

Estimation de la production forestière : principes et applications

PAR

P. DAGNELIE ⁽¹⁾, J.P. GRAYET ⁽²⁾, J. RONDEUX ⁽³⁾, A. THILL ⁽⁴⁾

*Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat
Gembloux (Belgique)*

Ind. bibl. : 521.522.524.315.524.6.566

1. — Introduction

Sous le titre « estimation de la production forestière : principes et applications », une journée d'étude et une journée de démonstration en forêt ont été organisées, respectivement, à la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux le 2 mars 1977 et à la Station Scientifique des Epioux le 6 mai 1977 ⁽⁵⁾.

A la publication indépendante de leurs diverses communications, les collaborateurs de ces deux journées ont préféré substituer la diffusion d'un texte commun, qui réunit à la fois des informations générales (paragraphe 2) et des indications pratiques relatives à la mesure des arbres (paragraphe 3), à l'utilisation de tables et d'équations de cubage (paragraphe 4), à l'utilisation de tables de production (paragraphe 5), à la réalisation d'un inventaire complet (paragraphe 6) et à la réalisation d'un inventaire par échantillonnage (paragraphe 7).

(1) Chaire de Statistique.

(2) Centre de Recherche et de Promotion forestières (I.R.S.I.A.).

(3) Chaire de Sylviculture.

(4) Centre d'Ecologie forestière et rurale (I.R.S.I.A.).

(5) La Station Scientifique des Epioux est une unité décentralisée de la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux installée au Domaine des Epioux, qui appartient au Centre Public d'Aide Sociale de la Ville de Mons.

Ces informations, essentiellement destinées aux praticiens, ont été volontairement simplifiées et pourront parfois paraître fort sommaires à certains. Elles pourront alors être complétées par la consultation d'ouvrages spécialisés, tels que ceux de PARDÉ (1961) et PRODAN (1965).

2. — Principes généraux

1. — Définitions.

1) *Production forestière*

L'expression « estimation de la production forestière » comprend trois termes qui méritent, avant toute autre chose, d'être définis de façon précise.

Le qualificatif forestière indique qu'il s'agit de la production d'une étendue boisée ou partiellement boisée, telle qu'une parcelle forestière de gestion ou d'expérience, une coupe forestière, une propriété forestière ou l'ensemble d'une région ou d'un pays partiellement boisé. A la limite, il pourrait s'agir également de la production d'un seul arbre, isolé ou considéré comme tel.

La production sera généralement une production en volume de matière ligneuse, dont il faut cependant spécifier clairement les limites.

On pourrait penser, en premier lieu, au volume total du ou des arbres, ce qui impliquerait de prendre en considération le volume de toutes les branches, aussi fines soient-elles, et ce qui ne sera en fait que très rarement le cas.

Pour éviter cet écueil, on s'arrêtera plus volontiers au volume du bois fort, correspondant à une découpe de 22 cm de circonférence ou, ce qui est équivalent, de 7 cm de diamètre. Encore faudra-t-il préciser s'il s'agit du bois fort de la tige principale (VC22), du bois fort des branches (VC22B) ou de l'ensemble (VC22 + VC22B) (1).

Les volumes pourront également être limités à d'autres découpes, définies soit en grosseur, soit en hauteur : nous parlerons par exemple des volumes jusqu'à une découpe de 60 cm, 90 cm et 120 cm de circonférence (VC60, VC90 et VC120) et des volumes jusqu'à une hauteur de 4 m, 8 m et 12 m (VH4, VH8 et VH12).

D'autre part, la distinction doit être faite entre volumes mesurés sur écorce (c'est-à-dire écorce comprise) ou sous écorce (c'est-à-dire écorce exclue). Sauf indications contraires, nous considérerons toujours le volume sur écorce.

Enfin, il y a lieu de distinguer dans certains cas le volume du peuplement sur pied ou peuplement principal et le volume des éclaircies ou peuplement accessoire.

2) *Estimation*

L'emploi du mot estimation indique clairement qu'il ne s'agit pas de mesurer la production forestière de façon tout à fait exacte, sans erreurs, mais au contraire de l'estimer, en sachant parfaitement bien que des erreurs seront commises et en chiffrant leur ordre de grandeur.

(1) Les symboles donnés entre parenthèses sont ceux que nous avons adoptés par ailleurs (DAGNELIE *et al.*, 1976) et qui seront utilisés dans la suite de ce travail.

Ces erreurs peuvent être de deux types : les erreurs systématiques conduisent, comme leur nom l'indique, à des sous-évaluations ou des surévaluations systématiques de la production, tandis que les erreurs aléatoires résultent du hasard et de l'imperfection des observations, tout en se compensant ou en s'annulant en moyenne.

Les erreurs systématiques peuvent être évitées dans certaines conditions. Quant aux erreurs aléatoires, leur importance peut être chiffrée par l'utilisation du coefficient de variation (CV) ou du coefficient de variation résiduelle (CVR). Ces coefficients mesurent la dispersion aléatoire des différentes observations qui pourraient être effectuées dans des conditions semblables (par exemple sur des arbres de même grosseur ou par différents observateurs), cette dispersion étant exprimée en pour-cent de la vraie valeur, que l'on cherche à estimer.

En première approximation, on peut dire que l'erreur commise est inférieure au coefficient de variation dans 2 cas sur 3 et qu'elle est inférieure au double du coefficient de variation dans 95 cas sur 100. Cette limite supérieure, égale ou double du coefficient de variation, est souvent considérée comme l'erreur maximum.

2. — *Inventaire complet.*

1) *Principe*

La première méthode d'estimation de la production forestière qui vient à l'esprit est le recensement ou l'inventaire complet, au cours duquel tous les arbres sont observés individuellement, au moins en ce qui concerne une de leurs caractéristiques.

Des indications pratiques relatives à la réalisation des inventaires complets sont données au paragraphe 6.

2) *Caractéristiques des arbres*

Les caractéristiques des arbres qui sont observées le plus couramment sont leur grosseur (circonférence ou diamètre) et leur hauteur.

La circonférence et le diamètre sont mesurés à une hauteur de référence, généralement de 1,5 m en Belgique et 1,3 m dans les pays étrangers. Par souci d'harmonisation, nous proposons de donner progressivement la préférence aux circonférences ou aux diamètres à 1,3 m (C130 ou D130).

Quant à la hauteur, il s'agit normalement de la hauteur totale (HTOT), mesurée du pied de l'arbre jusqu'à sa pousse terminale.

Des indications pratiques relatives à l'observation de ces caractéristiques sont données au paragraphe 3.

Ajoutons encore ici que les arbres, considérés individuellement, peuvent être caractérisés aussi par leur surface terrière, c'est-à-dire par la surface de leur section horizontale à la hauteur de référence adoptée pour mesurer la circonférence ou le diamètre (section horizontale à 1,3 ou 1,5 m de hauteur), et par leurs différents volumes, qui ont été définis ci-dessus et qui peuvent être déterminés à l'aide des tables ou des équations de cubage dont il sera question au paragraphe 4.

3) *Caractéristiques des peuplements*

Parmi les principales caractéristiques des peuplements forestiers figurent le nombre de bois par hectare (N), la surface terrière totale par hectare (G) et le volume total par hectare (V), ces deux dernières valeurs étant calculées par simple addition des valeurs correspondantes relatives aux différents arbres.

A ces totaux, on peut adjoindre des moyennes, telles que la circonférence moyenne, la hauteur dominante et le volume moyen.

En général, la valeur considérée comme circonférence moyenne (CMOY) n'est pas la moyenne arithmétique simple des circonférences des différents arbres, mais bien la circonférence de l'arbre de surface terrière moyenne, c'est-à-dire de l'arbre dont la surface terrière est égale à G/N .

De même, la moyenne arithmétique simple des hauteurs de tous les arbres est rarement utilisée en pratique. Elle cède la place à des hauteurs moyennes par catégories de grosseur et à la hauteur dominante, qui est égale à la moyenne des hauteurs totales d'une certaine fraction des arbres les plus gros ou les plus hauts. Conventionnellement, nous considérerons comme hauteur dominante (HDOM) la hauteur moyenne totale des 10 plus gros bois par hectare pour les essences feuillues et des 100 plus gros bois par hectare pour les essences résineuses.

Quant au volume moyen (VMOY), il s'agit bien, par contre, de la moyenne arithmétique simple des volumes individuels des différents arbres (V/N).

3. — *Inventaire par échantillonnage.*

1) *Principe*

Pour éviter le travail de dénombrement et de mesure de tous les arbres, on remplace parfois l'inventaire complet par un inventaire partiel ou par échantillonnage ou par sondage, au cours duquel seule une certaine fraction des arbres sont mesurés.

La solution la plus simple est de choisir une ou plusieurs parcelles considérées comme représentatives de l'ensemble du peuplement ou du domaine auquel on s'intéresse. Cette façon de faire n'est pas à l'abri de toute critique, dans la mesure où le choix des parcelles peut être très subjectif et où l'utilisation d'une ou d'un petit nombre de parcelles ne permet pas de chiffrer l'importance des risques d'erreur que l'on court.

Aussi est-il préférable de procéder à un échantillonnage statistique, qui conduit à utiliser un nombre assez important de petites placettes ou cellules judicieusement réparties sur le terrain.

2) *Placettes d'échantillonnage*

Dans le cas de l'échantillonnage statistique, les placettes sont généralement de forme circulaire et d'une étendue de quelques ares.

Leur étendue et leur nombre déterminent l'intensité d'échantillonnage, aussi appelée fraction échantillonnée ou fraction sondée ou taux de sondage, qui n'est autre que la surface totale des placettes inventoriées exprimée en pour-cent de la surface totale prise en considération (par exemple 4 % si une placette de 4 ares est installée pour chaque hectare de forêt).

Le nombre de placettes et l'intensité d'échantillonnage permettent aussi de chiffrer la précision des résultats obtenus, en termes de coefficients de variation.

Ces différentes notions seront illustrées dans le paragraphe 7, où une distinction sera également faite entre placettes permanentes, dont les limites sont fixées à demeure, pour une période relativement longue, et placettes temporaires ou instantanées, qui ne sont pas repérées de façon définitive sur le terrain.

3) Méthodes d'échantillonnage

Le choix de l'emplacement des placettes peut se faire selon différentes méthodes, appelées méthodes d'échantillonnage ou de sondage. Les méthodes les plus couramment utilisées sont l'échantillonnage aléatoire et l'échantillonnage systématique.

Dans le cas de l'échantillonnage aléatoire, l'emplacement de chacune des placettes est déterminé entièrement au hasard et de façon tout à fait indépendante du choix des autres placettes. Cette méthode, qui n'est pas dépourvue de qualités théoriques, est cependant d'un emploi relativement difficile en pratique.

Dans le cas de l'échantillonnage systématique, le choix de la première placette peut être fait au hasard, mais toutes les autres placettes sont ensuite localisées de façon régulière par rapport à la première, selon un maillage ou un réseau carré ou rectangulaire. Au contraire de la précédente, cette méthode présente des inconvénients sur le plan statistique, mais est d'un usage beaucoup plus facile en forêt.

Dans un cas comme dans l'autre, avant toute implantation de placettes, le peuplement ou le domaine considéré peut être divisé en deux ou plusieurs zones ou strates, correspondant par exemple à différentes essences, à différents types de végétation ou à différentes classes d'âge. L'échantillonnage est alors dit stratifié.

La figure 1 indique ce que peut être un échantillonnage complètement aléatoire, un échantillonnage systématique simple et un échantillonnage systématique en strates : dans ce dernier cas, on a supposé qu'en raison par exemple de l'hétérogénéité plus grande du peuplement, la fraction sondée devait être deux fois plus importante dans la strate A que dans la strate B.

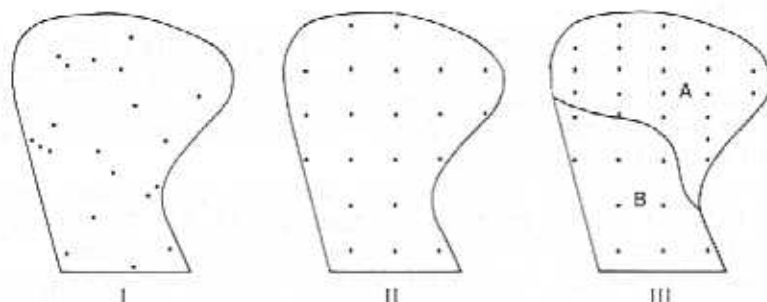


Fig. 1. — Échantillonnage aléatoire (I), échantillonnage systématique (II) et échantillonnage systématique stratifié (III).

4. — Divers.

D'autres méthodes d'estimation de la production forestière peuvent être utilisées.

Parmi celles-ci figure l'emploi de tables de production, qui permettent de déterminer les principales caractéristiques des peuplements d'âge constant, en fonction seulement de leur âge et de leur hauteur dominante. Il en sera question au paragraphe 5.

3. — Mesure des arbres

Les tables de cubage utilisées pour calculer le volume des arbres sur pied et des peuplements postulent la mesure soit de la circonférence ou du diamètre et de la hauteur totale individuelle de chaque arbre, soit de la hauteur totale moyenne par catégories de grosseur, soit encore de la hauteur dominante. Cette dernière est aussi utilisée pour définir les classes de production des peuplements (paragraphe 5).

1. — Circonférence et diamètre.

Les circonférences ou les diamètres se mesurent avec soin à une hauteur déterminée, à 1,3 m ou 1,5 m du sol. Il est conseillé à l'opérateur de se munir d'une canne de 1,3 m ou 1,5 m de longueur et de prendre les mesures du côté de l'amont de l'arbre s'il se trouve en terrain incliné.

Dans notre pays, l'usage du ruban forestier est généralisé, sauf dans les cantons de l'Est où on recourt au compas forestier. Ce dernier est plus lourd et encombrant, plus difficile à manier et plus cher à l'achat que le mètre ruban.

Pour les tiges parfaitement circulaires, les valeurs obtenues avec le ruban et le compas sont équivalentes; sinon, les résultats diffèrent avec la forme du tronc et ses irrégularités.

Selon PRODAN (1965), le ruban forestier est préférable pour la récolte de données dans les parcelles d'expériences permanentes ou semi-permanentes inventoriées à des intervalles réguliers car, quelle que soit la forme de la section d'un arbre, la dispersion des mesures répétées en circonférence est pratiquement nulle.

2. — Hauteur totale.

1) Principe

Parmi les appareils qui servent à mesurer les arbres debout, le plus utilisé est le dendromètre de BLUME-LEISS. Son prix n'est pas trop élevé; l'appareil est léger, peu encombrant et, avec un peu d'habitude, il permet d'apprécier très rapidement, en 2 ou 3 minutes toutes manœuvres comprises, la hauteur totale à 25 cm près.

Sur le côté gauche du boîtier du BLUME-LEISS, qui se tient comme un revolver, existent quatre échelles de hauteur (15, 20, 30, 40 m) et une échelle graduée en degrés, destinée à la mesure des pentes.

Les distances de l'observateur à l'arbre (15, 20, 30, 40 m) sont mesurées à l'aide du viseur dioptrique fixé dans le boîtier et d'une mire pliante sur laquelle figurent cinq voyants blancs et les chiffres 15, 20, 30, 40.

2) *Emploi du dendromètre BLUME-LEISS*

L'emploi du dendromètre BLUME-LEISS peut se résumer comme suit :

1^o Apprécier, à l'œil, la hauteur totale de l'arbre. S'il approche, par exemple, 30 m de hauteur, on déplie la mire pliante sur 30 m et on la fixe sur le tronc de l'arbre à hauteur d'homme.

2^o Se placer à une distance correspondant approximativement à celle affichée à la mire (par exemple 30 m) et à l'aide du viseur dioptrique, préciser la distance de manière à ce que l'image virtuelle coïncide exactement avec l'image réelle, c'est-à-dire de façon que les deux voyants blancs du centre de la mire se superposent exactement.

3^o Viser successivement :

a. le pied de l'arbre et, une fois le pendule arrêté, lire la valeur enregistrée sur l'échelle correspondant à la distance affichée à la mire (par exemple 30 m);

b. le bourgeon terminal ou les découpes choisies et lire comme précédemment la valeur enregistrée.

4^o Calculer la hauteur :

a. en ajoutant les valeurs a et b si elles se trouvent de part et d'autre du 0 de l'échelle;

b. en soustrayant la plus petite valeur de la plus grande dans le cas contraire;

c. en corrigeant éventuellement la hauteur lue en fonction de la pente.

Jusqu'à 6 à 7^o de pente, aucune correction de lecture n'est apportée en pratique à la hauteur. Lorsque la pente est plus forte, il faut mesurer l'angle que fait avec l'horizontale la ligne de visée (de l'observateur à l'arbre à hauteur des yeux). On consulte alors la table de correction, fixée sur la face droite du boîtier et qui donne, pour l'angle en question, le coefficient de correction. Il faut multiplier la hauteur de l'arbre par ce coefficient de correction et soustraire le chiffre trouvé du premier résultat, pour obtenir la hauteur exacte de l'arbre. Si, par exemple, la hauteur lue est de 27 m et la pente de 17^o, on a :

coefficient de correction = 0,09

correction = $27 \times 0,09 = 2,43$ m

hauteur exacte = $27 - 2,43 = 24,57$ ou 24,6 m.

3) *Commentaires*

Toutes les mesures de hauteur doivent être prises avec le plus grand soin, car elles comportent toujours un certain risque d'erreurs, les unes propres à l'instrument de mesure, les autres dues à l'opérateur. Ces erreurs sont généralement estimées à 1 % pour les résineux, entre 2 et 3 % pour les feuillus.

Chez les résineux, il est relativement facile de repérer la pointe de l'arbre; par contre, chez les feuillus, cette opération est souvent difficile à cause du développement de la couronne feuillée en demi-cercle, qui cache le bourgeon terminal en période de feuillaison. La mobilité des cimes par grand vent, la rectitude imparfaite des fûts, la présence de fourches augmentent encore les erreurs.

Chez les feuillus, à cime bien développée, une surestimation de 5 à 10 % est à craindre. La figure 2 donne une idée de la surestimation SS' dans le cas où on ne repère pas convenablement le bourgeon terminal (S), situé au centre de la cime.

Il faudra éviter autant que possible de mesurer un arbre penché et de choisir un point de station sur une pente. Le fait que l'arbre est incliné vers l'observateur ou dans la direction opposée apporte une surestimation SS' ou une sous-estimation SS'' qui peut être très importante (figure 3).

3. — Hauteur totale moyenne.

La hauteur totale moyenne par catégories de grosseur peut être obtenue en observant, par exemple, un arbre sur 5 ou sur 10 dans chaque catégorie et en calculant la moyenne arithmétique des hauteurs individuelles.

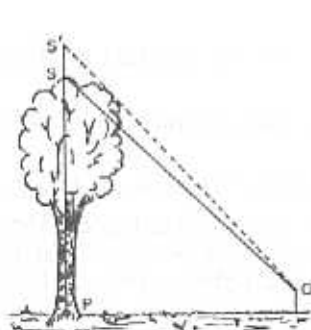


Fig. 2 — Surestimation de la hauteur dans le cas d'un arbre vertical.

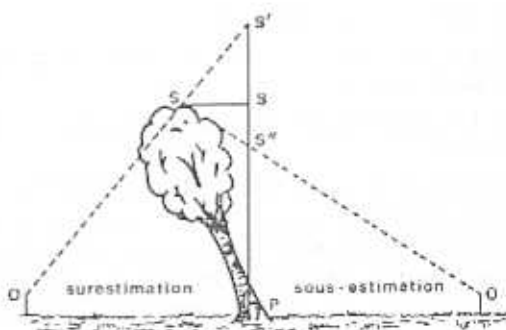


Fig. 3 — Surestimation ou sous-estimation de la hauteur dans le cas d'un arbre incliné.

4. — Hauteur dominante.

Dans la pratique, il n'est pas nécessaire, pour déterminer la hauteur dominante, d'observer les dix plus gros bois à l'hectare pour les essences feuillues et les cent plus gros bois à l'hectare pour les essences résineuses.

Cette hauteur peut en effet être obtenue à partir d'une série de points d'observation localisés soit sur une ligne de visée, dont le point de départ est choisi au hasard mais dont tous les autres se trouvent à égale distance, soit selon un réseau de mailles carrées ou rectangulaires, dont la base coïncide par exemple avec un chemin, une ligne de chasse, une limite communale ou une limite de coupe.

En chaque point matérialisé sur le terrain, l'opérateur mesure la hauteur totale de la plus grosse tige parmi celles qui poussent dans un rayon de 18 m (10 ares) pour les feuillus et de 6 m (1 are) pour les résineux. Le nombre de points requis dépend naturellement de l'étendue, de l'irrégularité ou de la diversité d'âge du peuplement.

D'après HAMILTON (1975), une précision satisfaisante est obtenue, dans le cas d'un peuplement équienné, en se conformant au tableau 1. Dans le cas d'un peuplement inéquienné, nous suggérons de doubler le nombre de points.

TABLEAU 1. — *Nombre de mesures par hectare, suivant l'état du peuplement.*

Surface en ha	Nombre de mesures dans un peuplement	
	uniforme	non uniforme
0 à 2	6	6
2 à 10	8	12
10 et plus	10	16

Dans une pessière uniforme de 2 ha, par exemple, il faudra s'arrêter tous les 30 ou 35 m sur une ligne de visée de 200 m de longueur, et mesurer ainsi, en 6 points, la hauteur totale du plus gros bois dans un rayon de 6 mètres; dans un peuplement non uniforme de même dimension, il faudra s'arrêter tous les 25 m, pour mesurer 8 fois la hauteur totale du plus gros bois dans un rayon de 6 mètres. Si la surface est de 10 ha ou plus, 1 point tous les 100 m suffit dans le cas d'un peuplement uniforme et 1 point tous les 50 m environ dans le cas d'un peuplement non uniforme.

Rappelons que la hauteur dominante est universellement reconnue comme critère d'appréciation de la productivité d'un peuplement et, partant, de la fertilité d'une station. Elle augmente de façon continue avec l'âge, mais n'est que fort peu affectée par l'intensité des éclaircies, qui ne portent guère sur les gros sujets. Par contre, la hauteur moyenne d'un peuplement (moyenne arithmétique des hauteurs de tous les arbres) varie brutalement et instantanément après chaque éclaircie. C'est ce qui explique que la hauteur dominante est utilisée pour construire les tarifs de cubage à une entrée, qui servent à cuber les peuplements, et qu'elle est aussi de plus en plus employée pour construire des tables de production.

4. — Utilisation de tables et d'équations de cubage

Les tarifs de cubage mathématiques donnent, sous la forme d'équations de cubage ou de tableaux de chiffres, les *volumes moyens* d'arbres de différentes dimensions, abattus et cubés par billons jusqu'à différentes découpes (1).

Trois types de tables de cubage ont été construites pour obtenir le volume moyen à différentes hauteurs du fût (12, 8 et 4 m) ou à différentes découpes de circonférence (120, 90, 60 et 22 cm) (DAGNELIE *et al.*, 1976).

Ces tables sont fonction :

- d'une variable (tarif à 1 entrée) : la circonférence ou le diamètre à 1,3 ou 1,5 m du sol;

(1) Dans la suite du texte nous parlerons indistinctement de tarifs ou de tables de cubage. Il nous paraît toutefois opportun de distinguer les « tables » ou les « tarifs », issus d'ajustements mathématiques, des « barèmes », élaborés à partir de méthodes graphiques (BOUCHON, 1974).

- de deux variables (tarifs à 2 entrées) : la circonférence ou le diamètre à 1,3 ou 1,5 m du sol et la hauteur totale;
- de la circonférence ou du diamètre à 1,3 ou 1,5 m du sol et de la hauteur dominante (tarifs à 1 entrée gradués en fonction de la hauteur dominante du peuplement).

1. — *Tables de cubage à une entrée.*

Ces tables donnent, en fonction uniquement de la circonférence ou du diamètre, les volumes bois fort de la tige et des branches, les volumes des fûts de 12, 8 et 4 m de longueur, le coefficient de forme de la tige et l'épaisseur de l'écorce, en valeur absolue et en pour-cent de la surface terrière.

Ces tarifs sont d'un emploi simple et rapide. Ils conviennent tout particulièrement pour le cubage des peuplements homogènes (les plantations pures d'épicéa et d'âge constant) et lorsqu'on demande une estimation en volume rapide et approchée d'un peuplement. Leur emploi se justifie aussi comme tarif aménagement.

Ils ne peuvent servir pour cuber des arbres isolés, ni pour estimer le volume d'un peuplement pour lequel une grande exactitude est demandée.

Le tableau 2 présente un extrait de la table à une entrée pour le chêne rouge d'Amérique.

TABLEAU 2. — *Exemple de table de cubage à une entrée (C130)*

VOLUMES A DIFFERENTES DECOUPES,
COEFFICIENT DE FORME ET EPAISSEUR DE L'ECORCE
EN FONCTION DE LA CIRCONFERENCE A 1,30 M (C130)

CHÊNE ROUGE
D'AMÉRIQUE

C130	D130	VC22	VC22B	VH12	VH8	VH4	F22	E	E100
35	11,1	0,044	0,000	0,004	0,030	0,034	0,801	0,22	7,87
45	14,3	0,110	0,000	0,074	0,081	0,061	0,708	0,30	8,37
55	17,5	0,192	0,000	0,157	0,142	0,094	0,649	0,38	8,69
65	20,7	0,290	0,012	0,251	0,213	0,133	0,608	0,46	8,92
75	23,9	0,403	0,023	0,356	0,292	0,178	0,578	0,54	9,08
85	27,1	0,532	0,046	0,474	0,381	0,228	0,555	0,62	9,20
95	30,2	0,676	0,081	0,603	0,479	0,284	0,537	0,70	9,30
105	33,4	0,836	0,128	0,745	0,586	0,346	0,523		
115	36,6	1,012	0,188	0,898	0,703				
125	39,8	1,203	0,261	1,062					
135	43,0	1,409	0,344						
145	46,2	1,631	0,434						

D'après ce tableau, on constate qu'un chêne rouge de 95 cm de tour cube :

- en bois fort tige (VC22) : 0,676 m³,
- en bois fort branches (VC22B) : 0,081 m³,
- jusqu'à une découpe de 12 m (VC12) : 0,603 m³,
- etc.

On relève en outre :

- que le coefficient de forme du bois fort de la tige (F22) est égal à 0,537;
- que l'épaisseur de l'écorce (E) est de 0,7 cm;
- qu'en pour-cent de la surface terrière (E100), l'écorce représente 9,3 %.

2. — Tables de cubage à deux entrées.

Ces tables donnent, en fonction de la circonférence ou du diamètre et de la hauteur totale de l'arbre ou de la hauteur totale moyenne par catégories de grosseur, les volumes bois fort tige, les volumes jusqu'à des découpes situées à 60, 90 et 120 cm de circonférence.

Elles sont nettement plus précises que les précédentes et elles sont recommandées pour cuber avec précision un peuplement ou un groupe d'arbres occupant plusieurs ares.

Le tableau 3 présente un exemple de table à 2 entrées, pour le chêne américain, qui donne le volume de la tige jusqu'à une découpe de 60 cm, en fonction de la circonférence et de la hauteur totale (HTOT) de l'arbre ou de la hauteur totale moyenne par catégories de grosseur.

TABLEAU 3. — Exemple de table de cubage à deux entrées (C130 et HTOT)

VOLUME JUSQU'À 60 CM DE CIRCONFÉRENCE (VC60)
EN FONCTION DE LA CIRCONFÉRENCE À 1,30 M (C130)
ET DE LA HAUTEUR TOTALE (HTOT) CHÊNE ROUGE
D'AMÉRIQUE

C130	D130	HTOT									
		12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
65	20,7	0,000	0,030	0,093	0,156	0,219	0,282	0,344	0,407	0,470	0,533
75	23,9	0,050	0,116	0,182	0,249	0,315	0,381	0,448	0,514	0,580	0,647
85	27,1	0,145	0,215	0,285	0,355	0,425	0,496	0,566	0,636	0,706	0,776
95	30,2	0,252	0,326	0,401	0,475	0,550	0,624	0,698	0,773	0,847	0,922
105	33,4	0,371	0,450	0,529	0,608	0,688	0,767	0,846	0,925	1,004	1,083
115	36,6	0,502	0,586	0,671	0,755	0,839	0,924	1,008	1,092	1,177	1,261
125	39,8	0,645	0,735	0,825	0,915	1,005	1,095	1,185	1,275	1,365	1,455
135	43,0	0,799	0,895	0,992	1,088	1,184	1,280	1,377	1,473	1,569	
145	46,2	0,966	1,069	1,171	1,274	1,377	1,480	1,583			
155	49,3	1,144	1,254	1,364							
165	52,5	1,334									
175	55,7										

Il ressort de ce tableau qu'un chêne de 125 cm de tour et de 20 m de hauteur totale cube 1,005 m³ jusqu'à la découpe de 60 cm de circonférence.

3. — Tables de cubage graduées en fonction de la hauteur dominante.

Ces tables donnent, en fonction de la circonférence ou du diamètre et de la hauteur dominante du peuplement, toute la série des volumes cités précédemment.

Elles peuvent servir comme tarifs aménagement et pour cuber des parcelles d'expérience inventoriées périodiquement.

Quant à leur précision et à la rapidité d'exécution des opérations, elles se situent entre les tarifs à une entrée et les tables à deux entrées.

Le tableau 4 est un exemple de tarifs qui donnent, toujours pour la même essence, en fonction de la circonférence (C130) et de la hauteur dominante (HDOM), le volume des fûts de plus de 90 cm de circonférence.

Pour cuber un peuplement qui a une hauteur dominante de 24 m, il suffit de consulter la colonne des 24 m, pour connaître le volume des fûts de plus de 90 cm de tour. Dans un tel peuplement, un chêne de 95 de circonférence cube 0,328 m³, celui de 125 cm cube 0,863 m³, etc.

4. — Equations de cubage.

Chaque table ou tarif a été calculé à partir d'une équation de cubage qui permet, déjà à l'aide d'une machine à calculer portative, de connaître très rapidement les volumes et d'effectuer les calculs d'accroissements.

L'importance des erreurs aléatoires a été chiffrée par le coefficient de variation résiduelle. Il permet de savoir avec quelle approximation le volume a été obtenu, ce qui présente un avantage sur les barèmes établis par ajustement graphique. Si l'on veut, par exemple, connaître le volume bois fort de la tige (VC22) d'un chêne rouge d'Amérique de 125 cm de circonférence à 1,3 m de hauteur, situé dans un peuplement qui a 20 m de hau-

TABLEAU 4. — Exemple de tables de cubage à une entrée (C130) graduées en fonction de la hauteur dominante (HDOM)

VOLUME JUSQU'À 90 CM DE CIRCONFÉRENCE (VC90)
EN FONCTION DE LA CIRCONFÉRENCE À 1,30 M (C130)
ET DE LA HAUTEUR DOMINANTE (HDOM)

CHÊNE ROUGE
D'AMÉRIQUE

C130	D130	HDOM								
		16	18	20	22	24	26	28	30	
95	30,2	0,146	0,191	0,237	0,282	0,328	0,373	0,418	0,464	
105	33,4	0,282	0,334	0,386	0,438	0,490	0,542	0,593	0,645	
115	36,6	0,432	0,491	0,550	0,609	0,668	0,727	0,786	0,845	
125	39,8	0,596	0,662	0,729	0,796	0,863	0,929	0,996	1,063	
135	43,0	0,773	0,848	0,923	0,998	1,073	1,148	1,223	1,298	
145	46,2	0,962	1,048	1,132	1,216	1,300	1,384	1,468	1,552	
155	49,3	1,168	1,262	1,356	1,450	1,544	1,638	1,732	1,826	
165	52,5	1,386	1,488	1,590	1,692	1,794	1,896	1,998	2,100	
175	55,7	1,616	1,726	1,836	1,946	2,056	2,166	2,276	2,386	

teur dominante on peut, à l'aide des tables dendrométriques (DAGNELIE *et al.*, 1976), obtenir directement le volume en consultant la table à une entrée (p. 46, CR4), qui donne 1,017 m³, ou utiliser l'équation de la page 54 (CR12), qui s'écrit comme suit en langage de programmation fortran :

$$VC22 = -0,11994 + 0,13559 E - 04 * C130^{**2} + 0,73103 E - 02 * HDOM + 0,24918 E - 05 * C130^{**3} * HDOM \quad 13,4$$

et doit se lire :

$$VC22 = -0,11994 + 0,000013559 C130^2 + 0,0073103 HDOM + 0,0000024918 C130^3 HDOM$$

Pour C130 = 125 cm et HDOM = 20 m, on a :

$$\begin{aligned} VC22 &= -0,11994 + 0,000013559 (125)^2 + 0,0073103 (20) \\ &\quad + 0,0000024918 (125)^3 (20) \\ &= -0,11994 + 0,211859375 + 0,146206 + 0,7786875 \\ &= -0,11994 + 1,136752875 \\ &= 1,016812875 \text{ ou } 1,017 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

avec un coefficient de variation résiduelle de 13,4 %.

Le coefficient de variation résiduelle de 13,4 % signifie qu'en première approximation, une erreur inférieure au coefficient de variation (13,4 %) est commise dans 2 cas sur 3 et qu'une erreur inférieure au double du coefficient de variation (26,8 %) l'est dans 95 cas sur 100 ou, ce qui est équivalent, qu'une erreur supérieure au coefficient de variation (13,4 %) n'est commise que dans 1 cas sur 3 et qu'une erreur supérieure au double du coefficient de variation (26,8 %) ne l'est que dans 5 cas sur 100.

Pour le calcul d'autres types de volume, la même démarche peut être suivie en utilisant les équations à une ou deux variables.

Signalons que si l'on veut connaître le volume d'un arbre à partir de la souche, on peut, soit passer par l'équation qui donne la circonférence à 1,3 m ou 1,5 m de hauteur, soit utiliser, ce qui est préférable, l'une ou l'autre des deux équations qui donnent directement le volume bois fort de la tige à partir de la circonférence de la souche, ou le volume bois fort de la tige en faisant intervenir à la fois la circonférence de la souche et la hauteur dominante du peuplement, si celle-ci peut être déterminée. Les tables complètes n'ont pas été publiées, mais les équations sont disponibles (DAGNELIE *et al.*, 1976).

5. — Utilisation de tables de production

1. — Buts d'une table de production.

La table de production est un moyen indirect d'estimation, destiné à mesurer et à prévoir rapidement et au moindre coût, la croissance de peuplements pour des périodes de temps relativement longues.

Le plus souvent, on parlera de tables de production « normales », basées essentiellement sur l'âge et la productivité stationnelle, pour des peuplements équiennes monospécifiques pleins et réguliers, sans vides, ni surstockages. La table de production est une « image » moyenne de l'état actuel ou prévisible d'un peuplement; il convient d'en être conscient lors de l'interprétation des résultats qu'elle peut fournir.

L'utilisation de la table de production se conçoit principalement en matière d'aménagement forestier (calcul de possibilités, modèles de sylviculture, planification régionale) et de productivité forestière (choix d'essences).

2. — Contenu d'une table de production.

Habituellement, la table de production se présente sous la forme d'un ensemble de tableaux fournissant les valeurs de diverses caractéristiques dendrométriques en fonction de l'âge et d'un indice de productivité matérialisant une classe de productivité ou de production ou encore de fertilité.

Afin de fixer les idées et mieux faire comprendre le mécanisme d'utilisation d'une table, nous nous référerons, dans les lignes qui suivent, à celle qui a été récemment construite pour l'épicéa commun en Belgique (DAGNELIE *et al.*, 1976).

Dans cette table, quatre classes — ou niveaux de productivité — sont considérées; elles sont matérialisées par des valeurs de la hauteur dominante (HDOM) échelonnées de 3 en 3 m (30, 27, 24 et 21 m) à l'âge (A) de référence de 50 ans.

Pour chacun des niveaux, la table fournit, en ce qui concerne le peuplement principal, accessoire et total, les informations suivantes, ramenées à l'hectare, par classes d'âge de 5 ans :

- *peuplement principal* (avant éclaircie) :
 - nombre de bois (N),
 - circonférence de l'arbre de surface terrière moyenne (CMOY),
 - surface terrière (G),
 - volume de l'arbre moyen (VMOY),
 - volume total (V);
- *peuplement total* (peuplement principal + éclaircies) :
 - nombre de bois (N),
 - circonférence de l'arbre de surface terrière moyenne (CMOY),
 - surface terrière (G),
 - volume moyen (VMOY),
 - volume total (V),
 - surface terrière cumulée (GCUM),
 - volume cumulé (VCUM);
- *peuplement total* (peuplement principal + éclaircies) :
 - surface terrière totale (GTOT),
 - volume total (VTOT),
 - accroissement annuel courant en surface terrière (ACG),
 - accroissement annuel courant en volume (ACV),
 - accroissement annuel moyen en surface terrière (AMG),
 - accroissement annuel moyen en volume (AMV).

3. — Principe d'utilisation.

Les paramètres d'entrée dans une table de production conventionnelle sont l'âge et la hauteur dominante, à partir desquels il est possible de déterminer la classe de fertilité.

L'âge — à partir de la plantation — est obtenu, soit par consultation de plans parcellaires, soit par sondage à la tarière de PRESSLER, jusqu'au cœur, de quelques arbres (1).

La détermination de la hauteur dominante se fait sur les bases déjà évoquées au paragraphe 3.4.

4. — Exemple d'utilisation.

Soit un peuplement d'épicéa de 4 ha, âgé de 52 ans et d'allure uniforme. Sa hauteur dominante, estimée sur base de 6 points de station, est de 27,08 m, soit :

$$(26,75 + 27,75 + 25,50 + 27,00 + 28,25 + 27,25) / 6 = 27,08 \text{ m.}$$

1) Détermination de la classe de production

Celle-ci se fait par interpolations successives entre âges et hauteurs dominantes « théoriques » les plus proches de ces mêmes valeurs « observées ».

(1) Afin de ne pas trop abîmer les arbres, le prélèvement à la tarière est effectué à 30 cm du sol.

Pour l'exemple envisagé, après une première interpolation portant sur l'âge, on peut constater que la hauteur dominante se situe entre les classes II et III (tableau 5).

En classe II, la hauteur dominante à 52 ans serait :

$$27,0 + \frac{2}{5} (28,2 - 27,0) = 27,48 \text{ m};$$

de même, en classe III, on aurait :

$$24,0 + \frac{2}{5} (25,2 - 24,0) = 24,48 \text{ m}.$$

La hauteur dominante observée étant égale à 27,08 m, le facteur d'interpolation à utiliser ultérieurement dans la détermination des caractéristiques du peuplement s'obtient comme suit :

$$k = \frac{27,48 - 27,08}{27,48 - 24,48} = 0,13$$

2) Détermination des caractéristiques du peuplement

De manière générale, une caractéristique dendrométrique donnée Y du peuplement considéré peut être déduite des relations suivantes :

$$Y = Y(\text{classe II}) + 0,13 (Y(\text{classe III}) - Y(\text{classe II})),$$

ou encore :

$$Y = Y(\text{classe II}) - 0,13 (Y(\text{classe II}) - Y(\text{classe III})).$$

Il en résulte, par exemple, la mise en évidence des diverses caractéristiques suivantes :

— volume du bois fort sur pied :

$$\text{à 50 ans : } V = 485 - 0,13 (485 - 422) = 477 \text{ m}^3/\text{ha},$$

$$\text{à 55 ans : } V = 505 - 0,13 (505 - 443) = 497 \text{ m}^3/\text{ha},$$

$$\text{à 52 ans : } V = 477 - \frac{2}{5} (497 - 477) = 485 \text{ m}^3/\text{ha};$$

— accroissement courant en volume bois fort entre 55 et 60 ans :

$$\text{ACV} = 15,8 - 0,13 (15,8 - 14,6) = 15,6 \text{ m}^3/\text{ha an};$$

— production totale en volume bois fort à 70 ans (coupe à blanc + éclaircies) :

$$\text{VTOT} = 1096 - 0,13 (1096 - 972) = 1080 \text{ m}^3/\text{ha};$$

— circonférence moyenne des arbres exploités à 70 ans (coupe à blanc) :

$$\text{CMOY} = 126 - 0,13 (126 - 110) = 124 \text{ cm}.$$

TABLEAU 5. — Extrait des tables de production pour l'épicéa commun
(*Picea Abies Karst.*) (DAGNELIE et al., 1976).

112

TABLES DE PRODUCTION
CLASSE II (HDOM A 50 ANS = 27 M)

EPICEA
COMMUN

A	HDOM	PEUPEMENT PRINCIPAL N CM0Y G VMOY V	N	CM0Y G	VMOY V	GCUM VCUM	ECLAIRCIES VMOY V GCUM VCUM	PEUPEMENT PRINCIP. + ECLAIRCIES GTOT VTOT ACG ACY AMV	A
50	27,0	646 91 42,7 0,751 465	115	78 5,6	0,558 64	37,1 364		74,2 785 1,12 16,8 1,48 15,7 50	
55	28,2	531 101 42,7 0,951 505	82	90 5,3	0,780 64	42,4 428		79,8 669 1,45 15,8 1,45 15,8 55	
60	29,2	449 109 42,7 1,157 520	62	102 5,1	1,007 63	47,5 491		85,1 948 1,42 15,8 1,42 15,8 60	
65	30,0	387 118 42,7 1,376 533	47	114 4,9	1,317 62	52,4 553		90,2 1024 1,39 15,8 1,39 15,8 65	
70	30,8	340 126 42,7 1,597 543					95,1 1096 1,36 15,7 1,36 15,7 70		

TABLES DE PRODUCTION
CLASSE III (HDOM A 50 ANS = 24 M)

EPICEA
COMMUN

A	HDOM	PEUPEMENT PRINCIPAL N CM0Y G VMOY V	N	CM0Y G	VMOY V	GCUM VCUM	ECLAIRCIES VMOY V GCUM VCUM	PEUPEMENT PRINCIP. + ECLAIRCIES GTOT VTOT ACG ACY AMV	A
50	24,0	847 77 41,7 0,498 422	151	67 5,4	0,370 56	37,9 318		74,2 564 1,10 15,4 1,48 13,7 50	
55	25,2	696 87 41,8 0,636 443	110	77 5,2	0,509 56	43,1 374		79,7 761 1,45 13,8 1,45 13,8 55	
60	26,3	586 95 41,9 0,785 460	83	87 5,0	0,672 56	48,1 430		85,0 834 1,42 13,9 1,42 13,9 60	
65	27,2	503 102 42,0 0,943 474	65	97 4,9	0,850 55	53,0 485		90,1 904 1,39 13,9 1,39 13,9 65	
70	28,0	438 110 42,0 1,111 487					95,0 972 1,36 13,9 1,36 13,9 70		

Bull. Soc. Roy. For. de Belgique - 86 - 8

Il convient de remarquer que, si le peuplement investigué avait présenté une surface terrière s'écartant sensiblement de la surface terrière « normale » (différence entre valeur de la table et valeur observée de 20 % par exemple), les valeurs du volume auraient pu être corrigées, proportionnellement au décalage existant entre la surface terrière réellement observée et la surface terrière « normale ».

6. — Réalisation d'un inventaire complet

L'inventaire complet ou pied par pied consiste à mesurer tous les arbres présents sur une étendue donnée. Pratiquement, on considère la circonférence à hauteur d'homme (C130 ou C150) de tous les bois et on estime des hauteurs moyennes par catégories de grosseur ou encore des hauteurs dominantes, l'utilisation de ces variables étant tributaire de la nature des tarifs de cubage susceptibles d'être pris en considération.

1. — Récolte des données.

La récolte des données est effectuée pendant le repos de la végétation, pour faciliter ultérieurement les calculs d'accroissement (1). Sur le terrain, l'équipe de récolte se compose idéalement de 3 à 4 hommes, dont 1 chef d'équipe chargé du pointage des données. Les peuplements faisant l'objet de l'inventaire sont parcourus par virées successives dans un ordre préétabli et de manière à réduire au maximum les risques d'erreur.

Les grosseurs (circonférences ou diamètres) sont mesurées par catégories, le plus souvent de 2 en 2 cm ou de 5 en 5 cm pour les diamètres et de 10 en 10 cm pour les circonférences. Des méthodes de pointage variées permettent d'enregistrer les nombres de bois, pour chaque essence considérée, au moyen de combinaisons de points et de barres par exemple. Il est important d'adopter une convention quant à la matérialisation elle-même des catégories de grosseur, en fixant une classe soit par sa valeur centrale, soit par ses limites (limite inférieure, par exemple). Souvent, dans l'optique de classes s'échelonnant de 10 en 10 cm, le point central de classe sert de référence (exemple : la classe des 45 va de 40,0 à 49,9 cm, celle des 55 de 50,0 à 59,9 cm).

Dans le même ordre d'idées, il faut prévoir la fixation d'un seuil d'inventaire : on admet généralement une valeur minimale de 30 cm de circonférence pour les résineux et de 40 cm pour les feuillus.

2. — Réduction et exploitation des données.

La ventilation des arbres par catégories de grosseur et la détermination de hauteurs (totales) par catégories ou de hauteurs dominantes permet d'utiliser les tarifs de cubage et d'estimer diverses valeurs dendrométriques à l'hectare telles que : volume (bois fort ou bois d'œuvre à découpes préétablies), surface terrière, arbres moyens (en circonférence ou en volume).

(1) Il convient d'être attentif à l'époque des mesures dans la détermination du nombre d'années séparant deux inventaires successifs, en notant la date exacte des inventaires (mois et année). En effet, selon que la période de végétation se situe avant ou après les inventaires, l'accroissement porte sur un nombre différent d'années. A titre d'exemple, dans le cas d'inventaires réalisés en novembre 1977 et février 1980, l'accroissement portera sur 2 ans alors qu'il porterait sur 3 ans si octobre 1980 avait été l'époque du dernier inventaire.

Si l'on dispose de plusieurs inventaires de matériel sur pied et d'éclaircies (ou de chablis), on peut procéder à des comparaisons, en vue de déterminer l'accroissement.

En effet, soit V_1 le volume inventorié en début d'une période d'observation donnée (premier inventaire), V_2 le volume inventorié en fin de période (second inventaire) et P le matériel éventuellement prélevé au sein de la période.

L'accroissement périodique en volume (APV) se calcule facilement au moyen de la relation suivante :

$$APV = V_2 - V_1 + P$$

qui peut aussi s'écrire sous la forme :

$$APV = V_2 - (V_1 - P)$$

L'accroissement annuel ou annuel courant s'obtient, quant à lui, en divisant l'accroissement périodique par le nombre d'années de la période; il s'agit aussi, de façon générale, d'un accroissement moyen périodique.

Il faut remarquer que ce type de problème constitue un champ d'application idéal de l'informatique, cette dernière permettant d'éviter les calculs longs et fastidieux que l'exploitation de tout inventaire complet suppose (RONDEUX, 1972). De plus en plus, on s'intéresse à l'automatisation de la phase de récolte des données au moyen d'appareils enregistreurs tels que le compas perforateur SWISSPERFO (RONDEUX, 1976).

3. — Précision.

La réalisation d'un inventaire complet exige qu'un grand soin soit apporté aux mesures sur le terrain, si l'on veut obtenir des résultats aussi précis que possible. Une source fréquente d'erreurs provient du fait que les arbres devant faire l'objet de plusieurs mesurages successifs n'ont pas été matérialisés quant au niveau de mesure (à la griffe ou à la couleur, par exemple).

Il ne faut pas non plus exclure les risques de chevauchement de virées ou au contraire les oublis lors des mesures; enfin, le type de tarif utilisé est aussi une source non négligeable d'erreurs.

Dans la pratique courante des inventaires complets réalisés avec soin, on estime que l'erreur d'inventaire est de l'ordre de 4 à 5% (variabilité des instruments, erreurs dues aux opérateurs, etc.), l'erreur relative aux tarifs de cubage n'étant pas prise en compte.

On doit cependant s'attendre à une erreur beaucoup plus grande en ce qui concerne l'accroissement résultant de la comparaison entre inventaires successifs. La théorie des erreurs indique en effet que l'erreur relative sur l'accroissement en volume (par exemple) croît beaucoup plus rapidement que l'erreur relative faite sur les volumes. Pour fixer les idées, si le matériel mesuré V_1 est de 1 000 m³, le matériel V_2 de 1 200 m³ et les erreurs de 5%, on observe donc des différences en volume respectivement égales à 50 et à 60 m³ lors des inventaires, mais l'erreur commise sur l'accroissement (soit : 1 200 — 1 000 = 200 m³) sera voisine de 80 m³, ce qui représente, en valeur relative, une erreur de 40% sur l'accroissement calculé (!) !

4. — Exemple.

Supposons que l'on ait inventorié un peuplement d'épicéas de 3 ha comportant 812 arbres et dont la hauteur dominante a été estimée à 32 m. Les circonférences de ceux-ci ont été réparties en classes de 10 cm (tableau 6).

Sur base de ces informations, on peut calculer plusieurs caractéristiques dendrométriques globales du peuplement, éventuellement ramenées à l'hectare; on aura ainsi :

- nombre de bois à l'hectare : $812/3 = 271$,
- surface terrière à l'hectare : $103,6553/3 = 34,6 \text{ m}^2$,
- volume à l'hectare : $1337,417/3 = 446 \text{ m}^3$,
- arbre de volume moyen : $1337,417/812 = 1,647 \text{ m}^3$,
- circonférence de l'arbre de surface terrière moyenne :

$$\sqrt{\frac{103,6553}{4 \pi \frac{812}{812}}} = 1,267 \text{ m ou } 126,7 \text{ cm.}$$

7. — Réalisation d'un inventaire par échantillonnage

1. — Choix de la méthode de travail.

Il existe dans certains cas des contingences telles que l'inventaire exhaustif ne peut être réalisé : superficie trop vaste pour un personnel réduit, un budget limité et un délai de réalisation trop bref. Dans ces conditions, on peut recourir à l'inventaire partiel, mais on ne doit pas perdre de vue ses caractéristiques et ses limites.

L'installation de parcelles dites représentatives d'un ensemble plus vaste présente le gros inconvénient de rendre impossible la quantification du risque d'erreur encouru par l'extrapolation, au niveau du domaine étudié, des résultats partiels obtenus. D'où son intérêt limité, si ce n'est dans le volet dendrométrique d'un parcellaire.

Les techniques systématique et aléatoire nous livrent par contre des résultats auxquels nous pouvons associer les erreurs à craindre correspondantes. Du point de vue pratique, l'échantillonnage systématique est sans conteste le plus prisé, de par sa simplicité et sa rigueur lors du travail sur le terrain.

Quelle que soit la solution choisie, il nous est loisible, afin d'augmenter la précision des résultats, de procéder à la subdivision en strates du domaine considéré (paragraphe 2.3.3).

(1) Cette valeur de 40 % peut paraître surprenante, mais il faut se souvenir que l'erreur moyenne (quadratique) d'une différence est égale à la racine carrée de la somme des carrés des erreurs moyennes obtenues sur chacun des termes de la différence, soit ici : $\sqrt{50^2 + 60^2} = 70$. Le coefficient de variation de la différence est donc bien de l'ordre de 40 % :

$$\left(100 \frac{70}{1200 - 1000}\right) = 39 \frac{1}{2} \%$$

TABLEAU 6. — Exemple de dépouillement des résultats d'un inventaire complet.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
65	12	0,0336	0,4032	0,413	4,858
75	20	0,0448	1,1648	0,558	14,534
85	34	0,0575	1,9550	0,720	24,684
95	45	0,0718	3,2310	0,914	41,130
105	81	0,0877	7,1037	1,123	90,363
115	111	0,1052	11,6772	1,353	150,183
125	160	0,1243	19,8880	1,603	256,480
135	154	0,1450	22,3300	1,875	288,750
145	91	0,1673	15,2243	2,197	197,197
155	63	0,1912	12,0456	2,480	156,240
165	10	0,2196	3,4856	2,815	45,040
175	9	0,2437	2,1933	3,170	28,530
185	6	0,2724	1,0344	3,545	21,270
195	1	0,3026	0,3026	3,942	3,942
205	2	0,3344	0,6668	4,360	8,720
215	1	0,3678	0,3678	4,798	4,798
Totaux	812		103,8563		1337,417

La signification des diverses rubriques (1), (2), etc... est la suivante :

- (1) catégories de circonférence à 1,3 m;
- (2) nombres de bois par catégories;
- (3) surfaces terrières unitaires par catégories, en m² (pour la catégorie des 65 cm par exemple : $65^2/4\pi = 336 \text{ cm}^2$ ou $0,0336 \text{ m}^2$);
- (4) surfaces terrières totales par catégories en m², soit (2) x (3);
- (5) volumes unitaires par catégories en m³, basés sur un tarif fournissant le volume du bois fort de la tige VC22 en fonction de la hauteur dominante (HDOM = 32 m);
- (6) volumes totaux par catégories en m³, soit (2) x (5).

2. — Installation des placettes et collecte des informations.

1) Nombre de placettes.

Le nombre de placettes à installer dépend essentiellement de la variabilité du matériel (CV) et de la précision souhaitée, en valeur relative, au niveau des résultats (d).

Il y a lieu, pour estimer CV, de réaliser un inventaire-pilote, c'est-à-dire d'installer quelques placettes et de calculer le coefficient de variation des résultats obtenus pour l'ensemble de ces placettes.

Si d est la précision souhaitée exprimée en pour-cent de la moyenne, le nombre n de placettes à installer sera en première approximation égal à :

$$n \sim \frac{4 CV^2}{d^2}$$

S'il s'agit d'un échantillonnage stratifié, il est possible, moyennant la connaissance de la variabilité au sein de chacune des strates, de répartir de manière optimale les n placettes à l'intérieur des différentes zones.

2) *Forme et grandeur des placettes.*

En pratique, la placette sera circulaire, car à surface égale, c'est cette forme géométrique qui possède le plus petit périmètre, le nombre d'arbres-limites (à cheval sur la ligne périmétrale) étant ainsi minimum. De plus, la délimitation de tels cercles se fait aisément à l'aide de la mire de PARDÉ et du viseur dioptrique équipant le dendromètre BLUME-LEISS.

Quant à leur grandeur, elle doit être, en théorie et pour une intensité d'échantillonnage donnée, aussi petite que possible. En fait, de manière à rester suffisamment représentatives, les placettes doivent comporter de 10 à 20 tiges, ce qui correspond en futaie résineuse à des placettes variant, en fonction de l'âge, de 2 à 7,5 ares et en futaie feuillue de 4 à 10 ares.

3) *Réalisation pratique.*

La réalisation d'un inventaire par échantillonnage comporte généralement les quatre phases suivantes : choix de la ligne de base, progression, installation des placettes et récolte des informations. Ce canevas correspond à la méthode la plus utilisée qu'est l'inventaire systématique.

Phase n° 1 : Choix de la ligne de base.

La ligne de base doit être aisément identifiable sur le terrain; elle correspondra de préférence à un élément topographique, à un coupe-feu, à un chemin ou encore à une limite de peuplement. Elle sera aussi longue et aussi rectiligne que possible, car c'est d'elle que partiront sous un angle constant les lignes de visée secondaires. Le réticule établi sera du type carré ou du type rectangulaire (éventuellement légèrement aplati).

La maille sera choisie de telle sorte qu'elle définisse au minimum le nombre de points de station obligatoires prédéfinis. Dans le cas d'un maillage carré, l'installation d'un point d'échantillonnage par demi-hectare, par hectare et par deux hectares correspond respectivement à des distances entre centres de placettes de 70,7 m, 100 m et 141,4 m.

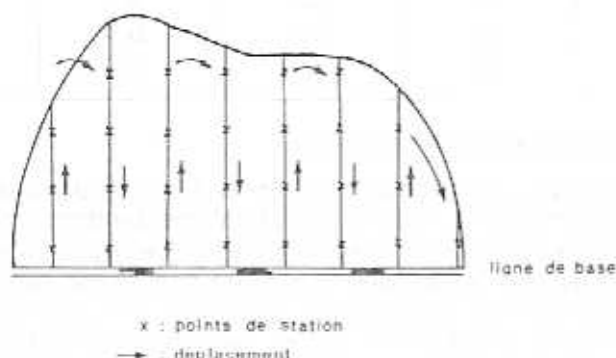


Fig. 4. — Exemple de progression

Phase n° 2 : Progression.

Elle s'effectue par exemple suivant le schéma de la figure 4, à l'aide d'une boussole et d'une corde ou d'un fil déroulable (topofil) ou même au pas, ce qui nécessite la présence d'au moins deux personnes : l'une qui indique la direction, l'autre qui se déplace suivant ses directives et procède à la mesure de la distance horizontale.

Phase n° 3 : Installation des placettes.

Pour la détermination de l'assiette des placettes, on utilise la mire de PARDÉ et le viseur dioptrique du dendromètre BLUME-LEISS.

Visant la mire à l'aide du dioptré, l'opérateur s'en rapproche ou s'en éloigne afin de ne plus avoir d'image dédoublée, c'est-à-dire de faire coïncider le voyant inférieur d'une image avec le voyant supérieur de l'autre. Il se trouve à ce moment exactement sur le périmètre le long duquel il se déplace, afin d'indiquer les arbres dont le centre au moins se trouve à l'intérieur de la placette.

Il y a lieu évidemment de régler préalablement la mire en séparant les voyants mobiles d'une distance telle qu'elle définisse l'aire choisie pour la placette (tableau 7).

Dans le cas d'un terrain en pente, cette distance doit être modifiée (tableau 7). La surface horizontale ainsi délimitée est de même importance qu'en terrain plat, mais sa forme est différente : il s'agit alors d'une ellipse, dont le grand axe est perpendiculaire à la direction de la plus grande pente.

TABLEAU 7. — Réglage de la mire de PARDÉ pour la délimitation des placettes (écartement entre les deux repères de la mire, exprimé en cm).

Pente en degrés	Surface des placettes en ares			
	2	4	5	10
0	23,9	33,9	37,9	53,5
5	24,0	34,0	38,0	53,8
10	24,3	34,4	38,5	54,4
15	24,8	35,1	39,3	55,5
20	25,5	36,1	40,4	57,1

Phase n° 4 : Récolte des informations.

Afin de quantifier l'importance du matériel sur pied dans la placette, il y a lieu de relever un certain nombre d'informations dendrométriques.

Nous mesurerons à cet effet la circonférence à hauteur de poitrine (1,3 m de préférence) de tous les arbres, la hauteur dominante de l'essence principale et éventuellement les hauteurs dominantes ou les hauteurs totales par catégorie des essences secondaires. Ces variables permettent d'effectuer le cubage des arbres à l'aide de tables à deux entrées ou à une entrée graduées en fonction de la hauteur dominante (paragraphes 4.2 et 4.3).

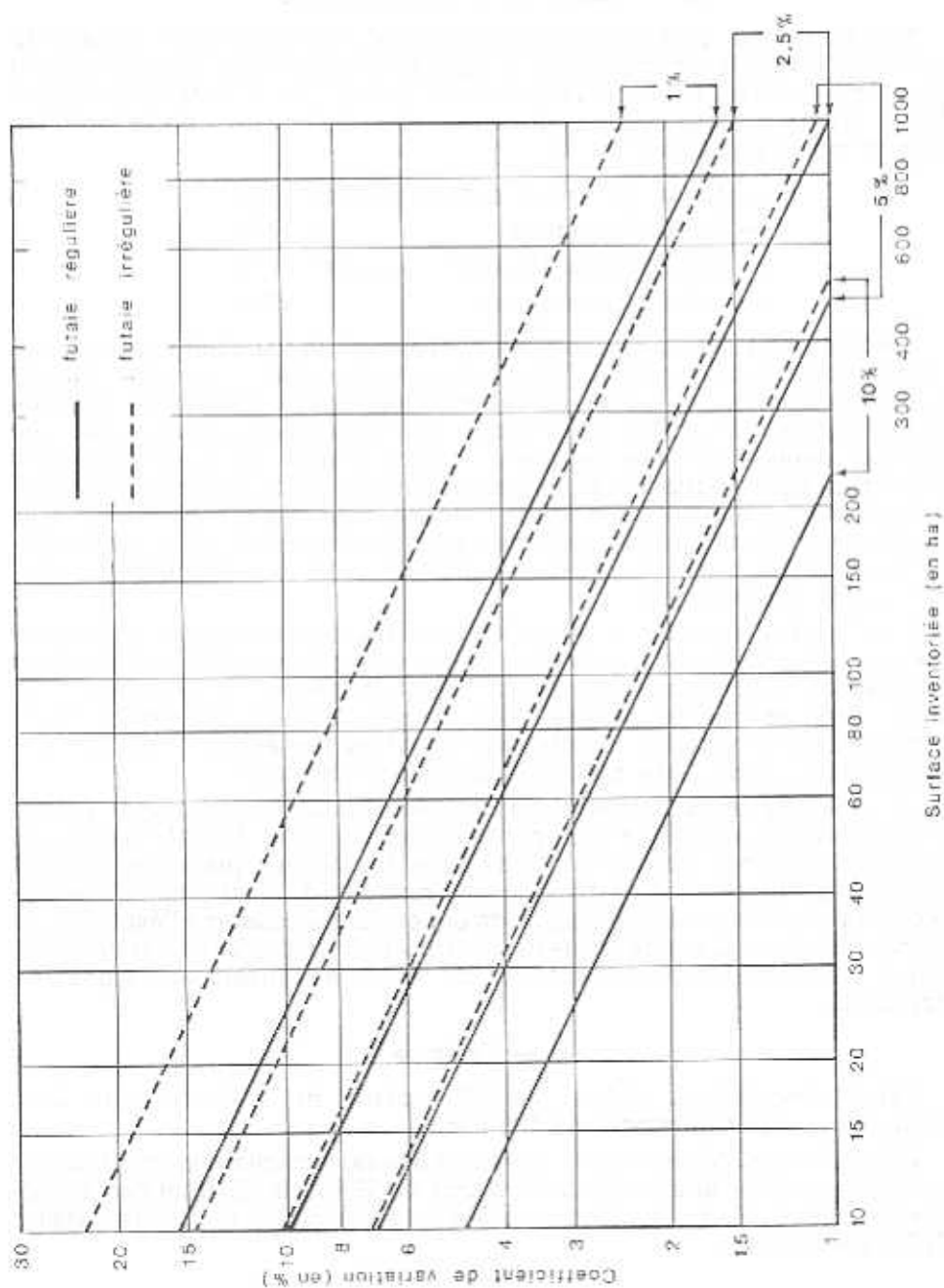


Fig. 3. — Evolution du coefficient de variation de la surface inventoriée en fonction de la surface inventoriée.

3. — Les résultats et leur précision.

Tout inventaire, qu'il soit partiel ou complet, doit répondre à un objectif précis. C'est en fonction de celui-ci que le forestier se définira un niveau de précision à respecter. Nous citerons à ce titre, les normes données par PARDÉ (1961), qui fixe comme suit, en fonction de la valeur de la forêt, les erreurs maximales admissibles :

- forêts de valeur exceptionnelle : 5 %
- forêts classiques : 7 %
- peuplements de valeur médiocre : 10 %
- estimations rapides : 15 %

Sur base de l'inventaire-pilote, en connaissant la variabilité du matériel, il sera possible de déterminer le nombre de placettes à installer, de telle sorte que la précision observée des résultats finaux soit proche de celle souhaitée (GRAYET, 1977). En pratique, la précision à attendre pour une variable donnée (nombre de tiges, surface terrière ou volume) dépend avant tout de l'importance de la fraction sondée et de la superficie totale à inventorier. L'abaque de la figure 5 donne, pour des placettes de 5 ares installées en futaie feuillue, les valeurs du coefficient de variation (soit la moitié de l'erreur maximum), en fonction de la fraction échantillonnée et de la surface inventoriée.

Il existe d'ailleurs une série de formulations mathématiques permettant de calculer à posteriori la précision obtenue, que l'inventaire soit aléatoire ou systématique, stratifié ou simple. Toutefois, cette précision sera différente selon la variable étudiée. Ainsi, le nombre de tiges sera toujours connu de manière moins précise que la surface terrière et le volume, ces derniers jouissant d'une précision quasiment identique.

Le problème de la comparaison des résultats d'inventaires par échantillonnages successifs, est par contre beaucoup plus délicat lorsque les observations n'ont pas été répétées dans les mêmes placettes. Il s'agit dans ce cas de se montrer extrêmement prudent, d'autant plus que la surface inventoriée est faible et spécialement en ce qui concerne l'évolution du nombre de tiges. Dans ce contexte, l'installation de placettes permanentes paraît indispensable pour l'obtention de résultats suffisamment dignes de confiance.

4. — Exemple.

Soit un inventaire à réaliser sur 400 hectares de futaie de hêtre, dont l'âge est approximativement de 125 ans.

Effectué sur 30 placettes circulaires de 5 ares, l'inventaire-pilote a donné un coefficient de variation pour le volume de 35 %. Ne désirant pas dépasser 5 % d'erreur pour la surface terrière et le volume, nous devons installer 200 placettes car :

$$n \sim \frac{4 \times 0,35^2}{0,05^2} \sim 200,$$

soit une placette par deux hectares.

Nous trouvons confirmation de ces normes par l'examen de la figure 5, où nous voyons que 400 ha de hêtraie inventoriés par échantillonnage à raison de 2,5 % en surface (soit 200 placettes de 5 ares sur les 400 ha) donne une précision pour la surface terrière qui varie suivant l'hétérogénéité de la forêt entre 3,2 % et 5 % (2 fois le CV).

Nous nous trouvons donc en présence d'un inventaire par échantillonnage du type systématique, non stratifié.

Réalisé selon ces directives, l'inventaire a donné les résultats suivants : 147 tiges par hectare, 24,2 m² de surface terrière et 172 m³ par hectare en moyenne pour l'ensemble de la forêt, avec des erreurs maximales de 5,4 % pour le nombre de tiges, de 4,6 % pour la surface terrière et de 4,7 % pour le volume.

Nous constatons, d'une part, que la précision est effectivement moins grande pour le nombre de tiges que pour la surface terrière et le volume et, d'autre part, que l'erreur maximale choisie n'a pas été dépassée.

8. — Conclusions

L'aménagiste et le gestionnaire de tout domaine forestier, quelle qu'en soit l'étendue, doivent savoir combien il est important de disposer de données précises relatives à la production des peuplements, pour pouvoir prendre en connaissance de cause toutes les décisions qui s'imposent. La principale conclusion de la présente synthèse est qu'il est relativement simple, à l'heure actuelle, de répondre à ce besoin.

Les outils dont le praticien peut se contenter sont en effet le mètre ruban, le dendromètre BLUME-LEISS, les tables dendrométriques et, éventuellement, la tarière de PRESSLER, la boussole et la mire de PARDÉ.

Le mètre ruban permet de mesurer des circonférences (paragraphe 3.1), tandis que le dendromètre BLUME-LEISS fournit des mesures de hauteurs totales individuelles (paragraphe 3.2) et, subsidiairement, de hauteurs moyennes par catégories de grosseur (paragraphe 3.3) et de hauteurs dominantes (paragraphe 3.4). Dans certains cas, la tarière de PRESSLER est nécessaire pour la détermination des âges (paragraphe 5.3) et la boussole pour la fixation de lignes de visées (paragraphe 7.2).

Sur la base des seules observations recueillies de cette manière, les tables et les équations de cubage permettent d'estimer très facilement les volumes des arbres (paragraphe 4), tandis que les tables de production fournissent rapidement de nombreuses caractéristiques des peuplements (paragraphe 5). De plus, ces outils suffisent à la réalisation d'inventaires complets (paragraphe 6) et d'inventaires par échantillonnage (paragraphe 7).

Bien sûr, les tables que les auteurs du présent article ont publiées en 1976 (DAGNELIE *et al.*, 1976) sont loin de répondre à toutes les demandes, mais il entre dans leurs intentions de les compléter progressivement (1).

(1) Peut-être est-il opportun d'ailleurs de rappeler qu'il s'agit là d'un travail de longue haleine, résultant de la collaboration de différents services de la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux et de l'Institut pour l'Encouragement de la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture : Chaire d'Ecologie (Prof. A. NOIRFALIGE) et Centre d'Ecologie forestière et rurale (I.R.S.I.A.), Chaire de Sylviculture (Prof. P. ROISIN) et Centre de Recherche et de Promotion forestières (I.R.S.I.A.), et Chaire de Statistique (Prof. P. DAGNELIE) et Bureau de Biométrie (I.R.S.I.A.).

Bien sûr aussi, de nombreuses autres méthodes d'estimation de la production forestière existent ou sont à l'étude, mais il n'est nullement nécessaire que l'aménagiste ou le gestionnaire qui veut agir de façon efficace s'encombre de notions trop complexes ou trop disparates.

9. — Bibliographie

- BOUCHON J. (1974). *Les tarifs de cubage*. Institut National de la Recherche Agronomique. Centre National de Recherches Forestières, Nancy, 57 p.
- DAGNELIE P., RONDEUX J. et THILL A. (1976). *Tables dendrométriques*. Presses Agronomiques de Gembloux, 128 p.
- GRAYET J.P. (1977). *Contribution à l'étude de l'échantillonnage en futaie feuillue*. Ann. Sol. forest., 1977, 34 (1), 59-75.
- HAMILTON G.J. (1975). *Forest mensuration handbook*. London, Forestry Commission Dooklet 39, 275 p.
- PARDE J. (1961). *Dendrométrie*. Ecole Nationale des Eaux et Forêts, Nancy, 350 p.
- PRODAN M. (1965). *Holzmasslehre*. Sauerländer, Frankfurt, 644 p.
- RONDEUX J. (1976). *About the use of the « SWISSPERFO » caliper in forest inventories*. XVIIIth IUFRO World Congress-Working Group 54.02.4, Oslo, Norway, June 20 - July 2, 8 p.
-