importants.

Le programme gradient de séchage G est lié aux 4 caractéristiques physiques du bois par la formule de régression multiple suivante :

$$\hat{G} = 1,271 54 + 0,894 26 D + 0,818 7 V + \\ + 0,175 94 B - 0,737 26 T/R.$$

Coefficient de corrélation multiple = 0,88.
 Coefficient de variation résiduelle = 17,9 %.

Dans ce cas également, c'est la variable D (densité) qui est la plus importante, mais la nervosité du bois (V) et le rapport T/R jouent aussi un rôle non négligeable dans l'estimation de \hat{G} , comme le montrent les t de STUDENT des coefficients de régression partielle :

$$D = 3,631 ; V = 1,163 ; \\ T/R = - 1,273 ; B = 0,644.$$

La qualité de l'ajustement des valeurs estimées par rapport aux valeurs observées est caractérisée par les résidus de G figurant en annexe 1. Mis à part le Fromager (- 121,2 %), le Kondroti (41,4 %) et le Samba (- 60,3 %), l'ajustement est plutôt meilleur que celui relatif à la variable T.

Représentation graphique du problème

Afin d'obtenir une vue graphique des relations entre les programmes T et G et les variables physiques, nous avons effectué, en collaboration avec la Division de Biométrie du C.T.F.T. de Nogent-sur-Marne, une analyse canonique sur les 6 variables en présence. Il s'agit, en effet, de rechercher une représentation en plan des

25 essences de référence qui permette de rendre compte de façon précise des proximités des variables du premier type (caractéristiques physiques : D, B, V, T/R) relatives aux variables du deuxième type (programmes T et G) (CAILLIEZ, 1979).

Le principe de l'analyse canonique est rappelé en annexe 2. Après calcul, on obtient les couples canoniques du groupe 1 (relatif aux caractéristiques physiques) X_1 et X_2 ci-après :

$$X_1 = 0,620 3 (D - 2,36) + 0,188 (B - 2,58) + \\ + 0,730 2 (V - 1,98) - 1,093 (T/R - 1,732),$$

$$X_2 = 0,755 4 (D - 2,36) - 0,322 9 (B - 2,58) - \\ + 0,469 5 (V - 1,98) + 3,537 (T/R - 1,732).$$

Le tableau 5 des corrélations existant entre les variables caractéristiques des 25 essences de référence et les variables canoniques du groupe 1, permet d'interpréter X_1 et X_2 .

On remarque dans ce tableau 5, que X_1 est lié positivement à la densité D et la nervosité V mais dépend peu du retrait B et de la déformation T/R. X_2 , en revanche, est lié positivement à T/R et dépend peu de D, B et V.

Les valeurs X_1 et X_2 pour les 25 essences de référence sont données en annexe 3. La représentation graphique correspondante est effectuée à partir de ces coordonnées sur un plan d'axes X_1 X_2 orthonormés (fig. 3).

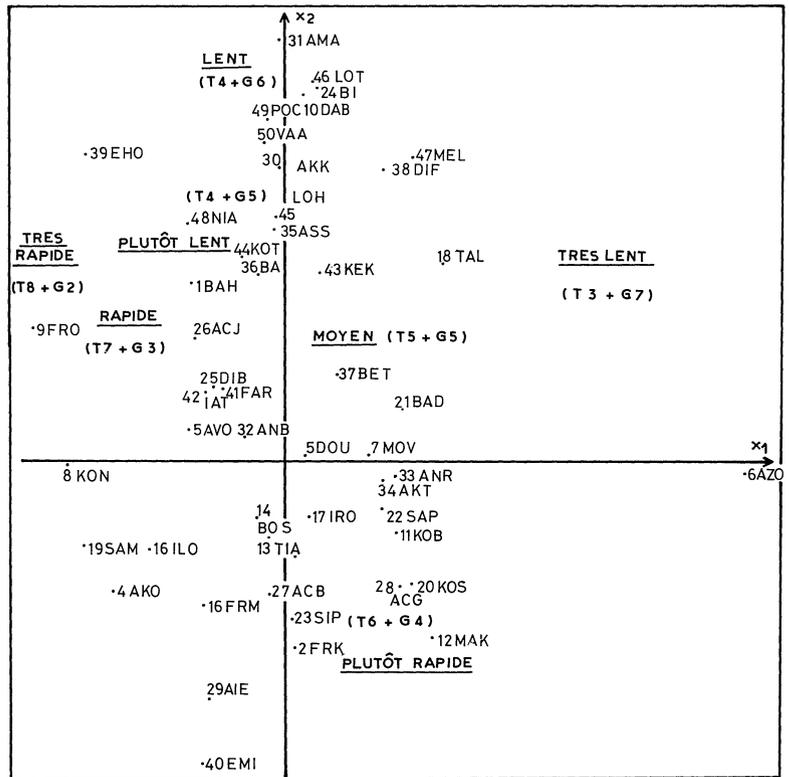


FIG. 3. — Représentation graphique en coordonnées canoniques du groupe 1 (Densité + Retrait + Nervosité + T/R) = (X_1 et X_2) de 50 espèces de Côte-d'Ivoire et de leur répartition en programmes (Température + Gradient de séchage).

TABLEAU 5

CORRÉLATIONS EXISTANT ENTRE LES VARIABLES CARACTÉRISTIQUES DES 25 ESSENCES DE RÉFÉRENCE ET LES VARIABLES CANONIQUES

	D	B	V	T/R	T	G
X ₁	0,948	0,583	0,755	- 0,380	- 0,708	0,872
X ₂	0,261	0,338	0,304	0,860	- 0,292	0,122

APPLICATION AUX ESSENCES DE CÔTE-D'IVOIRE

Etude des programmes théoriques de séchage de 25 essences de Côte-d'Ivoire

Il existe un certain nombre de bois ivoiriens pour lesquels on ne connaît pas de façon approfondie les programmes de séchage. D'autres essences au contraire traditionnellement utilisées sont bien connues du point de vue du séchage artificiel mais n'ont pas été retenues dans les essences de référence, en raison de l'insuffisance des données concernant leurs propriétés physiques (exemple : Koto : 2 essais ; Assamela : 2 essais). Enfin, certains bois tels que les Acajous et les Aniégrés n'ont pas été pris comme essences de référence et sont étudiés dans ce chapitre pour mettre en évidence les différences de programmes de séchage pouvant éventuellement exister en fonction des genres ou espèces botaniques : exemple : Acajou Bassam = *Khaya ivorensis*, Acajou Grandes Feuilles = *Khaya grandifoliola*, Acajou blanc = *Khaya anihoteca* ou encore Aniégré blanc = *Anigeria robusta* et Aniégré rouge = *Gambeya perpulchra*.

Ainsi 25 essences ivoiriennes supplémentaires sont examinées ici, pour lesquelles nous nous proposons de définir le programme théorique de séchage. Dans le tableau 6, sont consignées les caractéristiques physiques D, B, V, T/R définies selon le système de codification utilisé précédemment.

Programmes théoriques Température et Gradient

Pour définir pour chaque essence les programmes température et gradient, on reprend les formules de régressions multiples permettant d'estimer \hat{T} et \hat{G} en fonction des caractéristiques physiques des bois.

$$\begin{aligned}\hat{T} &= 10,659\ 8 - 1,131\ 47\ D - 0,652\ 03\ V - \\ &\quad - 0,066\ 73\ B - 0,442\ 46\ T/R, \\ \hat{G} &= 1,271\ 54 + 0,894\ 26\ D + 0,818\ 7\ V + \\ &\quad + 0,175\ 94\ B - 0,737\ 26\ T/R.\end{aligned}$$

Il en résulte pour chacune des 25 essences, une valeur estimée des programmes T et G qui figure dans le tableau 7.

Cette détermination des programmes de séchage à partir des seules équations de régression semble un peu brute, ne serait-ce qu'en raison de la qualité très moyenne de l'ajustement estimé des valeurs concernant certaines essences. Ces résultats peuvent être nuancés en portant sur le graphe des caractères canoniques X₁ et X₂ les essences ivoiriennes étudiées (numérotées de 26 à 50) (voir fig. 3).

Cette procédure permet de voir les proximités par rapport aux bois de référence portés sur ce même graphique. Les coordonnées canoniques de ces 25 nouveaux bois sont mentionnées en annexe 4.

Ecart entre les calculs de régression et la détermination graphique

Il convient de signaler quelques écarts observés entre la détermination par les formules de régression et par le graphique en coordonnées canoniques. Le tableau 8 suivant consigne ces écarts.

Les données que nous avons par ailleurs et les quelques résultats dont nous disposons permettent d'établir une correction de ces programmes comme il est indiqué dans la dernière colonne du tableau 8.

Groupement des essences en programmes type de séchage

Cette correction étant faite, il est possible d'effectuer, dans une première approche, un groupement des 50 essences ivoiriennes selon les 7 programmes types de séchage par thermohygrographie variable définis précédemment (tableau 3).

1 — PROGRAMME TRÈS LENT (T3 + G7)
Amazakoué, Azobé, Tali, Vaa

TABLEAU 6

CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES 25 ESSENCES IVOIRIENNES ÉTUDIÉES SUR LE PLAN DU SÉCHAGE

Essences	N°	Sigle	D	B	V	T/R
Acajou Bassam	26	ACJ	2	2	2	2
Acajou blanc	27	ACB	2	2	2	1,5
Acajou G.F.	28	ACG	3	4	2	1,3
Aiélé	29	AIE	1	4	2	1,7
Akossika	30	AKK	3	3	2	2,2
Amazakoué	31	AMA	4	3	1	2,1
Aniégré blanc	32	ANB	2	3	2	1,9
Aniégré rouge	33	ANR	3	4	2	1,7
Akatio	34	AKT	3	3	2	1,6
Assaméla	35	ASS	3	1	2	1,9
Ba	36	BA	3	3	2	2
Bété	37	BET	3	2	2	1,7
Difou	38	DIF	1	1	3	2,6
Eho	39	EHO	1	1	3	2,6
Emien	40	EMI	1	2	2	1,4
Faro	41	FAR	2	3	2	2
Iatandza	42	IAT	2	1	2	1,8
Kékélé	43	KEK	3	3	2	2
Koto	44	KOT	2	4	2,5	2,4
Lohonfé	45	LOH	3	3	2	2,1
Lotopa	46	LOT	4	4	1	2,1
Melegba	47	MEL	4	3	2	2,0
Niangon	48	NIA	2	4	2	2,4
Pocouli	49	POC	3	3	1	2,6
Vaa	50	VAA	3,5	4	1	2,1

TABLEAU 7

PROGRAMMES THÉORIQUES TEMPÉRATURE T ET GRADIENT DE SÉCHAGE G
CALCULÉS D'APRÈS LES RÉGRESSIONS MULTIPLES DÉFINIES À PARTIR DES 25 ESSENCES DE RÉFÉRENCE

Essences	N°	Sigle	Programme T théorique	Programme G théorique
Acajou Bassam	26	ACJ	6	3,5
Acajou blanc	27	ACB	6	3,5
Acajou G.F.	28	ACG	5	4
Aiélé	29	ATE	6	4
Akossika	30	AKK	4,5	5
Amazakoué	31	AMA	3	7
Aniégré blanc	32	ANB	5,5	4,5
Aniégré rouge	33	ANR	4	6
Akatio	34	AKT	4	5
Assaméla	35	ASS	5,5	3,5
Ba	36	BA	4,5	6
Bété	37	BET	5	4,5
Difou	38	DIF	4,5	4,5
Eho	39	EHO	7,5	2
Emien	40	EMI	7	3
Faro	41	FAR	5,5	4,5
Iatandza	42	IAT	6,5	3
Kékélé	43	KEK	4,5	5,5
Koto	44	KOT	4,5	5
Lohonfé	45	LOH	4	6
Lotofa	46	LOT	3	7
Melegba	47	MEL	4	6
Niangon	48	NIA	4,5	5
Pocouli	49	POC	4,5	5,5
Vaa	50	VAA	3,5	7

2 — PROGRAMME LENT (T4 + G6)

Bi, Dabéma, Difou, Lotofa, Melegba, Pocouli

3 — PROGRAMME PLUTÔT LENT (T4 + G5)

Akatio, Akossika, Aniégré rouge, Ba, Kekele, Koto, Lohonfé, Niangon

4 — PROGRAMME MOYEN (T5 + G5)

Acajou Bassam, Aniégré blanc, Assaméla, Avodiré, Badi, Bété, Bossé, Dibétou, Doussié, Iatandza, Iroko, Kotibé, Movingui, Sapelli, Tiama

TABLEAU 8

ÉCARTS OBSERVÉS ENTRE LES PROGRAMMES DE SÉCHAGE (T + G) DÉTERMINÉS PAR LES FORMULES DE RÉGRESSION MULTIPLE ET LE GRAPHIQUE EN COORDONNÉES CANONIQUES

Essences	Sigle	N°	Programme calculé	Programme déterminé par graphique	Programme corrigé
Acajou Bassam	ACJ	26	$T_6 + G_{3/4}$	$T_5 + G_5$	$T_5 + G_5$
Aniégré blanc	ANB	32	$T_{5/6} + G_{4/5}$	$T_5 + G_5$	$T_5 + G_5$
Aniégré rouge	ANR	33	$T_4 + G_6$	$T_5 + G_5$	$T_4 + G_5$
Akatio	AKT	34	$T_4 + G_5$	$T_5 + G_5$	$T_4 + G_5$
Assamela	ASS	35	$T_{5/6} + G_{3/4}$	$T_4 + G_5$	$T_5 + G_5$
Difou	DIF	38	$T_{4/5} + G_{4/5}$	$T_4 + G_6$	$T_4 + G_6$
Vaa	VAA	50	$T_{3/6} + G_7$	$T_4 + G_6$	$T_3 + G_7$

- 5 — PROGRAMME PLUTÔT RAPIDE (T6 + G4)
Acajou blanc, Acajou GF, Faro, Fraké, Framiré, Kosipo, Makoré, Sipo.
- 6 — PROGRAMME RAPIDE (T7 + G3)
Aielé, Bahia, Emien, Ilomba, Kondroti
- 7 — PROGRAMME TRÈS RAPIDE (T8 + G2)
Ako, Eho, Fromager, Samba

Discussion

Ce groupement étant établi, on peut avancer quelques critiques : la première, la plus importante, est que les programmes calculés sont d'ordre théorique et de ce fait nécessiteraient une vérification par des essais de séchage sur toutes les essences, autres que celles de référence. C'est bien entendu le programme d'expérimentation qui est prévu par le laboratoire de technologie du C.T.F.T. de Côte-d'Ivoire. Mais, il est intéressant de signaler que, pour certaines essences, les programmes calculés ou déterminés graphiquement coïncident parfaitement avec ceux déterminés par KOLLMANN (1970). C'est le cas, notamment pour les espèces suivantes : Assaméla, Acajou Bassam, Aniégéré blanc, Bété, Niangon.

La deuxième critique est que le groupement d'essences proposé ici par la méthode d'investigation exposée ci-dessus ne coïncide pas avec celui que l'on peut effectuer à partir des résultats obtenus par les tables de séchage traditionnelles (STEVENS and PRATT, 1961) mises au point par le Forest Products Laboratory de Princes Risborough, reprises et adaptées par le Laboratoire de physique du Centre Technique du Bois pour le séchage de 28 essences de Côte-d'Ivoire (cahier CTB n° 56-1977).

La raison de cette différence réside dans le fait que ces tables de séchage de STEVENS et PRATT n'ont pas un gradient de séchage constant à partir de 28 %. L'analyse des températures sèches et des différences thermohygro-métriques en fonction de l'humidité moyenne du bois à sécher montre que, d'une manière générale, les températures préconisées pour des taux

d'humidité au-dessous de 30 % sont moins élevées que celles prévues dans les programmes T de KOLLMANN (1970), mais qu'en revanche, les gradients de séchage sont souvent plus forts, l'étendue de ces gradients allant de 2,3 à 5,8 suivant les tables de séchage, au lieu de 1,5 à 5,2 pour le système élaboré par KEYLWERTH (1951) et KOLLMANN (1970).

Il serait intéressant d'effectuer une étude comparative de ces deux principes sur les essences où les écarts sont importants. Le tableau 9 énumère les principales essences ivoiriennes pour lesquelles cet écart est sensible, en indiquant les programmes T + G établis d'après le système mis au point par KOLLMANN (utilisés sur la plupart des séchoirs à régulation automatique en Allemagne et aux Etats-Unis) et les programmes classiques transposés en programmes température et gradient, préconisés en Grande-Bretagne et en France.

TABLEAU 9

COMPARAISON DES PROGRAMMES DE SÉCHAGE UTILISÉS PAR KOLLMANN ET PAR LE F.P.L. DE PRINCES-RISBOROUGH CONCERNANT 19 ESSENCES IVOIRIENNES

Essences	Programme T + G (KOLLMANN)	Programme T + G (Princes Risborough)
Acajou Bassam	$T_6 + G_4$	$T_5 + G_2$
Aniégré blanc	$T_5 + G_5$	$T_{3/4} + G_{3/4}$
Assaméla	$T_5 + G_5$	$T_{5/6} + G_1$
Badi	$T_5 + G_5$	$T_5 + G_{2/3}$
Dabéma	$T_4 + G_6$	$T_{3/4} + G_{3/4}$
Dibétou	$T_5 + G_5$	$T_5 + G_{2/3}$
Doussié	$T_5 + G_5$	$T_5 + G_{2/3}$
Framiré	$T_6 + G_4$	$T_5 + G_{2/3}$
Fromager	$T_8 + G_2$	$T_{5/6} + G_1$
Ilomba	$T_7 + G_3$	$T_{3/4} + G_{3/4}$
Kosipo	$T_6 + G_4$	$T_3 + G_2$
Fraké	$T_6 + G_4$	$T_{5/6} + G_1$
Makoré	$T_6 + G_4$	$T_{5/6} + G_{1/2}$
Movingui	$T_5 + G_5$	$T_5 + G_2$
Niangon	$T_4 + G_5$	$T_5 + G_{2/3}$
Sapelli	$T_5 + G_5$	$T_{3/4} + G_{3/4}$
Sipo	$T_6 + G_4$	$T_5 + G_{2/3}$
Tali	$T_3 + G_7$	$T_{3/4} + G_{1/2}$
Tiama	$T_5 + G_5$	$T_3 + G_{4/5}$

CONCLUSION

L'objet principal de cette étude était triple :

1) Essayer de mettre en évidence les relations pouvant exister entre les diverses propriétés physiques d'un bois caractérisant à divers degrés le comportement au séchage, et les deux facteurs composants des programmes de séchage : la température sèche et le gradient de séchage.

2) Exposer, à partir de ces relations, une méthodologie d'investigation permettant d'orienter les recherches en matière de séchage artificiel par thermohygrométrie variable en évitant le plus possible les tâtonnements expérimentaux et les erreurs pouvant occasionner des

coûts de fonctionnement trop importants (temps chercheurs, énergie, approvisionnement en bois, etc...

3) Enfin, après avoir laissé entrevoir la possibilité de grouper les essences par programmes de séchage, mettre en évidence les divergences plus ou moins importantes qui existent à l'heure actuelle entre les diverses tables de séchage préconisées pour un même type de séchoir.

En définitive, l'optique dans laquelle cette analyse a été entreprise était d'apporter des éléments techniques permettant d'aboutir à des programmes types optimaux, définis dans le sens des économies d'énergie et de la qualité même du séchage du bois.

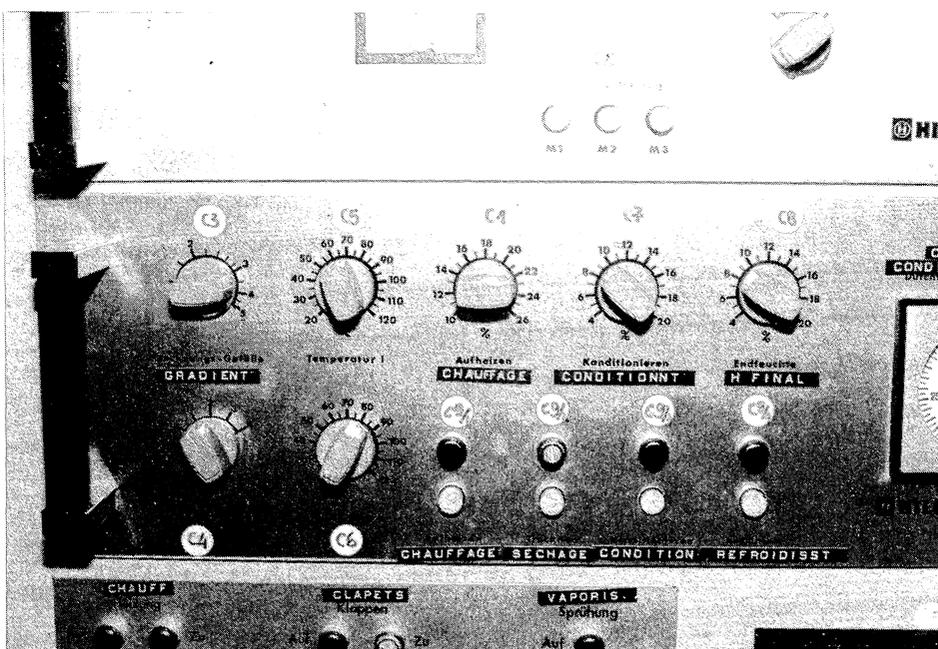
ABIDJAN, 1983.

REFERENCES

- CAILLIEZ (F.), 1978. — Programmes de séchage artificiel. Régressions multiples. (Communication personnelle 6653/BIOM C.G.). C.T.F.T., Nogent-sur-Marne.
CTB, 1977. — Conseils pratiques pour le séchage des bois. Cahier du Centre Technique du Bois n° 56.
KEYLWERTH (R.), 1950. — Drying gradients and the Control of Timber kilns. Holz-Zentralblatt, n° 76.

- KOLLMANN (F.), COTE (W. A.), 1978. — Principles of wood Science and Technology. Springer verlag (NY).
KOLLMANN (F.), 1970. — Kiln Drying of Sawn Timber. R. Hildebrand.
STEVENS (W. C.), PRATT (G. H.), 1961. — A Guide to the kiln Drying of Timber. HMSO (London).

Armoire de régulation. A gauche, le bouton C 3 affiche la valeur du gradient de séchage et permet d'ajuster automatiquement les conditions thermohygrométriques de l'air du séchoir au taux d'humidité d'équilibre du bois. Les boutons C 5 et C 6 permettent d'afficher le programme de température.



Annexe 1

TABLEAU DES RÉSIDUS CONCERNANT LES VARIABLES T ET G

Essences	N°	Résidus de T	%	Résidus de G	%
Bahia	1	2,081	26,0	- 0,603	- 20,1
Fraké	2	0,160	2,5	0,483	10,7
Doussié	3	0,399	6,6	- 0,226	- 8,1
Ako	4	0,369	4,6	- 6,580	- 29,0
Avodiré	5	- 0,456	- 7,6	- 0,401	- 13,4
Azobé	6	0,951	31,7	- 0,973	- 13,9
Movingui	7	0,080	- 1,7	0,148	2,9
Kondroti	8	- 2,576	- 51,5	1,655	41,4
Fromager	9	2,090	22,0	- 1,212	- 121,2
Débéma	10	- 0,373	- 9,9	0,240	4,8
Kotibé	11	- 6,597	- 13,3	0,486	8,8
Makoré	12	0,814	13,6	- 0,161	- 3,2
Tiama	13	1,640	- 36,4	1,528	27,8
Bossé	14	1,174	- 23,5	0,116	2,9
Framiré	15	0,572	7,6	- 0,320	- 10,7
Ilomba	16	- 0,183	- 2,6	0,069	2,3
Iroko	17	0,236	3,9	- 0,303	- 7,6
Tali	18	- 0,833	- 27,8	0,813	12,5
Samba	19	1,80	18,9	- 0,904	- 60,3
Kosipo	20	- 0,642	- 14,3	0,412	7,5
Badi	21	0,361	7,2	- 0,202	- 4,0
Sapelli	22	0,869	14,5	- 0,426	- 9,4
Sipo	23	- 0,262	- 4,4	- 0,031	- 0,8
Bi	24	- 0,262	- 6,5	0,138	2,8
Dibétou	25	- 1,619	- 36,0	0,351	8,8

Annexe 2

PRINCIPES DE L'ANALYSE CANONIQUE

L'analyse canonique est bien adaptée au problème posé ici : elle consiste à rechercher une représentation graphique des bois de référence, basée sur les variables D, B, V et T/R, qui rende compte le mieux possible des proximités des bois relativement à leur programme de séchage (T et G).

On rappelle ici la procédure de calcul (CAILLIEZ, 1979).

On cherche deux variables de la forme :

$$X = a_1 D + a_2 B + a_3 V + a_4 T/R$$

$$Y = b_1 T + b_2 G,$$

de variance 1 (normées) et le plus corrélées possible. D, B, V, T/R, T et G sont ici centrées ; les variables X et Y le seront également.

On démontre que le vecteur $a = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ est le vecteur propre de la matrice $V_{11} \ V_{12} \ V_{22} \ V_{21}$ où la matrice des variances-covariances des variables est partitionnée de la façon suivante :

	D	B	V	T/R	T	G
D B V T/R	V_{11}				V_{12}	
T G	V_{21} (transposée de V_{12})				V_{22}	

On démontre d'autre part que le vecteur $b = (b_1, b_2)$ associé est égal à $V_{22}^{-1} V_{21} a$, la valeur propre étant égale au carré du coefficient de corrélation entre les variables canoniques X et Y.

Ayant obtenu le couple (X, Y) correspondant à la plus grande valeur propre, on cherche celui qui est associé à la 2^e valeur propre, et ainsi de suite.

On trouve les résultats suivants : (calculs effectués par la Division de Biométrie du C.T.F.T./NOGENT).

Matrice des corrélations du groupe 1 (D, B, V, T/R).

	D	B	V	T/R
D	1,00			
B	0,55	1,00		
V	0,70	0,70	1,00	
T/R	- 0,19	0,29	0,13	1,00

Matrice des corrélations du groupe 2 (T, G).

	T	G
T	1,00	
G	- 0,92	1,00

Matrice de corrélation du groupe 1 avec le groupe 2.

	D	B	V	T/R
T	- 0,75	- 0,51	- 0,62	0,02
G	0,86	0,55	0,69	- 0,23

Trace de la matrice = 1,035 9.

Facteurs	Valeur propre	Corrélation canonique	Inertie (%)	Cumul
1	0,814	0,902	78,6	78,6
2	0,222	0,471	21,4	100

Facteurs canoniques

* Groupe 1 (D, B, V, T/R)

D	- 0,620 3	0,755 4
B	+ 0,188	- 0,322 9
V	+ 0,730 2	- 0,469 5
T/R	- 1,093	+ 3,537

* Groupe 2 (T, G)

	Y ₁	Y ₂
T	0,382 0	1,109
G	- 1,424	- 1,404

Annexe 3

COORDONNÉES DES POINTS —
« ESSENCES DE RÉFÉRENCE »
EN REPRÉSENTATION CANONIQUE (X₁ ET X₂)

Essence N°	Sigle	X ₁	X ₂
1	BAH	- 0,641	1,239
2	FRK	0,045	- 1,268
3	DOU	0,112	0,045
4	AKO	- 1,174	- 0,889
5	AVO	- 0,663	0,270
6	AZO	3,091	- 0,087
7	MOV	0,541	0,033
8	KON	1,487	- 0,020
9	FRO	- 1,721	0,879
10	DAB	0,125	2,467
11	KOB	0,744	- 0,482
12	MAK	0,963	- 1,190
13	TIA	- 0,095	- 0,530
14	BOS	- 0,189	- 0,369
15	FRM	- 0,562	- 0,969
16	ILO	- 0,934	- 0,578
17	IRO	- 0,152	- 0,376
18	TAL	1,037	1,334
19	SAM	- 1,362	- 0,566
20	KOS	0,853	- 0,836
21	BAD	0,781	0,344
22	SAP	0,650	- 0,321
23	SIP	0,030	- 1,076
24	BI	0,204	2,498
25	DIB	- 0,501	0,500

Annexe 4

COORDONNÉES DES 25 POINTS-ESSENCES IVOIRIENNES
EN REPRÉSENTATION CANONIQUE
SUR LES AXES X₁ ET X₂

Essence	N°	Sigle	X ₁	X ₂
Acajou Bassam	26	ACJ	- 0,611	0,854
Acajou blanc	27	ACB	- 0,064	- 0,915
Acajou GF	28	ACG	0,775	- 0,867
Aiélé	29	AIE	- 0,527	- 1,608
Akossika	30	AKK	- 0,021	1,994
Amazakoué	31	AMA	- 0,021	2,865
Aniégré blanc	32	ANB	- 0,313	0,177
Aniégré rouge	33	ANR	0,713	- 0,098
Akatio	34	AKT	0,635	- 0,128
Assaméla	35	ASS	- 0,069	1,578
Ba	36	BA	- 0,128	1,286
Bété	37	BET	0,337	0,548
Difou	38	DIF	0,660	1,980
Eho	39	EHO	- 1,345	2,074
Emien	40	EMI	- 0,575	- 2,024
Faro	41	FAR	- 0,423	0,531
Iatandza	42	IAT	- 0,580	0,469
Kékélé	43	KEK	0,198	1,286
Koto	44	KOT	- 0,307	1,388
Lohonfé	45	LOH	0,088	1,640
Lotofa	46	LOT	0,166	2,542
Mélégba	47	MEL	0,818	2,042
Niangon	48	NIA	- 0,672	1,623
Pocouli	49	POC	- 0,130	2,347
Vaa	50	VAA	- 0,144	2,164

Annexe 5

NOMENCLATURE DES ESSENCES IVOIRIENNES ÉTUDIÉES

Nom usuel	N°		F a m i l l e
Acajou Bassam	26	<i>Khaya ivorensis</i>	Méliacée
Acajou blanc	27	<i>K. anthotheca</i>	Méliacée
Acajou Grande F.	28	<i>K. grandifoliola</i>	Méliacée
Aiélé	29	<i>Canarium schweinfurthii</i>	Burseracée
Akatio	34	<i>Gambeya africana</i>	Sapotacée
Ako	4	<i>Antiaris africana</i>	Moracée
Akossika	30	<i>Scottellia chevalieri + coriacea</i>	Flacourtiacée
Amazakoué	31	<i>Guibourtia ehie</i>	Césalpiniée
Aniégré blanc	32	<i>Aningeria robusta</i>	Sapotacée
Aniégré rouge	33	<i>Gambeya perpulchra</i>	Sapotacée
Assaméla	35	<i>Pericopsis elata</i>	Papilionnée
Avodiré	5	<i>Turraeanthus africana</i>	Méliacée
Azobé	6	<i>Lophira alata</i>	Ochnacée
Ba	36	<i>Celtis mildbraedii</i>	Ulmacée
Badi	21	<i>Nauclea diderichii</i>	Rubiacée
Bahia	1	<i>Hallea ciliata</i>	Rubiacée
Bété	37	<i>Mansonia altissima</i>	Sterculiacée
Bi	24	<i>Eribroma oblonga</i>	Sterculiacée
Bossé	14	<i>Guarea cedrata</i>	Méliacée
Dabéma	10	<i>Piptadeniastrum africanum</i>	Mimosée
Dibétou	25	<i>Lovoa trichilioïdes</i>	Méliacée
Difou	38	<i>Morus mesozygia</i>	Moracée
Doussié	3	<i>Afzelia bella + africana</i>	Césalpiniée
Eho	39	<i>Ricinodendron africanum</i>	Euphorbiacée
Emien	40	<i>Alstonia boonei</i>	Apocynacée
Faro	41	<i>Daniellia sp.</i>	Césalpiniée
Fraké	2	<i>Terminalia superba</i>	Combrétacée
Framiré	15	<i>T. ivorensis</i>	Combrétacée
Fromager	9	<i>Ceiba pentandra</i>	Bombacacée
Iatandza	42	<i>Albizia ferruginea</i>	Mimosée
Ilomba	16	<i>Pycnanthus angolensis</i>	Myristicacée
Iroko	17	<i>Chlorophora excelsa</i>	Moracée
Kékélé	43	<i>Holoptelea grandis</i>	Ulmacée
Kondroti	8	<i>Rodognaphalon brevicuspe</i>	Bombacacée
Kosipo	20	<i>Entandrophragma candollei</i>	Méliacée
Kotibé	11	<i>Nesogordonia papaverifera</i>	Sterculiacée
Koto	44	<i>Pterygota macrocarpa</i>	Sterculiacée
Lohonfe	45	<i>Celtis adolphi-friderici</i>	Ulmacée
Lotofa	46	<i>Sterculia rhinopetala</i>	Sterculiacée
Makoré	12	<i>Thieghemella heckelii</i>	Sapotacée
Mélégba	47	<i>Berlinia confusa</i>	Cesalpiniée
Movingui	7	<i>Disthemonanthus benthamianus</i>	Cesalpiniée
Niangon	48	<i>Tarrietia utilis</i>	Sterculiacée
Pocouli	49	<i>Berlinia occidentalis</i>	Cesalpiniée
Samba	19	<i>Triplochiton scleroxylon</i>	Sterculiacée
Sapelli	22	<i>Entandrophragma cylindricum</i>	Méliacée
Sipo	23	<i>Entandrophragma utile</i>	Méliacée
Tali	18	<i>Erythrophleum ivorense</i>	Cesalpiniée
Tiama	13	<i>Entandrophragma angolense</i>	Méliacée
Vaa	50	<i>Gilbertiodendron taiense</i>	Cesalpiniée

