



LI CHANGSHENG  
Université de Harbin

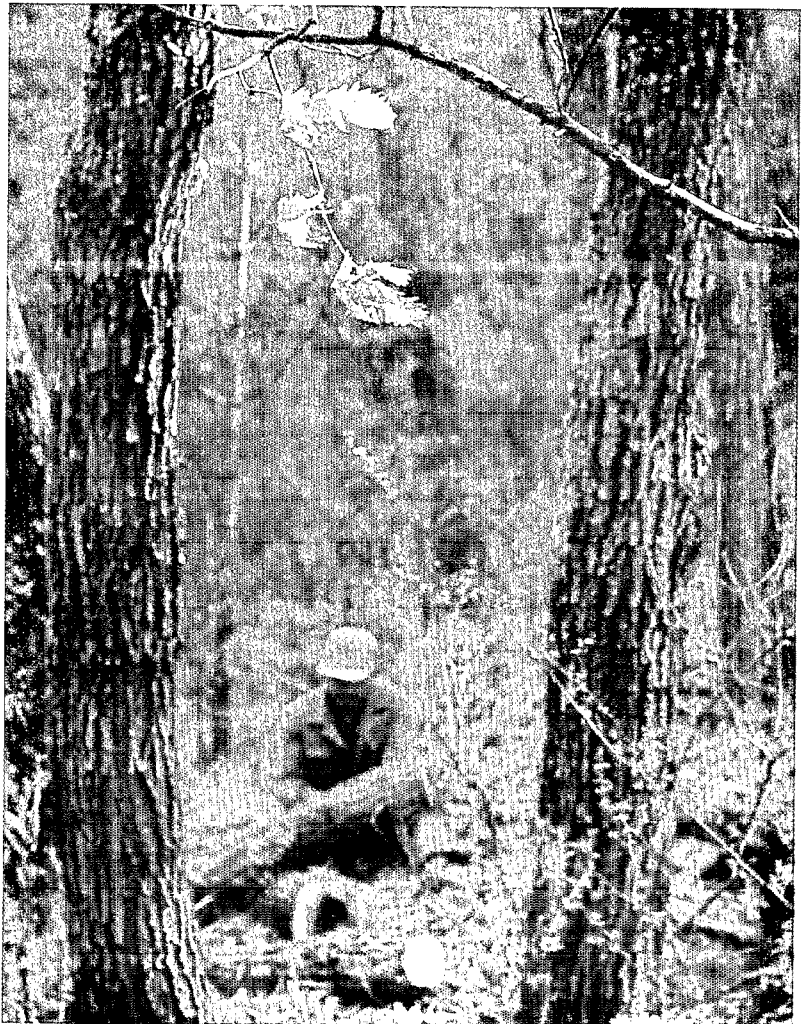
FRANÇOIS HOULLIER  
ENGREF/Nancy

LI MENG  
Académie forestière de Harbin

# ÉQUATIONS DE CROISSANCE DU CHÊNE DE MONGOLIE

*Quercus mongolica* Fisch. et Turcz.

Divers modèles peuvent être utilisés pour estimer la croissance et la productivité d'une espèce forestière. La méthodologie employée ici, pour le chêne de Mongolie, peut s'appliquer aussi à des arbres tropicaux.



Analyse de tige dans une futaie de chênes de Mongolie (diamètre moyen  $\approx 40$  cm).  
*Stem analysis in a Mongolian oak high forest (average diameter  $\approx 40$  cm).*



Les peuplements de chêne de Mongolie (*Quercus mongolica* Fisch. et Turcz.) constituent le type de formation secondaire le mieux représenté dans la province chinoise de Heilongjiang (HU, 1979). Les statistiques de 1991 du Bureau des Ressources forestières de cette province estiment que ces peuplements couvrent une surface de 514 977 ha et que cette espèce représente un volume sur pied de 32 618 000 m<sup>3</sup>. Une bonne connaissance de la production de cette espèce est donc d'une grande importance. Cependant, les études sur sa croissance et sa productivité font encore défaut, alors même qu'elles devraient constituer un préalable à l'élaboration de règles de gestion.

Dans ce contexte général, l'objectif de cet article est de fournir certains des éléments nécessaires à la connaissance de la production du chêne de Mongolie en proposant :

- Des modèles pour la croissance moyenne en hauteur et en diamètre.

- Une équation reliant la hauteur et le diamètre individuels.

Dans un premier temps, nous passons en revue diverses fonctions de croissance communément utilisées et nous rappelons leurs propriétés mathématiques. Ensuite, nous présentons les données et comparons les résultats obtenus avec les différentes fonctions. Enfin, nous construisons un faisceau de courbes de croissance en hauteur qui doit permettre une première évaluation de la fertilité des stations de la province de Heilongjiang.

Les méthodes employées ici ne sont pas originales ; il s'agit surtout pour nous de fournir des résultats préliminaires sur la croissance du chêne de Mongolie et d'illustrer ce qu'il est possible de faire lorsqu'on commence à étudier la production d'une espèce avec des données transversales.

## DONNÉES

La zone étudiée est la région de Mudanjiang dans la province de Heilongjiang. Elle est située entre 128°51' et 134°5' de longitude est, entre 43°40' et 49°25' de latitude nord. L'altitude varie entre 400 et 800 m, la température annuelle moyenne entre 2,5 et 4 °C, la durée de la période sans gelée entre 110 et 140 jours, les précipitations annuelles moyennes entre 460 et 690 mm.an<sup>-1</sup>.

Les données utilisées proviennent de 510 placettes temporaires réparties dans 10 districts forestiers de la division forestière de Mudanjiang. Ces placettes sont issues d'un inventaire régional basé sur un plan d'échantillonnage systématique. Toutes sont situées dans des formations secondaires et appartiennent à des futaies régulières, approximativement équiennes, où le chêne de Mongolie est l'espèce prépondérante.

2 077 arbres ont été échantillonnés dans ces placettes, parmi lesquels 827 arbres dominants (c'est-à-dire en l'occurrence appartenant à l'étage dominant et ayant libre accès à la lumière) et 1 250 arbres choisis par échantillonnage aléatoire (dont certains dominants). 755 des 827 arbres dominants ont été utilisés pour ajuster les équations, les 72 autres pour les tester (ou les valider). Les données mesurées sur ces arbres sont leur âge à la souche (A), leur diamètre à 1,30 m (D130) et leur hauteur totale (H). Les principales caractéristiques de cet échantillon sont fournies dans le tableau I.

Notons que ces données ne permettent pas d'estimer la hauteur dominante *sensu stricto* (H<sub>0</sub>) puisque celle-ci est conventionnellement définie comme la hauteur moyenne des 100 plus gros arbres par hectare (PARDE et BOUCHON, 1988). Dans la suite, nous appellerons abusivement « hauteur dominante » (resp. « diamètre dominant ») la hauteur (resp. le diamètre) des arbres physiologiquement dominants.

Des analyses de tige ont aussi été réalisées sur 10 arbres dominants provenant de peuplements appartenant à des classes d'âge et de fertilité différentes. Ces données, trop peu nombreuses pour construire le modèle de croissance en hauteur, ont été utilisées pour le valider qualitativement.

Un tel jeu de données est typique de ce que l'on peut obtenir à partir d'un inventaire régional. Il est à noter que ces données ne contiennent pas d'informations sur la sylviculture pratiquée autres que la densité et la surface terrière sur pied au moment de l'inventaire. Par ailleurs, nous ne disposons pas d'informations écologiques sur chaque placette (ex. altitude, profondeur du sol). C'est

TABLEAU I  
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES 510 PLACETTES ÉCHANTILLONNÉES

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Coefficient de variation
Age (an)	15	135	47,0	20,96	0,443
Diamètre moyen (cm)	6	85	13,6	7,031	0,516
Hauteur moyenne (m)	4	24	10,2	3,127	0,307
Volume (m <sup>3</sup> /ha)	5	335	72,9	48,56	0,667

pourquoi nous nous sommes principalement intéressés à la croissance moyenne ou aux relations allométriques moyennes entre le diamètre et la hauteur.

## MÉTHODES

Le choix de fonctions susceptibles de bien représenter la croissance des arbres est rarement basé sur des considérations écologiques ou biologiques : trop de processus entrent en jeu pour qu'il soit possible de fonder *a priori* le choix d'une fonction. La plupart du temps, on se contente de chercher une fonction qui s'ajuste bien aux données et qui ait un bon comportement qualitatif. Les arguments utilisés sont donc de nature empirique (bon ajustement statistique) et phénoménologique.

### FONCTIONS DE CROISSANCE

Pour cette étude, nous avons adopté cette approche en nous restreignant à une famille de fonctions sigmoïdales qui est fréquemment utilisée pour décrire la production ligneuse aux niveaux de l'arbre et du peuplement :

fonction de Richards et ses divers cas particuliers et simplifications (cf. par exemple, PIENAAR et TURNBULL, 1973 ; DEBOUCHE, 1979 ; CAUSTON et VENUS, 1981 ; ITO et OSUMI, 1985). D'autres fonctions, de forme voisine, sont parfois utilisées (cf. par exemple, DANJON et HERVÉ, 1994).

La fonction de Richards est dérivée d'une généralisation du modèle de croissance de VON BERTALANFFY (RICHARDS, 1959). Sa forme intégrée est :

$$Y = a \cdot [1 - b \cdot \exp(-k \cdot t)]^c \quad (1)$$

où  $Y$  est une variable dont on étudie la croissance (ex. hauteur d'un arbre, biomasse d'un peuplement) ;  $t$  est le temps ou l'âge ;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $k$  sont des paramètres :

- $a$  est l'asymptote supérieure de  $Y$  tandis que  $k$  définit l'échelle des temps ( $a > 0$ ,  $k > 0$ ) ;
- $b$  détermine la position de la courbe de croissance sur l'axe  $t$  tandis que  $c$  influe sur la forme de la courbe et sur la position relative du point d'inflexion le long de l'axe des  $Y$ . Les combinaisons possibles de  $b$  et  $c$  sont : ( $b > 0$  et  $c \geq 1$ ) ou ( $b < 0$  et  $c < 0$ ).

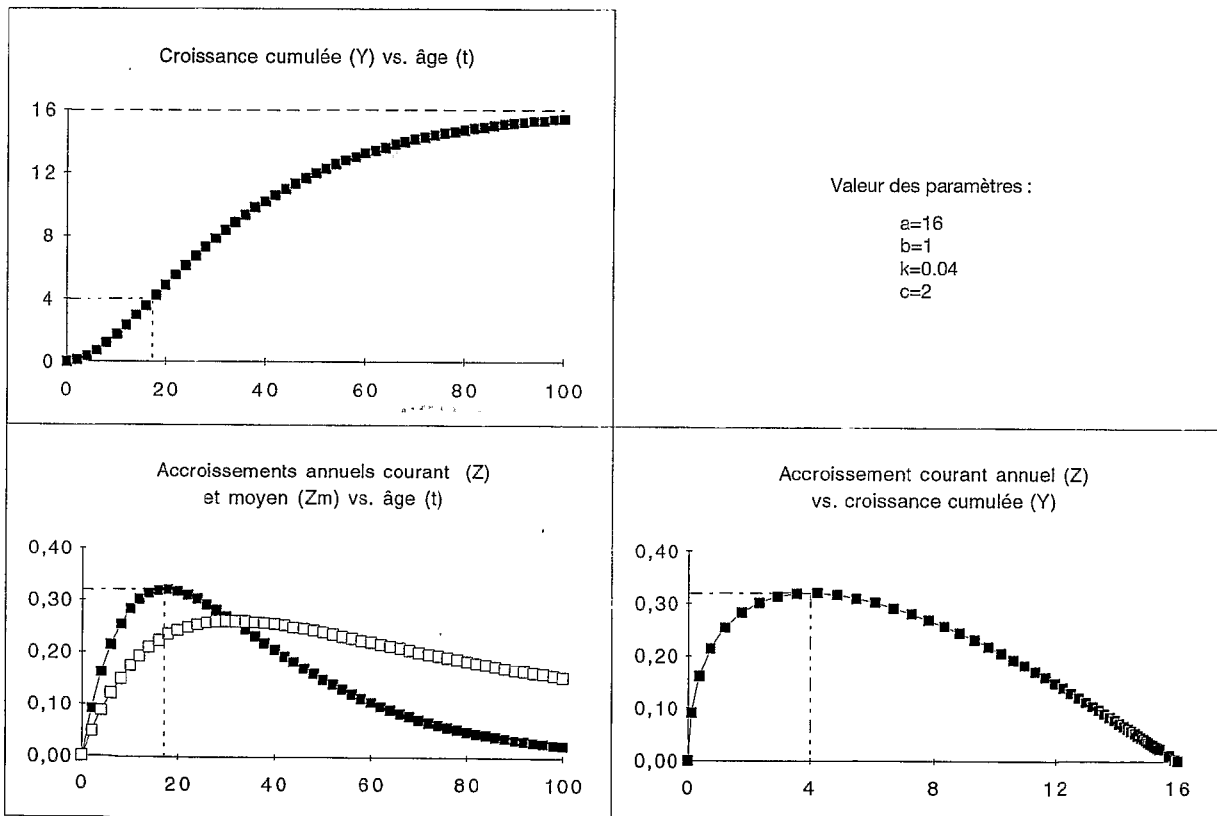


Figure 1. Différents aspects de l'équation de croissance de Richards.  
Different aspects of Richards' growth equation.

Des propriétés mathématiques de la fonction de croissance de Richards peuvent être obtenues en dérivant l'équation (1), cf. fig. 1, p. 43 :

□ Soit  $Z$  la vitesse de croissance,  $Z_r$  la vitesse de croissance relative et  $Z_m$  la vitesse moyenne de croissance depuis  $t = 0$  :

$$Z = \frac{dY}{dt} = a \cdot b \cdot k \cdot c \cdot \exp[-k \cdot t] \cdot [1 - b \cdot \exp(-k \cdot t)]^{c-1}$$

$$Z = k \cdot c \cdot Y \cdot \left[ \left( \frac{a}{Y} \right)^{1/c} - 1 \right] \quad (2)$$

$$Z_r = k \cdot c \cdot \left[ \left( \frac{a}{Y} \right)^{1/c} - 1 \right] \quad (3)$$

$$Z_m = \frac{Y}{t} = \frac{a}{t} \cdot [1 - b \cdot \exp(-k \cdot t)]^c \quad (4)$$

□ Soit  $Z_{\max.}$  la vitesse maximale de croissance,  $T_{\max.}$  (resp.  $Y_{\max.}$ ) la date (resp. la dimension  $Y$ ) à laquelle  $Z = Z_{\max.}$  :

$$Z_{\max.} = a \cdot k \cdot \left( \frac{c-1}{c} \right)^{c-1} \quad (5)$$

$$T_{\max.} = \frac{1}{k} \cdot \ln(b \cdot c) \quad (6)$$

$$Y_{\max.} = a \cdot \left( \frac{c-1}{c} \right)^c \quad (7)$$

Selon les valeurs de  $b$  et  $c$ , on obtient des cas particuliers qui portent des noms de fonction différents (JIANG *et al.*, 1990a ; MILLIER, 1982). Certaines de ces fonctions particulières dérivées de l'équation (1) sont fréquemment utilisées en foresterie (LI, 1988 ; LI *et al.*, 1991) :

- la fonction de Richards simplifiée, aussi appelée fonction de Chapman-Richards, est obtenue pour  $c > 1$  et  $b = 1$ , de telle sorte que l'origine de la croissance soit en  $t = 0$  :

$$Y = a \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)]^c \quad (8)$$

- la fonction de Mitscherlich, ou monomoléculaire, est obtenue pour  $c = 1$  et  $b > 0$  ; elle n'a pas de point d'inflexion :

$$Y = a \cdot [1 - b \cdot \exp(-k \cdot t)] \quad (9)$$

Lorsque  $b = 1$  [ou lorsque  $c = 1$  dans l'équation (8)], on a le "modèle dit de Lamoni" :

- la fonction logistique est obtenue pour  $b = -b' < 0$  et  $c = -1$  :

$$Y = \frac{a}{1 + b' \cdot \exp(-k \cdot t)} \quad (10)$$

- la fonction de Gompertz est obtenue à la limite quand  $c$  tend vers l'infini :

$$Y = a \cdot \exp[-d \cdot \exp(-k \cdot t)] \quad (11)$$

où  $d$  est un nouveau paramètre formé à partir de  $a$ ,  $b$  et  $k$ .

### AJUSTEMENT

Dans cette étude, nous avons employé les équations (8) à (11) afin d'ajuster les courbes de croissance individuelles en hauteur et diamètre ainsi que les courbes hauteur-diamètre. Les paramètres ont été estimés par la méthode des moindres carrés ordinaires avec la procédure NLIN de SAS (1988) en utilisant l'algorithme de Marquardt (1963). Les modèles ont été ajustés séparément pour le jeu des 1 250 arbres échantillonnés aléatoirement et pour le jeu des 755 arbres dominants. Pour l'équation (8) [resp. (9)], nous avons systématiquement testé si  $c$  (resp.  $b$ ) était différent de 1 au seuil de 0,05 ; lorsque ce paramètre n'était pas significativement différent de 1, nous l'avons fixé à 1 et nous avons ajusté à nouveau le modèle. Pour juger de la qualité de l'ajustement, nous avons utilisé les deux statistiques suivantes : le pseudo-coefficient de détermination ( $R^2$ ), défini comme le carré du coefficient de corrélation linéaire entre les valeurs prédites et les valeurs observées, et l'écart-type résiduel (ETR), défini comme la racine du carré moyen des erreurs résiduelles obtenu en tenant compte du nombre de degrés de liberté.

## RÉSULTATS

### CROISSANCE EN HAUTEUR ET EN DIAMÈTRE : COMPARAISON DES DIFFÉRENTES ÉQUATIONS

Les résultats des ajustements sont présentés dans le tableau II (resp. tableau III) pour les 1 250 arbres échantillonnés aléatoirement (resp. 755 arbres dominants). Les quatre fonctions de croissance [éq. (8) à (11)] ont approximativement les mêmes performances mesurées au moyen des critères suivants : le pseudo-coefficient de détermination ( $R^2$ ) et l'écart-type résiduel (ETR). La fonction de Richards simplifiée [éq. (8)] est la meilleure pour prédire la croissance moyenne en hauteur et en diamètre à partir de l'âge. La fonction de Mitscherlich [éq. (9)] est la meilleure pour prédire la hauteur et le diamètre « dominants » en fonction de l'âge et pour estimer la hauteur à partir du diamètre [fig. 2, courbe (1), p. 46].

### INDICE DE FERTILITÉ

La méthode proportionnelle (JIANG *et al.*, 1990b ; LI *et al.*, 1990), aussi appelée méthode de Schumacher ou méthode de la courbe-guide (CLUTTER *et al.*, 1983), a été utilisée pour construire un faisceau de courbes de crois-



TABLEAU II

RÉSULTATS DE L'AJUSTEMENT NON LINÉAIRE DES ÉQUATIONS (8) À (11)  
POUR LES 1 250 ARBRES ÉCHANTILLONNÉS ALÉATOIREMENT

Variable dépendante	Variable indépendante	Equation	R <sup>2</sup>	ETR	Remarque*
H	A	(8)	0,634	2,17 m	c = 1
H	A	(9)	0,634	2,17 m	b = 1
H	A	(10)	0,629	2,24 m	
H	A	(11)	0,626	2,27 m	
La meilleure équation est : $H = 15,08 \cdot [1 - \exp(-0,0261 \cdot A)]$					
D130	A	(8)	0,883	2,92 cm	
D130	A	(9)	0,872	3,12 cm	b = 1
D130	A	(10)	0,881	2,93 cm	
D130	A	(11)	0,860	3,18 cm	
La meilleure équation est : $D130 = 145,0 \cdot [1 - \exp(-0,0028 \cdot A)]^{1,0898}$					
H	D130	(8)	0,674	2,07 m	
H	D130	(9)	0,697	2,00 m	
H	D130	(10)	0,694	2,01 m	
H	D130	(11)	0,670	2,09 m	
La meilleure équation est : $H = 19,64 \cdot [1 - 0,9442 \cdot \exp(-0,0489 \cdot D130)]$					

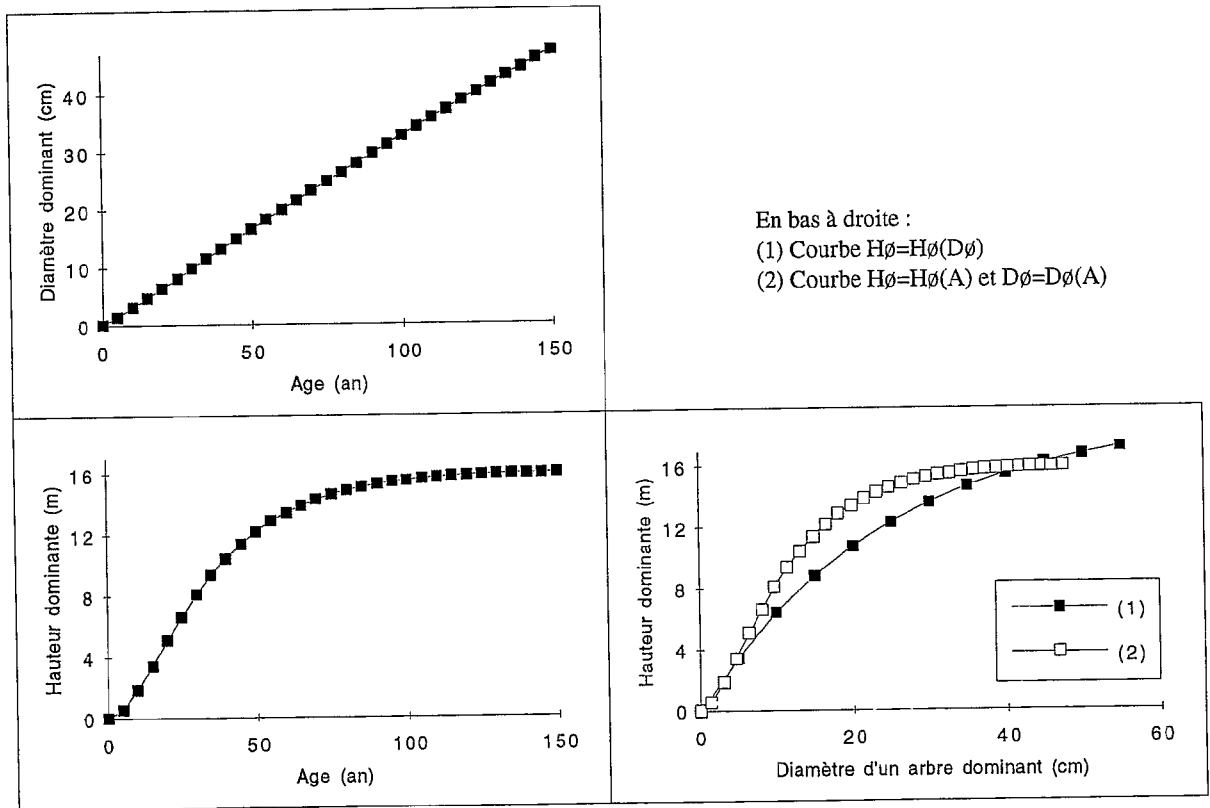
\* Pour l'équation (8) [resp. (9)], quand c (resp. b) n'était pas significativement différent de 1, sa valeur a été arbitrairement fixée à 1 et le modèle a été ajusté de nouveau.

TABLEAU III

RÉSULTATS DE L'AJUSTEMENT NON LINÉAIRE DES ÉQUATIONS (8) À (11)  
POUR LES 755 ARBRES DOMINANTS

Variable dépendante	Variable indépendante	Equation	R <sup>2</sup>	ETR	Remarque*
H	A	(8)	0,687	2,00 m	
H	A	(9)	0,684	2,06 m	
H	A	(10)	0,682	2,01 m	
H	A	(11)	0,654	2,10 m	
La meilleure équation est : $H = 16,04 \cdot [1 - \exp(-0,0408 \cdot A)]^{1,976}$					
D130	A	(8)	0,879	3,30 cm	
D130	A	(9)	0,869	3,43 cm	b = 1
D130	A	(10)	0,878	3,32 cm	
D130	A	(11)	0,857	3,58 cm	
La meilleure équation est : $D130 = 152,0 \cdot [1 - \exp(-0,00028 \cdot A)]^{1,089}$					
H	D130	(8)	0,621	2,28 m	
H	D130	(9)	0,633	2,25 m	b = 1
H	D130	(10)	0,624	2,26 m	
H	D130	(11)	0,619	2,29 m	
La meilleure équation est : $H = 19,20 \cdot [1 - 1,0084 \cdot \exp(-0,0413 \cdot D130)]$					

\* Pour l'équation (8) [resp. (9)], quand c (resp. b) n'était pas significativement différent de 1, sa valeur a été arbitrairement fixée à 1 et le modèle a été ajusté de nouveau.



En bas à droite :  
 (1) Courbe  $H\phi = H\phi(D\phi)$   
 (2) Courbe  $H\phi = H\phi(A)$  et  $D\phi = D\phi(A)$

Figure 2. Courbes moyennes ajustées pour les arbres dominants (équations, cf. tableau II).  
 Average curves adjusted for dominant trees (equations, see table II).

sance non sécantes. Ces courbes sont censées représenter différentes classes de fertilité, mais on ne peut pas le démontrer lorsqu'on ne dispose que de données transversales et que l'équilibre du plan d'échantillonnage, en termes de classes d'âge et de fertilité, ne peut pas être garanti (HOULLIER, 1990).

La courbe moyenne de croissance en « hauteur dominante » ajustée par la fonction simplifiée de Richards a servi de courbe-guide :

$$H\phi = 16,04 \cdot [1 - \exp(-0,0408 \cdot A)]^{1,976} \quad (12)$$

Nous avons choisi 50 ans comme âge de référence et avons fixé une amplitude de 2 m pour les classes de fertilité. Nous avons ainsi obtenu le tableau IV et la figure 3 qui permettent de positionner un peuplement quelconque dans sa classe de fertilité dès que l'on connaît son âge et sa « hauteur dominante » à une date donnée. En inversant l'équation (12) on peut aussi estimer directement l'indice de fertilité  $I_f$  :

$$I_f = \frac{H\phi(A)}{[1 - \exp(-0,0408 \cdot A)]^{1,976}} \quad (13)$$

### VALIDATION DU MODÈLE DE CROISSANCE EN HAUTEUR

Nous avons testé la précision de la courbe-guide sur un sous-échantillon indépendant formé par les 72 arbres dominants qui n'avaient pas été utilisés pour ajuster le modèle. A cet effet, nous avons appliqué la méthode suivante (cf. LANG et TANG, 1989) : nous avons estimé la « hauteur dominante »  $\hat{H}\phi$  à partir de l'âge avec l'équation (12) ; nous avons ensuite ajusté le modèle linéaire suivant :

$$H\phi = \alpha + \beta \cdot \hat{H}\phi + \varepsilon \quad (14)$$

( $\alpha = 0,1435$ ,  $\beta = 0,9954$ ,  $R = 0,81$ ,  $n = 72$ , erreur relative moyenne = 0,76 %). Nous avons alors calculé la statistique suivante :

$$F = \frac{n-2}{2} \cdot \frac{n \cdot \hat{\alpha}^2 + 2 \cdot \hat{\alpha} \cdot (\hat{\beta}-1) \cdot \sum_{i=1}^n \hat{H}\phi_i - (\hat{\beta}-1)^2 \cdot \sum_{i=1}^n \hat{H}\phi_i^2}{\sum_{i=1}^n (H\phi_i - \hat{\alpha} - \hat{\beta} \cdot \hat{H}\phi_i)^2} \quad (15)$$

TABLEAU IV

CROISSANCE EN « HAUTEUR DOMINANTE »  
POUR LE CHÊNE DE MONGOLIE  
DANS DIFFÉRENTES CLASSES DE FERTILITÉ

Age	Indice de fertilité : hauteur à 50 ans						
	6	8	10	12	14	16	18
10	0,91	1,21	1,52	1,82	2,12	2,43	2,73
20	2,49	3,32	4,16	4,99	5,82	6,65	7,48
30	3,97	5,29	6,62	7,94	9,27	10,59	11,91
40	5,14	6,85	8,57	10,28	11,99	13,71	15,42
50	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00
60	6,61	8,81	11,01	13,22	15,42	17,62	19,82
70	7,03	9,37	11,71	14,06	16,40	18,74	21,09
80	7,32	9,75	12,19	14,63	17,07	19,51	21,95
90	7,51	10,01	12,52	15,02	17,52	20,02	22,53
100	7,64	10,19	12,73	15,28	17,82	20,37	22,92
110	7,73	10,30	12,88	15,45	18,03	20,60	23,18
120	7,78	10,38	12,97	15,57	18,16	20,76	23,35
130	7,82	10,43	13,04	15,65	18,26	20,86	23,47
140	7,85	10,47	13,08	15,70	18,32	20,93	23,55
150	7,87	10,49	13,11	15,73	18,36	20,98	23,60

où :  $H\phi_i$  = hauteur observée sur l'arbre  $i$ ,  $\hat{H}\phi_i$  = hauteur estimée,  $n$  = nombre d'arbres échantillonnés,  $\hat{\alpha}$  et  $\hat{\beta}$  sont les estimations des paramètres de l'équation (14). Nous avons obtenu :

$$F = 0,6996 < F_{2,70(0,05)} = 3,1277,$$

ce qui « valide » la courbe-guide (c'est-à-dire qu'on ne rejette pas l'hypothèse nulle :  $\alpha = 0$  et  $\beta = 1$ ).

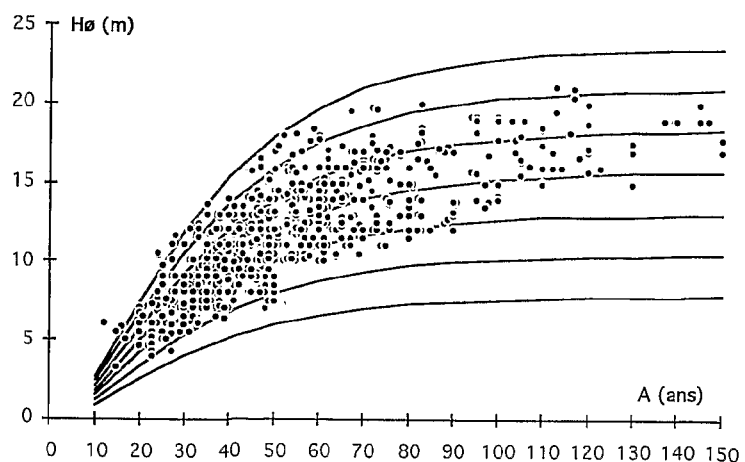
## DISCUSSION ET CONCLUSION

Ces résultats suggèrent que l'équation de Richards simplifiée est bien adaptée pour décrire la croissance en hauteur et en diamètre du chêne de Mongolie. La mise en œuvre de la méthode proportionnelle a ainsi permis de générer un faisceau de courbes de croissance en « hauteur dominante » indicées par la fertilité. Ces modèles peuvent être utilisés pour prédire la croissance moyenne des arbres dans les futaies de chêne de Mongolie ou pour estimer la fertilité des stations sur lesquelles ils sont installés. Bien que préliminaires, les résultats obtenus fournissent des ordres de grandeur et indiquent notamment que la croissance du chêne de Mongolie est modérée : à 100 ans et sur une station de fertilité moyenne, la « hauteur dominante » est de l'ordre de 15 m tandis que le « diamètre dominant » est proche de 35 cm.

Ces résultats illustrent aussi ce qui peut être réalisé, et les limites d'une telle étude, lorsqu'on commence à analyser la croissance d'une espèce pour laquelle on manque d'informations quantitatives et de données longitudinales. On observe, en premier lieu, qu'il est difficile de départager les équations sur la seule base des critères statistiques usuellement employés : les valeurs de  $R^2$  et de  $ETR$  sont proches pour les différentes équations utilisées afin de prédire la même variable.

Il faut ensuite rappeler que la méthode proportionnelle est très sensible au plan d'échantillonnage et que, plus précisément, sa fiabilité dépend de l'équilibre des classes d'âge et de fertilité dans l'échantillon des placettes temporaires. Quand les données ne sont pas équilibrées, cette méthode peut générer des résultats fortement biaisés : souvent, la hauteur des peuplements les plus âgés est sous-estimée car il est rare d'observer des

Figure 3. Croissance en « hauteur dominante » du chêne de Mongolie dans la province de Heilongjiang : données issues des placettes temporaires et faisceau de courbes théoriques.  
Growth in « dominant height » of Mongolian oak in the Province of Heilongjiang : data from sampling plots and set of theoretical curves.



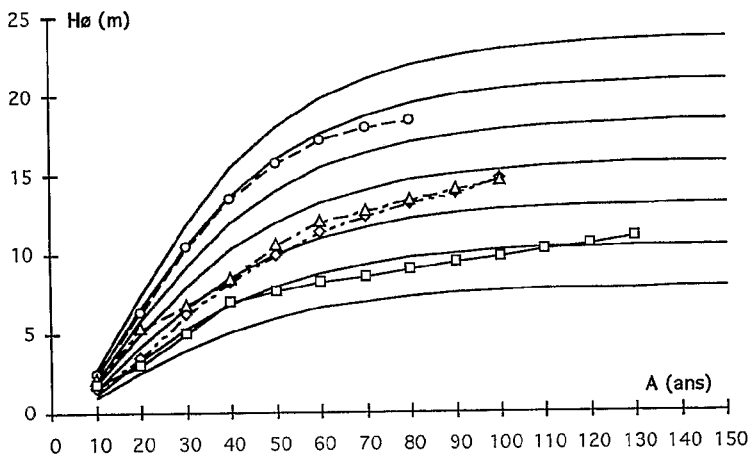


Figure 4. Croissance en « hauteur dominante » du chêne de Mongolie dans la province de Heilongjiang : courbes théoriques ajustées avec la méthode proportionnelle et courbes expérimentales observées à partir d'analyses de tige (seuls les 4 arbres les plus âgés ont été représentés).  
 Growth in « dominant height » of Mongolian oak in the Province of Heilongjiang - theoretical curves adjusted with the proportional method and experimental curves observed from stem analyses (only the four oldest trees have been represented).

stations fertiles portant des peuplements très âgés. La validation que nous avons effectuée dans cet article ne résout pas cette difficulté car elle est principalement basée sur des placettes temporaires. Nous ne disposons malheureusement que de quelques analyses de tige : celles-ci nous ont permis de vérifier que les courbes de croissance ajustées sont qualitativement cohérentes avec les courbes observées (fig. 4). Il faudrait maintenant disposer de nouvelles données longitudinales (analyses de tige, placettes permanentes, mesures d'accroissement) pour valider quantitativement le modèle de croissance en « hauteur dominante » (HOULLIER, 1990).

Il est possible de prédire directement la croissance en diamètre à partir des équations ajustées à cet effet. Il faut toutefois être conscient que les équations concernant le diamètre intègrent, sans les distinguer, les effets conjoints de la station et de la sylviculture et qu'elles ne permettent donc pas d'évaluer les conséquences de différents types de gestion. Pour obtenir de telles informations, il serait nécessaire :

- de disposer de données provenant d'un plan d'échantillonnage (ou d'expérience) où la station et la sylviculture seraient connues et systématiquement croisées
- et/ou d'utiliser un vrai modèle dynamique basé sur l'étude des accroissements en fonction de l'âge, de la densité du peuplement et de la fertilité.

L'équation de MITSCHERLICH s'est avérée la meilleure pour prédire la hauteur à partir du diamètre. La relation entre le diamètre et la hauteur n'est cependant pas une vraie relation de croissance mais une relation allométrique. La figure 2 indique ainsi que les deux méthodes possibles - prédiction directe de la hauteur à partir du diamètre ou combinaison des relations hauteur-âge et diamètre-âge - peuvent aboutir à des prédictions sen-

siblement différentes (écart de près de 3 m sur la hauteur pour des arbres de diamètre égal à 20 cm). Ces différences sont liées à deux faits complémentaires :

- Les meilleures équations sélectionnées sur la base des critères statistiques usuels ne sont pas mathématiquement cohérentes entre elles.
- Pour un même arbre ou une même placette, les résidus des différents modèles ne sont pas indépendants les uns des autres.

La résolution rigoureuse de ce problème passerait par une formulation statistique plus complète des relations entre l'âge, la hauteur et le diamètre. □

Remerciements

Les auteurs remercient vivement WANG Z. X., CHAI Y. X. et QOIA L. X. pour leur aide sur le terrain ainsi que John FONWEBAN qui a amélioré la première version (anglaise) du manuscrit. Ils sont aussi redevables aux deux lecteurs anonymes qui ont suggéré diverses améliorations.

► LI CHANGSHENG  
 Northeastern Forestry University  
 HARBIN  
 Chine

► François HOULLIER  
 Institut Français de Pondichéry  
 11 St. Louis Str.  
 P.B. 33  
 PONDICHERY 605 001  
 Inde

► LI MENG  
 Heilongjiang Academy of Forestry  
 HARBIN  
 Chine





## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DEBOUCHE C., 1979.  
Présentation coordonnée de différents modèles de croissance. Rev. Stat. appl., 27 (4) : 5-22.
- CAUSTON D. R., VENUS J.-C., 1981.  
The biometry of plant growth. Edward Arnold, 89-130.
- CLUTTER J.-L., FORSTON J.-C., PIENAAR L. V., BRISTER G. H., BAILEY R. L., 1983.  
Timber management, a quantitative approach. John Wiley & Sons (New York), 333 p.
- DANJON F., HERVÉ J.-C.  
Choice of a model for height growth curves of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). Ann. Sc. for. (à paraître).
- HOULLIER F., 1990.  
Modèles de croissance en hauteur : remarques sur les relations entre la nature des données et le type de modèle ajusté. Bull. Rech. Agron. Gembloux, 25 (1) : 65-75.
- HU ZHENGCHANG, 1979.  
The characteristic of Mongolian oak of secondary forests [chinois]. Communication of Forestry Technology, Harbin.
- ITO T., OSUMI S., 1985.  
Applicability of the Richards function to analysis of stand growth in even-aged pure stand. Scientific Report, Kyoto Pref. Univ. Agri., 112 p.
- JIANG YIYIN, LANG KUJIAN, LI FENGRI, LI CHANGSHENG, 1990a.  
The growth of poplar in protective plantations. In : Proceedings of the second international Symposium Protective Plantation Technology, Harbin, IV, 380-387.
- JIANG YIYIN, LI CHANGSHENG, LI FENGRI, 1990b.  
The construction of site index tables for Poplar in Protective forests. In : Proceedings of the second international Symposium Protective Plantation Technology, Harbin, IV, 376-379.
- LANG KUJIAN, TANG SOUZHENG, 1989.  
The program package of IBM PC series computer [chinois]. Chinese Forestry press, Beijing.
- LI CHANGSHENG, 1988.  
Forest growth and yield models [chinois]. External forestry, Heilongjiang Academy of Forestry, 1 : 20-24.
- LI CHANGSHENG, GONG WEIGUANG, LI MENG, 1990.  
Evaluation of site quality for dahurian larch. In : Proceedings of the first international Symposium Forest Soils & Modern Forest Management, 1990, Harbin, China, 264-269.
- LI CHANGSHENG, JIANG YIYIN, YEH-CHU WANG, 1991.  
Growth and yields models for dahurian larch plantations. J. Northeast For. Univ. [English edition], 2 (1) : 24-29.
- MARQUARDT D. W., 1963.  
An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters. Journ. Soc. Indust. Appl. Math., 11 : 431-441.
- MILLIER C., 1982.  
Courbes de réponse. In : Lebreton & Millier (Eds), Modèles dynamiques déterministes en biologie, Masson (Paris), pp. 13-58.
- PARDÉ J., BOUCHON J., 1998.  
Dendrométrie. 2<sup>e</sup> édition, ENGREF (Nancy).
- PIENAAR L. V., TURNBULL K. J., 1973.  
The Chapman-Richards generalization of von Bertalaffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. Forest Science, 19 : 2-22.
- RICHARDS F. J., 1959.  
A flexible growth function for empirical use. Journal of Experimental Botany, 29 (10) : 290-300.
- SAS, 1988. SAS/STAT Guide for personal computers. SAS Institute, 1 028 p.



## R É S U M É

EQUATIONS DE CROISSANCE DU CHÊNE DE MONGOLIE (*QUERCUS MONGOLICA* FISCH. ET TURCZ.)  
DANS LA PROVINCE DE HEILONGJIANG (CHINE)

Bien que les futaies de chêne de Mongolie couvrent une grande partie des forêts secondaires de la province de Heilongjiang, les forestiers manquent d'informations sur leur production. La présente étude vise à combler cette lacune. 2 005 arbres dont 755 arbres dominants provenant de 510 placettes temporaires ont été mesurés. Quatre fonctions sont utilisées pour ajuster des modèles moyens de croissance en hauteur et en grosseur. La fonction de CHAPMAN-RICHARDS fournit le meilleur ajustement pour la croissance en hauteur individuelle, en diamètre à 1,3 m et en hauteur dominante. Le modèle moyen de croissance en hauteur dominante est utilisé comme courbe de référence pour construire un faisceau de courbes de croissance indicées par la fertilité. La précision de ce modèle est partiellement validée au moyen d'un jeu de données indépendantes. La fonction de MITSCHERLICH est le meilleur modèle pour prédire la hauteur à partir du diamètre à 1,3 m. Ces résultats préliminaires permettent d'illustrer ce qui peut être fait, en l'absence de données longitudinales, afin de décrire et de prédire la croissance d'une espèce pour laquelle on manque de références.

**Mots-clés :** Production du bois. Croissance. Modèle mathématique. Fertilité du sol. *Quercus mongolica*.

## A B S T R A C T

GROWTH EQUATIONS FOR MONGOLIAN OAK (*QUERCUS MONGOLICA* FISCH. AND TURCZ.)  
IN HEILONGJIANG PROVINCE (CHINA)

Although Mongolian oak forests cover a large area of the secondary forests in Heilongjiang province, forest managers lack information on their production. The present study aims at filling this gap. Measurements were carried out on 2,005 trees, of which 755 were dominant trees coming from 510 sampled temporary plots. Four functions are used to adjust the average growth models in terms of height and size. The CHAPMAN-RICHARDS function provides the best adjustment for growth in terms of individual height, diameter to 1.3 m and dominant height. The average growth model of dominant height is used as a reference curve for the construction of a set of growth curves indexed by fertility. The accuracy of this model is partially validated by means of an independent data set. The MITSCHERLICH function is the best model for predicting height as of the diameter of 1.3 m. These preliminary results illustrate what can be done, when longitudinal data are lacking, to describe and predict the growth of a species for which there are no references.

**Key words :** Wood production. Growth. Mathematical models. Soil fertility. *Quercus mongolica*.

## R E S U M E N

ECUACIONES DE CRECIMIENTO DEL ROBLE DE MONGOLIA (*QUERCUS MONGOLICA* FISCH. Y TURCZ.)  
EN LA PROVINCIA DE HEILONGJIANG (CHINA)

A pesar de que los robles de monte alto de Mongolia cubren una gran parte de los bosques secundarios de la provincia de Heilongjiang, los especialistas forestales carecen de informaciones acerca de su producción. El presente estudio tiene por propósito colmar semejante laguna. Se ha procedido a la medición de 2 005 árboles, de los cuales 755 árboles dominantes, procedentes de 510 emplazamientos temporales. Se han utilizado cuatro funciones para ajustar los modelos medios de crecimiento en altura y grosor. La función de CHAPMAN-RICHARDS constituye el mejor medio de ajuste para el crecimiento en cuanto a la altura individual, en diámetros de 1,3 m y en altura dominante. El modelo medio de crecimiento en altura dominante se utiliza como curva de referencia para elaborar un sistema de curvas de crecimiento indexadas por la fertilidad. La precisión de este modelo viene a ser particularmente valedera por medio de un juego de datos independientes. La función de MIESCHERLICH es el mejor modelo para predecir la altura tomando como punto de partida el diámetro de 1,3 m. Estos resultados preliminares permiten ilustrar todo cuanto se puede hacer, en caso de inexistencia de datos longitudinales, con objeto de describir y predecir el crecimiento de una especie para la cual se carece de referencias.

**Palabras clave :** Producción de madera. Crecimiento. Modelos matemáticos. Fertilidad del suelo. *Quercus mongolica*.

## SYNOPSIS

## GROWTH EQUATIONS FOR MONGOLIAN OAK (*Quercus mongolica* Fisch. and Turcz.) IN THE HEILONGJIANG PROVINCE (CHINA)

LI CHANGSHENG, FRANÇOIS HOULLIER, LI MENG

Though Mongolian oak (*Quercus mongolica* Fisch. et Turcz.) stands constitute the most common type of secondary highforests in the Heilongjiang Province (China), silviculturists and forest managers are still lacking quantitative growth and yield information for this species. This article primarily aims at partially filling this gap, providing preliminary height and diameter growth functions.

The first part of the paper is devoted to a presentation of four widely used nonlinear growth functions : the mathematical properties of the logistic equation, the RICHARDS, MITSCHERLICH and GOMPertz equations are reviewed (see figure 1 for RICHARDS function). The data set includes 1 250 random trees and 755 dominant trees coming from 510 temporary plots sampled in a systematic regional inventory. Measurements are tree age ( $A$ ), diameter at breast height ( $D130$ ) and total height ( $H$ ). The growth equations are fitted to height-over-age and diameter-over-age data using ordinary least squares ; results are then compared.

The second part is devoted to reviewing some mathematical properties of the non-linear RICHARDS growth function : the cumulated growth equation [eq. (1)], the current, relative and average increment functions [eq. (2) to (4)], and the phenomenological meaning of the parameters [eq. (5) to (7), see also figure 1].

The logistic, CHAPMAN-RICHARDS, MITSCHERLICH and GOMPertz equations are then defined as particular cases of the RICHARDS function : [eq. (8) to (11)].

These growth equations are fitted to height-over-age, diameter-over-age and height-over-diameter data using the non-linear ordinary least squares fitting method. They are then compared according to usual test-of-fit statistics :  $R^2$  and root mean squared error.

- The CHAPMAN-RICHARDS function [eq. (8)] provides the best model for predicting average and dominant height and  $D130$  from age (see figure 2, tables II and III).
- The average growth curve of dominant height is further used as a guide curve for the construction of a site index system (see table IV and figure 3) which is partially validated using a restricted but independent data set (72 standing trees and 10 stem analyses ; see figure 4).
- The MITSCHERLICH function [eq. (9)] is the best model for estimating height and dominant height from  $D130$ .
- The results show that the growth of Mongolian oak is slow : on a medium-quality site, 100-year-old stands have a dominant height of around 15 m and a mean diameter around 35 cm.

The final discussion emphasizes two methodological aspects : (i) the need for dynamic data (stem analysis, permanent plots) in order to validate such preliminary models ; (ii) the fact that empirically-based equations are not necessarily self-consistent (see the two predicted height-over-diameter curves in figure 2).

**SUR VOTRE AGENDA**

**Fertilité et stratégies paysannes dans les zones tropicales humides.**  
**Thème du séminaire organisé par le CIRAD à Montpellier du 13 au 17 novembre 1995**

Trois axes majeurs structureront l'organisation des débats :

- dresser un état des apports des disciplines concernant la fertilité,
- établir des synthèses par type de culture ou système de culture,
- analyser des études de cas.

Cinq thèmes sont abordés avec une approche analytique pour les deux premiers, globale pour les trois autres :

- types de milieux et facteurs limitants (enherbement, érosion, nématodes,...),
- systèmes de culture et objectifs paysans,
- paysages en construction (bocages, fronts pionniers),
- systèmes agro-industriels,
- systèmes maraîchers et péri-urbains.

Renseignements :  
 Jean PICHOT  
 Direction Scientifique du CIRAD  
 B.P. 5035  
 F 34032 MONTPELLIER CEDEX 1  
 (France)

**La ruralité dans les pays du Sud à la fin du xx<sup>e</sup> siècle**  
**Trois journées d'études organisées par l'ORSTOM à Montpellier du 12 au 14 décembre 1995**

Organisées à l'initiative du Département « Milieux et Activités

agricoles » de l'ORSTOM, ces journées porteront sur le champ de recherche qu'offre le monde rural à l'époque contemporaine dans les pays du Sud : modification de l'environnement, croissance démographique, extension de la frontière agricole.

Renseignements :  
 Secrétariat des Journées « Ruralité »  
 ORSTOM-LE.A.  
 B.P. 5045  
 34032 MONTPELLIER CEDEX 1  
 (France)

**Écologie et Politique**  
**Journées organisées par Nature-Sciences-Sociétés du 12 au 13 décembre 1995**

Au cours de ces journées, qui se dérouleront à Paris, deux champs d'interrogation seront abordés : les fondements de l'écologie scientifique, ses rapports avec l'écologie politique et les nouvelles sollicitations dont elles font l'objet, expertise et ingénierie écologiques.

Renseignements :  
 ASSOCIATION NSS-Dialogues  
 Tél. : (1) 40 97 71 16  
 Télécopie : (1) 40 97 47 53

**Symposium sur l'agroforesterie dans les zones humides de l'Afrique Centrale et Occidentale du 4 au 8 décembre 1995 au Cameroun**

C'est à Yaoundé que se tiendra cette manifestation régionale, préparée par l'ICRAF, dans le but de recenser les recherches faites depuis 1970 sur ce thème et de développer les col-

laborations entre les organismes impliqués.

Renseignements :  
 M. Patrice de VERNOU  
 Délégation du CIRAD au Cameroun  
 B.P. 2572  
 Yaoundé (Cameroun)  
 Tél. : (237) 21 25 41  
 Télécopie : (237) 20 29 69

**VIENNENT DE SORTIR**

**Deux annuaires forestiers publiés par la F.A.O.**

La F.A.O. a édité deux annuaires importants : l'un (de 214 pages), sur les établissements de formation et d'enseignement forestier au nombre de 60, répartis dans 92 pays ; l'autre de 287 pages sur les organismes de recherche forestière en collaboration avec l'IUFRO et le réseau européen de recherche forestière tropicale (750 organismes recensés dans 112 pays).

Chaque dictionnaire, dont la réédition est prévue tous les deux ans, comprend un questionnaire pour mettre à jour les renseignements ou donner de nouvelles informations.

Les deux annuaires sont disponibles en version imprimée ou sur disquette sous DOS. Ils sont accessibles sur INTERNET (GOPHER. F.A.O. ORG.).

Renseignements :  
 Publications and Information  
 Coordinator  
 Forestry Department  
 F.A.O.  
 Via delle Terme di Caracalla  
 00100 ROME (Italie)

**Les classiques de l'AFOCEL**

■ **Le mémento 1995 est arrivé**  
 Ce fascicule, petit par la taille, grand par son utilité, vous donnera de précieuses informations sur la filière bois. Il délivre en effet les derniers chiffres-clés de la profession, ainsi que toutes les adresses utiles du secteur. Vous pouvez l'obtenir gracieusement auprès du Service de diffusion des publications de l'AFOCEL.

■ **Les Annales de recherches sylvicoles 1993/94 sont parues.** Elles regroupent différents travaux menés au sein de l'AFOCEL, qui vont des biotechnologies appliquées aux arbres forestiers et à la sylviculture, sans oublier la qualité des bois.

Pour tous renseignements :  
 AFOCEL  
 Diffusion des Publications  
 Domaine de l'Étançon  
 77370 NANGIS  
 (France)  
 Tél. : 16 (1) 60 67 00 30  
 Télécopie : 16 (1) 64 08 49 93

**Un film vidéo produit par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche « Exploiter la forêt Un métier à part entière »**

Cette vidéo de 16 minutes a été conçue par les pouvoirs publics à l'intention de tous les acteurs de la filière bois (propriétaires, industriels, exploitants forestiers et partenaires de service) pour les sensibiliser à une redéfinition de leur organisation afin de les rendre plus compétitifs.

Pour tous renseignements :  
 Conseil technique  
 Catherine de MENTHIERE  
 Tél. : (1) 49 55 51 42

Communication :  
 Gilles HIRZEL  
 Tél. : (1) 49 55 59 17  
 M. et N. LAVOIS  
 Tél. : (1) 49 55 54 24 - 49 55 59 06