

Modèles de cubage pour essences multi-tiges : application à des plantations d'acacia

Philippe Lejeune, Jacques Rondeux

De nombreux travaux de plantations forestières réalisés en zone aride, semi-aride ou tropicale sèche ont pour principal objectif la production de combustible à usage domestique, sous forme de bois de feu ou de charbon de bois (*photo 1*).

Une gestion prospective de ces plantations nécessite de suivre l'évolution des volumes utilisables ainsi que leur répartition par classe de grosseur (assortiment), ce qui implique la mise en œuvre de tarifs de cubage adaptés aux objectifs poursuivis. Les principaux problèmes rencontrés lors de l'élaboration de ceux-ci ont trait à la morphologie des arbres ou arbustes présents dans ces peuplements (manque de rectitude, aspect buissonnant, tiges multiples), à la définition des volumes de référence et à la mise au point de méthodes d'estimation de volume à la fois simples et efficaces [1].

Nous avons envisagé la construction de modèles de cubage individuels adaptés à des plantations d'acacia auriculiforme (*Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth) et devant permettre, à partir de variables facilement mesurables sur le terrain (circonférence et, éventuellement, hauteur totale), l'estimation du volume total utilisable ainsi que sa répartition en classes de grosseurs ou catégories de produits associées à des qualités différentes

P. Lejeune, J. Rondeux : Unité de gestion et économie forestières, Faculté des sciences agronomiques de Gembloux, 2 passage des Déportés, B-5030 Gembloux, Belgique.
Tirés à part : P. Lejeune.

de bois de feu. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet de reboisement financé par le Fonds européen de développement (FED) au Zaïre (plateau des Bateke).

Nous présenterons d'abord les caractéristiques du matériel expérimental utilisé. Nous décrirons ensuite la technique de construction de tarifs retenue ainsi que les résultats les plus intéressants, avant de suggérer quelques conclusions d'ordre pratique.

Matériel d'étude

Les données que nous avons utilisées dans cette étude se réfèrent à deux échantillons distincts. Le premier se compose de 248 arbres prélevés au sein de trois parcelles de 25 hectares à des âges compris entre 31 et 40 mois. Les mesures effectuées ont servi à construire des tarifs de cubage exprimant le volume individuel des arbres. Le second est constitué de 58 arbres issus d'une parcelle âgée de 10 ans. Il a permis d'établir un modèle de cubage adapté à l'estimation des volumes d'assortiments.

Compte tenu de la morphologie buissonnante des arbres à cuber (*photo 2*), ceux-ci ont été divisés en billons de longueurs variables pour tenir compte, d'une part, de la ramification des tiges et, d'autre part, des limites correspondant aux classes de grosseurs prises en compte dans la définition des assortiments. (Le classement des billons repose à la fois sur des circonférences « gros bout » et « fin de bout ».)

Les variables récoltées sur chaque arbre abattu ont concerné : la circonférence au niveau d'abattage, la circonférence à 1,30 mètre au-dessus du niveau du sol, mesurée sur tous les brins présents à ce niveau, la hauteur totale, les circonférences aux niveaux délimitant le début et la fin de chaque billon.

Les trois classes de grosseurs envisagées, en relation avec la fabrication de charbon de bois, ont été définies comme suit, en termes de circonférences :

- classe 1 : 9 - 14 cm ;
- classe 2 : 15 - 44 cm ;
- classe 3 : 45 cm et plus.

Lorsque l'arbre à cuber comportait plusieurs tiges ouobale théorique, correspondant à l'arbre de surface terrière équivalente et résultant de l'expression suivante [2] :

$$C = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2}$$

sachant que :

- n = nombre de brins identifiés à 1,30 m ;
- c_i = circonférence à 1,30 m pour le brin i.

Les volumes des billons ont, quant à eux, été déterminés par la formule du tronc de cône [3]. Pour chaque arbre, nous avons défini le volume total (vtot) jusqu'à une découpe de 9 cm de circonférence, ainsi que les volumes partiels correspondant à une répartition des billons dans les classes de circonférence évoquées plus haut (v_{9-14} , v_{15-44} , v_{45+}).



◀ **Photo 1.** Piles de bois de feu d'*Acacia auriculiformis* (zone exploitée à l'avant-plan et peuplement à l'arrière plan) (cliché J. Rondeux).

Plate 1. Piles of *Acacia auriculiformis* fuelwood (cutting area in the foreground, growing stock in background).



Photo 2. Configuration d'un sujet d'*Acacia auriculiformis* au sein d'un peuplement de 5 ans (cliché J. Rondeux). ▶

Plate 2. General appearance of an *Acacia auriculiformis* tree in a five-year-old stand.

Tableau 1

Principales caractéristiques des deux échantillons d'*Acacia auriculiformis* composés respectivement de 248 arbres (éch. 1) et de 58 arbres (éch. 2)

Variable	Moyenne		Minimum		Maximum		Coefficient de variation (%)	
	éch.1	éch.2	éch.1	éch.2	éch.1	éch.2	éch.1	éch.2
Âge (A en mois)	34,7	120,0	31,0	120,0	40,0	120,0	10,1	0
Circonférence à la base (c ₀ en cm)	26,7	59,7	13,0	27,0	48,0	116,0	31,1	37,9
Circonférence à 1,30 m (c en cm)	18,9	44,1	9,0	21,0	39,0	84,0	85,0	32,3
Nombre de brins à 1,30 m (nbr)	1,3	1,1	1,0	1,0	4,0	3,0	43,9	34,9
Hauteur total (h en cm)	558,0	1 512,0	300,0	920,0	800,0	1 970,0	19,5	13,7
Volume total (vtot en dm ³)	9,8	181,3	1,3	22,2	46,2	725,5	82,7	79,3
Volumes partiels (en dm ³)								
- 9-14 cm (v ₉₋₁₄)	3,0	21,7	0,4	2,1	14,1	56,4	70,2	62,1
- 15-44 cm (v ₁₅₋₄₄)	6,8	115,5	0	11,6	29,5	398,1	96,5	68,6
- 45 cm et + (v ₄₅₊)	0	44,1	0	0	5,3	275,6	1 023,3	135,9

General characteristics of the two *Acacia auriculiformis* samples ; sample 1 : 248 trees, samples 2 : 58 trees

Tableau 2

Équations de cubage pour le volume total établies à partir du premier échantillon (248 arbres âgés de 31 à 40 mois)

Équations	Volume total (dm ³)	CVR
1	$- 4,355 + 0,3912 c + 2,019.10^{-2} c^2$	25,1
2	$- 0,2147 c_0 + 1,988.10^{-2} c_0^2$	26,9
3	$- 6,841 + 4,232.10^{-2} c^2 - 2,930.10^{-4} c^3 - 2,221 \text{ nbr} + 0,1980 A$	22,8
4	$1,379.10^{-2} c^2 + 3,682.10^{-4} c^3 + 4,305.10^{-5} c^2 h - 1,186 \text{ nbr}$	19,9
5	$11,10 - 0,1678 c_0 + 60,63.10^{-4} c_0^2 + 18,53.10^{-6} c_0^2 h$	24,3

Conditions de validité : 9 cm < c < 40 cm ; 13 cm < c₀ < 48 cm ; 31 mois < A < 40 mois ; 1 nbr < 4.

c : circonférence à 1,30 m de l'arbre de surface terrière équivalente (cm).

c₀ : circonférence à la base (cm) ; nbr : nombre de brins à ce niveau.

h : hauteur total (cm).

A : âge de la plantation (mois)

CVR : coefficient de variation résiduelle (%).

Equations used estimating total tree volume compiled from first sample

Afin de mieux préciser les caractéristiques dendrométriques du matériel ligneux échantillonné, le *tableau 1* présente les principaux paramètres statistiques qui s'y rapportent. Il convient de préciser que toutes les mesures de gros-seurs, ainsi que les volumes qui en découlent, sont considérés sur écorce.

Établissement des tarifs de cubage

Volume total

Nous avons appliqué les techniques de la régression multiple pour relier le volume total individuel aux caractéristiques dendrométriques observées sur les arbres échantillons. La qualité des ajustements a été appréciée à l'aide du coefficient de variation résiduelle (CVR) et l'absence de biais a été vérifiée par l'analyse des résidus [4].

Si nous considérons la grosseur, représentée par la circonférence à la base (section d'abattage) ou par la circonférence à 1,30 mètre, et la hauteur totale comme étant les variables explicatives principales, on peut envisager des tarifs à une entrée ou à deux entrées [5].

Bien que les équations basées uniquement sur la grosseur fournissent des résultats acceptables (équations 1 et 2 du *tableau 2*, *figure 1*), la prise en compte de variables supplémentaires, telles que l'âge et le nombre de brins présents à 1,30 mètre, permet d'éviter un biais dans l'estimation du volume pour certaines catégories d'arbres. En effet, si nous considérons les résidus relatifs à l'équation 1 (*tableau 2*) exprimant le volume en fonction de la seule circonférence à 1,30 mètre, ils sont corrélés positivement avec l'âge (r = 0,28) et négativement avec le nombre de brins observés (r = -0,34).

En plus des équations basées uniquement sur la grosseur, nous avons retenu, en considérant l'analyse des résidus et la précision des modèles testés, trois modèles représentés par les équations 3 à 5 (*tableau 2*) qui mettent en œuvre la circonférence à la base (c₀) ou celle à 1,30 mètre (c) ainsi que l'âge (A), le nombre de brins (nbr) et la hauteur totale (h), selon les cas.

Le recours à la régression pondérée [6], utilisant un poids équivalent à l'inverse de la surface terrière individuelle, n'a

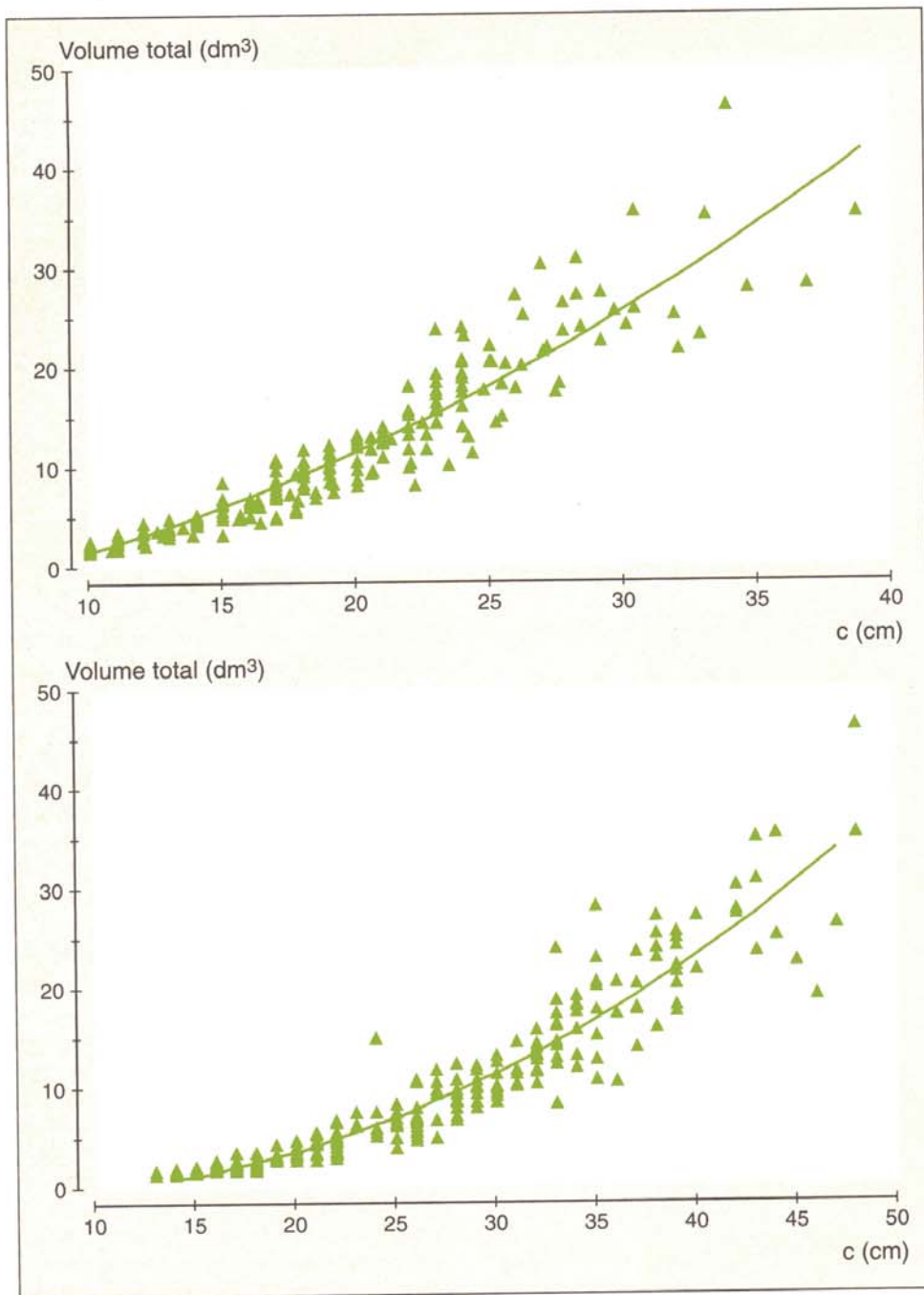


Figure 1. (a) Évolution du volume total (vtot en dm³) en fonction de la circonférence à 1,30 m de l'arbre de surface terrière équivalente (c en cm) : valeurs observées et estimées par le modèle vtot = f(c).
 (b) Évolution du volume total (vtot en dm³) en fonction de la circonférence à la base (c₀ en cm) : valeurs observées et estimées par le modèle vtot = f(c₀).

Figure 1. (a) Changes in total volume (vtot in dm³) according to girth at 1.30 m of tree equivalent basal area (c in cm) : observed and estimated values using the model vtot = f(c);
 (b) Changes in total volume (vtot in dm³) according to girth at the stump height (c₀ in cm) : observed and estimated values using the model vtot = f(c₀).

donné lieu à aucune amélioration de la qualité des ajustements.

Globalement, les équations basées sur c (équations 1, 3 et 4) donnent de meilleurs résultats que celles qui utilisent c₀ (équations 2 et 5). Cependant, dans le cas des tarifs à une entrée, l'utilisation de c impose la connaissance de l'âge sous peine de commettre un biais sur l'estimation du volume.

L'introduction de la hauteur totale comme deuxième variable explicative n'entraîne qu'une faible amélioration de la précision (réduction de CVR de 22,8 % à 19,9 % pour le tarif basé sur c et de 26,9 % à 24,3 % pour celui utilisant c₀), ce qui confirme toute l'importance qu'il convient d'accorder à la mesure de la grosseur dans ce type d'estimation.

Volumes partiels ou assortiments

Étant donné le nombre réduit d'arbres comportant des billons de circonférence supérieure à 45 cm dans le premier échantillon, nous avons préféré exploiter les données relatives aux arbres plus âgés du second échantillon pour étudier les possibilités de mise au point de modèles permettant d'estimer la répartition des volumes par classes de grosseurs, en fonction des variables déjà utilisées pour le volume total.

Les volumes partiels ont été estimés de manière interdépendante, pour éviter d'observer des discordances entre les volumes totaux et les sommes des volumes partiels leur correspondant. Ainsi, les volumes relatifs aux classes 1 et 2 (v₉₋₁₄ et v₁₅₋₄₄) sont définis par les équations de régression 7 et 8 et celui de la troisième classe (v₄₅₊), exprimé par l'équation 9, est obtenu en soustrayant du volume total, calculé au moyen de l'équation 6, les deux premiers volumes partiels (tableau 3).

Les modèles que nous avons retenus font intervenir la circonférence à 1,30 mètre (c). L'utilisation de la circonférence à la base (c₀), ou l'introduction, dans l'une ou l'autre équation, de la hauteur comme variable explicative supplémentaire ne permet pas d'augmenter la précision des estimations de manière significative.

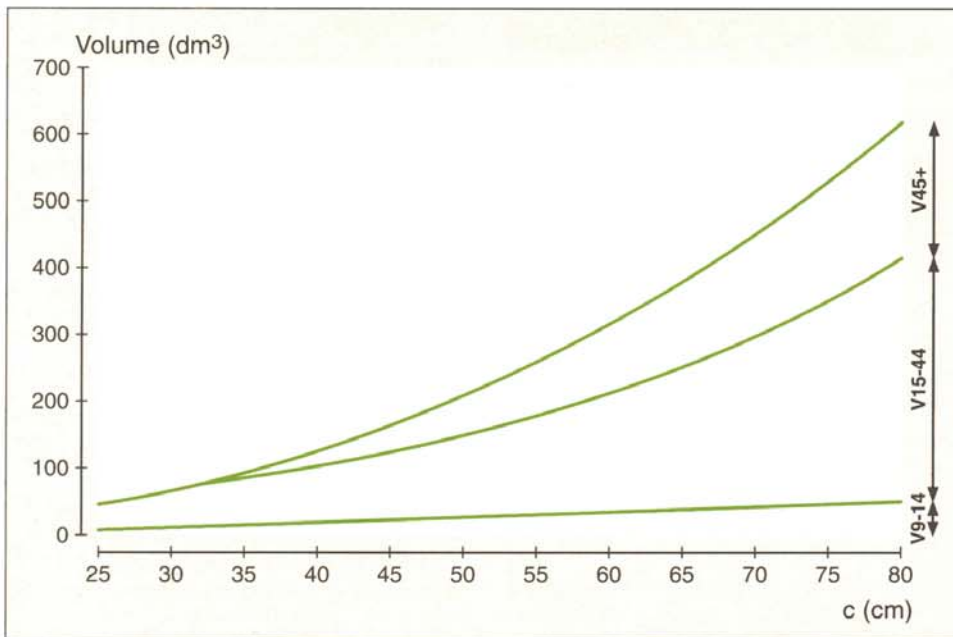


Figure 2. Évolution de la répartition des volumes partiels en fonction de la circonférence de surface terrière équivalente à 1,3 m.

Figure 2. Changes in distribution of partial volumes according to girth at 1.30 m of tree with equivalent basal area.

Summary

Models for the estimating volume in multiple-stem tree species: application to plantations of acacia

P. Lejeune, J. Rondeux

Tree-volume equations were devised to estimate the volume of wood (excluding bark) of *Acacia auriculiformis* A. Cunn ex Benth fuelwood plantations in Zaïre. The tables give the total volume of stems and branches to an upper girth limit of 9 cm, together with the volumes according to the following classes of girth : 9-14, 15-44 and over 45 cm.

Because this species has a high proportion of multiple-stem trees (which begin forking below the breast-height level), girth at 1.30 m is a relatively meaningless concept. Taking the extent of this variable in tree volume estimation into account, various expressions of girth were investigated. Instead of considering each stem girth individually, a « standardised » girth at 1.30 m (from ground level) was adopted. For any given tree, this corresponds to the quadratic sum of all girths measured at 1.30 m :

$$c = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2}$$

where n = number of separate stems at 1.30 m ; and c_i = girth (1.3 m) of stem i .

Multiple regression equations were used as mathematical models for elaborating the volume tables providing tree volumes based on

several independant variables : girth at 1.30 m, girth at stump height, total height, age, and number of stems or shoots. Since accuracy would not be usefully increased by weighting, this was not done.

For the estimation of total volume (table 2), the most appropriate model was :

$$v = f(c, c^2, nbr, h)$$

where : c = girth at 1.30 m ; nbr = number of stems ; h = total height.

The residual coefficient of variation (CVR) in the relationship was 19.9 %.

From a precision point of view, an equation excluding the total height h and based solely upon c , c^2 , nbr and A (age) was quite acceptable (CVR = 22.8 %).

Another regression model using girth at stump level (c_0) could also be used (table 2, equation 4):

$$v = f(c_0, c_0^2, c_0^2 h) \quad [CVR = 24,3 \%]$$

The partial volumes related to the above-mentioned girth classes may be predicted from girth alone (table 3).

Tableau 3

Équations de cubage pour les volumes partiels établies à partir du second échantillon (58 arbres âgés de 10 ans)

Équations	Volume (dm ³)	CVR
6	$v_{tot} = 6,146 \cdot 10^{-3} c^2 + 4,350 \cdot 10^{-4} c^3$	14,4
7	$V_{9-14} = -14,55 + 0,8221 c$	31,1
8	$V_{15-45} = 44,75 + 6,179 \cdot 10^{-4} c^3$	22,4
9	$V_{45+} = -30,20 - 0,8221 c + 6,146 \cdot 10^{-2} c^2 - 1,829 \cdot 10^{-4} c^3$	53,5

Conditions de validité : 21 cm < c < 84 cm

c : circonférence à 1,30 m de l'arbre de surface terrière équivalente (cm).
CVR : coefficient de variation résiduelle (%).

Equations used for estimating partial tree volume compiled from second sample (58 trees aged 10 years)

L'application de l'équation 9 (tableau 3) ne se justifie qu'au-delà d'une grosseur seuil (c = 32 cm) en dessous de laquelle le volume relatif à cette classe est considéré comme nul. Pour mieux fixer les idées, la figure 2 donne une représentation de la répartition des volumes partiels en fonction de c.

Conclusion

Les tarifs que nous avons construits permettent d'estimer le volume total du matériel ligneux présent dans des plantations d'acacia auriculiforme, ainsi que sa répartition selon diverses classes de grosseurs. Leur application est relativement

simple, puisque la connaissance des grosseurs à 1,30 mètre et de l'âge permet d'estimer les différents volumes avec une précision satisfaisante.

Pour caractériser la circonférence des arbres présentant plusieurs ramifications de la tige principale au niveau de mesure (c), nous préconisons de recourir à une grosseur globale correspondant à la somme quadratique des circonférences mesurées à ce niveau.

L'utilisation des tarifs fournissant les volumes partiels (assortiments) est très simple sur le plan pratique, puisqu'elle ne requiert que la connaissance de la grosseur des tiges à 1,30 mètre ■

Résumé

Des tarifs de cubage individuels ont été construits pour estimer le volume de plantations d'*Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth destinées à la production de bois de feu. Ces tarifs fournissent, d'une part, le volume total incluant le bois de tiges et de branches jusqu'à une découpe de 9 cm de circonférence et, d'autre part, ce volume réparti en classes de circonférences de 9 à 14 cm, 15 à 44 cm et plus de 45 cm.

Cette essence est généralement abondamment ramifiée, ce qui complique la détermination de son volume et interfère avec la caractérisation d'une variable dendrométrique déterminante, à savoir la circonférence ou le diamètre à 1,30 m au-dessus du niveau du sol. Lorsque plusieurs tiges sont observées à 1,30 m de hauteur, il est proposé de considérer une circonférence théorique résultant de la somme quadratique des circonférences des brins mesurées à ce niveau.

Différentes équations de cubage mettant en œuvre les circonférences à la base de l'arbre (niveau d'abattage) ou à 1,30 m, ainsi que la hauteur totale, l'âge et le nombre de brins, sont proposées pour des plantations âgées de quelques dizaines de mois. En termes de compromis entre précision des estimations et coût des mesures, l'équation faisant intervenir la circonférence à 1,30 m, l'âge et le nombre de brins s'est avérée la plus satisfaisante. En ce qui concerne les estimations de volume par assortiments, applicables à des plantations plus âgées, les équations ne faisant intervenir que la seule circonférence à 1,3 m sont largement acceptables.

Références

1. FAO. Études sur les volumes et la productivité des peuplements forestiers tropicaux. 1- Formations forestières sèches. *Forêts : Études FAO* 1984 ; 51/1 : 88 p.
2. Chojnacky DC. Subsampling diameter growth within multiple-stem juniper trees. In : *Forest resources inventory*. Publ FWS-3-90. Blacksburg : Virginia School of forestry and wildlife resources, 1990 : 32-41.
3. Palm R. Influence de la formule de cubage et de la longueur des billons sur la détermination du volume d'arbres abattus. *Ann Sci For* 1982 ; 39 : 231-8.
4. Cailliez F. Estimation des volumes et accroissements des peuplements forestiers (avec référence particulière aux forêts tropicales). 1- Estimation des volumes. *Forêts : Études FAO* 1980 ; 22/1 : 229 p.
5. Parde J, Bouchon J. *Dendrométrie*. Nancy : École nationale du génie rural, des eaux et forêts, 1988 ; 328 p. (2^e éd).
6. Rondeux J. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Gembloux : Presses agronomiques de Gembloux, 1993 ; 521 p.

Remerciements

Les auteurs adressent leurs remerciements à la société ZTE (Zaire Trading and Engineering) qui, chargée de la supervision du projet, leur a fourni les moyens matériels nécessaires à la réalisation de l'étude. Ils remercient également Monsieur N'Goma et son équipe de techniciens (Centre forestier de Kinzono, Zaïre), pour l'aide précieuse apportée lors de la prise de mesures sur le terrain.