

168

Les textes qui ont été publiés en deux parties consécutives... La première est consacrée aux grands principes... les autres sont consacrés à l'exploration... Nombreuses données... rigueur de données... (ou) nous... Dans la première partie nous examinons... le concept de... les principales étapes de la construction d'un... (graphes 2, 3) et... les principaux types d'évaluation... et leur... 2,3 traite des principaux... quelques... Après... inter-paragraphe... rapidement la nature... habituellement considérés (paragraphe 3.2). Nous envi-... (paragraphe 3.2 et 3.3) et... en ce qui... Ind. bibl. : 524.315

**Principes de construction des tarifs de cubage
mathématiques et de traitement automatique
d'observations dendrométriques (*)**

par

Jacques RONDEUX

Chaire de Sylviculture

Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat à Gembloux.

Ind. bibl. : 524.315

1. — Introduction

Les études dendrométriques nécessitent de nombreuses mesures et de longs calculs. C'est l'une des raisons qui expliquent notre pauvreté relative en matière de tarifs de cubage et, d'une manière plus générale, en tout ce qui concerne la croissance de la plupart de nos essences. Pourtant ces informations sont à la base des études de production et jouent un rôle primordial dans la gestion des peuplements forestiers.

* Déposé à la Rédaction le 13 novembre 1972.

Le texte qui suit s'articule en deux parties complémentaires : la première est consacrée aux grands principes de construction des tarifs de cubage mathématiques; la deuxième concerne un système d'exploitation automatique de données dendrométriques en général.

Dans la première partie, nous examinons successivement le concept de tarif mathématique (paragraphe 2.1), les principales étapes de la construction d'un tarif (paragraphe 2.2) et, parmi elles, le choix du matériel de base, les principaux types d'équation, le choix des équations et leur ajustement aux données observées. Le paragraphe 2.3 traite des principaux avantages de la méthode analytique.

La deuxième partie est axée sur l'utilisation de l'ordinateur dans l'exploitation de données dendrométriques. Après quelques principes généraux abordés dans un premier paragraphe (paragraphe 3.1), nous définissons rapidement la nature des données dendrométriques habituellement considérées (paragraphe 3.2). Nous envisageons ensuite la récolte et l'enregistrement des données (paragraphe 3.3 et 3.4) et leur traitement (paragraphe 3.5), en ce qui concerne d'une part les tarifs de cubage et d'autre part diverses caractéristiques dendrométriques.

Nous terminons ces considérations par un exemple relatif à une étude effectuée sur le hêtre et par une appréciation sommaire de la rentabilité du système (paragraphe 4). Enfin, nous tirons quelques conclusions rapides sur l'intérêt que présentent les techniques actuelles dans la réalisation d'études à caractère dendrométrique (paragraphe 5).

2. — La construction des tarifs de cubage mathématiques

1. — *Le concept général de tarif de cubage mathématique.*

Le fait de recourir à des considérations mathématiques dans l'élaboration d'un tarif de cubage n'est certes pas

récent (SCHMITT et SCHNEIDER, 1959), mais l'outil mathématique et les moyens de calcul ont progressé à un rythme tel qu'ils permettent aujourd'hui d'analyser et de traiter plus rapidement et plus complètement ce problème. Nombreuses sont toujours les recherches qui mettent en œuvre la technique de la régression (ou des moindres carrés), simple ou multiple, linéaire ou curvilinéaire. Il n'est pas inutile de rappeler que celle-ci consiste à déterminer les coefficients d'une équation dite de régression, dont les paramètres sont fixés en fonction de la plus ou moins grande contribution qu'ils peuvent apporter à la connaissance du volume (grosueur, hauteur, coefficients de forme, etc.). Les coefficients s'obtiennent en minimisant la somme des carrés des écarts entre les volumes observés et les volumes calculés au moyen de l'équation, de façon à ajuster au mieux l'équation aux données. L'équation de régression étant connue, il est possible de l'utiliser notamment pour calculer des tarifs de cubage classiques.

2. — *Les principales étapes de la construction d'un tarif.*

L'élaboration de tarifs de cubage peut se décomposer en plusieurs étapes bien distinctes :

1. récolte du matériel de base sous la forme de tiges d'essai, si possible abattues, dont on mesure entre autres le diamètre ou la circonférence par billons successifs (de longueur souvent fixée selon les essences), ainsi que la longueur, pour déterminer de manière précise un ou plusieurs types de volume;

2. calcul de ces volumes par les méthodes classiques avec recours aux formules de NEWTON ou de SIMPSON;

3. choix d'un modèle mathématique susceptible d'exprimer au mieux le ou les volumes en fonction d'autres caractéristiques connues (diamètre, circonférence, hauteur, etc.);

4. ajustement de ce modèle à l'ensemble des valeurs observées;

5. calcul des tarifs proprement dits.

En ce qui concerne la première étape, le choix et la mesure des tiges d'essai sont évidemment conditionnés par le matériel existant ou disponible. Du point de vue mathématique, ce choix doit être opéré d'une manière aléatoire et représentative, et être tel qu'il respecte autant que possible les principales conditions d'application des méthodes de régression (DAGNELIE, 1969).

Quant au choix du modèle mathématique et de ses paramètres, il ne répond à aucune règle stricte; le plus souvent, on met à profit des formules expérimentées de longue date ou l'on procède à des essais d'équations basées sur des considérations théoriques ou des lois empiriques relatives au volume ou à la forme des arbres. Nous verrons qu'à ce niveau, l'utilisation du traitement automatique joue un rôle déterminant, car il permet de tester facilement la valeur d'un nombre considérable d'équations.

1) *Le choix du matériel de base*

Outre son caractère représentatif de l'ensemble étudié, l'échantillon doit comporter un nombre suffisant d'individus convenablement répartis dans toutes les catégories de grosseur. Ce nombre est surtout fonction de la zone d'application du tarif (région, forêt, coupe), de l'essence considérée et, dans une certaine mesure, des conditions d'application des méthodes statistiques. En principe, le nombre minimum d'arbres à envisager dans la construction de tarifs locaux serait de l'ordre de 30 à 50. D'après SCHMITT et SCHNEIDER (1959), la construction de tarifs régionaux par la méthode des moindres carrés nécessiterait, pour être valable, environ 200 tiges représentatives des peuplements intéressés et choisies aléatoirement dans ces peuplements.

2) *Les principaux types d'équation*

Pour fixer les idées, sans toutefois entrer dans les détails, voyons quels sont les divers types d'équation de base auxquels la plupart des tarifs connus peuvent se

ramener, après simplification ou transformation. A cette fin, nous supposons toujours que V désigne le volume, D le diamètre (ou la circonférence), H la hauteur et a, a', b, b1, b2, etc... les divers paramètres.

a) Fonctions d'une seule variable (régression simple — tarifs à une entrée).

$$V = a + b D$$

$V = a D^b$ (relation d'allométrie), dont la transformée logarithmique est une équation linéaire :

$$\log V = \log a + b \log D \quad \text{ou} \quad V' = a' + b D'$$

Cette équation s'adapte généralement très bien au cas des tarifs « aménagement ».

$V = a + b D^2$ (équation linéaire en D^2), très valable et souvent utilisée.

b) Fonctions de deux variables (régression multiple — tarifs à deux entrées).

$$V = a + b_1 D + b_2 H$$

$V = a D^{b_1} H^{b_2}$ (relation « d'allométrie multiple »), dont la transformée logarithmique est également linéaire :

$$\log V = \log a + b_1 \log D + b_2 \log H$$

$$\text{ou } V' = a' + b_1 D' + b_2 H'$$

$$V = a (DH)^b \quad \text{ou} \quad V' = a' + b (DH)'$$

c) Fonctions de trois variables (régression multiple — tarifs à trois entrées).

Par analogie on peut aussi considérer des équations comportant une troisième variable, X, résultant soit de la transformation de l'une des précédentes soit de leur combinaison ou une variable telle qu'un coefficient de forme :

$$V = a + b_1 D + b_2 H + b_3 X$$

d) Fonctions polynomiales.

Ces fonctions deviennent rapidement très compliquées et ne présentent pas toujours un grand intérêt, tout au moins pour les tarifs de cubage classiques, ne faisant pas intervenir les assortiments ou autres considérations de ce genre.

Nous nous contenterons de retenir des équations simples telles que :

$V = a + b_1 D^2 + b_2 H$
 et des fonctions non linéaires dans lesquelles une même variable intervient au moins à deux degrés différents :
 $V = a + b_1 D + b_2 D^2$ (polynôme de degré 2).

3) *Le choix de l'équation*

Du point de vue mathématique, nous pensons que les équations linéaires, ou pouvant être mises sous forme linéaire par une transformation adéquate, sont surtout à préconiser. L'ajustement des équations est beaucoup plus facile à réaliser dans ce cas, surtout si on limite le nombre de paramètres. On s'efforcera aussi, en régression multiple, de considérer dans une même équation des variables explicatives fortement corrélées avec la variable dépendante, mais si possible peu corrélées entre elles (DAGNELIE, 1966). Le plus souvent il est inutile de vouloir introduire plus de trois variables explicatives dans une même équation, sous peine de voir la précision se stabiliser ou même diminuer.

En supposant que les distributions conditionnelles sont normales ⁽¹⁾ et de même variance (conditions qui peuvent être assurées parfois par une transformation logarithmique), il est possible de tester la linéarité d'une régression et la signification des coefficients de régression. L'hypothèse de linéarité permet d'envisager plus facilement d'autres études statistiques, tels que le test de parallélisme ou d'égalité des coefficients de régression et l'analyse de la covariance (BERGEL, 1971; DAGNELIE, 1970; DECOURT, 1971; KOZAK, 1970), qui fournissent des renseignements quant à la possibilité de transposer un tarif valable pour un milieu déterminé dans d'autres milieux. En présence de plusieurs équations pour lesquelles un ajustement a été réalisé, l'élimination de certaines d'entre elles peut se faire sur les bases suivantes : signification des coefficients de régression, comparaison des coefficients de corrélation

(1) Au sens de la distribution de LAPLACE - GAUSS.

et des écarts - tonnes ou des coefficients de variation résiduels estimés (DECOURT, 1971; IN et al., 1973). Ces derniers paramètres permettent en outre d'avoir une idée de la précision des tarifs, en chiffrant l'importance de la variation des volumes calculés par rapport aux volumes observés.

Du point de vue strictement forestier, les critères du choix seront plutôt liés au respect d'une précision souhaitée et à la facilité ou la rapidité des diverses mensurations à effectuer.

4) *L'ajustement des équations*

L'ajustement est réalisé par la méthode des moindres carrés selon un processus qui fait l'objet de nombreux programmes de calcul sur ordinateur. A l'inverse de l'ajustement graphique, l'ajustement mathématique a l'avantage d'éliminer tout élément subjectif et éventuellement d'accorder une pondération aux éléments mis en relation.

5) *Le calcul des tarifs*

Le calcul des tarifs revient uniquement à présenter les volumes, à partir des fonctions, sous la forme de tableaux qui sont l'expression habituelle des tables de cubage.

3. — *Les principaux avantages de la méthode analytique.*

La méthode analytique présente d'incontestables avantages :

— elle permet de synthétiser en une seule expression une quantité parfois impressionnante de mesures relatives à des variables déterminées;

— elle permet la construction de divers types de tarifs de cubage différenciés par la nature même du volume recherché (volume bois d'œuvre, bois fort, bois fort tige, total...) ou par la zone d'application de ces tarifs, moyennant une simple modification des coefficients des équations;

— l'équation choisie peut fournir des renseignements très précieux quant à la précision à accorder aux volumes moyens calculés (CHEVROU, 1967);

— les calculs permettent le traitement rapide et sûr par ordinateur (RONDEUX, 1972).

3. — L'utilisation de l'ordinateur dans les études dendrométriques

1. — Principes généraux.

Au même titre que pour les tarifs de cubage, la détermination de rapports dendrométriques par la voie qui vient d'être préconisée s'avérerait très pénible sans recourir aux méthodes de traitement automatique de l'information (PRODAN, 1967; SCHMIDT, 1965). C'est pourquoi nous avons conçu un système d'exploitation de données par ordinateur, permettant de déduire un maximum d'informations des données recueillies. Pour conférer un caractère suffisamment général au système, nous l'avons destiné aussi bien à l'élaboration de tarifs de cubage qu'à celui de rapports dendrométriques. Dans une assez large mesure, il s'inspire des méthodes statistiques qui sont à la base de la bibliothèque de programmes mise au point par les collaborateurs de la Chaire de Statistique de la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux et du Bureau de Biométrie de l'I.R.S.I.A. (CARLETTI et al., 1973). Ces programmes ont d'ailleurs déjà été utilisés, d'une manière sensiblement différente, dans des études dendrométriques relatives au frêne (DAGNELIE et al., 1969; THILL, 1970) et plus récemment à l'érable sycomore et au merisier (IN et al., 1973).

La conception originale et la souplesse de ces divers programmes nous ont incité à les utiliser de manière tout à fait intégrée dans la résolution des problèmes dendrométriques. Cette utilisation ne nécessitait en effet que la préparation de quelques programmes spécifiques surtout relatifs à l'introduction des données et à l'impression des résultats.

2. — *La nature de l'information traitée.*

La nature des informations considérées dépend non seulement du but poursuivi, mais aussi du temps susceptible d'être consacré aux mesures. Cependant, de manière générale, dans l'optique d'un traitement standardisé, il est préférable de récolter plutôt trop que trop peu d'informations. Sur la base de résultats partiels, il arrive en effet que l'on souhaite modifier le but initial d'un travail de recherche ou la manière de le réaliser, mais cela n'est souvent possible qu'à la condition de disposer de quelques informations supplémentaires.

Cette considération a d'autant plus de poids que la majorité des études dendrométriques sont effectuées, pour des raisons de facilité, à partir d'arbres abattus provenant d'éclaircies ou de coupes rases et qu'il n'est pas toujours facile de mettre à profit, pour effectuer toutes les observations, le délai généralement très court existant entre l'abattage et le transport des produits. Néanmoins, il faut toujours s'efforcer de profiter de pareilles circonstances, si l'on désire constituer un véritable dossier dendrométrique.

Les informations recueillies sur le terrain ou dérivées de celles-ci représentent un ensemble de variables qui peuvent être groupées succinctement de la manière suivante :

- variables permettant la construction de tarifs de cubage (grosseurs et longueurs par billons successifs, hauteurs diverses);

- variables relatives à l'élaboration de rapports dendrométriques (décroissance, défilement, forme, etc.);

- variables relatives à la croissance des arbres (âge, accroissements, élongations, hauteur de la cime verte, diamètre de la cime...);

- variables caractéristiques de la station (hauteurs dominantes ou autres indices de productivité).

Ces variables ne sont pas nécessairement toutes considérées et c'est le plus souvent la nature des recherches qui en décide.

3.— *La récolte des données.*

L'une des bases importantes de l'intégration complète du traitement de l'information est l'automatisation de la récolte des données (SCHÖPFER, 1969; ZÖHRER, 1971). Il n'est toutefois guère facile d'y aboutir pour des données aussi diversifiées, d'autant plus qu'elles ne font pas toujours l'objet de mesures directes (par exemple, l'âge). Aussi est-il plus expéditif, malgré tout ce que l'on a déjà suggéré à propos d'enregistrement automatique (BADAN et al., 1962; SCHÖPFER, 1967; SCHRAM, 1970), de transposer les mesures sur fiches de pointage ⁽¹⁾. L'ordre dans lequel les observations devront être faites doit cependant être fixé de façon logique, sous peine d'accuser des pertes de temps parfois considérables.

4. — *L'enregistrement des données.*

Par enregistrement des données ⁽²⁾, nous entendons essentiellement leur transfert des fiches de pointage sur un support acceptable par l'ordinateur. La perforation des valeurs rassemblées sur les fiches se fait par arbre et, le cas échéant, par milieu de croissance. L'information par arbre correspondant en général à une ou deux cartes perforées, de telle manière que l'on puisse modifier à volonté l'importance du matériel d'analyse, en jouant simplement sur le nombre total de cartes.

5. — *Le traitement des données.*

1) *Cubage*

Le premier type d'exploitation des données concerne le cubage des arbres. A la lecture de l'information relative à chacun d'eux, un programme spécial appelé «CUBES» isole toutes les caractéristiques indispensables

(1) Eventuellement adaptées à la lecture optique (ALBES, 1971) ou permettant tout au moins une perforation rapide et facile sur cartes ou sur ruban.

(2) Pour plus de détails à ce sujet, nous renvoyons le lecteur à DAGNELIE (1968, 1972), ROY et BEGIN (1969).

au cubage, effectue celui-ci selon la formule de SIMPSON et donne des résultats pour n'importe quel niveau souhaité de la tige. On en déduit des valeurs relatives à plusieurs types de volumes (volume bois fort tige, volume bois d'œuvre couramment pratiqué ou volume répondant à diverses limitations en grosseur ou en hauteur). Simultanément, les valeurs obtenues, ainsi que l'information non utilisée pour le cubage, sont stockées sur disque magnétique dans un ordre et sous une présentation compatibles avec les programmes statistiques de CARLETTI et al. (1973).

2) *Calcul des équations de régression*

Les variables initiales peuvent être mises en relation dans n'importe quel sens, principalement au moyen d'équations de régression.

Le nombre de relations n'est pas seulement conditionné par le nombre de variables initiales considérées, mais également par diverses combinaisons possibles de ces variables. En effet, à ce stade du traitement, les variables initiales peuvent être complétées au moyen de ces mêmes variables ayant subi une transformation (carré, produit, quotient, logarithme, etc.) et par des variables dérivées (coefficients de décroissance, défilement, forme et rapports divers).

Cet ensemble d'opérations, qui aurait pu être partiellement réalisé par le programme CUBES, est effectué par un programme beaucoup plus général, appelé F2VAR, qui redistribue ensuite l'information d'une manière compatible avec l'utilisation des programmes de régression simple (REGSI) et multiple (REGMU) ⁽¹⁾.

Le programme REGSI présente la particularité de fournir, préalablement à l'estimation des paramètres de la régression, la distribution graphique des fréquences

(1) Les programmes F2VAR, REGSI et REGMU, écrits en FORTRAN IV (langage symbolique de programmation), appartiennent à la bibliothèque de la Chaire de Statistique de la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux.

des deux variables mises en relation. Cette possibilité est souvent très intéressante, car elle permet d'orienter plus rapidement le choix du type d'équation et d'éliminer au besoin des observations aberrantes.

Quant au programme REGMU, selon le nombre et la nature des variables qu'il met en relation, il permet d'effectuer des régressions multiples proprement dites ou des régressions polynomiales.

La précision des résultats fournis par les programmes REGSI et REGMU peut inciter l'utilisateur à effectuer d'autres transformations de variables, en vue de tester des équations éventuellement mieux adaptées. Cela nécessite alors un retour au programme F2VAR.

On peut aussi vouloir tester l'évolution ou le comportement d'une caractéristique en fonction du milieu de croissance dont proviennent les arbres mesurés. Dans ce cas, il est indispensable de pousser les investigations plus loin, par exemple en recourant à l'analyse de la covariance (programme ACOV1, dans le cas de régressions linéaires) ⁽¹⁾.

3) *Choix des équations et présentation des résultats*

Le dernier stade du traitement consiste enfin à sélectionner les équations les plus intéressantes. Cette phase du calcul pourrait aussi être automatisée, mais nous croyons qu'il est préférable que le forestier reste maître de la décision à prendre en ce domaine. Les facteurs déterminant le choix des équations seront le plus souvent ceux qui ont été énumérés ci-dessus. Sous la condition d'utiliser les coefficients de régression des équations retenues, il suffit alors de présenter les résultats fournis par les diverses relations mathématiques d'une manière conforme aux exigences de la pratique. L'impression des tarifs sous forme de tableaux peut être réalisée grâce au programme TAB2V.

(1) Le programme ACOV1 appartient aussi à la bibliothèque de la Chaire de Statistique de la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux.

4) *Schéma récapitulatif*

En résumé, l'ensemble des calculs est effectué au moyen de six programmes généraux. Ce fait peut paraître surprenant dans le contexte d'une intégration des calculs, c'est-à-dire d'une automatisation poussée, mais nous pensons qu'il est plus judicieux de recourir à plusieurs programmes travaillant sur les *mêmes bases*, plutôt que de gonfler un programme rendu forcément moins souple par la diversité des fonctions qu'il devrait assumer. Pareil programme risquerait en outre d'être constamment révisé à la moindre modification dans l'objectif d'une recherche.

Pour nous résumer, le système d'exploitation proposé peut être représenté schématiquement comme il est indiqué à la figure 1.

4. — Exemple

Le processus de calcul qui vient d'être développé a été mis au point lors de mesures dendrométriques effectuées sur 152 hêtres en région ardennaise. Le principal but de ces mesures était la construction de tarifs de cubage locaux et l'estimation de paramètres caractéristiques de cette essence dans des milieux à priori différents.

1. — *Nature et récolte des informations.*

Les mesures effectuées dans 4 stations différentes, arbre par arbre, sont renseignées comme suit sur les fiches de pointage. Pour la facilité de l'exposé, les variables observées seront appelées par leurs numéros d'ordre :

- | | |
|--------|--|
| 1 | : circonférence ou diamètre à 1,3 m ⁽¹⁾ , |
| 2 | : circonférence ou diamètre à 1,5 m, |
| 3 et 4 | : hauteurs bois d'œuvre ⁽²⁾ , |
| 5 | : hauteur bois fort tige, |
| 6 | : hauteur totale, |

(1) Pour des raisons de facilité et surtout d'habitude, la circonférence a été préférée au diamètre dans le présent travail.

(2) Suite à la définition peu précise de la notion du bois d'œuvre, nous avons envisagé 2 types de hauteur, l'une correspondant à une recoupe imposée et l'autre à celle pratiquée par l'exploitant.

- 7, 8, 9, et 10 : circonférence ou diamètre à la moitié de ces diverses hauteurs,
- 11 : largeur de la cime,
- 12 : longueur de la cime,
- 13 : âge,
- 14 : circonférences ou diamètres de 2 en 2 mètres à partir de 1 m jusqu'à la hauteur bois fort tige (le nombre de ces variables est étroitement lié à la hauteur totale des arbres mesurés).

2. — *Traitement des informations.*

Dans une première phase les variables reprises sous les numéros d'ordre 3, 4, 5 et 14 ont été exploitées par le programme « CUBES », de manière à définir 3 variables « calculées » :

- 14 et 15 : volumes bois d'œuvre (2 types de volumes liés aux deux types de hauteurs) ⁽¹⁾,
- 16 : volume bois fort tige.

Une deuxième phase a consisté à calculer un certain nombre de variables dérivées des précédentes (programme F2VAR) :

- 17 à 20 : coefficients de décroissance relatifs aux bois d'œuvre, au bois fort tige et au bois total,
- 21 à 23 : coefficients de forme relatifs aux bois d'œuvre et au bois fort de la tige,
- 24 à 26 : défilements,
- 27 : rapport diamètre cime/diamètre tronc à 1,3 m,
- 28 : rapport longueur cime/largeur cime,
- 29 : rapport longueur cime/longueur totale de l'arbre.

(1) Les variables 14, 15 et 16 remplacent la variable 14.

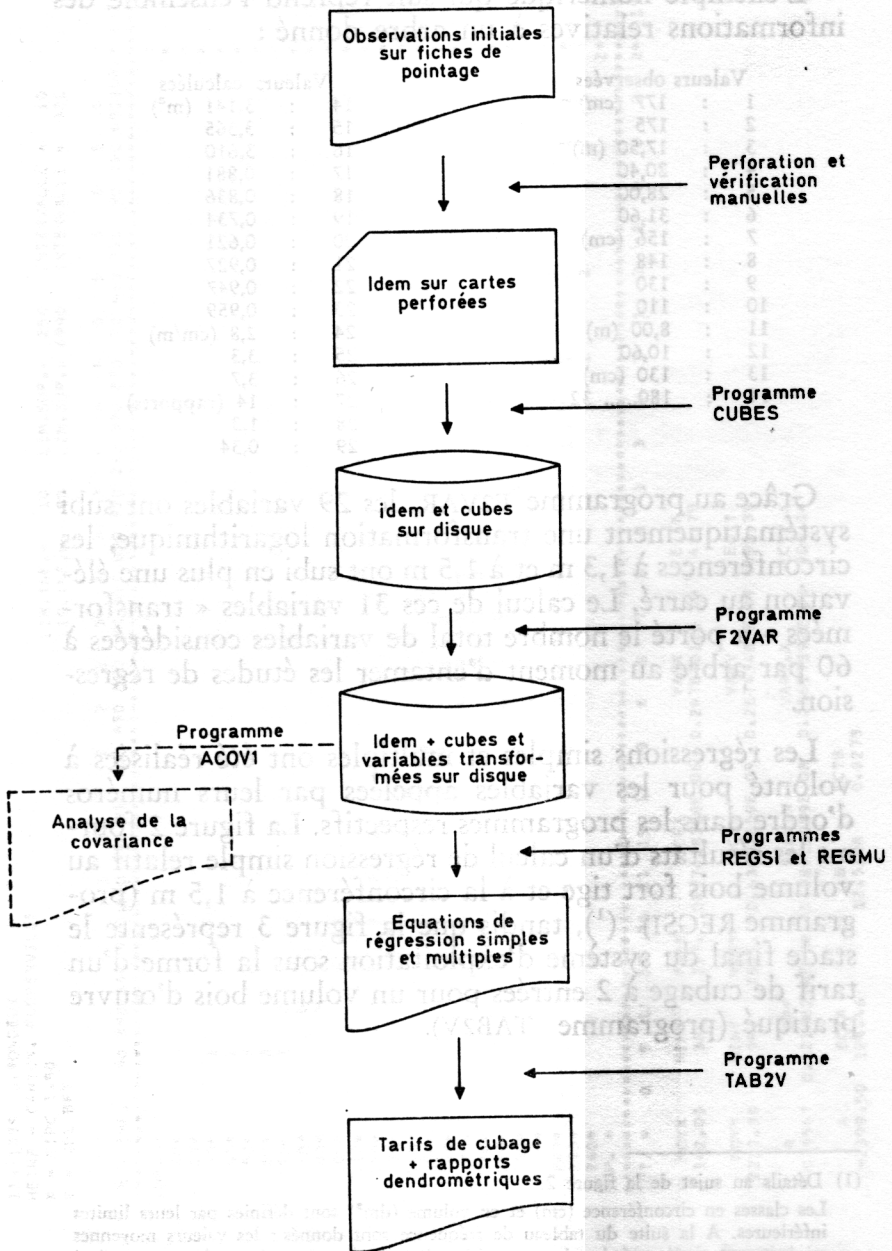


Fig. 1. — Schéma récapitulatif du système d'exploitation des données.

L'exemple numérique qui suit reprend l'ensemble des informations relatives à un arbre donné :

Valeurs observées		Valeurs calculées	
1	: 177 (cm)	14	: 3,141 (m ³)
2	: 175	15	: 3,365
3	: 17,50 (m)	16	: 3,610
4	: 20,40	17	: 0,881
5	: 28,00	18	: 0,836
6	: 31,60	19	: 0,734
7	: 156 (cm)	20	: 0,621
8	: 148	21	: 0,927
9	: 130	22	: 0,947
10	: 110	23	: 0,959
11	: 8,00 (m)	24	: 2,8 (cm/m)
12	: 10,60	25	: 3,3
13	: 130 (cm)	26	: 3,7
14	: 180,....., 32	27	: 14 (rapports)
		28	: 1,3
		29	: 0,34

Grâce au programme F2VAR, les 29 variables ont subi systématiquement une transformation logarithmique, les circonférences à 1,3 m et à 1,5 m ont subi en plus une élévation au carré. Le calcul de ces 31 variables « transformées » a porté le nombre total de variables considérées à 60 par arbre au moment d'entamer les études de régression.

Les régressions simples et multiples ont été réalisées à volonté pour les variables appelées par leurs numéros d'ordre dans les programmes respectifs. La figure 2 fournit les résultats d'un calcul de régression simple relatif au volume bois fort tige et à la circonférence à 1,5 m (programme REGSI) ⁽¹⁾, tandis que la figure 3 représente le stade final du système d'exploitation sous la forme d'un tarif de cubage à 2 entrées pour un volume bois d'œuvre pratiqué (programme TAB2V).

(1) Détails au sujet de la figure 2.

Les classes en circonférence (cm) et en volume (dm³) sont définies par leurs limites inférieures. A la suite du tableau de fréquence sont donnés : les valeurs moyennes minimum et maximum des deux variables, leurs variances et leurs écart-types ainsi que le coefficient de corrélation (R) et l'écart-type résiduel estimé (ECTY-X).

Les coefficients A et B définissent l'équation de régression suivante : $Y = 2399.50 + 32.5108 X$.

TABLE DE Z=EXP(A+R*LOG(X))+C*LOG(Y))

A = -3.3442
 B = 1.7727
 C = 0.8638

CIRCONFÉRENCES * XMIN XMAX DX
 45 245 10

HAUTEURS-(CM)- * YMIN YMAX DY
 900 2200 100

	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
45	0.137	0.151	0.164	0.176	0.189	0.201	0.214	0.226	0.238	0.250	0.262	0.274	0.286	0.298
55	0.196	0.215	0.233	0.252	0.270	0.287	0.305	0.323	0.340	0.357	0.374	0.391	0.408	0.425
65	0.264	0.289	0.314	0.338	0.363	0.386	0.410	0.434	0.457	0.480	0.503	0.526	0.549	0.571
75	0.340	0.372	0.404	0.436	0.467	0.498	0.529	0.559	0.589	0.619	0.648	0.678	0.707	0.736
85	0.425	0.465	0.505	0.544	0.583	0.622	0.660	0.698	0.735	0.773	0.809	0.846	0.883	0.919
95	0.517	0.566	0.615	0.663	0.710	0.757	0.804	0.850	0.896	0.941	0.986	1.031	1.075	1.119
105	0.617	0.676	0.734	0.792	0.848	0.904	0.960	1.015	1.069	1.124	1.177	1.231	1.284	1.336
115	0.725	0.795	0.863	0.930	0.997	1.063	1.128	1.192	1.257	1.320	1.383	1.446	1.508	1.570
125	0.841	0.921	1.000	1.078	1.155	1.232	1.307	1.382	1.457	1.530	1.604	1.676	1.748	1.820
135	0.964	1.056	1.146	1.236	1.324	1.412	1.499	1.585	1.670	1.754	1.838	1.921	2.004	2.086
145	1.094	1.198	1.301	1.403	1.503	1.603	1.701	1.798	1.895	1.991	2.086	2.181	2.275	2.368
155	1.231	1.349	1.464	1.579	1.692	1.804	1.914	2.024	2.133	2.241	2.348	2.454	2.560	2.665
165	1.376	1.507	1.636	1.764	1.890	2.015	2.139	2.261	2.383	2.504	2.623	2.742	2.860	2.977
175	1.527	1.672	1.816	1.958	2.098	2.237	2.374	2.510	2.645	2.779	2.912	3.044	3.175	3.305
185	1.685	1.846	2.004	2.160	2.315	2.468	2.620	2.770	2.919	3.067	3.213	3.359	3.503	3.647
195	1.850	2.026	2.200	2.372	2.542	2.710	2.876	3.041	3.204	3.366	3.527	3.687	3.846	4.004
205	2.021	2.214	2.404	2.592	2.777	2.961	3.143	3.323	3.501	3.679	3.854	4.029	4.202	4.375
215	2.199	2.409	2.616	2.820	3.022	3.222	3.419	3.615	3.810	4.003	4.194	4.384	4.573	4.760
225	2.384	2.611	2.835	3.057	3.275	3.492	3.706	3.919	4.130	4.339	4.546	4.752	4.956	5.160
235	2.575	2.802	3.063	3.302	3.538	3.772	4.003	4.233	4.460	4.686	4.910	5.133	5.354	5.573
245	2.773	3.037	3.297	3.555	3.809	4.061	4.310	4.557	4.802	5.046	5.287	5.526	5.764	6.000

FIN

Fig. 3. — Tarif à 2 entrées du volume bois œuvre.

Il faut insister sur l'intérêt de cette transmission directe de résultats par l'ordinateur car elle exclut les risques habituels d'erreurs lors de transcriptions successives.

3. — *Quelques informations sur la rentabilité du système*

Il peut être utile de donner une appréciation des temps et des coûts d'utilisation du traitement automatique dès qu'il peut concerner des travaux semblables à celui qui vient d'être exposé. Cependant, il faut rester objectif, car l'interprétation des chiffres que nous pourrions donner n'aurait de sens que si l'on procédait à des comparaisons avec les méthodes classiques (« manuelles ») et si l'on pouvait parfaitement préciser les conditions d'utilisation.

Pour fixer quand même les idées, il est indéniable que les temps et coûts d'application de pareille méthode sont principalement liés au nombre de bois mesurés, qu'il s'agisse de la récolte de l'information ou de son traitement.

Sur la base des 152 bois de l'exemple, la récolte des variables « observées » a été effectuée en moyenne à raison de 4 à 5 bois par heure pour une équipe de trois hommes, soit environ 1,5 bois/homme heure. Ce chiffre est évidemment fonction des difficultés rencontrées (relief accidenté, bois non ébranchés, etc...) et des temps de déplacement entre les arbres à mesurer.

Au centre de calcul, la préparation de l'information, c'est-à-dire la perforation et la vérification des données, a nécessité environ 6 heures (3 heures par opération). Quant au travail de l'ordinateur (IBM 1130), on peut dire à titre d'indication, que la construction exclusive de tarifs à une et à deux entrées à partir des circonférences, hauteurs et volumes, compte tenu des programmes mis en œuvre, a nécessité un peu plus de 10 minutes, depuis le cubage des arbres jusqu'à l'impression complète des tarifs.

En admettant que les mesures aient été effectuées par 3 hommes, les quelques considérations précédentes nous permettent d'estimer à $1/5$ le rapport entre le temps nécessaire à la préparation des données et celui consacré aux mesures, ce rapport devient environ $1/150$ si l'on considère uniquement le temps nécessaire aux calculs !

Nous ne donnerons pas d'information précise sur le coût de toutes ces opérations, car celui-ci est dépendant du matériel utilisé et de son amortissement, des rémunérations du personnel et aussi du type de renseignements demandés. Nous sommes cependant convaincus que le coût des travaux réalisés au centre de calcul est très supportable compte tenu du nombre et de la qualité des renseignements fournis par l'ordinateur. En effet, toujours pour l'exemple considéré, nous estimons approximativement le rapport entre le coût des travaux exécutés au centre de calcul et celui de la collecte des informations à $1/10$.

5. — Conclusions

L'importance des tarifs de cubage est évidente à de nombreux points de vue pour les forestiers, mais on constate encore assez souvent que les tarifs utilisés sont peu représentatifs, voire même inexistantes pour certaines essences. Que dire alors de leur adaptation à la diversité des peuplements et à leur évolution au cours du temps ! En outre, les études dendrométriques permettent de mieux préciser la structure de nos peuplements et elles constituent une étape importante sur la route qui conduit aux tables de production. Mais ce raisonnement théorique ne peut trouver de réponse dans la pratique tant que les nombreux calculs qui en découlent restent laborieux et assez difficiles à exécuter.

A condition de profiter des moyens actuels de traitement de l'information et d'utiliser les méthodes statistiques adéquates, nous croyons que ce problème peut être partiellement résolu. Traduites en relations mathématiques, les caractéristiques dendrométriques sont plus facilement interprétables et conviennent très bien au traitement automatique.

Nous préconisons, en ce qui concerne le traitement par ordinateur de pareilles informations, un système souple basé sur l'utilisation en séquence de plusieurs programmes de manière à pouvoir orienter ou adapter les calculs et les recherches en fonction des besoins ou des idées futurs.

Le travail relativement minime dévolu à l'ordinateur permet d'encourager la collecte des données sur le terrain, qui bien souvent ne se fait pas, par crainte des calculs ultérieurs ou simplement parce qu'elle est restée sans suite dans le passé. Mais pour cela il faut établir puis entretenir le contact entre les services techniques œuvrant sur le terrain et un centre de calcul; à ce sujet, il est d'ailleurs réconfortant de constater que des agents techniques ont compris l'utilité du dialogue et l'apprécient !

Cette étude a pu être réalisée grâce au dévouement de M. A. Fagneray, ingénieur des Eaux et Forêts de l'Etat à Florenville, à qui nous exprimons notre vive reconnaissance. Nous tenons aussi à remercier les membres de son personnel : MM. Calande, Collignon, Dupont, Gilles et Heppe pour l'aide efficace qu'ils nous ont apportée.

Résumé

Des méthodes statistiques adéquates et les immenses possibilités du traitement électronique de l'information permettent la construction rapide de tarifs de cubage et l'exploitation plus complète d'informations dendrométriques.

Nous avons mis au point un système d'exploitation automatique de pareilles données. L'ensemble des calculs est réalisé au moyen de 6 programmes généraux (Fortran IV, IBM 1130 - 16 K) travaillant sur les mêmes bases et d'une manière tout à fait intégrée.

Des informations concernant la durée et le coût des opérations sont envisagées pour une étude dendrométrique effectuée sur le hêtre.

Samenvatting

Adekquate statistische methodes en de onbegrensde mogelijkheden van de elektronische informatieverwerking laten toe snel kuberingstabellen op te maken, alsook een meer volledige exploitatie van de dendrometrische gegevens.

Wij hebben een systeem voor de automatische exploitatie van dergelijke gegevens uitgewerkt. Het geheel van de berekeningen wordt verwezenlijkt door 6 algemene programma's (Fortran IV,

IBM 1130 - 16 K), die op dezelfde bases steunen en op volledig geïntegreerde wijze werken.

Inlichtingen inzake de tijdsduur en de kostprijs van de bewerkingen worden in aanmerking genomen voor een dendrometrische studie betreffende de beuk.

Zusammenfassung

Angemessene statistische Rechenmethoden und die äusserst grossen Möglichkeiten der elektronischen Datenverarbeitung erlauben eine relativ schnelle Anfertigung von Massentafeln und eine vollständigere Ausbeutung holzmesskundlichen Informationen. Solche Daten können nach dem von uns vorgeschlagenen system automatisch ausgebeutet werden.

Die Berechnung erfolgt mit gleichen Ausgangsdaten arbeitenden und vollständig integrierten allgemein Programmen (Fortran IV, IBM 1130 - 16 K). Angaben über Dauer und Kosten für die Anfertigung einer Massentafel für Buche werden gegeben.

Summary

Adequate statistical methods and the great possibilities of electronic data processing allow a better construction of tariff tables and a more complete analysis of dendrometrical observations. The study of an integrated computing system is given in this article. The calculations involved by this system require 6 general programs (Fortran IV, IBM 1130 - 16 K) which use the same basis. Informations concerning the time and the cost of operations are considered in a study on the beech.

Bibliographie

- ALBES, W., 1971. — Entwicklung und Stand der elektronischen Datenverarbeitung in der Bayerischen Staatsforstverwaltung. - Allg. Forst. Zeitschrift, 32, 670-675.
- BADAN, R.; HINSON, W.H. et STEWART, D., 1962. — A registering caliper : a new application of mechanical recording in forest enumerations. - Proc. 13 th. Congr. Int. Union For. Res. Organ. Vienna (1961) sect 25/7 - 5/1., 2 p.
- BERGEL, D., 1971. — Die Herleitung neuer Massentafeln für die Douglasie in Nordwestdeutschland. - Allg. Forst-u. J. Ztg., 142, 247-257.
- CARLETTI, G.; CLAUSTRIAUX, J.; DAGNELIE, P.; DEBOUCHE, C.; IN, K.; OGER, R.; ROUSSEAUX, G., 1973. — Organisation d'une bibliothèque de programmes statistiques pour ordinateur. Texte à publier dans la Revue Belge de Statistique, d'Informatique et de Recherche opérationnelle (vol. 12).

- CHEVROU, B., 1967. — Les tarifs de cubage dans la foresterie moderne. - Rev. Forest. Franç., 1, 33-39.
- DAGNELIE, P., 1966. — La régression multiple. - Biom. Praxim. 7, 193-238.
- DAGNELIE, P., 1968. — Introduction aux ordinateurs. - Ann. Gembloux 74, 141-154.
- DAGNELIE, P., 1969-1970 — Théorie et méthodes statistiques : applications agronomiques (2 vol). - Duculot, Gembloux, 378 + 451 p.
- DAGNELIE, P., 1972. — L'ordinateur et la gestion des forêts. — Bull. de la Soc. Roy. For. de Belgique, 78 (1), 58-78.
- DAGNELIE, P.; RONDEUX, J.; THILL, A., 1969. — Etude dendrométrique du frêne commun (*Fraxinus excelsior* L.) - Bull. Rech. Agron. Gembloux, IV (3-4), 378-410.
- DECOURT, N., 1971. — Comparaison des équations de régression. Application au cubage des peuplements d'épicéa commun. - Ann. Sci. Forest, 28 (1), 51-58.
- IN, K.; RONDEUX, J.; THILL, A., 1973. — Etude dendrométrique de l'érable sycomore (*Acer Pseudoplatanus* L.) et du merisier (*Prunus Avium* L.). - Texte à publier dans le Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux (N.S., Tome VII, n° 1-2).
- KOZAK, A., 1970. — A simple method to test parallelism and coincidence for curvilinear, multiple linear and multiple curvilinear regressions. - 3d Conférence of the Advisory group of Forest Statisticians, Sect 25, IUFRO, JOUY-en-JOSAS, France, September, 7-11.
- PRODAN, M., 1967. — Bericht über elektronische Auswertungen in mittel- u. osteuropäischen Forstlichen Versuchswesen. XIV IUFRO. Kongress, München 1967, Sect 25, 146-157.
- RONDEUX, J., 1972 — A propos de l'automatisation des inventaires forestiers complets. - Bull. de la Soc. Roy. For. de Belgique, 79 (4), 237-252.
- ROY et BEGIN, 1969. — Principes d'informatique. Mc Graw-Hill, Montreal, 288 p.
- SCHMIDT, A., 1965. — Die Versuchsflächenauswertung mit elektronischen Rechenanlagen, Aufnahme und Auswertung forstlicher Versuchsflächen. Vorträge auf der Tagung in Giessen. Bad. Godesberg 1966, 23-32.
- SCHMITT, R. et SCHNEIDER, B., 1959. — Die Aufstellung von Massentafeln nach der Methode der kleinsten Quadrate. Mitt. d. Hess. Landesforstw n° 2.
- SCHÖPFER, W., 1967. — Auf dem Wege zur integrierten Datenverarbeitung in der Forsteinrichtung. - Allg. Forstzeitschrift, 22 (44), 743-746; 22 (45), 767-773.
- SCHÖPFER, W., 1969. — Elektronische Datenverarbeitung in der Forstwirtschaft zwischen heute und morgen. Mitt. d. Bad.-Württ. FVA, H. 19.
- SCHRAM, P., 1970. — A propos d'un compas forestier enregistreur. - Rev. Forest. Franç., 553-554.
- THILL, A., 1970. — Le frêne et sa culture. - Duculot, Gembloux, 85 p.
- ZÖHRER, F., 1971. — Die Technik der Datenerfassung für die Forstwirtschaft. Unter besonder Berücksichtigung der Forstinventur und Forsteinrichtung. - Allg. Forstzeitung, 82, F 4, 82-86.