Modèle de croissance en hauteur à partir de placettes temporaires pour Eucalyptus saligna au Cameroun

Jn Fonweban, F Houllier

▶ **To cite this version:**

Jn Fonweban, F Houllier. Modèle de croissance en hauteur à partir de placettes temporaires pour Eucalyptus saligna au Cameroun. Annales des sciences forestières, 1995, 52 (3), pp.263-281. hal-00882997

HAL Id: hal-00882997
https://hal.science/hal-00882997

Submitted on 11 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ann Sci For (1995) 52, 263-281
© Elsevier/INRA

Article original

Modèle de croissance en hauteur à partir de placettes temporaires pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun

JN Fonweban [1,2], F Houllier [2*]

[1] *Département de foresterie, université de Dschang, BP 234, Dschang, Cameroun ;*
[2] *ENGREF, laboratoire de recherches en sciences forestières, unité Dynamique des systèmes forestiers (associée à l'INRA), 14, rue Girardet, 54042 Nancy cedex, France*

(Reçu le 15 juillet 1994; accepté le 4 octobre 1994)

Résumé — La croissance en hauteur d'*Eucalyptus saligna* a été étudiée à partir de 239 placettes temporaires installées dans 6 réserves forestières du Cameroun. L'équation de Johnson-Schumacher s'est avérée la mieux adaptée. Les courbes moyennes ajustées pour chaque réserve présentent un polymorphisme élevé qui semble lié à des facteurs édaphiques et topographiques ainsi qu'à l'altitude. Afin d'augmenter la précision des prédictions, on a donc introduit une variable caractérisant la pente et la position topographique dans le modèle. Les modèles de croissance construits serviront ultérieurement pour la construction d'un modèle de production pour *Eucalyptus saligna*.

***Eucalyptus saligna* / croissance en hauteur / modèles de croissance / indice de fertilité / courbes polymorphes**

Summary — Height growth model based on temporary plot measurements for *Eucalyptus saligna* in Cameroon. *The height growth of* Eucalyptus saligna *(aged 4–19 years) was studied using data from 329 temporary plots established in 6 forest reserves in Cameroon. Of the 5 growth functions tested, the Johnson–Schumacher function best fitted the data set. The growth curves obtained revealed differences in growth patterns. The factors identified to be responsible for this polymorphic nature of the growth curves were, in decreasing order of importance, soil-type, slope, altitude and topographic location. The growth model obtained was hence modified to account for slope and topographic location. These models will serve as a basis for the development of a growth and yield model for* E saligna.

Eucalyptus saligna */ height growth / growth functions / site-index curves / polymorphism*

* Adresse actuelle : Institut français de Pondichéry, 11, Saint-Louis Street, PO Box 33, 605001 Pondicherry, Inde

INTRODUCTION

L'introduction des eucalyptus au Cameroun date de 1920 (Tchanou, 1975), mais ce n'est que vers 1930 que les plantations d'eucalyptus ont commencé à être établies sur des surfaces significatives (Njoukam, 1989). Parmi les espèces testées, *Eucalyptus saligna* a bien réussi. Aujourd'hui, elle occupe une place relativement importante du fait de ses multiples utilisations et de sa croissance rapide : les paysans l'utilisent pour le chauffage, pour les piquets et perches et pour la construction tandis que le gouvernement dépend uniquement des poteaux d'eucalyptus pour l'électrification rurale et urbaine. L'eucalyptus est aussi utilisé à grande échelle comme source d'énergie : 2 usines de production de thé de la Cameroon Development Corporation (CDC Ndu et CDC Djuttitsa) ont complètement abandonné l'utilisation du gazole au profit du bois d'eucalyptus pour le séchage du thé. De plus, les pays voisins (Tchad, Centrafrique, Nigeria) ont exprimé leurs besoins en poteaux d'eucalyptus (FAO/PNUD, 1988). Considérant l'importance économique que joue cette espèce, le plan d'action forestier tropical a recommandé la plantation de 1 000 ha par an d'eucalyptus et de pins dans la savane d'altitude de l'ouest du Cameroun et l'extension du programme à la zone aride du pays. Actuellement, on compte moins de 5 000 ha de plantations d'eucalyptus au Cameroun, mais le potentiel de reboisement est important : les réserves forestières de l'État, qui couvrent près de 102 000 ha dans l'ouest et le nord-ouest, sont à reboiser avec cette espèce. Les potentialités des eucalyptus comme bois de trituration ne sont pas encore exploitées ; néanmoins, l'exemple des plantations du Congo et du Brésil donne une idée de ce qu'on peut en espérer (Faure, 1990).

La demande de produits d'eucalyptus sera donc vraisemblablement croissante dans l'avenir. L'intensification de la production requiert cependant une sylviculture appropriée. Alors que les études sur la productivité des stations occupent une place importante en sciences forestières, il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'études de ce genre sur l'eucalyptus au Cameroun.

Pour définir un indice de productivité, la hauteur moyenne des arbres dominants s'est révélée un indicateur intéressant de la fertilité d'une station pour une espèce donnée. La hauteur dominante est en effet presque insensible aux variations de la densité et aux pratiques sylvicoles (Lanier, 1986) et elle est bien liée à la production en volume (Assmann, 1970). La construction de faisceaux de courbes hauteur–âge correspondant aux différentes classes de fertilité constitue une étape importante de la construction d'un modèle de croissance ou de tables de production. En fait, c'est la première «entrée» de toutes les tables de production : leur précision dépend donc en grande partie de la précision du modèle de croissance en hauteur dominante.

Le but de cette étude est de construire un modèle de croissance en hauteur dominante pour *Eucalyptus saligna* planté dans différentes réserves forestières du Cameroun. Les résultats serviront ultérieurement comme base pour la construction d'un modèle de production pour cette espèce.

En absence de placettes permanentes et du fait de l'impossibilité de pratiquer des analyses de tige (cernes et unités de croissance non visibles), nous avons choisi de baser cette étude sur des placettes temporaires. Cependant, comme l'utilisation des données transversales pose des problèmes statistiques particuliers (Houllier, 1990), nous avons stratifié l'échantillonnage par grand type de sol et cherché à tenir compte de l'effet de variables écologiques supplémentaires (pente, topographie).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Région d'étude (cf fig 1)

Les hauts plateaux de l'ouest du Cameroun, sont situés à plus de 1 000 m d'altitude. 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) et une saison sèche plus courte (2 à 3 mois) (Sieffermann, 1973). La température moyenne annuelle diffère selon l'altitude des plateaux : elle se situe autour de 21°C. 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

Les sols appartiennent à 3 grands types : les sols peu évolués, les sols hydromorphes et les sols ferralitiques. C'est sur ce dernier type de sols que se trouvent les plantations d'eucalyptus. On distingue plusieurs sous-types dans cette catégorie :

– les sols ferralitiques 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 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 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. Leur intérêt agricole est médiocre lorsque l'horizon induré est très proche de la surface. L'induration provient essentiellement des hydroxydes de fer et d'alumine, lorsqu'ils sont suffisamment concentrés (Martin et Segalen, 1966). Dans la plupart des cas, la cuirasse résulte de la variation de niveau d'une nappe phréatique avec engorgement et enrichissement des horizons profonds par des solutions riches en fer. L'érosion joue également un rôle important dans leur formation en mettant à nu, soit des horizons profonds durcis, soit des horizons riches en hydroxydes qui durcissent rapidement après exposition à l'air (Segalen, 1957). La réserve de Melap (3) est sur ce type de sol.

– Les sols ferralitiques humifères sont issus des basaltes et des trachytes du plateau de Bamenda-Nkambé, sous une pluviométrie 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 ferralitiques rouges. Les réserves de Bafut (6) et de Bali-Ngemba (7) sont sur ce type de sol.

– Les sols jeunes dérivés de roches volcaniques (sols noirs dérivés de lapilli) sont localisés dans l'ouest du Cameroun autour des édifices volcaniques récents. Ces sols sont généralement brun foncé ; cependant, on les appelle sols noirs en raison de la couleur généralement noire des lapilli. Ils possèdent une 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 en eau élevée. Leur pH varie entre 5,5 et 7,5. La teneur en matière organique varie entre 2 et 14% en surface, et diminue rapidement en profondeur. Le rapport C/N indique une matière organique évoluée et l'humus apparaît en général satisfaisant pour des sols tropicaux. La concentration en azote est bonne dans les horizons supérieurs mais souvent un peu faible en profondeur. La réserve de Baleng (1) est sur ce type de sols.

Plan d'échantillonnage

Les données utilisées proviennent de 329 placettes temporaires qui ont été sélectionnées selon la procédure suivante.

Dans un premier temps, six strates ont été choisies : il s'agit de réserves forestières situées dans des conditions écologiques différentes (altitude, sol, pluviométrie ; voir tableau I et paragraphe précédent).

Au sein de chaque strate, nous avons recherché des parcelles d'âges différents.

Dans chaque parcelle, qui correspond donc à une année de plantation, des placettes ont été

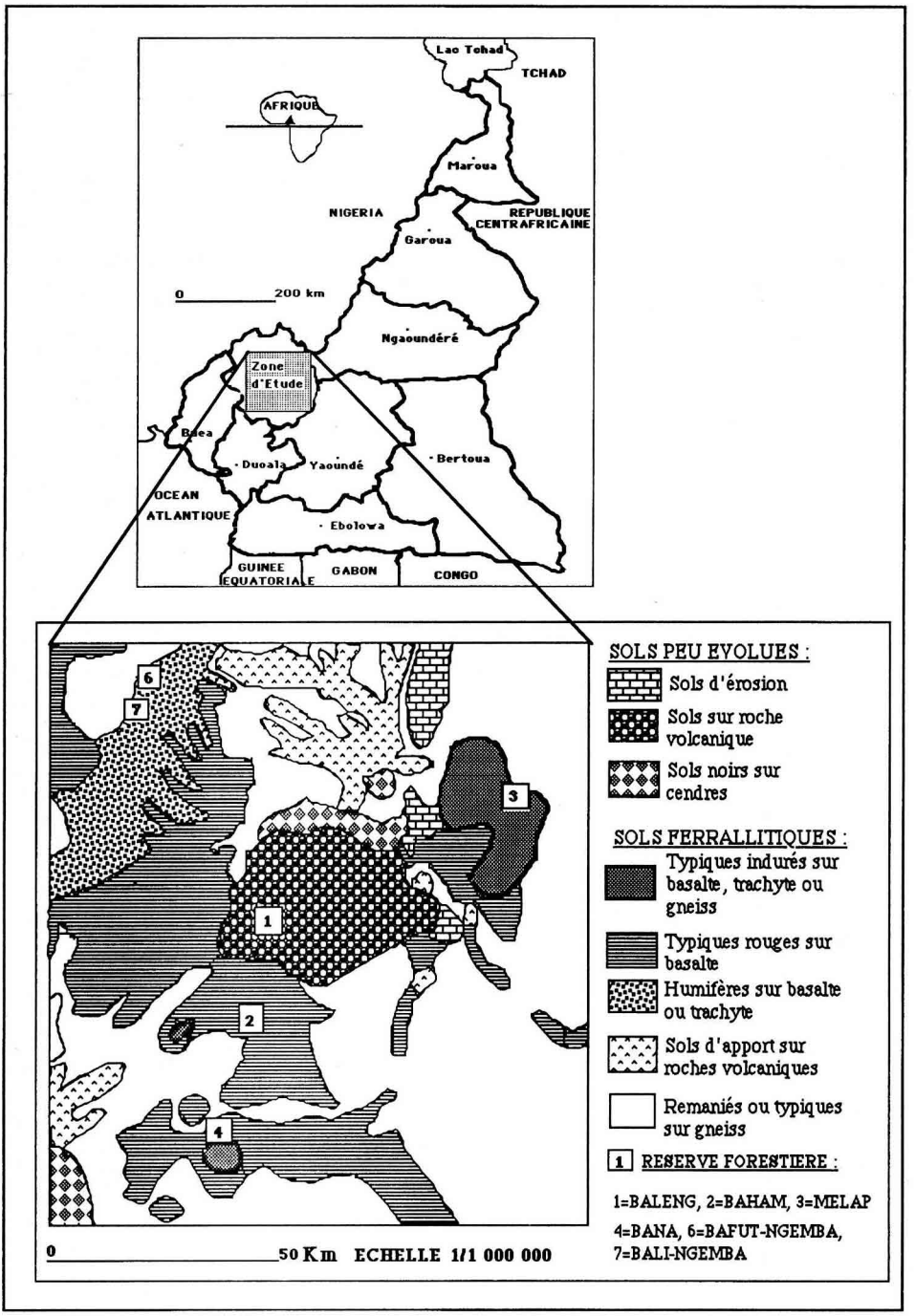

Fig 1. Localisation de la zone d'étude, réserves étudiées et type de sols dans la zone.

Tableau I. Résumé des caractéristiques des sites étudiés.

Réserve [a]	*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

[a] Les numéros entre parenthèses sont utilisés pour désigner chaque réserve (1 = Baleng, 2 = Baham, *etc*) ; Ferr : sol ferralitique, *P* : pluviométrie annuelle, *T* : température moyenne annuelle.

installées de façon à couvrir la diversité des conditions topographiques relatives (sommet, haut, milieu et bas de pente) et la pente a été mesurée (avec le dendromètre Blume-Leiss) pour chaque placette (dans certaines réserves seulement). Le tableau II montre la répartition des placettes dans les différentes réserves et classes d'âge.

La surface de chaque placette varie entre 100 m^2 (10 m x 10 m) et 400 m^2 (20 m x 20 m). Dans chaque placette, 4 à 6 arbres parmi les plus gros et les plus hauts appartenant à l'étage dominant ont été choisis. Leur hauteur a été mesurée avec le dendromètre Blume-Leiss. La hauteur dominante de la placette (H_0) a été esti-

Tableau II. Structure du plan d'échantillonnage : nombre de placettes échantillonnées dans chaque réserve forestière aux différents âges.

Âge	*Réserve forestière*						*Total*
	1	*2*	*3*	*4*	*6*	*7*	
03	–	–	–	07	–	–	07
05	–	–	–	08	–	08	16
06	06	06	04	05	–	–	21
07	04	–	–	05	09	–	18
08	–	04	–	05	08	03	20
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	03	12
15	06	05	03	–	08	–	22
16	07	04	–	–	–	–	11
17	–	05	05	–	09	04	23
18	03	04	05	–	09	03	24
19	–	–	–	–	06	02	08
Total	57	40	49	53	91	39	329

mée par la moyenne de ces 4 à 6 hauteurs individuelles : il s'agit donc de la hauteur moyenne des arbres dominants, qui peut différer de la hauteur moyenne des 100 plus gros par hectare.

Équations de croissance en hauteur et méthode d'ajustement

En absence de données longitudinales, nous avons utilisé la méthode dite de Bruce et Schumacher (1950) (Ottorini et Nys, 1981). La croissance en hauteur est reconstituée à partir de l'observation, à un moment donné, de placettes d'âges différents dont on suppose qu'elles représentent différents stades de développement d'un même peuplement pour des conditions écologiques données.

Cette méthode pose cependant des problèmes car elle est sensible à la structure du plan d'échantillonnage : s'il existe une liaison entre l'âge des placettes échantillonnées et leur fertilité, la courbe moyenne de croissance ajustée peut être biaisée (Houllier, 1990). Afin de pallier, au moins partiellement, cette difficulté, nous avons choisi d'ajuster une courbe de croissance pour chacune des strates (réserves). Par ailleurs nous avons analysé le plan d'échantillonnage au sein de chaque réserve à l'aide d'un graphique (âge, hauteur). Nous observons les déséquilibres suivants (fig 2) : les placettes de moins de 6 ans sont peu représentées et il y a des «trous» pour certaine classes d'âge et certaines réserves ; par exemple, il n'existe pas de placettes âgées dans la réserve de Bana. Par ailleurs il semble qu'au sein des réserves de Baleng, Bafut et Bali les peuplements les plus âgés soient situés sur les stations les moins fertiles. Ces déséquilibres peuvent induire des biais, mais ils étaient inévitables du fait que l'échantillonnage a été basé sur les plantations existantes.

En l'absence d'un modèle de croissance pour l'*Eucalyptus saligna* au Cameroun, la première tâche a consisté à rechercher une équation qui s'ajuste bien aux données. Nous avons passé en revue différentes équations fréquemment utilisées (voir tableau III) et avons essayé de les ajuster, soit globalement (toutes strates confondues), soit strate par strate. L'algorithme utilisé pour la minimisation de la somme des carrés des écarts est celui de Gauss-Marquardt. Pour chaque modèle, nous avons fourni les fonctions de sensibilité par rapport à chaque paramètre. Sous certaines hypothèses (normalité, homoscédasticité et indépendance des erreurs), les estimateurs sont asymptotiquement exacts (Seber et Wild, 1989). Les modèles ajustés ont été évalués et comparés selon les critères suivants : bon comportement qualitatif, faible carré moyen résiduel (CMR) et bon comportement des résidus (par analyse graphique).

L'objectif était de construire un modèle aussi simple et aussi général que possible. L'hypothèse de départ était que la croissance dans les différentes réserves étudiées à la même allure

Tableau III. Modèles de croissance testés.

Appellation du modèle	*Équation*
Logistique (Verhulst)	$Ho(t) = K[1 + \exp(a(t0 - t))]^{-1}$
Gompertz	$Ho(t) = K \exp(-\exp(a(t0 - t)))$
Monomoléculaire (Mitscherlisch)	$Ho(t) = K[1 - \exp(a(t0 - t))]$
Logistique généralisé (Chapman-Richards, von Bertalanffy)	$Ho(t) = K[1 + (m - 1) \exp(a(t0 - t))]^{-1/(m-1)}$
Lundqvist-Matern	$Ho(t) = K \exp(-(1 / at)^m)$

t : âge ; K : asymptote (taille maximale) ; a : inverse d'une constante de temps ; m : position verticale du point d'inflexion : forme de la courbe ($m \geq 0$ pour Lundqvist-Matern ; $1 \geq m \geq 0$ pour Chapman-Richards) ; $t0$: âge du point d'inflexion ou origine du temps (Houllier, 1994).

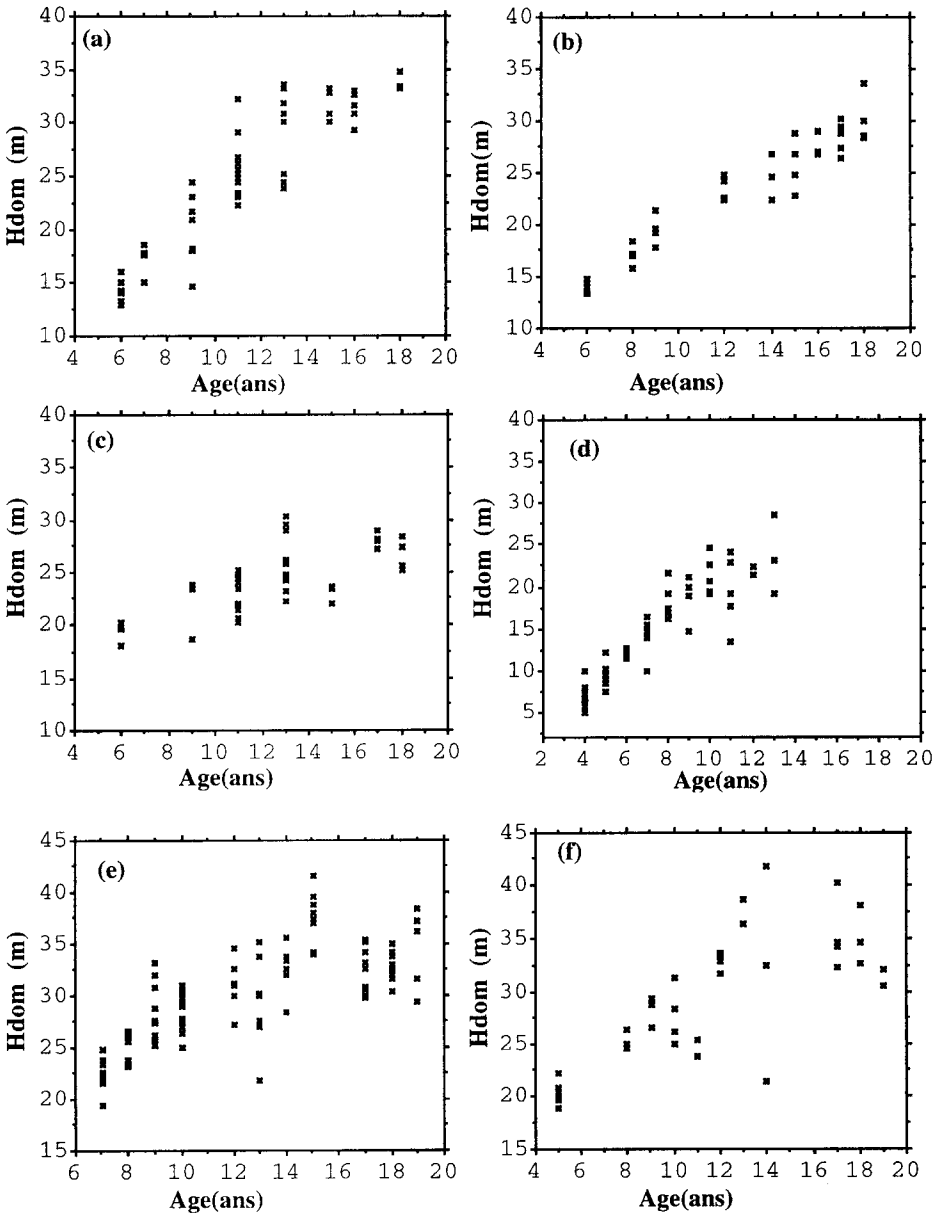

Fig 2. Répartition des placettes échantillonnées par réserve et par classe d'âge : (a) Baleng ; (b) Baham ; (c) Melap ; (d) Bana ; (e) Bafut ; (f) Bali.

et que ce sont les paramètres de l'équation qui varient d'une réserve à l'autre. Pour l'équation retenue, nous avons ajusté i) un modèle global (toutes réserves confondues) et ii) des modèles locaux (ajustement séparé pour chaque réserve). Nous avons alors comparé ces 2 ajustements de la manière suivante. Soient *SCR* la somme des carrés des écarts résiduels du modèle global et *ddl* le nombre de degrés de liberté correspondant ; SCR_i la somme des carrés des écarts résiduels de chaque modèle local (pour la réserve *i*) et ddl_i le nombre de degrés de liberté correspondant. Sous les hypothèses de normalité, d'homoscédasticité et d'indépendance des erreurs et sous l'hypothèse nulle d'identité des modèles locaux, la statistique :

$$F_{obs} = \frac{SCR - \sum_{i=1}^{n} SCR_i}{ddl - \sum_{i=1}^{n} ddl_i} \quad \frac{\sum_{i=1}^{n} SCR_i}{\sum_{i=1}^{n} ddl_i}$$

suit une distribution de Fisher $F_{(v1,v2)}$

où $v1 = (ddl - \sum_{i=1}^{n} ddl_i)$, $v2 = \sum_{i=1}^{n} ddl_i$

(Tomassone *et al*, 1983) et *n* est le nombre de strates. Le test qui s'en déduit est asymptotique dans le cas d'un modèle non linéaire.

Nous avons alors recherché un compromis entre ces 2 modèles (ajustement global et ajustements locaux) en essayant de limiter le nombre de paramètres et d'obtenir une bonne description de la variabilité inter-site des courbes de croissance en hauteur. Nous avons ensuite tenté d'introduire la pente et la position topographique de la placette pour améliorer l'ajustement du modèle.

RÉSULTATS

Modèle global et modèles par réserve

L'ajustement des différentes équations a conduit au choix du modèle de Johnson-Schumacher (une forme particulière du modèle de Lundsqvist-Matern avec $m = 1$). Le modèle monomoléculaire a présenté des performances voisines, mais nous ne l'avons pas retenu car il compte un paramètre de plus (tableaux IV et V). Quoi qu'il en soit, le déséquilibre du plan d'échantillonnage et l'absence de données longitudinales ne permettent pas d'affirmer avec certitude que l'équation de Johnson-Schumacher est la meilleure.

Les résultats des différents ajustements du modèle de Johnson-Schumacher sont présentés au tableau VI. Nous avons d'abord ajusté le modèle global (A) et le modèle local (D). En notant *i* l'indice de chaque réserve et après reparamétrisation ($b = 1/a$) :

$$H0_i(t) = K \exp(-b/t) \qquad [A]$$

$$H0_i(t) = K_i \exp(-b_i/t) \qquad [D]$$

Tableau IV. Ajustement des modèles globaux de croissance en hauteur pour *Eucalyptus saligna*.

Modèle	*ddl*	*SCR*	*CMR* (m^2)	$K \pm \sigma_K$ (*m*)	$b \pm \sigma_b$ [a] (*an*)	$m \pm \sigma_m$ (–)
Schumacher	327	6197,11	18,9514	45,1895 ± 1,2310	6,1582 ± 0,3049	–
Monomoléculaire	326	6204,22	19,0314	34,9030 ± 1,4665	0,1505 ± 0,0221	1,3356 ± 0,1439

[a] b = 1/a dans le modèle de Lundqvist-Matern ; les modèles logistique de Gompertz, de Chapman-Richards et de Lundqvist-Matern n'ont pas convergé avec l'algorithme de Marquardt.

Tableau V. Valeurs de carré moyen résiduel *(CMR)* pour les modèles de Johnson-Schumacher et monomoléculaire par réserve.

Réserve	*Modèle*	
	Johnson-Schumacher	*Monomoléculaire*
1	6,28	6,31
2	2,61	2,28 [a]
3	4,35	4,29 [a]
4	5,47	5,55
6	8,91	8,65
7	13,25	13,42

[a] L'un des coefficients estimé n'était pas significativement différent de 0.

Un test de comparaison entre les modèles [A] et [D] a permis de rejeter l'hypothèse d'identité des courbes entre réserves forestières (F_{obs} = 57,16 > $F_{,05(10,317)}$) : la valeur de CMR pour les modèles locaux (6,97 m^2) est nettement et significativement plus faible que pour le modèle global (18,95 m^2) (tableau VI). La croissance diffère donc dans au moins l'une des réserves (c'est-à-dire que K et b ne sont pas identiques pour toutes les réserves).

En examinant les variations du paramètre b d'une réserve à l'autre, on distingue 2 groupes de réserves : les réserves 1, 2 et 4 (GP_I) et les réserves 3, 6 et 7 (GP_{II}). Nous avons donc réajusté le modèle séparément pour chacun des 2 sous-groupes GP_I et GP_{II} (tableau VI, Modèle par groupe [B]) :

Tableau VI. Ajustement de l'équation de Johnson-Schumacher : modèles global (A), par groupes de réserves (B), par réserve dans chaque groupe (C), et pour chaque réserve prise individuellement (D).

	Groupe	*Réserve*	*ddl*	*SCR*	*CMR (m^2)*	*$K \pm \sigma_K$ (m)*	*$b \pm \sigma_b$ (an)*
Modèle global (A)			327	6197,1	18,95	45,19 ± 1,23	6,158 ± 0,305
Modèle par groupe (B)	GPI		148	1200,4	8,11	48,39 ± 1,48	7,944 ± 0,334
	GPII		177	2945,7	16,64	39,41 ± 1,26	3,735 ± 0,359
	Total		325	4146,1	12,76		
Modèle avec variables muettes (C)	GPI	1	–	359,2	–	50,71 ± 1,53	7,511 ± 0,461
		2	–	105,1	–	44,19 ± 1,32	7,511 ± 0,461
		4	–	282,5	–	42,38 ± 1,82	7,511 ± 0,461
	GPII	3	–	213,5	–	33,85 ± 0,88	3,978 ± 0,302
		6	–	801,4	–	42,51 ± 0,92	3,978 ± 0,302
		7	–	490,9	–	43,34 ± 1,09	3,978 ± 0,302
Total			321	2254,3	7,02		
Modèle local (D)		1	55	345,3	6,28	54,14 ± 2,43	8,303 ± 0,527
		2	38	99,2	2,61	42,12 ± 1,33	6,881 ± 0,388
		3	47	204,4	4,35	31,83 ± 1,37	3,212 ± 0,508
		4	51	279,1	5,47	40,45 ± 2,42	7,090 ± 0,505
		6	89	792,6	8,91	43,85 ± 1,45	4,358 ± 0,387
		7	37	490,1	13,25	42,84 ± 2,09	3,851 ± 0,486
Total			317	2210,7	6,97		

$$H0_i(t) = K_g \exp(-b_g/t)$$

(i = réserve, g = sous-groupe) [B]

Un nouveau test de comparaison entre les modèles par groupe et les modèles par réserve a permis de rejeter l'hypothèse d'égalité des paramètres K et b au sein de chaque sous-groupe : $F_{obs} = 23{,}72 > F_{,05(4,144)}$ pour GP_I, $F_{obs} = 85{,}82 > F_{,05(2,175)}$ pour GP_{II}. La valeur moyenne de CMR (12,76 m^2) est plus faible que celle obtenue par le modèle global, mais elle est proche du double de la valeur obtenue pour le modèle local.

Nous avons finalement procédé à un autre ajustement en imposant une même valeur de b au sein de chaque sous-groupe (technique des variables muettes). Le modèle est de la forme :

$$H0_i(t) = K_i \exp(-b_g/t)$$

(i = réserve, g = sous-groupe) [C]

Les résultats de cet ajustement sont indiqués dans le tableau VI (modèle avec variables muettes [C]) et les courbes moyennes par réserve sont représentées à la figure 3. Un test de comparaison des modèles emboîtés [C] et [B] a donné : $F_{obs} = 67{,}34 > F_{,05(4,321)}$ (l'hypothèse nulle étant : $K_1 = K_2 = K_4 = K_I$ et $K_3 = K_6 = K_7 = K_{II}$). Un autre test de comparaison entre les modèles [C] et [D] a donné : $F_{obs} = 1{,}56 < F_{,05(4,317)}$ (l'hypothèse nulle étant : $b_1 = b_2 = b_4 = b_I$ et $b_3 = b_6 = b_7 = b_{II}$). Nous avons donc retenu le modèle [C] : b est constant au sein de chaque sous-groupe, tandis que K varie d'une réserve à l'autre.

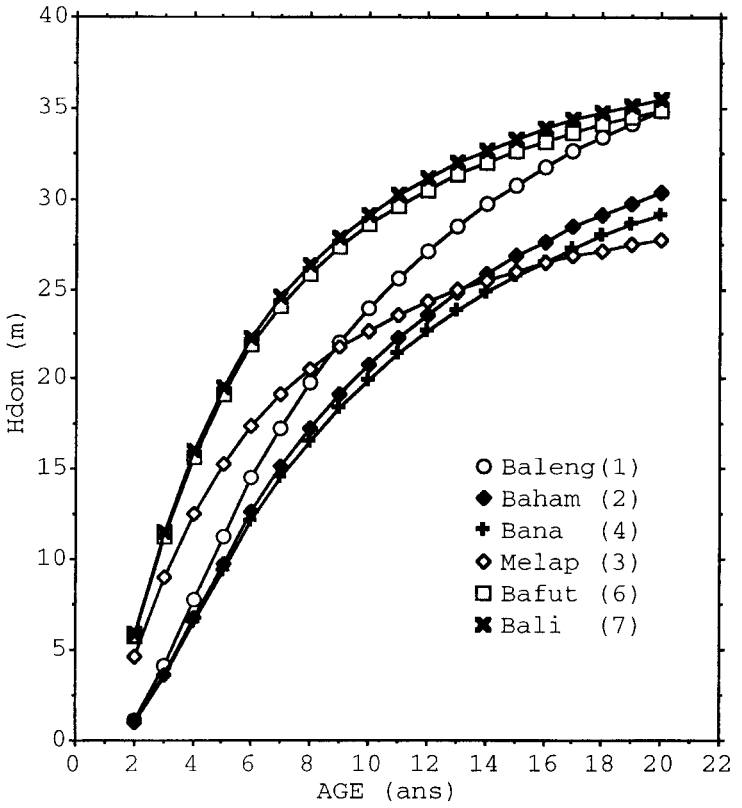

Fig 3. Courbes de croissance en hauteur dominante d'*Eucalyptus saligna* ajustées dans chaque réserve forestière : modèle avec variable muette (C).

Allures de croissance (cf fig 3)

Les courbes ajustées avec le modèle (C) montrent une nette différenciation entre les 2 groupes de réserves : la croissance initiale en hauteur est sensiblement plus rapide pour GP_{II} (réserves 3, 6 et 7) que pour GP_{I} (réserves 1, 2 et 4). Au sein de GP_{II}, les écarts entre réserves s'accentuent sensiblement avec l'âge : la croissance initiale dans la réserve 3 (Melap) est forte mais elle se ralentit ensuite très rapidement et devient inférieure à celle des réserves les moins fertiles de GP_{I} ; les réserves 6 (Bafut-Ngemba) et 7 (Bali-Ngemba) ont des performances voisines et sont les plus fertiles. Pour GP_{I}, la croissance initiale est modérée, mais le rythme de croissance s'infléchit moins par la suite ; il n'apparaît pas une différenciation majeure au départ, mais les écarts s'accentuent sensiblement après 7 ans ; dans la réserve 1 (Baleng), la croissance est soutenue et vers 19 ans la hauteur dominante rejoint celle des réserves 6 et 7 ; les courbes de croissance pour les réserves 2 (Baham) et 4 (Bana) sont proches et correspondent à de faibles rythmes de croissance.

Au vu de ces résultats, il semble donc qu'il existe au moins 2 facteurs de variation des courbes de croissance en hauteur : un facteur qui conditionne la vitesse de croissance initiale et un facteur qui conditionne la performance à moyen/long terme, facteur qui mérite mieux le terme de fertilité.

Influence des facteurs topographiques sur la croissance

Ainsi que l'ont montré divers auteurs, la topographie est un facteur important de la fertilité (Zedaker *et al* (1987) et Hocker (1979) pour l'effet de la pente ; Garbaye (1979), Le Goff et Levy (1984) et Tanghe (1991) pour l'effet de la position topographique). Elle conditionne en effet aussi bien l'alimentation en eau (en fonction du bilan des pertes et apports latéraux) que la nutrition (érosion et entraînement des éléments minéraux sur les pentes, accumulation dans les bas de pente). L'influence de la topographie est analysée ici selon 2 critères complémentaires : la valeur de la pente maximale sur la placette et la position topographique (le long d'un versant). Ces 2 critères n'ayant pas été systématiquement relevés dans les premières réserves étudiées, leur effet n'a pu être étudié que pour certaines réserves.

Effet de la pente (réserves 1, 2, 3, 4 et 7)

Pour analyser si la pente a une influence sur la croissance, nous avons représenté les résidus d'estimation des courbes de croissance obtenues avec le modèle [C] en fonction de la pente (fig 4). Nous avons constaté qu'il y a une légère tendance décroissante des résidus avec la pente : le modèle [C] tend à sous-estimer la croissance lorsque la pente est faible et à la surestimer lorsqu'elle est forte. Nous avons donc modifié le modèle (C) en introduisant l'effet de la pente (p, mesurée en degrés) sous la forme suivante (tableau VII).

$$H0_i(t) = (K_i + c.p^2).\exp(-b_g/t)$$
$$(i = \text{réserve}, g = \text{sous} - \text{groupe}) \qquad [C']$$

Le choix d'un paramètre c commun aux différentes réserves a été fondé sur divers ajustements et sur des comparaisons de modèles emboîtés du même type que celles qui ont déjà été présentées.

Un test de comparaison entre les modèles incluant la pente (C') et n'incluant pas la pente (C) indique que l'effet de la pente est significatif : $F_{obs} = 17{,}93 < F_{.05(1,233)}$. La figure 5 illustre la variation de la hauteur dominante en fonction de la pente dans la réserve de Baleng (réserve 1). On

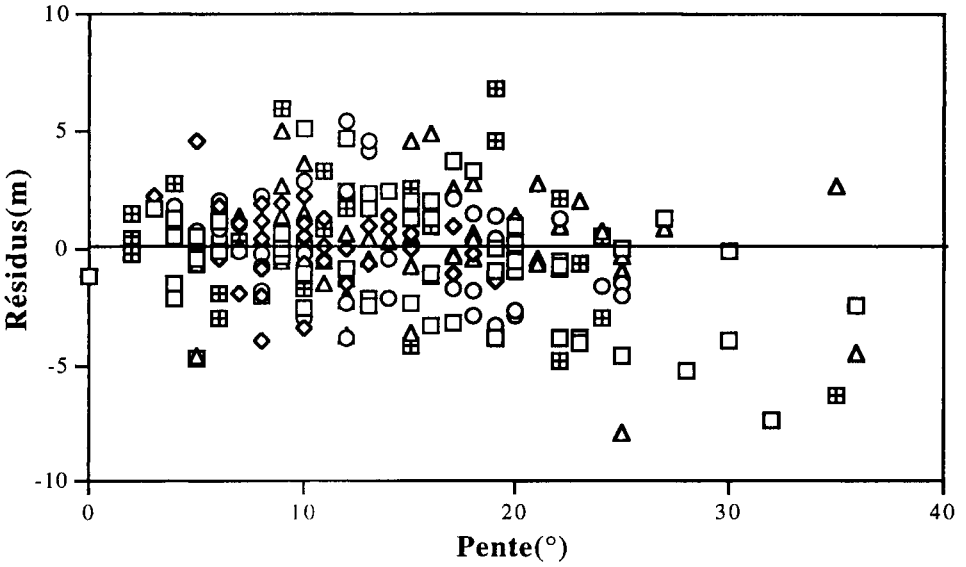

Fig 4. Nuage de points des résidus d'estimation des courbes de croissance obtenues avec le modèle (C) en fonction de la pente (réserves 1, 2, 3, 4 et 7).□ Baleng (1) ;◇ Baham (2) ; O Melap (3) ; Δ Bana (4) ; ⊞ Bali (7).

constate que c'est à partir de 10° que l'effet de la pente commence à se faire sentir (les courbes correspondant à $p = 0°$ et 10° sont presque confondues). Pour les pentes de plus de 20° il y a une forte diminution de la croissance.

Effet de la position topographique sur la croissance (réserves 2, 4 et 7)

L'examen de la position topographique montre que les peuplements situés en bas de pente sont en général plus hauts que ceux

Tableau VII. Ajustement de l'équation de Johnson-Schumacher en incluant l'effet de la pente : modèle (C').

Sous-groupe	*Réserve*	$K_i \pm \sigma_{K_i}$ *(m)*	$b_g \pm \sigma_{b_g}$*(an)*	$c \pm \sigma_c$ *(degré$^{-1}$)*
GPI	1	52,97 ± 1,54	7,803 ± 0,443	0,0053 ± 0,0013
	2	45,82 ± 1,27	7,803 ± 0,443	0,0053 ± 0,0013
	4	45,37 ± 1,78	7,803 ± 0,443	0,0053 ± 0,0013
GPII	3	34,39 ± 0,92	3,777 ± 0,346	0,0053 ± 0,0013
	7	43,61 ± 1,16	3,777 ± 0,346	0,0053 ± 0,0013

Avec ddl = 233 ; SCR = 1 331,23 ; CMR = 5,71 m² ; CMR (pour modèle (C) ajusté pour les réserves 1, 2, 4, 3, 7) = 6,13 m² ; SCR = 1 433,7 ; ddl = 234).

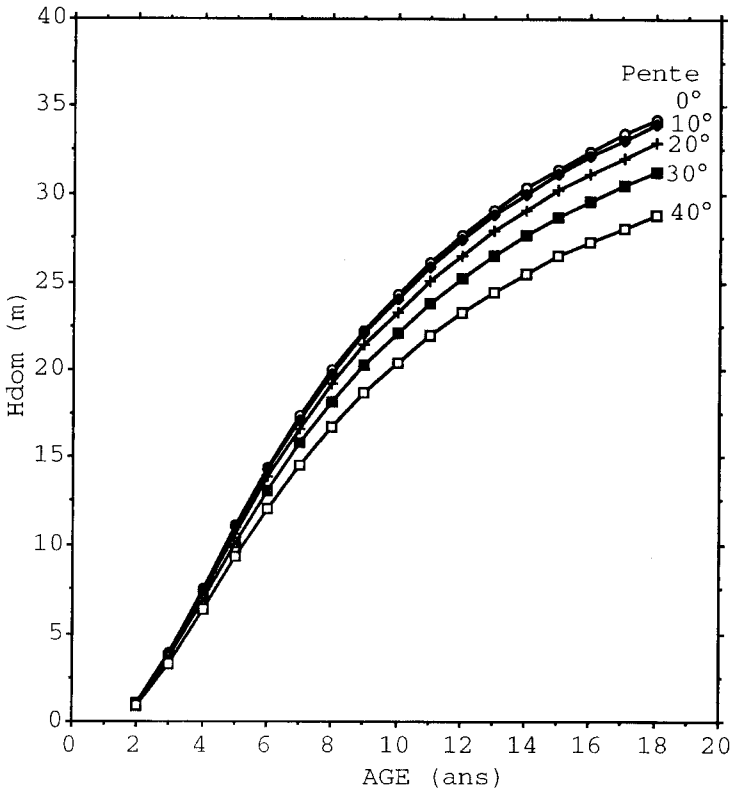

Fig 5. Illustration de l'effet de la pente sur les courbes de croissance en hauteur (réserve 1).

situés au sommet des pentes. Une analyse de variance a donc été effectuée sur les résidus obtenus avec le modèle incluant la pente (C') pour tester si la position topographique a un effet significatif sur la croissance dans chaque réserve (tableau VIII).

À partir de ces analyses, on constate que la position topographique n'a un effet significatif sur la croissance en hauteur dominante que dans la réserve 2. La non significativité dans d'autres réserves peut être due à la nature des données (faibles effectifs, situations peu contrastées dans les réserves 4 et 7, définition parfois imprécise de la position topographique). Les résultats de la réserve 7 sont sans doute dus i) au contraste entre des parcelles situées dans des dépressions et des parcelles à flanc de colline et ii) au fait que nous avons utilisé la position topographique relative (au sein de chacune de ces parcelles) et non pas un système absolu de notation. Cependant, après avoir observé que les stations de sommet (SOM) et de haut de pente (HP) ont des performances voisines et qu'il en est de même pour les stations de bas de pente (BP) et milieu de pente (MP), nous avons ajusté le modèle suivant (tableau IX) :

$$Ho_i(t) = (K_i + c.p^2 + d.topo).\exp(-b_g/t)$$
(i = réserve, g = sous – groupe) [C]

où d est un paramètre global et *topo* est une variable muette qui vaut 0 pour SOM et HP et 1 pour MP et BP. On vérifie que le paramètre d est significativement différent de 0 et que l'adjonction de la topographie

Tableau VIII. Effet de la position topographique : analyse de variance des résidus du modèle (C').

Réserve	$F_{observé}$	F_{tab}	*Conclusion*
Anova avec SOM, HP, MO et BP			
2	3,68	$F_{,05(3,37)} = 2,84$	S
4	0,99	$F_{,05(3,50)} = 2,76$	NS
7	0,15	$F_{,05(2,33)} = 2,49$	NS
Global	2,40	$F_{,05(3,127)} = 2,68$	NS
Anova avec MP et BP fusionnés ainsi que SOM et HP			
2	9,53	$F_{,01(1,39)} = 7,31$	TS
4	2,48	$F_{,05(1,52)} = 4,03$	NS
7	0,19	$F_{,05(1,34)} = 4,13$	NS
Global	6,37	$F_{,05(1,129)} = 3,92$	S

BP : bas de pente ; MP : milieu de pente ; HP : haut de pente ; SOM : sommet ; niveaux de signification : S : significatif ; NS : non significatif ; TS : très significatif.

Tableau IX. Ajustement de l'équation de Johnson-Schumacher incluant la pente et la position topographique : modèle (C'').

Sous-groupe	*Réserve*	$K_i \pm \sigma_{K_i}$ *(m)*	$b_g + \sigma_{b_g}$ *(an)*	$c \pm \sigma_c$ *(degré $^{-1}$)*	$d \pm \sigma_d$*(m)*
GPI	2	41,82 ± 1,31	7,033 ± 0,557	0,0041 ± 0,0016	2,759 ± 0,933
	4	39,54 ± 1,79	7,033 ± 0,557	0,0041 ± 0,0016	2,759 ± 0,933
GPII	7	39,90 ± 1,55	3,483 ± 0,435	0,0041 ± 0,0016	2,759 ± 0,933

Avec ddl = 125 ; SCR = 593,71 ; CMR = 4,75 m^2. CMR pour modèle (C) (avec réserves 2, 4, 7) = 5,20 m^2 ; SCR = 660,8 ; ddl = 127. CMR pour modèle (C') (avec réserves 2, 4, 7) = 5,07 m^2 ; SCR = 638,5 ; ddl = 126.

diminue sensiblement *CMR* de 5,07 m^2 (modèle [C']) à 4,75 m^2 (modèle [C"]).

DISCUSSION

Interprétation des courbes de croissance

Ces résultats indiquent clairement que la croissance en hauteur de l'*Eucalyptus saligna* varie en fonction de la station sous l'effet de divers facteurs et que cette variation ne peut pas être exprimée par un paramètre unique (un indice de fertilité) qui serait valable pour toutes les réserves : d'un groupe de réserves à l'autre, les courbes de croissance sont en effet sécantes. Ce résultat infirme l'hypothèse du faisceau de courbes anamorphes, hypothèse commode qui est fréquemment émise et qui constitue le fondement de la méthode de la courbe guide (Clutter *et al,* 1983). Plusieurs autres

études ont d'ailleurs indiqué que la forme de la courbe de croissance en hauteur d'une même espèce peut varier d'un site à un autre du fait de l'interaction des facteurs édaphiques, topographiques et climatiques. Le tableau X rassemble des références de divers travaux qui ont abouti à la construction de courbes de croissance polymorphes. Ces exemples nous incitent à penser que la différenciation de la croissance dans les 6 réserves peut être due à des facteurs pédologiques et/ou climatiques.

Facteurs pédologiques

En examinant les différents types de sol dans la zone d'étude, on constate que les réserves sont toutes sur des sols ferralitiques. Néanmoins, on observe que les roches-mères ne sont pas les mêmes dans toutes les réserves, ce qui peut donner lieu à des sols ferralitiques ayant des propriétés physico-chimiques différentes. À cause de la pédogenèse différenciée (Martin et Segalen, 1966 ; Sieffermann, 1973 ; Valet, 1980), ces sols ont aussi évolué plus ou moins différemment :

– Dans la réserve de Melap, le phénomène d'induration a produit une cuirasse latéritique (des concrétions) proche de la surface du sol qui limite la profondeur de sol prospectable par les racines : ceci peut expliquer pourquoi la croissance se ralentit très rapidement.

– Les réserves de Bali-Ngemba (7), Bafut-Ngemba (6) et Baleng (1) sont situées sur des sols fertiles, riches en éléments nutritifs (Hawkins et Brunt, 1965 ; Valet, 1980 ; Vallerie, 1971), ce qui explique leurs meilleures performances.

– Quant aux mauvaises performances dans les réserves de Baham (2) et de Bana (4), nous pensons qu'elles sont dues au fait qu'elles sont situées sur des collines (Baham sur les collines de Chengue (1 500 m-1 889 m) ; Bana sur le versant du mont Batchingou (2 097 m)) où les sols sont appauvris par l'érosion. Les profils de sol dans ces réserves indiquent la présence de concrétions latéritiques, avec de véritables

Tableau X. Quelques études révélant l'existence de courbes polymorphes de croissance.

Auteur	*Espèce étudiée*	*Pays (lieu d'étude)*
Le Goff (1981)	*Fagus sylvatica*	Nord-ouest et nord-est de la France
Madesclaire (1986)	*Acer pseudoplatanus, Prunus avium*	Lorraine (France)
Sindou et Madesclaire (1986)	*Larix decidua*	Lorraine (France)
Zahner (1962)	*Pinus taeda*	Arkansas/Louisiane (États-Unis)
Newberry et Pienaar (1978)	*Pinus elliottii*	États-Unis
Spurr (1952)	*Pinus monticola*	États-Unis
Carmean (1956)	*Pseudotsuga menziesii*	États-Unis
Coile et Schumacher (1953)	*P taeda, P echninata*	États-Unis
Turvey (1983)	*Pinus radiata*	Victoria (Australie)
Schönau (1973)	*Accacia mearnsii*	Kenya (Afrique de l'Est)
Carmean et Lenthall (1989)	*Pinus banksiana*	Ontario (Canada)
Monserud (1984)	*Pseudotsuga menziesii*	États-Unis

cuirasses par endroits (Kamdem, 1976 ; Kamaha, 1976).

Facteurs climatiques (altitude)

La différence de croissance entre Baham et Bana n'est pas très grande : en fait, les 2 réserves ne sont pas très éloignées géographiquement (*cf* fig 1) mais elles sont situées à des altitudes différentes (1 500-1 889 m pour Baham et 2 097 m pour Bana) (tableau I). De même, les réserves de Bafut-Ngemba et de Bali-Ngemba sont proches et ont une fertilité voisine : la différence en faveur de Bali-Ngemba peut, là aussi, être due à l'altitude (fig 6).

Selon le CTFT (1959), la réussite des plantations d'*Eucalyptus saligna* est la meilleure pour les altitudes comprises entre 750 et 1 500 m. Certaines études (Evans, 1974 ; Oswald, 1989 ; Ottorini et Nys, 1981) ont indiqué que la croissance d'une espèce peut diminuer avec l'altitude dès qu'on atteint un certain seuil critique. Par exemple, Evans (1974) a observé une augmentation de la croissance en hauteur dominante de *Pinus patula* au Swaziland avec l'altitude jusqu'à un maximum vers environ 1 200 m, puis une diminution progressive de la croissance avec l'altitude. Nous supposons donc que la différence indiquée à la figure 6 pour les 2 groupes de réserves est due à l'altitude.

Signalons cependant qu'il est difficile ici de séparer les effets de l'altitude et du type de sol. Deux hypothèses peuvent donc être avancées : i) une hypothèse pédologique : la richesse du sol en éléments nutritifs et en eau joue un rôle déterminant sur la per-

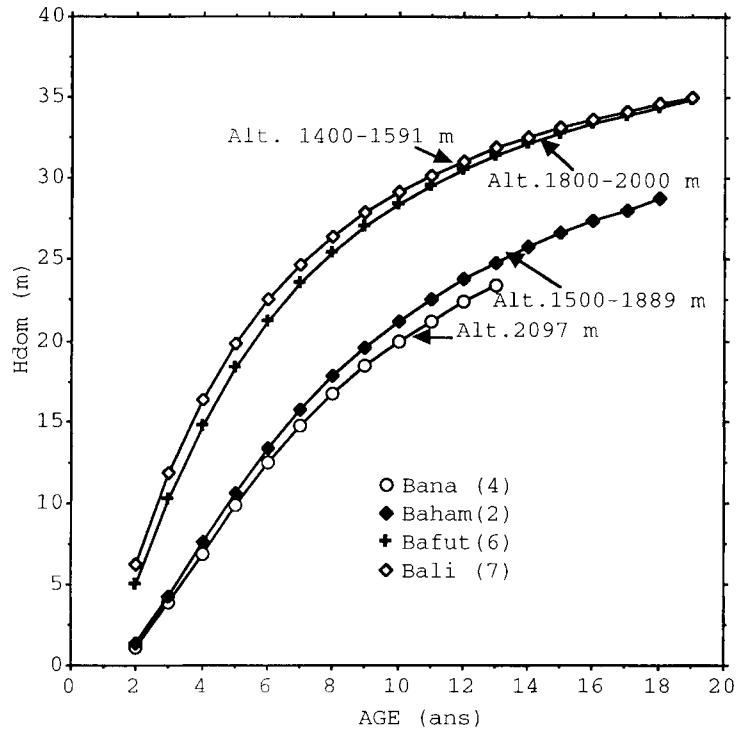

Fig 6. Croissance en hauteur d'*Eucalyptus saligna* sur 2 types de sols et à des altitudes différentes à partir du modèle D : réserves (2) et (4) sur sols ferralitiques rouges : réserves (6) et (7) sur sols ferralitiques humifères.

formance des eucalyptus ; ii) une hypothèse «géoclimatique» : l'altitude a un effet sur la croissance des eucalyptus dans les différentes réserves. Nous n'avons pas assez d'informations pour tester complètement ces 2 hypothèses, mais il semble que l'effet du sol soit prépondérant.

Estimation de l'indice de fertilité

L'indice de fertilité (*Ip* ou *S* = site index) est, par définition, la hauteur dominante atteinte par un peuplement à un âge de référence, *Ar*, donné. Nous avons choisi un âge de référence (t_r) de 10 ans, proche de l'âge d'exploitabilité, car beaucoup de peuplements d'*Eucalyptus saligna* sont exploités vers 10 à 12 ans (Pande, 1974 ; FAO, 1982 ; Poynton, 1981 ; Shiver et Brister, 1990) pour les poteaux (c'est la principale utilisation des eucalyptus actuellement au Cameroun). La courbe guide : $H_0(t) = K \exp(-b/t)$ donne $Ip = K \exp(-b/t_r)$ quand $t = t_r$, d'où : $K = Ip / \exp(-b/t_r)$, puis :

$$H_0(t) = Ip.\exp[-b(1/t - 1/t_r)]$$

La méthode employée et la nature stratifiée du plan d'échantillonnage permettent d'appliquer cette procédure au sein de chaque groupe de réserve. Elle peut même être affinée pour les réserves où la pente et la position topographique ont été observées. En fonction de la réserve étudiée, nous conseillons d'ailleurs d'utiliser le modèle C, C' ou C" (tableau XI).

CONCLUSION

Les objectifs de cette étude étaient les suivants : ajuster des modèles de croissance en hauteur pour *Eucalyptus saligna* dans 6 réserves forestières, comparer la croissance en hauteur dominante de l'eucalyptus entre ces 6 réserves, étudier l'influence de quelques facteurs du milieu (pente, position topographique) sur la croissance des eucalyptus, et, enfin, construire un (des) faisceau(x) de courbes hauteur–âge pour cette espèce.

Parmi les 5 équations ajustées, l'équation de Johnson-Schumacher (une forme simplifiée de l'équation de Lunqvist-Matern) s'est avérée assez bien adaptée pour décrire la croissance en hauteur dans les 6 réserves. La croissance en hauteur dominante n'a pas la même allure dans les différentes réserves : les courbes de croissance sont polymorphes. Cette différenciation de croissance (en allure et niveau) semble liée à la fois aux facteurs édaphiques et aux facteurs topographiques

Tableau XI. Modèles conseillé à utiliser en fonction de la réserve étudiée.

Paramètre	*Réserve* 1	2	4	6	7	3
	Modèle C'	C"	C"	C	C"	C'
K	52,97	41,82	39,54	42,51	39,90	34,39
b	7,803	7,033	7,033	3,978	3,483	3,777
c	0,005 3	0,004 1	0,004 1	–	0,004 1	0,005 3
d	–	2,759	2,759	–	2,759	–

et physiographiques. Par ordre décroissant d'importance, les facteurs les plus importants sont le sol, la pente, l'altitude et la position topographique. Afin d'augmenter la précision des prédictions, il est préférable d'utiliser le modèle qui inclut la pente et la position topographique, lorsque ces mesures sont disponibles. En se basant sur la nature du sol et l'allure de courbe de croissance, on peut identifier 4 sous-groupes : les réserves sur sols ferralitiques rouges sur des collines (réserves 2 et 4), les réserves sur sols ferralitiques humifères (réserves 6 et 7), les réserves sur sols indurés avec cuirasse (réserve 3) et les réserves sur sols volcaniques récents (réserve 1).

Les modèles de croissance en hauteur dominante sont à la base de toutes les tables et modèles de production. Les courbes de croissance en hauteur construites ici vont donc servir ultérieurement pour la construction d'un modèle de production pour *Eucalyptus saligna*. Les modèles de production sont en effet des outils indispensables en aménagement forestier comme dans certaines études régionales et en matière de planification (Bartet et Bolliert, 1976).

Au plan méthodologique, et bien que nous n'ayons pas évité toutes les difficultés inhérentes aux données transversales (déséquilibre de l'échantillon au sein de certaines strates), cette approche illustre l'intérêt de la stratification du plan d'échantillonnage et de la prise en compte de variables écologiques additionnelles lorsqu'on ne dispose que de placettes temporaires.

REMERCIEMENTS

La récolte des données utilisées dans cette étude a été partiellement réalisée grâce à la participation d'élèves-ingénieurs au département de foresterie (université de Dschang) dans le cadre de leur stage de fin d'étude. L'Office national de développement des forêts (ONADEF) nous a permis d'installer les placettes dans ses peuplements. Nous avons bénéficié de l'aide financière (une bourse FAC) du gouvernement français dans le cadre de la coopération ENGREF-DEPFOR (université de Dschang, Cameroun). Nous les en remercions vivement.

RÉFÉRENCES

Assmann E (1970) *The Principles of Forest Yield Study.* Pergamon Press, Oxford, 503 p

Bartet JH, Bolliet R (1976) *Méthode utilisée pour la construction de tables de production à sylviculture variable.* Office national des forêts, section Technique, document 76-9, 90 p

Bruce D, Schumacher FX (1950) *Forest Mensuration.* McGraw Hill, New York, 483 p

CTFT (1959) *Eucalyptus saligna* et *Eucalyptus grandis* : caractère sylvicole et méthode de production. BFT 63, 17-21

Carmean WH (1956) Suggested modifications of the standard Douglas-fir site curves for certain soils in south western Washington. *For Sci* 2, 242-250

Carmean WH, Lenthall DJ (1989) Height-growth and site-index curves for Jack Pine in north central Ontario. *Can J For Res* 19, 215-224

Clutter JC, Fortson JC, Pienaar LV, Brister GA, Bailey RL (1983) *Timber Management. A Quantitative Approach.* John Wiley and Son, New York, 333 p

Coile TS, Schumacher FX (1953) Site index of young stands of loblolly and shortleaf pines in the Piedmont Plateau Region. *J For* 51, 432-435

Evans J (1974) Some aspects of the growth of *Pinus patula* in Swaziland. *Commonw For Rev* 93 (1) London, UK

FAO (1982) *Les eucalyptus dans les reboisements.* Collection FAO : Forêts, n° 11, Rome, 753 p

FAO/PNUD (1988) Plan d'action de forêt tropical pour le Cameroun. Rapport, FAO.

Faure JJ (1990) Le Cameroun et ses forêts. II. Le secteur forestier. *Rev For Fr* 42 (3), 353-369

Garbaye J (1979) Sol et productivité des peupliers «I214» et Robusta en populiculture traditionnelle dans le Nord Parisien. *Ann Sci For* 36, 39-58

Hawkins P, Brunt M (1965) *The soils and ecology of West cameroon* (vols I&II). FAO, Rome

Hocker HW (1979) *Introduction to Forest Biology.* John Wiley and Sons, New York, 467 p

Houllier F (1990) Modèles de croissance en hauteur : remarques sur les relations entre la nature des données et le type de modèle ajusté. *In : IUFRO Proc S4.02.03.S4.02.04 on Forest Growth Data : Cap-*

ture, Retrieval and Dissemination (P Adlard, J Rondeux, eds), faculté des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique, 65-75

Houllier F (1994) Introduction à la régression non linéaire. Support de cours pour DEA. ENGREF, Nancy, 37 p

Kamaha (1976) Rapport de stage monographique du village Bapouh (Bana). Univ de Dschang, Cameroun, 58 p

Kamdem R (1976) Rapport de stage monographique du village Chengne (Naham). Univ de Dschang, Cameroun, 70 p

Lanier L (1986) *Précis de sylviculture.* ENGREF, Nancy, 468 p

Le Goff N (1981) Table de production. *In : Le hêtre* (E Tessier du Cros, ed), INRA, Paris, 326-338

Le Goff N (1982) Productivité du frêne en région Nord-Picardie. A. Courbes de croissance en hauteur. *Ann Sci For* 39, 259-288

Le Goff N, Levy J (1984) Productivité du frêne (*Fraxinus excelsor* L) en région Nord-Picardie. B. Étude des relations entre la productivité et les conditions de milieu. *Ann Sci For* 41, 135-170

Madesclaire A (1986) Potentialités des stations forestières des plateaux calcaires de Lorraine pour l'érable Sycomore et le merisier : étude des croissances. Rapport centre régional de la propriété forestière de Lorraine-Alsace et centre INRA de Nancy, 55 p

Martin D, Segalen P (1966) Carte pédologique du Cameroun Oriental au 1/1 000 000. Notice explicative, ORSTOM, centre de Yaoundé, 133 p

Monserud RA (1984) Height growth and site index curves for inland Douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type. *For Sci* 30, 943-965

Newberry JD, Pienaar LV (1978) Dominant height growth models and site index curves for site-prepared slash pine plantations in the lower coastal plain of Georgia and North Florida. Univ of Georgia. Plantation Management Research Cooperative, Research Paper, 4

Njoukam R (1989) Sylvicultures d'*Eucalyptus saligna* en savane d'altitude (province de l'Ouest et du Nord-Ouest du Cameroun). Rapport technique, antenne de recherche forestière de Foumban, Cameroun, 46 p + annexes

Oswald H (1989) Conditions forestières et potentialités de l'épicéa en haute Ardèche. *Ann Sci For* 26, 183-224

Ottorini JM, Nys C (1981) Application des données de l'Inventaire forestier national à l'étude de la production du pin sylvestre en Margeride. A. Étude de la croissance en hauteur. *Ann Sci For* 38, 223-236

Pande GC (1974) Volume prediction in *Eucalyptus grandis* crops. *Indian Forester* 100, 533-543

Poynton RJ (1981) The silvicultural treatment of eucalypt plantations in southern Africa. *S Afr For J* 116, 11-16

Schönau APG (1973) Height growth and site index curves for *Acacia mearnsii* on the Uasin Gishu plateau of Kenya. *Commw For Rev* 52, 245-253

Seber GAF, Wild CJ (1989) *Nonlinear Regression.* John Wiley & Sons, New York, 768 p

Shiver BD, Brister GH (1990) Tree and stand volume functions for *Eucalyptus saligna* in Western Kenya. *In : IUFRO Group S4.01 Proc Mensuration, Growth, and Yield, World Congress,* Montréal, Canada, August 5-11, 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

Sindou C, Madasclaire A (1986) Le mélèze d'Europe sur les plateaux calcaires de Lorraine. *Rev For Fr* 38, 439-448

Spurr SH (1952) *Forest Inventory.* Ronald Press, New York, 476 p

Tanghe C (1991) Écologie et croissance du pin de Salzmann en France. Mémoire de ENITEF-CEMAGREF, 84 p + annexes

Tchanou Z (1975) *Les eucalyptus et leur avenir en Afrique tropicale.* Diplôme de maître ès Sciences, Univ Laval, Canada, 92 p

Tomassone R, Lesquoy E, Millier C (1983) *La régression. Nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique.* Masson, Paris, 180 p

Turvey ND (1983) Soil-type yield curves for *Pinus radiata* in Gippsland, Victoria. *Aust For* 46, 118-125

Valet S (1980) Étude des paramètres du milieu physique pour l'élaboration des cartes de zonation géoclimatique des pentes de paysages agrogéologiques et de mise en valeur de l'Ouest. IRAT, Cameroun, 30 p

Vallerie M (1971) Carte pédologique du Cameroun Occidental. Notice explicative, ORSTOM, Paris

Zahner R (1962) Loblolly pine curves by soil groups. *For Sci* 8, 104-110

Zedaker SM, Bukhart HE, Stage AR (1987) General principles and patterns of conifer growth and yield. *In : Forest Vegetation Management for Conifer Production* (JD Walstad, PJ Kuch, eds), John Wiley & Sons, New York, 203-240