JOHN N. FONWEBAN
Université de Dschang

FRANÇOIS HOULLIER
ENGREF/Nancy

EUCALYPTUS SALIGNA AU CAMEROUN

Tarif de peuplement et modèle de production



Les grosses tiges d'eucalyptus sont sciées pour faire des lattes, des chevrons et des planches (à g. de la photo) ; les perches (à dr.) sont utilisées pour la confection de cases et clôtures, ainsi que comme chevrons sur la toiture des maisons.
Sawn timber (planks) from large eucalyptus (on the left) and poles (on the right). The sawn timber can be used for roofing or for fencing.

Les plantations d'*Eucalyptus saligna* jouent un rôle croissant au Cameroun. Dans le cadre d'une thèse en alternance, au Cameroun et en France, un modèle de production incluant des tarifs de cubage à découpes variables a été élaboré.

Les premières introductions d'eucalyptus *(Eucalyptus robusta)* au Cameroun datent de 1920. Leur but était d'assainir les terrains marécageux dans la région littorale. Vers 1940, *Eucalyptus saligna* et d'autres espèces ont été introduites sur les hauts plateaux de l'Ouest avec, comme vocation, la production de bois de feu et de bois rond pour la charpente (TCHANOU, 1975). Après quelques essais, les autres espèces ont été abandonnées au profit d'*E. saligna*. En effet, cette espèce s'est avérée bien adaptée aux conditions pédoclimatiques variées (FAURE, 1987), plus productive que les essences locales de savane et capable de satisfaire les besoins en bois de feu, bois de service et bois d'œuvre, produits que les formations naturelles dégradées ne sont plus capables de fournir. Elle a ainsi rapidement attiré l'attention des Services forestiers et des populations locales.

Au plan socio-économique, les Eucalyptus tiennent donc une place importante dans cette région ainsi que dans l'ensemble du pays (GAUTIER, 1994a, 1994b). De plus, les reboisements constituent un moyen d'alléger la pression sur les formations naturelles et, donc, de préserver la diversité de la flore et de la faune qui est fortement menacée : ils servent ainsi de complément aux formations naturelles (DUPUY, MILLE, 1991 ; EVANS, 1992).

L'extension de ces plantations et la diversité de leurs usages et fonctions nécessitent qu'elles soient aménagées. Au Cameroun, l'élaboration de plans d'aménagement pour les réserves forestières est ainsi l'une des activités prioritaires de l'Etat (ONADEF, 1991). L'aménagement nécessite, entre autres, de disposer d'informations fiables sur la production ligneuse (ALDER, 1980 ; VANNIÈRE, 1984). Qu'il s'agisse d'estimer la production d'une parcelle donnée ou de prédire l'évolution des ressources forestières, il est donc important de disposer de modèles de croissance (TOTH, TURREL, 1983 ; RONDEUX *et al.*, 1985, 1991 ; PARDÉ, BOUCHON, 1988).

Alors que les modèles de croissance et de production sont largement répandus dans la plupart des pays tempérés – où ils sont utilisés pour élaborer des normes de sylviculture, analyser les liaisons station-production, simuler l'évolution des ressources régionales et prédire la croissance dans le cadre des plans d'aménagement (HOULLIER *et al.*, 1991) – ils restent rares dans beaucoup de pays tropicaux, tout particulièrement en Afrique intertropicale (DUPUY, MILLE, 1991). Le manque ou l'insuffisance d'informations sur la croissance des espèces constitue ainsi l'un des obstacles à l'aménagement des forêts tropicales (PHILIP, 1987 ; ADLARD, 1990 ; VANCLAY, 1991, 1995). Bien qu'un modèle de production ait été récemment développé pour *E. saligna* au Kenya (SHIVER, BRISTER, 1990), cette espèce, qui est la deuxième espèce de reboisement en zone tropicale après *Tectona grandis* (PANDEY, 1983), figure encore

parmi celles pour lesquelles on manque de données sur la croissance et la production (PANDEY, 1983).

L'objectif de cet article est de présenter un modèle de production pour les peuplements d'*E. saligna* situés sur les hauts plateaux de l'ouest du Cameroun. Ce modèle a été construit à partir de placettes temporaires selon la méthode proposée par DÉCOURT (1972). Certains résultats ayant déjà fait l'objet de publications (FONWEBAN, HOULLIER, 1995) et étant inclus dans la thèse de FONWEBAN (1995), nous nous attacherons ici à :

- présenter un aspect original, à savoir la construction de tarifs de peuplement jusqu'à une découpe quelconque ;
- souligner l'intérêt de disposer de modèles locaux adaptés aux conditions écologiques de chaque site ;
- et montrer comment le modèle de production articule différents sous-modèles et peut être utilisé pour générer des tables de production.

PRÉSENTATION D'*EUCALYPTUS SALIGNA*

Dans son aire naturelle (sud du Queensland), qui s'étend entre 28° et 38° de latitude sud et entre 142° et 154° de longitude est, cette espèce peut atteindre 35 à 55 m de hauteur et 120 à 150 cm de diamètre (C.T.F.T., 1959). Comme espèce exotique, *E. saligna* a enregistré des résultats spectaculaires en plantation. A Hawaii, par exemple, elle peut atteindre une hauteur de 71 m avec une productivité qui varie entre 42 et 50 $m^3.ha^{-1}.an^{-1}$ sans apport d'engrais (F.A.O., 1982). Elle est plantée à grande échelle en Angola, en Afrique du Sud, à Hawaii et au Brésil. Toutefois la superficie plantée est difficile à estimer car cette espèce est souvent confondue avec *Eucalyptus grandis*, espèce très voisine au plan morphologique, taxonomique et écologique (C.T.F.T., 1959 ; ROEDER, 1980 ; BURGESS, BELL, 1983 ; ELDRIDGE *et al.*, 1993 ; PANCEL, 1993).

Au Cameroun, la diversité des utilisations du bois d'eucalyptus (cf. photo, p. 21) justifie pleinement le développement de tarifs de cubage souples permettant d'estimer la quantité des divers types de produits. Dans l'ouest, le bois d'eucalyptus constitue le principal combustible pour la population locale et de nombreuses familles urbaines ; deux usines de fabrication de thé appartenant à la CAMEROON DEVELOPMENT CORPORATION ont abandonné l'utilisation du gazole au profit du bois d'eucalyptus pour le séchage du thé. Les perches et piquets d'eucalyptus sont exploités dès l'âge de quatre ou cinq ans et sont très recherchés pour la construction des cases et la confection des clôtures en milieu rural. Malgré son coefficient de rétractabilité très élevé qui entraîne des fentes de retrait et un gauchissement très important au séchage (NJOUKAM, 1989), les paysans débitent les grosses tiges pour faire des lattes, des chevrons et des planches pour la construction et l'ameublement. Le bois d'*E. saligna* se traite facilement par le procédé Bethell et supporte des charges convenables, mais présente souvent des fentes graves qui amenuisent son aptitude à être utilisé comme poteau (EL ABID, 1984) ; c'est actuellement la seule espèce qui fournisse des poteaux pour l'électrification rurale et urbaine sur l'ensemble du territoire camerounais.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

ZONE D'ÉTUDE

Les données utilisées proviennent d'un réseau de placettes temporaires installées pour la circonstance dans six réserves forestières situées sur les hauts plateaux à

TABLEAU I

CARACTÉRISTIQUES DES SITES ÉTUDIÉS

Réserve*	Surface (ha)	Altitude (m)	P (mm)	T (°C)	Roche-mère	Type de sol
Baleng (1)	304	1 500	1 821	20,2	Basalte	Ferr. volcanique
Baham (2)	100	1 500-1 889	1 575	–	Basalte	Ferr. rouge
Melap (3)	1 700	1 100-1 200	1 932	21,8	Gneiss/Basalte	Ferr. induré
Bana (4)	2 100	2 097	1 800	–	Granite/Basalte	Ferr. rouge
Bafut (6)	3 248	1 800-2 000	2 372	18,9	Basalte/Trachyte	Ferr. humifère
Bali (7)	1 147	1 400	2 372	18,9	Granite/Basalte	Ferr. humifère

* Les numéros entre parenthèses sont utilisés pour désigner chaque réserve (1 = Baleng, 2 = Baham, etc.).
Ferr. = sol ferrallitique, P = pluviosité annuelle, T = température moyenne annuelle.

l'ouest du Cameroun (tableau I). Cette région comprend les plateaux Bamiléké (1 200-1 900 m) et Bamoun (1 000-1 300 m), les hauts plateaux de Bamenda (2 500-3 000 m) et le massif des Bamboutos (1 900-2 700 m). Son climat est de type guinéen d'altitude, caractérisé par une pluviosité plus élevée (1 750 à 2 600 mm.an^{-1}) et une saison sèche plus courte qui dure de deux à trois mois (SIEFFERMANN, 1973). La température moyenne annuelle se situe autour de 21 °C mais diffère selon l'altitude. On note les plus fortes températures moyennes journalières, 28 °C, ainsi que les plus grands écarts journaliers, 15 °C, en janvier, février et mars.

LES SOLS

(cf. MARTIN, SEGALEN, 1966 ; VALLERIE, 1971)

Les sols des hauts plateaux de l'ouest du Cameroun appartiennent à trois grands types : les sols peu évolués, les sols hydromorphes et les sols ferrallitiques. C'est sur ce dernier type que se trouvent les peuplements d'eucalyptus. On distingue plusieurs sous-types dans cette catégorie :

□ **Les sols ferrallitiques rouges** sur basalte qui occupent la majeure partie du plateau Bamiléké et plusieurs secteurs du plateau Bamoun. Ils se sont développés sur les basaltes les plus anciens. Leur fertilité chimique dépend de l'épaisseur et de la richesse de l'horizon humifère. Leurs propriétés physiques et hydriques sont très favorables : grande épaisseur, porosité élevée assurant une bonne aération, friabilité et absence de cailloux, forte teneur en argile permettant une rétention d'eau correcte, perméabilité de surface réduisant l'érosion. Les réserves forestières de Baham (2) et de Bana (4) sont sur ce type de sol.

□ **Les sols indurés,** donnant par endroits de véritables cuirasses, se sont formés sur des roches diverses : basalte, gneiss ou granite. On les trouve notamment au nord du Cameroun occidental et entre Foumban et Koutaba. Leur intérêt agricole est médiocre lorsque l'horizon induré est très proche de la surface. La réserve de Melap (3) est sur ce type de sol.

□ **Les sols ferrallitiques humifères** sont issus des basaltes et des trachytes du plateau de Bamenda-Nkambé, sous une pluviosité plus élevée qu'au Cameroun oriental. Riches en matière organique, ils figurent parmi les plus fertiles de la région bien qu'ils manquent de bases et d'azote assimilables par les plantes. Leurs caractéristiques physiques et hydriques sont celles des sols ferrallitiques rouges. Les réserves de Bafut-Ngemba (6) et de Bali-Ngemba (7) se trouvent sur ce type de sol.

□ **Les sols jeunes dérivés de roches volcaniques** sont localisés autour des édifices volcaniques récents, d'une part dans la plaine bananière à l'ouest de Nyombé et, d'autre part, au nord-ouest de Foumbot où ils supportent de belles plantations de caféiers d'Arabie. Ces sols sont généralement brun foncé ; cependant, on les appelle sols noirs en raison de la couleur noire des lapillis. Ils possèdent une belle structure grenue à grumeleuse et une texture grossière permettant une bonne circulation de l'air et de l'eau. Leur porosité est très forte et leur capacité de rétention d'eau élevée. Leur pH varie entre 5,5 et 7,5 et la teneur en matière organique entre 2 et 14 %. La réserve de Baleng (1) est sur ce type de sol.

ÉCHANTILLONNAGE

329 placettes temporaires ont été installées dans les six réserves forestières étudiées. Dans chaque parcelle, qui correspond à une même année de plantation, des placettes ont été installées de façon à couvrir la diversité des conditions topographiques : sommet, haut, milieu et bas de pente. Le tableau II montre la répartition des placettes dans les différentes réserves et classes d'âge. La surface de ces placettes varie entre 100 m^2 (10 m × 10 m) et 400 m^2 (20 m × 20 m).

TABLEAU II

STRUCTURE DU PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE : NOMBRE DE PLACETTES PAR CLASSE D'ÂGE ET PAR RÉSERVE

Age (an)	Réserve forestière						Total
	1	2	3	4	6	7	
03	–	–	–	07	–	–	07
05	–	–	–	08	–	07	15
06	06	06	04	05	–	–	21
07	04	–	–	05	08	–	17
08	–	04	–	05	07	03	19
09	08	04	03	05	10	04	34
10	–	–	–	05	12	04	21
11	14	–	13	05	–	02	34
12	–	05	–	04	06	04	19
13	09	–	16	04	08	02	39
14	–	03	–	–	06	04	13
15	06	05	03	–	08	–	22
17	–	05	05	–	09	03	22
18	03	04	05	–	09	04	25
19	–	–	–	–	06	02	08
Total	**57**	**40**	**49**	**53**	**89**	**41**	**329**

Dans chaque placette, la hauteur (h) de quatre à six arbres dominants et codominants a été mesurée avec le dendromètre Blume-Leiss. Le diamètre à 1,30 m (d_{130}) de tous les arbres a été mesuré avec un ruban et l'âge de la placette (A) a été déterminé à partir des archives de plantation. A partir de ces mesures, nous avons estimé la hauteur dominante (H_0), le diamètre quadratique moyen (D_g), le nombre de tiges par hectare (N) et la surface terrière (G).

Le cubage des arbres a fait l'objet d'une étude indépendante. 641 arbres ont été cubés sur pied et ces données ont été utilisées pour construire un tarif de cubage individuel à deux entrées [$v = v(d_{130}, h)$], des équations de rapport de volume ainsi que des fonctions de défilement des tiges (FONWEBAN, HOULLIER, à paraître).

Une relation hauteur-diamètre [$h = h(d_{130})$] a été établie (Annexe A, p. 32) afin de convertir le tarif de cubage à deux entrées en un tarif à une entrée [$v = f(d_{130}, h(d_{130}))$]. Ce dernier a été utilisé pour estimer les volumes individuels des arbres dans chaque placette puis, par sommation des volumes individuels, le volume par hectare de chaque placette (V).

CONSTRUCTION D'UN TARIF DE PEUPLEMENT

Un tarif de cubage de peuplement donne, sous forme de tableau, de graphique ou de formule, une estimation du volume sur pied en fonction des grandeurs moyennes du peuplement : nombre de tiges, surface terrière, hauteur dominante et âge (PARDÉ, BOUCHON, 1988). Sous forme mathématique, c'est donc une relation du type :

$$V = V(A, G, H_0, N).$$

Pour construire un tel tarif, nous avons testé plusieurs équations en nous inspirant de la forme des modèles existant dans la littérature forestière (ex. AVERY, BURKHART, 1983 ; CLUTTER *et al.*, 1983). Nous avons ainsi étudié seize équations (FONWEBAN, 1995) dont les quatre meilleures sont considérées ici :

$$\ln V = \beta_1 + \beta_2.\ln(G.H_0) + \beta_3.G/A \quad [T1]$$

$$V = \beta_1 + \beta_2.G.H_0 \quad [T2]$$

$$V = \beta_1.G^{\beta_2}.H^{\beta_3} \quad [T3]$$

$$V = \beta_1.G^{\beta_2}.(H_0/N)^{\beta_3} \quad [T4]$$

L'ajustement de ces modèles a été réalisé par régression, linéaire ou non selon les cas, au moyen des procédures REG et NLIN de SAS (1988). L'étude de la qualité des modèles a été réalisée à partir du coefficient de détermination R^2 (ou pseudo-R^2 dans le cas des modèles non linéaires), de l'écart-type résiduel (ETR = $\sqrt{\text{CMR}}$), du biais moyen des prédictions et de l'examen graphique des résidus.

Pour une même équation, nous avons aussi distingué des modèles globaux, ajustés sur l'ensemble des données (toutes réserves confondues) et des modèles locaux, ajustés indépendamment pour chaque réserve. Afin de comparer les modèles globaux et locaux, et bien que les hypothèses statistiques nécessaires (normalité, indépendance et homoscédasticité des erreurs aléatoires) ne soient pas toujours strictement vérifiées et que ce test ne soit qu'asymptotique dans le cas des modèles non linéaires, nous avons réalisé un test F de Fisher (TOMASSONE *et al.*, 1983, p. 65 ; GALLANT, 1975). Soit SC (respectivement SC_i) la somme des carrés du modèle global (respectivement du modèle local pour la réserve i) et ddl (respectivement ddl_i) les degrés de libertés correspondants : sous l'hypothèse d'identité des modèles locaux avec le modèle global, la quantité

$$F = \left(\frac{SC - \Sigma_i SC_i}{ddl - \Sigma_i ddl_i}\right) \Big/ \left(\frac{\Sigma_i SC_i}{\Sigma_i ddl_i}\right)$$

suit une loi de Fisher à $ddl - \Sigma_i ddl_i$ et $\Sigma_i ddl_i$ degrés de liberté.

TARIFS DE PEUPLEMENT JUSQU'À UNE DÉCOUPE QUELCONQUE

Très souvent on a besoin d'estimer non seulement le volume total ou le volume bois fort (jusqu'au diamètre de 7 cm) d'un peuplement, mais aussi le volume jusqu'à une autre découpe en diamètre (ex. 12 cm pour les petits sciages ; cf. DELORD, 1984). ALDER (1980), RONDEUX *et al.* (1991) et PHILIP (1994) ont donc envisagé de construire des tarifs jusqu'à des découpes variées en combinant :

- des tarifs de cubage classiques (cf. ci-dessus)
- et des rapports de volume (r_d) obtenus en divisant le volume jusqu'à la découpe d (v_d) par le volume total de la tige (v) : $r_d = v_d/v$. Cette méthode, usuellement mise en œuvre pour les tarifs de cubage d'arbre (FONWEBAN, HOULLIER, à paraître) a été étendue ici au niveau du peuplement par sommation des volumes individuels. Nous avons donc défini le rapport R_d : $R_d = V_d/V$.

CONSTRUCTION D'UN MODÈLE DE PRODUCTION

Pour une essence donnée, les tables de production décrivent l'évolution moyenne probable de peuplements équiennes, classés par degré de fertilité des sols qui les portent (PARDÉ, BOUCHON, 1988). Ne disposant que de placettes temporaires, nous avons adopté la méthode

proposée par DÉCOURT (1972). Nous avons ainsi utilisé le système suivant de relations :

$H_0 = H(A, \varphi)$ [M1]

$N = N(H_0)$ ou $N = N(A)$ [M2]

$D_g = D(H_0, N)$ [M3]

$G = N.(\pi.D_g^2)/4$ [M4]

$V = V(A, G, H_0, N)$ [M5]

La relation **[M1]** représente la croissance en hauteur dominante en fonction de l'âge ; elle est indexée par la fertilité de la station (φ). La relation **[M2]** décrit la décroissance moyenne du nombre de tiges par hectare en fonction de la hauteur dominante ou de l'âge ; elle caractérise la sylviculture moyenne pratiquée ou peut servir de norme de sylviculture. La relation **[M5]** est un tarif de peuplement (cf. ci-dessus). La relation **[M4]** est la définition même de la surface terrière alors que les autres relations sont statistiques. Les relations **[M2]** à **[M5]** contiennent, explicitement ou non, la hauteur dominante : ce modèle rend donc compte des effets conjoints de l'âge et de la fertilité de la station.

Nous avons ajusté un tel système d'équations, complété par une équation de rapport de volumes, et l'avons ensuite utilisé pour réaliser des prédictions. Nous avons négligé les éclaircies, absentes, et la mortalité, relativement faible, et avons assimilé le volume sur pied à la production en volume.

RÉSULTATS

TARIF DE PEUPLEMENT

Parmi les quatre équations envisagées, c'est l'équation **[T4]** qui a finalement été retenue car elle fournissait le meilleur ajustement en termes de biais et d'écart-type résiduel : $V = \beta_1.G_2^{\beta}.(H_0/N)_3^{\beta}$. Selon les réserves, le biais moyen varie entre – 0,1 $m^3.ha^{-1}$ et – 2,2 $m^3.ha^{-1}$ et l'écart-type résiduel entre 6,6 $m^3.ha^{-1}$ et 15,7 $m^3.ha^{-1}$.

Afin de vérifier que le modèle global (toutes réserves confondues) était satisfaisant et qu'il pouvait être utilisé dans l'ensemble des six réserves forestières, et bien que l'hypothèse d'homoscédasticité ne soit pas strictement vérifiée, ce modèle a été comparé aux modèles locaux (par réserve) au moyen d'un test F qui a permis de déceler des différences fortes et significatives entre les réserves : $F_{obs} = 313,79 > F_{0,05(15,272)} = 1,71$. Nous avons donc conclu que le modèle global n'était pas approprié et qu'il était préférable d'utiliser des modèles locaux adaptés à chaque réserve (tableau III).

A partir du tarif de peuplement local ainsi obtenu, nous avons ajusté un tarif jusqu'à une découpe quelconque en ajustant le modèle :
$V_d = \beta_1.G^{\beta_2}.(H_0/N)^{\beta_3}.(1 - \beta_4.(d/D_g)^{\beta_5})$,
où $R_d = (1 - \beta_4.(d/D_g)^{\beta_5})$ est le rapport de volume ($0 \leq R_d \leq 1$) et d le diamètre supérieur limite (diamètre à la découpe). Afin d'assurer la cohérence des résultats, cet ajustement a été effectué en conservant les valeurs de β_1, β_2 et β_3 : seuls β_4 et β_5 ont donc été estimés dans cette deuxième phase. Les résultats finaux confirment que le modèle local est meilleur que le modèle global (Tableau III).

MODÈLE DE PRODUCTION

Nous avons ajusté les relations **[M1]**, **[M2]** et **[M3]**. Pour la relation **[M1]**, nous avons retenu l'équation $H_0 = \theta_1.\exp(-\theta_2/A)$ qui a été ajustée séparément pour chacune des six réserves considérées (Annexe B.1, p. 32 ; FONWEBAN, HOULLIER, 1995). Là aussi, nous

TABLEAU III

TARIFS DE PEUPLEMENT JUSQU'À UNE DÉCOUPE VARIABLE (DIAMÈTRE *d*)

Equation : $V(d) = \beta_1 . G^{\beta_2} . (H_0/N)^{\beta_3} . (1 + \beta_4 . (d/D_g)^{\beta_5})$

Réserve	R^2 *	ETR ($m^3 . ha^{-1}$)	$\beta_1 \pm \sigma_{\beta_1}$	$\beta_2 \pm \sigma_{\beta_2}$	$\beta_3 \pm \sigma_{\beta_3}$	$\beta_4 \pm \sigma_{\beta_4}$	$\beta_5 \pm \sigma_{\beta_5}$
Baleng (1)	0,996	10,1	5,78 ± 0,52	1,23 ± 0,02	0,199 ± 0,016	0,712 ± 0,002	1,72 ± 0,01
Baham (2)	0,999	5,1	8,99 ± 0,59	1,13 ± 0,01	0,118 ± 0,008	0,697 ± 0,002	2,01 ± 0,01
Melap (3)	0,998	5,2	7,64 ± 0,55	1,12 ± 0,01	0,117 ± 0,014	0,725 ± 0,002	2,05 ± 0,01
Bana (4)	0,998	5,3	7,45 ± 0,78	1,24 ± 0,01	0,196 ± 0,015	0,726 ± 0,003	2,24 ± 0,02
Bafut (6)	0,998	12,2	13,68 ± 1,38	1,04 ± 0,01	0,145 ± 0,021	0,844 ± 0,002	2,24 ± 0,01
Bali (7)	0,997	5,9	11,25 ± 0,80	1,10 ± 0,02	0,148 ± 0,008	0,941 ± 0,004	2,55 ± 0,02

* Pseudo-coefficient de détermination calculé sur l'ensemble des observations (arbre échantillon, découpe).

avons observé que le modèle local était plus précis que le modèle global. Les courbes moyennes par réserve sont en effet fortement différentes et ne peuvent être simplement représentées par un faisceau de courbes affines bien ordonnées : la croissance initiale et la hauteur maximale des peuplements (asymptote) varient en fonction des conditions pédologiques et, moins certainement, bioclimatiques (FONWEBAN, HOULLIER, 1995 ; tableau I). Pour ce modèle de production, nous n'avons pas tenu compte d'autres résultats plus fins qui indiquent une influence de la topographie : à âge égal et dans une même réserve, les peuplements situés sur de fortes pentes ou en haut d'un versant sont moins hauts que ceux situés sur des pentes faibles ou en bas d'un versant (FONWEBAN, HOULLIER, 1995). Ce modèle décrit donc une croissance moyenne en hauteur au sein de chaque réserve.

La relation **[M2]** a été difficile à ajuster et a fourni des résultats médiocres à cause :

- de la faiblesse de la corrélation entre le nombre de tiges par hectare et l'âge
- et de l'absence de données longitudinales.

Après avoir essayé, sans résultat probant, d'ajuster une fonction puissance, $N = \alpha_1.D_g^{\alpha_2}$, dérivée de la loi d'auto-éclaircie (DREW, FLEWELLING, 1977), nous avons retenu les relations suivantes : $N = \alpha_1.\exp(\alpha_2/A)$ pour les réserves 3 et 7 et $S = \alpha_1.\exp(\alpha_2/A)$ pour les autres réserves (Annexe B.2, p. 32), où $S = 10\,000/(H_0.N^{0,5})$ est le facteur d'espacement de Hart-Becking pour une maille carrée (RIOU-NIVERT, 1984).

Pour la relation **[M3],** nous avons retenu l'équation $D_g = \beta_0 + \beta_1.H_0 - \beta_2.N$ qui a été ajustée localement, pour chaque réserve (Annexe B.3, p. 32).

Ce jeu de relations, complété par l'équation **[M4]** et le tarif de peuplement (cf. p. 26), constitue le modèle local de production ajusté pour chaque réserve.

PROJECTION DE LA PRODUCTION DES PLANTATIONS *D'EUCALYPTUS SALIGNA*

Dans chaque réserve et pour chaque âge échantillonné, la figure p. 28 donne les valeurs moyennes observées (H_0, N, D_g, G, V) et prédites ($\hat{H}_0$, $\hat{N}$, $\hat{D}_g$, $\hat{G}$, $\hat{V}$) des différentes grandeurs dendrométriques.

□ **Hauteur dominante :** les valeurs prédites grâce au modèle de croissance en hauteur dominante (FONWEBAN, HOULLIER, 1995) sont assez proches des valeurs observées. Néanmoins, on note quelques irrégularités dans certaines réserves, comme par exemple à Bali-Ngemba (7) à 16 ans, qui peuvent être dues à des interventions brutales (coupes frauduleuses), au manque d'entretien des peuplements ou encore aux variations naturelles de la fertilité au sein d'une même réserve (cf. les effets de la topographie rappelés précédemment). On observe par ailleurs que la fertilité, donc la productivité moyenne, varie beaucoup d'une réserve à l'autre : à 20 ans, les hauteurs moyennes prédites s'échelonnent entre moins de 28 m à Melap (3) et plus de 35 m à Bali-Ngemba (7) et Bafut-Ngemba (6) (FONWEBAN, HOULLIER, 1995).

□ **Densité du peuplement :** en général, il y a plus de 1 000 tiges par hectare à 18 ans, ce qui est dû à l'espacement initial des plantations (2 m × 2 m en moyenne, dans de nombreux cas), à la rareté des éclaircies et à la relative faiblesse de la mortalité naturelle. Par ailleurs, nous observons, au sein de chaque réserve, que l'évolution du nombre de tiges avec l'âge n'est pas très régulière. Les causes en sont : la nature temporaire des placettes utilisées, le manque d'entretien de certains peuplements et certains autres phénomènes difficiles à quantifier (passages du feu répétés, coupes frauduleuses). A Baleng par exemple, on constate un très faible nombre de tiges à 11 ans (771), conséquence selon NDO (1988) d'un essai d'éclaircie transformé en coupe frauduleuse. Dans le cas de la réserve de Bafut-Ngemba (6), l'irrégularité est due aux différents écartements utilisés : à 7 ans on observe 986 tiges par hectares (espacement initial : 3 m × 3 m) et 1 049 tiges par hectare à 19 ans (espacement initial : 2 m × 2 m). Le cas de la réserve de Bana (4) est similaire. Il est donc difficile de juger les prédictions de N dans les réserves de Bana et Bafut-Ngemba, où l'on constate une tendance plutôt croissante du nombre de tiges avec l'âge. Dans ces deux réserves, nous avons finalement choisi d'utiliser la moyenne du nombre de tiges par hectare observé (soit 1 650 pour Bana et 1 080 pour Bafut-Ngemba) pour faire des simulations. Dans ces conditions, il est assez normal que la loi d'auto-éclaircie qui décrit le relation entre la densité d'un peuplement équienne hyper-dense et la dimension moyenne de ses individus n'ait pas pu être ajustée.

□ **Diamètre quadratique moyen et surface terrière :** l'évolution observée du diamètre quadratique moyen est moins régulière que celle de la hauteur dominante. Cette irrégularité est due au fait que D_g est influencé par la densité du peuplement. Les valeurs prédites sont en général comparables aux valeurs observées. L'évolution de G dépend de celle de N et D_g : elle est très irrégulière et les prédictions s'écartent beaucoup des valeurs observées.

□ **Production totale et accroissement annuel moyen en volume (iV_m et $i\hat{V}_m$)** : la productivité diffère beaucoup d'une réserve à l'autre, avec des valeurs observées du volume sur pied (V) à 15 ans de plus de 900 $m^3.ha^{-1}$ à

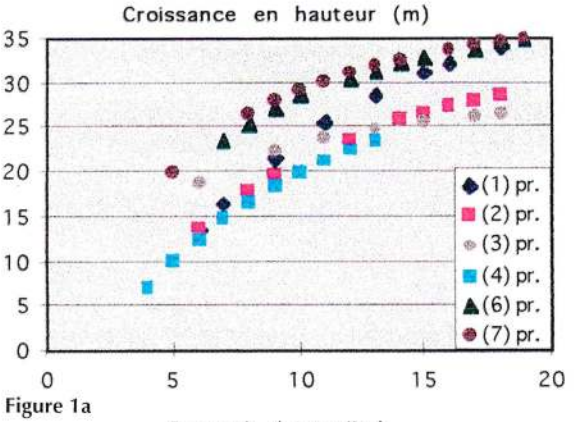


Figure 1a

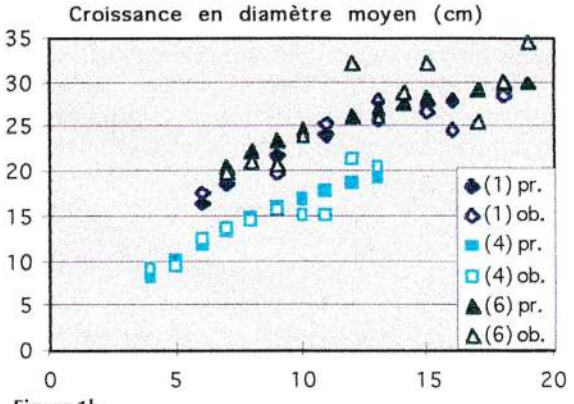


Figure 1b

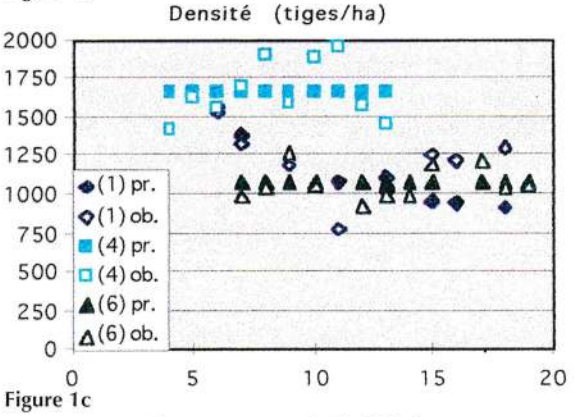


Figure 1c

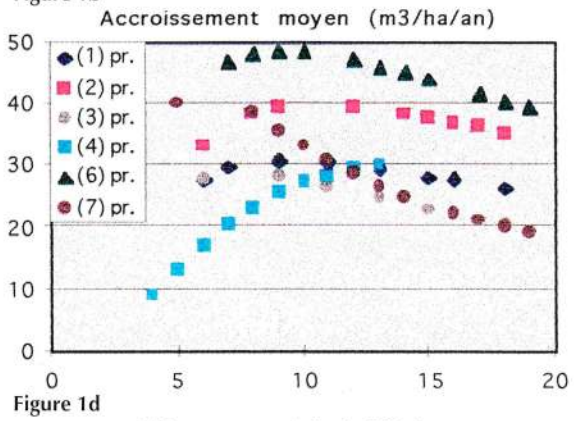


Figure 1d

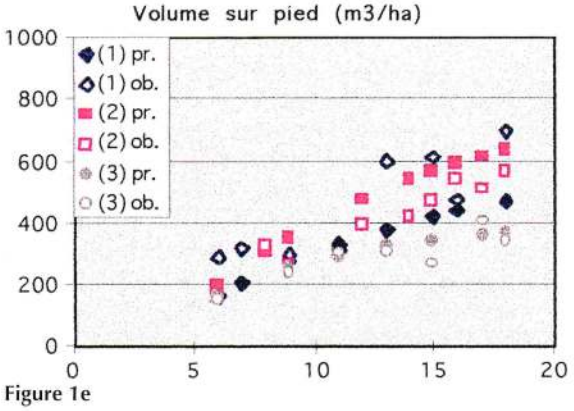


Figure 1e

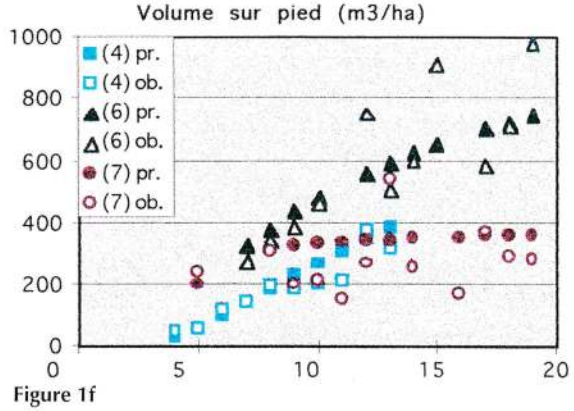


Figure 1f

Evolution moyenne prédite et observée des peuplements d'*Eucalyptus saligna* dans les six réserves forestières étudiées : 1a) croissance en hauteur prédite ; 1b) croissance en diamètre moyen prédite et observée dans trois réserves ; 1c) évolution du nombre de tiges prédit et observé dans trois réserves ; 1d) évolution de l'accroissement moyen prédit et observé dans trois réserves ; 1e) et 1f) évolution du volume sur pied prédit et observé dans les six réserves.

Predicted and observed average evolution of Eucalyptus saligna *stands in the six forest reserves : 1a) predicted height growth ; 1b) predicted and observed diameter growth in three reserves ; 1c) predicted and observed density in three reserves ; 1d) mean annual increment in three reserves ; 1e) and 1f) predicted and observed standing volume in the six reserves.*

« pr » : valeur prédite (*predicted*). « ob » : valeur moyenne observée (*observed*)

Bafut-Ngemba et de moins de 400 $m^3.ha^{-1}$ à Melap (3) et Bali-Ngemba (7). Les valeurs observées de l'accroissement moyen annuel maximal varient entre 27,4 $m^3.ha^{-1}.an^{-1}$ (à 11 ans) dans la réserve de Melap (3) et 62,7 $m^3.ha^{-1}.an^{-1}$ (à 12 ans) dans la réserve de Bafut-Ngemba (6).

Les variations, apparemment peu régulières en fonction de l'âge, des valeurs prédites de la production et de l'ac-

TABLEAU IV

COMPARAISON ENTRE LE VOLUME OBSERVÉ, LE VOLUME TARIF ET LE VOLUME PRÉDIT : EXEMPLES

Réserve	Age (an)	Volume observé ($m^3 . ha^{-1}$)	Volume tarif ($m^3 . ha^{-1}$)	Volume prédit ($m^3 . ha^{-1}$)
Bafut-Ngemba	12	751,9	742,0	561,9
Bafut-Ngemba	15	911,1	941,4	655,9
Bafut-Ngemba	19	980,5	973,8	747,5
Bali-Ngemba	11	154,5	162,0	336,6
Bali-Ngemba	16	175,6	172,9	353,9

croissement sont dues au fait que ces valeurs dépendent de H_0, N et G. L'écart entre les observations et les prédictions provient ainsi de plusieurs sources, dont l'incertitude associée au tarif de peuplement. Quand on utilise les grandeurs mesurées dans les peuplements (H_0, N, D_g, G) comme entrées du tarif au lieu des valeurs estimées ($\hat{H}_0$, $\hat{N}$, $\hat{D}_g$, $\hat{G}$) à partir des relations **[M1]** à **[M4]**, on observe naturellement que les écarts entre les volumes observés et ceux prédits par le tarif sont sensiblement plus faibles que les écarts entre les volumes observés et ceux prédits par le modèle de production (tableau IV).

Rappelons, enfin, que ces estimations de production et d'accroissement minorent les quantités réelles, puisque nous n'avons pas tenu compte de la mortalité (mort naturelle ou rares éclaircies) et que nous avons assimilé la production au volume sur pied.

APPLICATIONS ET DISCUSSION

UTILISATION DES TARIFS DE PEUPLEMENT

Les tarifs de peuplement sont des outils indispensables en matière de gestion forestière et d'inventaire, car ils permettent de réaliser des estimations rapides du volume sur pied (PARDÉ, BOUCHON, 1988 ; RONDEUX *et al.*, 1991). Ils sont illustrés avec les résultats d'un inventaire réalisé dans la réserve de Bali-Ngemba (7). Les valeurs observées, H_0, N et G, sont utilisées comme entrées du tarif établi pour cette réserve (tableau III) :

$V_d = 11{,}25.G^{1{,}105}.(H_0/N)^{0{,}1477}.[1 - 0{,}9409.(d/D_g)^{2{,}546}]$.

Les résultats de ces estimations sont présentés (tableau V, p. 30) pour le volume total (d = 0 cm), le volume bois fort (d = 7 cm) et le volume « petit sciage » (d = 12 cm).

Connaissant la superficie totale, S, et le volume par hectare, V, de chaque parcelle, nous pouvons estimer son volume total ($S.V$). Ces résultats peuvent ensuite être sommés au niveau du massif forestier afin d'en estimer la ressource au moment de l'inventaire. Pour la réserve de Bali-Ngemba, nous estimons ainsi le volume total sur pied à 88 153 m^3, le volume bois fort à 80 703 m^3 et le volume sciage à 58 764 m^3. La même démarche peut être reproduite pour chaque réserve ou pour d'autres valeurs de la découpe.

PRODUCTION D'*EUCALYPTUS SALIGNA* DANS L'OUEST-CAMEROUN

L'irrégularité de l'évolution de la production totale et de l'accroissement rend difficile la comparaison de la productivité entre les différentes réserves étudiées. De même, il est difficile de comparer strictement la productivité observée ici avec celle enregistrée dans d'autres pays, car la densité des peuplements n'est pas toujours indiquée. Toutefois, on constate que les valeurs obtenues ici sont comparables à celles d'autres pays producteurs d'*E. saligna* : 25 à 35 $m^3.ha^{-1}.an^{-1}$ en Afrique du Sud, 24 $m^3.ha^{-1}.an^{-1}$ au Kenya, 20 $m^3.ha^{-1}.an^{-1}$ en Angola, 42 à 50 $m^3.ha^{-1}.an^{-1}$ à Hawaii (F.A.O., 1982) ; 35 $m^3.ha^{-1}.an^{-1}$ en Nouvelle-Zélande et 57 $m^3.ha^{-1}.an^{-1}$ au Brésil (WILLIAMSON, 1981) ; entre 33,1 et 45,5 $m^3.ha^{-1}.an^{-1}$ (à 15 ans) à Hawaii (WALTERS, 1980) ; de 26 à 52 $m^3.ha^{-1}.an^{-1}$ au Kenya (SHIVER, BRISTER, 1990). La productivité de ces peuplements pourrait cependant être encore plus élevée à condition d'utiliser des semences améliorées par voie génétique, d'adopter une sylviculture appropriée et de bien entretenir les peuplements.

UTILITÉ DES MODÈLES ET TABLES DE PRODUCTION

□ **Utilité générale des modèles de production :** les tables de production sont des cas particuliers de modèles de production. Elles constituent des outils de prévision importants pour les sylviculteurs et les aménagistes ; elles permettent de classer les peuplements par classe de productivité ou de fertilité, de faire des prévisions de production pour une sylviculture donnée (TOTH, TURREL, 1983), elles peuvent aussi servir comme normes ou guides de sylviculture (DUPLAT, 1978).

Ces outils ne décrivent cependant que l'évolution moyenne des grandeurs d'un peuplement pur, équienne et homogène, le plus souvent sans vide, soumis à la sylviculture moyenne observée ou à une sylviculture-type, dite de référence (DUPLAT, 1978). Pour un peuplement particulier, ces grandeurs peuvent donc différer, plus ou

TABLEAU V

ESTIMATION DU VOLUME SUR PIED JUSQU'À DES DÉCOUPES VARIÉES POUR LA RÉSERVE DE BALI-NGEMBA (7)

A (ans)	S (ha)	H_0 (m)	N (t . ha^{-1})	D_g (cm)	G (m^2 . ha^{-1})	V (m^3 . ha^{-1})	$\hat{V}$ (m^3 . ha^{-1})	$\hat{V}_7$ (m^3 . ha^{-1})	$\hat{V}_{12}$ (m^3 . ha^{-1})
5	32	20,1	2 329	12,9	30,4	242,6	242,8	194,6	52,8
8	23	25,4	2 233	14,8	38,4	306,9	327,1	281,3	146,6
9	34	28,3	1 438	14,9	25,1	201,1	221,4	190,9	101,3
10	26	27,7	1 275	16,2	26,3	216,2	236,6	210,3	132,9
11	15	24,6	550	19,8	16,9	154,5	162,0	151,2	119,4
12	25	32,9	881	20,9	30,2	267,1	299,1	281,7	230,6
13	27	37,5	1 111	25,1	55,0	537,1	570,7	549,9	488,6
14	30	28,4	844	20,2	27,0	257,6	260,5	244,0	195,4
16	36	18,7	850	17,2	19,7	175,6	172,9	156,4	107,8
17	28	33,7	808	25,0	39,7	369,1	410,5	395,4	350,9
18	18	30,8	844	21,5	30,6	293,1	302,6	286,3	238,1
19	9	31,3	988	20,6	32,9	282,0	320,9	301,6	244,6

* $\hat{V}_7$ et $\hat{V}_{12}$ indiquent les volumes par hectare jusqu'à 7 et 12 cm de découpe en diamètre respectivement.

moins, de la moyenne à cause des différences de station et de traitement (FRANZ, FORSTER, 1979). Il n'est donc pas étonnant que certains peuplements, même soumis à une sylviculture proche de la sylviculture de référence, puissent s'écarter sensiblement des valeurs moyennes prédites (cf. fig., p. 28).

Les tables de production doivent être considérées comme des repères grâce auxquels on peut se situer plutôt que comme des normes ou des « modèles à suivre ». Elles dégagent les grandes tendances et peuvent être combinées avec des indicateurs techniques, économiques et financiers pour faire des prévisions à moyen ou long terme (détermination de la possibilité d'une forêt, évolution de la ressource et de la disponibilité en bois dans une région) ou optimiser la gestion forestière [détermination de l'âge d'exploitabilité et du calendrier des éclaircies par la programmation linéaire ou la programmation dynamique, cf. CLUTTER *et al.* (1983) ; BUONGIORNO, GILLES (1987)].

□ **Limites du modèle de production développé ici :** DÉCOURT (1972) indique que le but des premières tables de production françaises, construites à partir de placettes temporaires, a été de combler un vide et de mettre rapidement à la disposition des utilisateurs des outils de gestion qui leur faisaient défaut. Le modèle présenté ici relève de cette même logique. Ses principales faiblesses tiennent à l'absence de données longitudinales sur la croissance en hauteur, au caractère temporaire des placettes utilisées et à la mauvaise prise en compte de la mortalité (confusion entre volume sur pied et production, médiocrité de la relation entre l'âge et la densité du peuplement).

Il est donc évident qu'une façon d'améliorer et de valider ce modèle consisterait à suivre un certain nombre de placettes, à mesurer les accroissements et à vérifier que le modèle les prédit correctement. Les essais faits en ce sens dans d'autres situations ont généralement montré qu'il était délicat de passer d'un modèle de production intégré, construit sur des placettes temporaires, à un modèle d'accroissement différentiel. C'est plutôt dans l'autre sens, *i.e.* par intégration d'un modèle d'accroissement, que l'on peut assurer une compatibilité entre les accroissements et la production cumulée (CLUTTER, 1963 ; HOULLIER, 1986).

Une manière de mieux prendre en compte la mortalité et d'améliorer ainsi l'estimation de la productivité consisterait à ajouter, à l'équation **[M2]** qui décrit l'évolution du nombre de tiges par hectare, une équation fournissant le rapport entre le volume moyen des arbres morts et le volume moyen des arbres survivants, $K_m = v_{g,m}/v_g$ (HOULLIER *et al.*, 1995). Cette modification nécessiterait, elle aussi, de disposer de placettes semi-permanentes.

□ **Originalités du modèle de production développé :** malgré ses limites, notre modèle présente deux caracté-

ristiques intéressantes. D'une part, le développement d'un tarif de peuplement à découpe variable permet de prédire la production pour différents types d'utilisation. Nous en avons présenté ici une application assez simple, mais il serait possible d'aller plus loin en estimant, par exemple, le nombre d'arbres vérifiant tel ou tel critère de dimension (diamètre, longueur) requis pour l'usage sous forme de poteaux (cf. FONWEBAN, 1995).

Par ailleurs, l'existence d'un plan d'échantillonnage stratifié selon l'appartenance à six réserves et l'analyse systématique du caractère global ou local des équations ajustées ont permis de montrer que le modèle devait être calibré localement, c'est-à-dire pour chaque réserve. Sauf pour la croissance en hauteur où la fertilité des stations (type de sol et topographie) est clairement en cause, les raisons de l'inadéquation du modèle global moyen restent néanmoins mal connues.

Cette inadéquation du modèle global pose des problèmes d'extrapolation : lorsqu'on s'intéresse à un nouveau massif, il ne s'agit plus seulement d'utiliser un modèle moyen unique ajusté une fois pour toutes sur quelques réserves mais, au cas par cas, de choisir le modèle local le plus adapté (en se basant, par exemple, sur le type de sol) ou, même, de recalibrer les équations du modèle. Ce problème de variabilité intrarégionale de la croissance, parfois négligé, a amené certains auteurs à distinguer deux notions complémentaires :

- la fertilité de la station définie par référence à la croissance en hauteur
- et le niveau de productivité qui module la production pour une même croissance en hauteur (ASSMANN, 1970).

CONCLUSION

Les modèles ajustés ici pour les plantations d'*E. saligna* fournissent des outils aux gestionnaires forestiers : le tarif de peuplement permet d'estimer le volume de bois sur pied, tandis que le modèle de production décrit l'évolution moyenne prévisible des peuplements selon leur classe de fertilité. Les données nécessaires pour les utiliser sont bien connues des forestiers et leur mesure n'exige pas un équipement lourd ou coûteux : l'âge du peuplement, sa hauteur dominante, sa surface terrière et sa densité.

Ces modèles serviront dans les programmes d'aménagement des six réserves étudiées. Ils constitueront aussi une base de données quantitatives utile dans la perspective plus générale de l'aménagement des plantations d'*E. saligna* dans l'Ouest-Cameroun. Ces modèles ont cependant une particularité qui, simultanément, contribue à leur précision mais les rend délicats à employer : ce sont des modèles locaux calibrés pour chacune des réserves ; tant que l'on ne comprendra pas mieux les raisons, écologiques ou sylvicoles, de la forte variabilité observée entre les réserves, leur extrapolation à d'autres massifs sera donc difficile.

Ces modèles ont été intégrés dans un logiciel de simulation programmé en langage Basic (FONWEBAN, 1995) et qui sera progressivement amélioré au fur et à mesure que les modèles seront modifiés, calibrés pour d'autres réserves et validés. La validation du modèle, qui est aussi importante que sa construction et son ajustement (GOULDING, 1979), n'est en effet pas encore achevée. Elle nécessitera notamment le suivi de placettes semi-permanentes.

Nous souhaitons donc que des études ultérieures puissent être effectuées pour améliorer ces résultats. Nous espèrons aussi que des études similaires seront menées pour d'autres espèces plantées au Cameroun et dans d'autres pays tropicaux, car on manque encore d'outils pour prédire la production des plantations tropicales. ❐

Remerciements : La collecte des données utilisées dans cette étude a été réalisée grâce à la participation d'élèves-ingénieurs au Département de foresterie de l'Université de Dschang (Cameroun), dans le cadre de leur stage de fin d'étude. L'Office national de développement des forêts (ONADEF, agences de Bafoussam et de Bamenda) nous a permis d'installer les placettes et de cuber les arbres dans ses peuplements. Le premier auteur a bénéficié de l'aide financière (une bourse FAC) du Gouvernement français, dans le cadre de la coopération ENGREF-Université de Dschang. Les auteurs remercient deux lecteurs anonymes pour leurs judicieuses remarques et suggestions.

▶ John N. FONWEBAN
Département de foresterie
Université de Dschang
B.P. 180 DSCHANG
Cameroun

▶ François HOULLIER
Laboratoire de recherches en sciences forestières
ENGREF
14, rue Girardet
54042 NANCY CEDEX
France

ANNEXES

Annexe A. – Relation hauteur/diamètre (d'après FONWEBAN, 1995)

Equation : $h = 1,3 + \eta_1 . \exp(-\eta_2/d_{130})$

Réserve	R^{2*}	ETR (m)	$\eta_1 \pm \sigma_{\eta_1}$ (m)	$\eta_2 \pm \sigma_{\eta_2}$ (cm)
1 Baleng	0,80	2,89	74,1 ± 3,1	31,0 ± 1,3
2 Baham	0,87	2,48	49,9 ± 1,4	22,0 ± 0,7
3 Melap	0,75	2,10	38,5 ± 0,8	12,8 ± 0,5
4 Bana	0,80	2,24	39,4 ± 1,5	20,1 ± 0,8
6 Bafut-Ngemba	0,74	2,55	48,0 ± 0,9	15,2 ± 0,6
7 Bali-Ngemba	0,77	2,68	47,2 ± 1,3	14,7 ± 0,7

* Pseudo-coefficient de détermination.

Annexe B. – Relations utilisées pour le modèle de production

B.1. – Modèle de croissance en hauteur dominante (d'après FONWEBAN, HOULLIER, 1995)

Equation : $H_0 = \theta_1 . \exp(-\theta_2/A)$

Réserve	ETR (m)	$\theta_1 \pm \sigma_{\theta_1}$ (m)	$\theta_2 \pm \sigma_{\theta_2}$ (an)
1 Baleng	2,51	54,1 ± 2,4	8,30 ± 0,53
2 Baham	1,62	42,1 ± 1,3	6,88 ± 0,39
3 Melap	2,09	31,8 ± 1,4	3,21 ± 0,51
4 Bana	2,34	40,5 ± 2,4	7,09 ± 0,51
6 Bafut-Ngemba	2,98	43,9 ± 1,5	4,36 ± 0,39
7 Bali-Ngemba	3,64	42,8 ± 2,1	3,85 ± 0,49

B.2. – Relation entre le nombre de tiges ou le facteur d'espacement et l'âge. Pour les réserves 3 et 7, c'est l'équation $N = \alpha_1 . \exp(\alpha_2/A)$ qui a été ajustée ; pour les réserves 1, 2, 4 et 6, c'est l'équation $S = \alpha_1 . \exp(\alpha_2/A)$ qui a été ajustée (d'après FONWEBAN, 1995)

Réserve	R^{2*}	ETR (tiges.ha^{-1})	$\alpha_1 \pm \sigma_{\alpha_1}$ (tiges.ha^{-1})	$\alpha_2 \pm \sigma_{\alpha_2}$ (an^{-1})
3 Melap	0,26	146	814 ± 49	2,66 ± 0,64
7 Bali-Ngemba	0,75	323	605 ± 59	6,92 ± 0,62
		(%)	(%)	(an^{-1})
1 Baleng	0,70	1,96	7,02 ± 0,47	5,88 ± 0,56
2 Baham	0,86	1,15	7,25 ± 0,31	5,34 ± 0,36
4 Bana	0,86	3,97	5,69 ± 0,56	7,80 ± 0,47
6 Bafut-Ngemba	0,51	1,58	6,63 ± 0,40	5,15 ± 0,60

* Pseudo-coefficient de détermination.

B.3. – Relation entre le diamètre quadratique moyen, le nombre de tiges par hectare et la hauteur dominante (d'après FONWEBAN, 1995)

Equation : $D_g = \gamma_1 + \gamma_2 . H_0 - \gamma_3 . N$

Réserve	R^2	ETR (cm)	$\gamma_1 \pm \sigma_{\gamma 1}$ (cm)	$\gamma_2 \pm \sigma_{\gamma_2}$ (cm.m^{-1})	$\gamma_3 \pm \sigma_{\gamma_3}$ (cm.ha)
1 Baleng	0,75	2,2	15,42 ± 2,35	0,499 ± 0,051	0,00375 ± 0,00136
2 Baham	0,92	1,3	8,17 ± 2,12	0,705 ± 0,047	0,00223 ± 0,00093
3 Melap	0,78	1,8	3,60 ± 3,13	0,981 ± 0,091	0,00493 ± 0,00160
4 Bana	0,94	1,7	8,27 ± 1,28	0,679 ± 0,044	0,00297 ± 0,00078
6 Bafut-Ng.	0,69	2,7	11,96 ± 2,64	0,826 ± 0,069	0,00997 ± 0,00204
7 Bali-Ng.	0,77	2,3	10,24 ± 2,17	0,430 ± 0,060	0,00296 ± 0,00062
Global	0,74	3,1	11,65 ± 1,11	0,592 ± 0,027	0,00391 ± 0,00050

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADLARD P. G., 1990.
Procedures for monitoring tree growth and site change. Oxford Forestry Institute, Tropical Forestry Papers 23, 187 p.

ADLER D., 1980.
Estimation des volumes et accroissement des peuplements forestiers. Vol. 2. Etude et prévision de la production. F.A.O., Rome, étude F.A.O.-Forêts 22/2, 229 p.

ASSMANN E., 1970.
The principles of forest yield study. Pergamon Press, 506 p.

AVERY T. E., BURKHART H. E., 1983.
Forest Measurements (3rd edition). McGraw-Hill, New York, 331 p.

BUONGIORNO J., GILLES J. K., 1987.
Forest Management and Economics : a primer in quantitative methods. Mac Millan Publishing Company, New York, 285 p.

BURGESS I. P., BELL J. C., 1983.
Comparative morphology and allozyme frequencies of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *Eucalyptus saligna* SM. Australian Forest Research 13(2) : 33-149.

CLUTTER J. L., 1963.
Compatible growth and yield model for loblolly Pine. For. Sci. 9(3) : 354-371.

CLUTTER J. C, FORTSON J. C., PIENAAR L. V., BRISTER G. A., BAILEY R., 1983.
Timber management. A quantitative Approach. John Wiley & Sons, New York, 333 p.

C.T.F.T., 1959.
Eucalyptus saligna et *Eucalyptus grandis* : caractère sylvicole et méthode de production. Bois et Forêts des Tropiques 63 : 17-21.

DÉCOURT N., 1972.
Méthode utilisée pour la construction rapide de tables de production provisoires en France. Ann. Sci. Forest. 29(1) : 35-48.

DELORD J. M., 1984.
Le profil des tiges. Rev. for. franç. XXXVI(6) : 505-513.

DREW T. J., FLEWELLING J. W., 1977.
Some recent Japanese theories of yield-density relationships and their application to Monterey Pine plantations. For. Sci. 23(4) : 517-534.

DUPLAT P., 1978.
Table de Production de référence pour le sapin du Jura. Office national des forêts, Section technique, 36 p.

DUPUY B., MILLE G., 1991.
Les plantations à vocation de bois d'œuvre en Afrique intertropicale humide. F.A.O., Rome, étude F.A.O.-Forêts 98, 225 p.

EL ABID A., 1984.
Aptitudes du Pin des Canaries et de certains Eucalyptus issus des reboisement marocains à produire des poteaux télégraphiques. Ann. rech. for. Maroc 24 : 150-173.

ELDRIDGE K., DAVIDSON J., HARWOOD C., VAN WYK G., 1993.
Eucalypt Domestication and Breeding. Clarendon Press, Oxford, 288 p.

EVANS J., 1992.
Plantation Forestry in the Tropics : Tree planting for industrial, social, environmental, and agroforestry purposes (2nd Edition), 403 p.

F.A.O., 1982.
Les Eucalyptus dans le reboisement. F.A.O., Rome, étude F.A.O.-Forêts, 753 p.

FAURE J. J., 1987.
Réserve forestière de Melap : Plan d'aménagement (1987-1996). Centre Universitaire de Dschang, Cameroun, 133 p.

FONWEBAN J. N., 1995.
Modélisation de la production des peuplements forestiers : application aux peuplements d'*Eucalyptus saligna* au Cameroun. ENGREF, Nancy, Thèse de doctorat, 197p. + annexes.

FONWEBAN J. N., HOULLIER F., 1995.
Courbes de croissance en hauteur et indice de fertilité pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun. Ann. sci. for. 52(3) : 263-281.

FONWEBAN J. N., HOULLIER F.
Tarifs de cubage et fonctions de défilement pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun. Ann. sci. for. (à paraître).

FRANZ F., FORSTER H., 1979.
Table de production de pin d'Alep pour les Arès-Algérie. Université de Münich, 114 p.

GALLANT R., 1975.
Testing a subset of the parameters of a nonlinear regression model. J. Am. Stat. Ass. 70(352) : 927-932.

GAUTIER D., 1994a.
Le statut de l'arbre en pays Bamiléké, Cameroun. Bois et Forêts des Tropiques 240(2) : 15-27.

GAUTIER D., 1994b.
Valeur d'usage des arbres en pays Bamiléké, Cameroun. Bois et Forêts des Tropiques 241(3) : 39-51.

GOULDING C. J., 1979.
Validation of growth models used in forest management. New Zealand J. For. 24(1) : 108-124.

HAMILTON G. J., CHRISTIE J. M., EDWARDS J., 1981.
Yield models for forest management. Forestry Commission Booklet 48, 32 p.

HOULLIER F., 1986.
Echantillonnage et modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : application au cas de l'Inventaire forestier national. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon I, 267 p.

HOULLIER F., BOUCHON J., BIROT Y., 1991.
Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. Rev. for. franç. XLIII : 87-108.

HOULLIER F., LEBAN J.-M., COLIN F., 1995.
Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. For. Ecol. Manage. 74 : 91-102.

MARTIN D., SEGALEN P., 1966.
Carte pédologique du Cameroun oriental. Notice explicative. ORSTOM, Centre de Yaoundé, 133 p.

NDO N. J. C., 1987.
Proposition d'aménagement de la réserve forestière de Baleng. ENSA-Cameroun, mémoire de fin d'études, 145 p.

NJOUKAM R. M., 1989.
Sylviculture d'*Eucalyptus saligna* en savane d'altitude (Province de l'Ouest et du Nord-Ouest du Cameroun). Antenne de recherche forestière de Foumban, Cameroun, rapport technique, 46 p. + annexes.

ONADEF, 1991.
Canevas de plan d'aménagement forestier. MINAGRI-ONADEF, Yaoundé, Cameroun, 7 p. + annexes.

PANCEL L., 1993.
Tropical Forestry Handbook (Vol. 1). Springer-Verlag, Berlin, 810 p.

PANDEY D., 1983.
Growth and yield of plantation species in the tropics. F.A.O., Rome, Forest Resources Division, 115 p.

PARDÉ J., BOUCHON J., 1988.
Dendrométrie (2e édition). ENGREF, Nancy, 328 p.

PHILIP M. S., 1987.
Obstacles to measuring growth and yield in tropical rain forest. *In* F. Mergen & J. R. Vincent (eds.), Natural Management of Tropical Moist Forests. Silvicultural and management prospects of sustained utilization, School of Forestry and Environmental Studies, Yale, 212 p.

PHILIP M.S., 1994.
Measuring Trees and Forests (2nd Edition). CAB International, UK, 310 p.

RIOU-NIVERT P., 1984.
Le facteur d'espacement : un guide pour les premières éclaircies dans les peuplements résineux. Forêt entreprise 20 : 18-25.

ROEDER K. R., 1980.
Provenance variation in growth features of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus saligna* in South Africa. South Afr. Forestry J. 112 : 36-41.

RONDEUX J., HERBERT J., LECOMTE H., TOUSSAINT A., 1985.
Méthode d'estimation rapide des volumes par catégories de grosseur en peuplement d'Epicéa (*Picea abies* Karst). Ann. sci. for. 42(2) : 185-195.

RONDEUX J., LAURENT C., LEJEUNE P., 1991.
Tarifs de cubage peuplement pour le Douglas *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en Moyenne et Haute-Belgique. Rev. for. franç. XXXXIII(6) : 507-513.

SAS, 1988.
SAS/STAT User's Guide. SAS Institute, 1 028 p.

SHIVER B. D., BRISTER G. H., 1990.
Tree and stand volume functions for *Eucalyptus saligna* in Western Kenya. *In* : H. E. Burkhart (ed.), Research in Forest Mensuration, Growth and Yield, IUFRO Proceedings, School of Forestry and Wildlife Resources, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA. Publ. FWS-2-90, p. 200-210.

SIEFFERMAN G., 1973.
Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun : variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial au milieu tropical. Mémoires ORSTOM., 66, 183 p.

TCHANOU Z., 1975.
Les Eucalyptus et leur avenir en Afrique tropicale. Université Laval, Canada, diplôme de Maître ès Sciences, 92 p.

TOMASSONE R., LESQUOY E., MILLIER C., 1983.
La régression, nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique. Masson, Paris, 180 p.

TOTH J., TURREL M., 1983.
La productivité du pin noir d'Autriche dans le Sud-Est de la France. Rev. for. franç. XXXV(2) : 31-41.

VALLERIE M., 1971.
Carte pédologique du Cameroun Occidental au 1/100 000. Notice explicative, ORSTOM, Paris.

VANCLAY J. K., 1991.
Review : data requirements for developing growth models for tropical moist forests. Commw. For. Rev. 70(4), 224 : 248-271.

VANCLAY J. K., 1995.
Growth models for tropical forests : A synthesis of models and methods. For. Sci. 41(1) : 7-42.

VANNIÈRE B., 1984.
Tables de production pour les forêts françaises (2e édition). ENGREF, Nancy, 158 p.

WALTERS G. A., 1980.
Saligna eucalyptus in a 15-year-old spacing study in Hawaii. USDA Forest Service, Research Paper PSW-151, 6 p.

WILLIAMSON M. J., 1981.
Growth of *Eucalyptus saligna* in a thinning trial at Waipoua. New Zealand Journal of Forestry 26(2) : 245-250.

RÉSUMÉ

TARIF DE PEUPLEMENT ET MODÈLE DE PRODUCTION POUR *EUCALYPTUS SALIGNA* AU CAMEROUN

En vue de l'aménagement des plantations d'*Eucalyptus saligna* sur les hauts plateaux de l'Ouest-Cameroun et afin de disposer d'informations quantitatives sur leur production, des placettes temporaires ont été installées et mesurées dans six réserves forestières de cette région. Les données ainsi recueillies ont été utilisées pour construire un modèle de production composé de plusieurs relations qui permettent de prédire la croissance en hauteur dominante (H_0), le diamètre quadratique moyen (D_g), la surface terrière (G) et le volume du peuplement (V) en fonction de l'âge de la plantation (A) et d'un indice de fertilité. Ce modèle a été calibré pour chacune des réserves. Il inclut notamment un tarif de cubage qui permet d'estimer le volume d'un peuplement jusqu'à n'importe quelle découpe (diamètre limite : d) à partir des grandeurs dendrométriques usuelles : G, H_0, D_g, nombre de tiges par hectare (N) et A. Les composantes du modèle de production ont été intégrées dans un logiciel qui permet de simuler l'évolution probable du peuplement. Les résultats obtenus indiquent que, selon la réserve, la production totale à 19 ans peut varier de 350 à plus de 900 $m^3.ha^{-1}$. L'accroissement annuel moyen maximal varie de 27,4 à 62,7 $m^3.ha^{-1}.an^{-1}$. Ces chiffres sont comparables avec les résultats obtenus dans d'autres pays producteurs d'*E. saligna*.

Mots-clés : *Eucalyptus saligna*. Tarif de peuplement. Tarif de cubage. Production forestière. Modélisation. Aménagement forestier.

ABSTRACT

STAND VOLUME EQUATIONS, GROWTH AND YIELD MODELS FOR *EUCALYPTUS SALIGNA* IN CAMEROON

In the context of the future planning and management of the *Eucalyptus saligna* plantations located in the western highlands of Cameroon, and in order to obtain quantitative information on their yield, temporary plots have been sampled and measured in six forest reserves. These data were used to build a stand growth and yield model, which predicts dominant height (H_0), mean quadratic diameter (D_g), basal area (G) and stand volume (V) as a function of stand age (A) and site quality. This model has been calibrated for each reserve. An original feature of this model is that it includes a flexible stand volume equation which predicts stand volume to any merchantability limit (up to diameter d), given G, H_0, D_g, A, and the number of stems per ha (N). The components of the growth and yield model have been incorporated into a user-friendly computer simulator in order to facilitate their use and to simulate average stand development over time. Total yield at 19 years varies between 350 $m^3.ha^{-1}$ to over 900 $m^3.ha^{-1}$, depending on the forest reserve. Maximum annual increment ranges from 27.4 to 62.7 $m^3.ha^{-1}.yr^{-1}$ and culminates between 11 and 12 years. These values compare favourably with results reported by other countries cultivating this species.

Key words : *Eucalyptus saligna*. Stand volume tables. Volume tables. Forestry production. Statistical model. Forest management.

RESUMEN

CUBICACIÓN DE MASAS FORESTALES Y MODELO DE PRODUCCIÓN PARA *EUCALYPTUS SALIGNA* EN CAMERÚN

Con objeto de disponer de informaciones cuantitativas acerca de su producción, con destino a la ordenación de plantaciones de *Eucalyptus saligna* en los altiplanos del oeste del Camerún, se han instalado y medido parcelas temporales en seis de las reservas forestales de esta región. Los datos así recogidos se han utilizado para construir un modelo de producción compuesto por varias relaciones que permiten predecir el crecimiento en alturas dominantes (H_0), el diámetro cuadrático medio (D_g), el área basimétrica (G) y el volumen de la masa forestal (V) en función del eje de la plantación (A) y de un índice de fertilidad. Este modelo se ha calibrado para cada una de las reservas. Fundamentalmente, incluye una cubicación de las masas forestales que permite evaluar el volumen de una plantación hasta cualquier corta (diámetro límite : d) a partir de las magnitudes dendrométricas usuales : G, H_0, D_g, número de tallos por hectárea (N) y A. Las componentes del modelo de producción se han integrado en un software que permite simular la evolución probable de la plantación. Los resultados conseguidos indican que, según la reserva, la producción total a los 19 años puede oscilar entre 350 y más de 900 $m^3.ha^{-1}$. A su vez, el incremento anual máximo oscila entre 27,4 y 62,7 $m^3.ha^{-1}$. $año^{-1}$. Estas cifras se pueden comparar con los resultados conseguidos en otros países productores de *Eucalyptus saligna*.

Palabras clave : *Eucalyptus saligna*. Tabla de volumen de masa. Tablas de cubicación. Producción forestal. Modelo estadístico. Ordenación forestal.

SYNOPSIS

STAND VOLUME EQUATIONS, GROWTH AND YIELD MODELS FOR *EUCALYPTUS SALIGNA* IN CAMEROON

JOHN N. FONWEBAN, FRANÇOIS HOULLIER

Eucalyptus saligna has proven to be the most promising species since its introduction into the western highlands of Cameroon. From this species alone the local population obtains firewood for domestic heating, poles and fenceposts, rafters, timber (planks) and other construction and furniture material ; two tea estates in this region use eucalyptus wood to process their tea leaves, and the government gets its entire supply of electricity and telephone poles from this species. Despite the socio-economic role played by the species, its proper management has been neglected since its introduction. This is partly due to the lack of information on its growth and yield.

The aim of this study was to construct a stand growth and yield model for this species, the ultimate goal being to provide forest managers with a flexible decision-support system.

MATERIALS AND METHODS

In the absence of experimental and permanent plots, the study was based on temporary plots established in six forest reserves in west Cameroon. Measurements carried out included tree dbh, height of dominant and co-dominant trees and the tallying of standing trees for volume estimation. From the dataset collected, dominant height (H_0), number of trees per ha (N) and stand basal area (G) were estimated. Tree volume, volume ratio and taper equations were constructed and used to estimate stand volume (V).

These variables (V, H_0, G, N) were used to construct a stand volume equation which allows for stand volume estimation to various top merchantability limits. A growth and yield model was elaborated based on a series of sub-models viz. : a dominant height growth model, a stand volume equation and other empirical relationships for predicting the stand density and mean quadratic diameter.

RESULTS AND CONCLUSION

One particular feature of the adjusted models is that they are local (*i.e.*, specific to each reserve). The advantage is that such models are significantly more precise than a global model, the drawback being that they have to be calibrated for each new reserve.

The results indicate volume yields that vary between 350 $m^3.ha^{-1}$ to over 900 $m^3.ha^{-1}$ at 19 years depending on the forest. Maximum annual increment culminates between 11 and 12 years and ranges from 27.4 to 62.7 $m^3.ha^{-1}.yr^{-1}$. This variability is linked with soil type and other ecological factors. These values compare favourably with results reported by other countries cultivating this species (Brazil, Hawaii and South Africa).

The stand volume equation provides a flexible tool for estimating stand volume up to various merchantability limits, while the stand yield model can be used to predict stand development over time. Both models are local, *i.e.* they have been specifically adjusted for each of the six reserves. A weakness of the stand yield model lies in the poor description of the mortality and thinning and in the lack of permanent plots. These models have been incorporated into a user-friendly computer simulation package and serve as yield forecasting tools in forest management.

Results obtained here will serve as a valuable information source for the management of the forest reserves studied. We hope that similar studies may be conducted for other planted species in Cameroon and elsewhere in the tropics where growth and yield models are still lacking.