

**estimation des volumes
et accroissement
des peuplements forestiers
avec référence particulière aux forêts tropicales**

vol. 1 - estimation des volumes

par
f. cailliez
centre technique forestier tropical, france

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

M-35

ISBN 92-5-200923-X

Reproduction interdite, en tout ou en partie, par quelque procédé que ce soit, sans l'autorisation écrite de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, seule détentrice des droits. Adresser une demande motivée au Directeur de la Division des publications, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Via delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie, en indiquant les passages ou illustrations en cause.

© FAO 1980

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les collègues qui m'ont aidé à rédiger cette partie I, en particulier Jean BOUCHON, Pierre DUPLAT, François GUINAUDEAU, Noël OGAYA, ainsi que Madame Catherine GUEGUEN, qui a effectué les croquis et plusieurs dactylographies en français et en anglais.

Francis CAILLIEZ

TABLE DES MATIERES

TOME I

	<i>Pages</i>
0 INTRODUCTION	1
1 LES DIFFERENTS VOLUMES QUE L'ON PEUT DEFINIR DANS UN ARBRE	2
11 QUEL EST L'OBJET PHYSIQUE CONCERNE ?	2
12 A QUELLE PARTIE DE CET OBJET S'INTERESSE-T-ON ?	2
121 Découpes de dimension	2
122 Découpes de forme - Exemples	3
122.1 La souche	3
122.2 La base de la cime	3
123 Découpes de qualité	3
13 QUELQUES EXEMPLES DE VOLUMES BRUTS	3
14 A PROPOS DES VOLUMES UTILISABLES	5
2 MESURE DIRECTE DU VOLUME D'UN ARBRE	6
21 MESURES SUR ARBRES DEBOUT	6
211 Mesures de grosseur (diamètre ou circonférence)	6
211.1 Définition du diamètre et de la circonférence de référence	6
211.2 Pratique de la mesure des diamètres et des circonférences sur arbres debout	8
211.21 Mesure du diamètre au compas	8
211.211 Le compas classique	8
211.212 Le compas finlandais	9
211.22 Mesure de la circonférence au ruban	10
211.23 Procédé de la planchette pour la mesure du diamètre à faible hauteur	11
211.231 Confection de la planchette	11
211.232 Mode opératoire	12
211.24 Le compas pentaprisme de Wheeler	13
211.25 Mesure du diamètre au Relascope de Bitterlich	14
212 Mesures de hauteur	18
212.1 Définitions	18
212.2 Mesures de hauteur sur arbre debout	18
212.21 Quelques dendromètres	18
212.211 Principe de deux appareils simples à fabriquer	19
212.212 Cinq dendromètres du commerce	22
212.22 Quelques remarques d'ordre pratique	25

	pages
213 Mesures d'épaisseur d'écorce	27
22 MESURES SUR ARBRES ABATTUS	28
221 Mesures de longueur	28
222 Mesures de grosseur	28
223 Mesure précise des diamètres sous écorce ou sous aubier	29
224 Cubage par enstérage de petites tiges ou branches ...	29
23 CALCUL DIRECT DU VOLUME D'UN ARBRE A PARTIR DES MESURES FAITES SUR LUI	31
231 Procédés de calcul	31
232 Recommandations sur les mesures à effectuer en fonc- tion des volumes recherchés	34
233 Exemples	35
24 ETUDE DE LA FORME DES ARBRES	39
241 Mesure de la forme de la tige par un coefficient ...	39
241.1 Définitions	39
241.2 Comment calculer f ou f'	41
242 Description du profil de la tige par l'équation d'une courbe	43
242.1 Les représentations possibles - Problème de la transformation des variables	43
242.2 Ajustement de courbes de profil par calcul ...	45
242.21 Principes	45
242.22 Exemples	49
242.221 Quatre points de mesure - Ajustement d'une cubique	49
242.222 Quatre points de mesure - Division en deux tronçons et ajustement d'une courbe à chacun d'eux	49
242.223 Description du profil moyen de 3 arbres par une cubique..	51
243 Mesures sur le houppier	55
3 MESURE INDIRECTE DU VOLUME D'UN PEUPEMENT : LES TARIFS DE CUBAGE	59
31 PRINCIPE ET DEFINITIONS	59
32 CHOIX DES ENTREES	61
33 SCHEMA DE LA PROCEDURE A SUIVRE POUR CUBER UN PEUPEMENT PAR UN TARIF	62
34 CHOIX DE L'ECHANTILLON NECESSAIRE A LA CONSTRUCTION D'UN TARIF	63
341 Tarif individuel	63
342 Tarif de peuplement	64
35 LES DIFFERENTES FACONS DE CALCULER LE TARIF GRACE AUX DONNEES RECUEILLIES	65
351 La méthode directe	65
352 Les méthodes graphiques	66
353 La méthode statistique de la régression	66
353.1 A propos du choix du modèle de régression	66
353.11 Simplicité du modèle	67
353.12 A propos des modèles où c'est une fonction de V et non V lui-même que l'on ajuste	68

	<i>pages</i>
353.13 Ajustement d'un modèle "par morceaux"	69
353.14 Régression pondérée ou régression non pondérée ?	72
353.15 Comment juger de la qualité d'une régression	74
353.2 Exemple	76
36 A PROPOS DES VOLUMES SOUS ECORCE	86
361 Epaisseur d'écorce et diamètre	86
362 Volume sur écorce - Volume sous écorce	87
362.1 Le pourcentage d'écorce	87
362.2 Passage du volume sur écorce au volume sous écorce	88
4 ESTIMATION DES VOLUMES UTILES	90
41 UN EXEMPLE DE METHODE APPLIQUEE EN FORET DENSE TROPICALE	90
411 Recueil des données	90
412 Analyse des résultats	93
42 ESTIMATION DE VOLUMES UTILES PAR UN TARIF DE CUBAGE	94
BIBLIOGRAPHIE SUCCINCTE	96

PREAMBULE

Il est évident pour les régisseurs forestiers que la possibilité d'estimer le volume des arbres et des peuplements et de prédire ce que la forêt produira selon les stations en fonction des différents types de traitement sylvicole est indispensable à tout processus rationnel de planification forestière. Il y a cependant une diversité considérable d'opinions à propos du concept de "production", des façons de l'estimer et d'en prédire l'évolution.

Ce manuel cherche à codifier les pratiques courantes d'estimation et de prédiction du volume des arbres et des peuplements, afin qu'elles puissent être mises en oeuvre par les personnes chargées de ce type de travail sans qu'elles soient pour autant spécialistes dans ce domaine.

Il est cependant nécessaire de souligner que, s'agissant d'un domaine en pleine évolution, notamment dans les tropiques, ce manuel doit être considéré comme provisoire et sujet à de futurs ajustements concernant soit des situations nouvelles et particulières, soit des techniques nouvelles, soit des techniques existantes mais non mentionnées dans le texte et qui pourraient se révéler supérieures.

C'est pourquoi il ne s'agit pas d'un manuel au sens vrai du terme mais davantage d'un recueil de conseils concernant le choix des méthodes auxquelles on a joint des instructions précises dans certains cas.

Ce manuel se réfère plus particulièrement aux forêts tropicales, tant naturelles qu'artificielles. Compte tenu de la difficulté d'évaluer la croissance et la production des peuplements naturels hétérogènes et non équiennes, les méthodes indiquées pour la construction des modèles de croissance s'appliquent essentiellement aux forêts équiennes monospécifiques. En ce qui concerne les forêts hétérogènes aucune instruction précise n'est donnée mais un certain nombre d'approches possibles sont proposées.

Le manuel comprend deux tomes. Le premier tome décrit les techniques de mesure et de calcul du volume des arbres et des peuplements. Le second concerne la croissance et la production. Une description des techniques statistiques et mathématiques, des tables statistiques sélectionnées, des exemples d'imprimés de calcul et de saisie de données et une bibliographie commentée sont inclus dans une série d'annexes.

- 7 -

Le premier tome du manuel a été rédigée par Francis Cailliez du Centre Technique Forestier Tropical (CTFT) à Nogent-sur-Marne (France) et la seconde par Denis Alder du Commonwealth Forestry Institute (CFI) à Oxford (Grande-Bretagne) qui a également réuni les annexes. Le travail des deux auteurs a été coordonné par Joran Fries, Université des sciences agronomiques, Uppsala (Suède). Le travail a été conçu et guidé par Jean-Paul Lanly et Karn Deo Singh de la division des ressources forestières de la FAO. Jean Clément (CTFT) a été associé à la phase initiale de l'étude.

La première version du manuel fut présentée à la réunion du groupe de recherche S4.01 de l'IUFRO (dendrométrie, croissance et production) qui s'est tenue à Oxford en septembre 1979 et elle fut discutée en détail pendant une journée complète. La plupart des participants étaient des spécialistes de dendrométrie des pays tropicaux invités spécialement par la FAO pour faire une analyse critique du manuel. Il avait été également envoyé à certains autres experts aux fins de commentaire. Les auteurs ont ensuite revu le texte pour tenir compte des remarques formulées.

Ce manuel, qui est le premier du genre dans le domaine de la foresterie tropicale, laisse le champ libre pour des améliorations et compléments futurs, particulièrement dans le cas des peuplements hétérogènes non équiennes pour lesquels des études complémentaires sont nécessaires. Toutes les suggestions à ce sujet seront particulièrement appréciées.

M.A. Flores Rodas
Sous Directeur général
Département des forêts

0 INTRODUCTION

Comment mesurer le volume des arbres et des peuplements ? C'est à cette question que la première partie du manuel se propose de répondre.

Ce sujet mérite en effet d'être traité pour deux raisons essentielles :

- *le problème lui-même n'est pas aussi simple ni aussi clairement posé qu'il y paraît ; il oblige à définir le plus précisément possible la nature du volume cherché : s'intéresse-t-on à la biomasse ligneuse, au volume des grosses tiges, au volume de bois sciable, etc... ?*
- *le ou les volumes cherchés étant précisés, la façon de les mesurer est à définir ; dans ce domaine, les pratiques des forestiers sont très anciennes et très diverses et il importe de tendre à les unifier pour être capable de relier valablement des estimations effectuées par différentes personnes dans différents pays.*

S'agissant d'un manuel, l'accent a été mis sur les méthodes les plus robustes ; les techniques sophistiquées qui ne peuvent être appliquées que par des instituts de recherche très équipés ne sont pas citées (utilisation de dendromètres coûteux, mesures de volumes sur photographies aériennes,...).

Ce manuel est, d'autre part, plutôt destiné aux forestiers des pays tropicaux où les problèmes majeurs concernent l'utilisation du bois comme combustible et comme matière première pour l'alimentation de scieries et d'unités de déroulage ou de fabrication de pâte à papier. C'est pourquoi les autres utilisations de la forêt (récolte des sous produits tels que le liège, utilisation fourragère des forêts,...), qui posent des problèmes spécifiques en ce qui concerne la mesure du volume de ces produits, ne sont pas abordées.

Après avoir défini les types les plus importants de volume, on décrira les procédures à suivre pour recueillir les données et les calculs à leur appliquer.

Cette première partie du manuel aurait aussi bien sa place dans un ouvrage sur l'inventaire forestier, car elle peut être regardée comme une introduction à la dendrométrie. Son contenu et sa forme sont tels qu'elle peut être lue facilement par toute personne ayant à travailler dans ce domaine.

1 LES DIFFERENTS VOLUMES QUE L'ON PEUT DEFINIR DANS UN ARBRE

Il faut toujours définir très précisément le volume dont on parle. Répondre pour cela aux deux questions suivantes :

- quel est l'objet physique concerné ?
- à quelle partie de cet objet s'intéresse-t-on ?

Il est de plus conseillé de préciser comment a été calculé le volume de cet objet, cette question se pose puisque le volume vrai est rarement connu exactement (ce serait le volume d'eau que l'objet déplace quand il est plongé dans une cuve). Les procédés d'estimation de ce volume exact seront décrits au § 23.

Reprenons pour l'instant les deux questions.

11 QUEL EST L'OBJET PHYSIQUE CONCERNE ?

Ce peut être - la tige : partie de l'arbre que l'on suit pour aller du pied de l'arbre au bourgeon terminal. Pour les arbres ramifiés, on considère par convention que le bourgeon terminal est le bourgeon le plus élevé.

- les branches
- les racines
- l'arbre : tige + branches + racines

Préciser si l'écorce est comprise ou non.

12 A QUELLE PARTIE DE CET OBJET S'INTERESSE-T-ON ?

Les limites de l'objet sont une découpe inférieure (au gros bout) et une découpe supérieure (au fin bout). Chacune de ces découpes peut être définie de plusieurs façons.

121 Découpes de dimension

Voici trois exemples de découpe supérieure de ce type :

- la découpe 0 cm de diamètre signifie que la limite est l'extrémité physique de la tige ou de la branche. On parle alors de volume "total".
- la découpe 7 cm de diamètre est la plus souvent utilisée pour faire une limite avec les petits brins qui sont très nombreux, difficiles à mesurer et de peu d'intérêt. C'est la découpe supérieure du volume "bois fort".

- . d'autres découpes sont possibles : la découpe 5 cm de diamètre est par exemple souvent admise comme découpe supérieure du volume papetier.

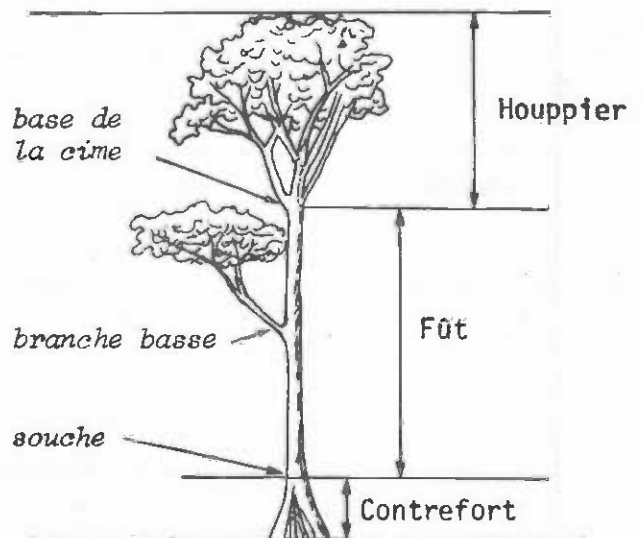
122 Découpes de forme - Exemples

122.1 La souche : elle peut être définie comme la base de la partie de la tige qui est extraite de forêt dans des conditions d'exploitation optimales (en perdant le moins possible de matière utilisable). Pour les arbres sans contrefort, ce niveau est à une hauteur du sol comprise entre 10 et 50 cm en général ; si ce niveau n'est pas précisé, il est présumé être à une distance du sol égale au centième de la hauteur totale de l'arbre. Pour les arbres à contrefort ou à racines aériennes, la souche est le sommet du contrefort ou des racines (niveau en général plus élevé que le niveau d'abattage).

122.2 La base de la cime : c'est l'endroit où la tige se ramifie nettement.

Ces deux découpes permettent de définir :

- le fût : partie de la tige située entre la souche et la base de la cime.
- les branches basses : branches insérées sur le fût.
- le houppier : partie de la tige située au-dessus de la base de la cime + branches insérées au-dessus de la base de la cime.



123 Découpes de qualité

On parlera par exemple de découpe tranchage, découpe sciage, découpe poteau, etc... Ces notions sont évidemment assez délicates à apprécier car elles intègrent des notions de forme et de dimension et sont très liées aux pratiques technologiques et commerciales du moment.

13 QUELQUES EXEMPLES DE VOLUMES BRUTS

Ce qui précède montre que pour un arbre donné, on peut définir une quasi infinité de volumes. En voici quelques exemples, cités sensiblement dans l'ordre de complexité croissante de leur mesure. Les trois premiers sont les plus utilisés.

Objet physique	Découpe inférieure (au gros bout)	Découpe supérieure (au fin bout)	Appellation du volume	Préciser à chaque fois s'il s'agit du volume sur ou sous écorce et indiquer comment a été calculé ce volume.
Fût	Souche	Base de la cime	Volume fût	
Tige	Souche	Découpe D = 7 cm	Volume tige bois fort	
Tige	Souche	Extrémité physique	Volume tige total	
Tige + branches basses	Pour la tige : souche	Découpe D = 7 cm pour la tige et chaque branche basse	Volume (tige + branches basses) bois fort	
Tige + branches	Souche	Extrémité physique de la tige et de chaque branche	Volume (tige + branches) total	
Tige + branches	Souche	Découpe D = 7 cm pour la tige et chaque branche	Volume (tige + branches) bois fort	
Branches	Pour chaque bran- che : insertion sur la tige ou la branche sur la- quelle elle s'in- sère	Extrémité physique de chaque branche	Volume branches total	
Branches	- idem -	Découpe D = 7 cm pour chaque bran- che	Volume branches bois fort	
Houppier	Pour la tige : découpe D = 7 cm pour chaque bran- che : insertion sur la tige	Extrémité physique de la tige et de chaque branche	Volume houppier total (découpe inférieure D=7cm pour la tige)	
Tige + branches	niveau du sol	Extrémité physique de la tige et de chaque branche	Volume total de la biomasse li- gneuse aérienne	
Arbre	Extrémité physique de la tige, des branches et des racines		Volume total de la biomasse ligneeuse	

14 A PROPOS DES VOLUMES UTILISABLES

Les volumes qui viennent d'être cités sont des volumes bruts. L'estimation des volumes utilisables correspondants nécessiterait de longs développements qui ne peuvent être abordés dans ce manuel. Le problème est en fait compliqué et n'est pas très bien résolu.

Les difficultés sont en effet de plusieurs types :

- il faut connaître les différentes utilisations actuelles et futures qui seront faites du bois (tranchage - déroulage - sciage - poteau - pâte à papier - bois de feu - bois de trituration ...)
- pour chaque utilisation, il faut connaître en détail la chaîne des transformations que subira le bois (modes d'abattage, de débardage, de transport, de traitement en usine,...).
- il faut traduire les différentes contraintes imposées par ces transformations en termes de données mesurables (longueur - diamètre - cylindricité - excentricité du cœur - courbure de la tige, défauts admissibles,...).

La procédure à suivre pour passer des volumes bruts aux volumes utilisables est donc très dépendante des conditions locales et des moyens disponibles. Nous ne pouvons que donner quelques idées et renvoyer le lecteur aux ouvrages spécialisés.

- les données recueillies par les services forestiers lors d'opérations d'inventaire (observation d'arbres sur pied ou abattus) ne peuvent que fournir des volumes présumés aptes à tel ou tel emploi. Des études dans les exploitations forestières et les industries de transformation sont indispensables pour connaître les véritables coefficients de passage du volume brut au volume utilisé. Un exemple sera donné au paragraphe 41,
- même si une estimation de volume est entreprise dans un but très précis (ex : approvisionnement d'une usine de pâte à papier), recueillir les données de façon à pouvoir estimer d'autres volumes car il est fréquent que la destination finale des bois ne soit pas celle qui était prévue et/ou que les contraintes fixées par les transporteurs et les industriels évoluent dans le temps,
- donner la priorité à l'estimation des volumes bruts et considérer que l'estimation des volumes utilisables est l'affaire de spécialistes.

2 MESURE DIRECTE DU VOLUME D'UN ARBRE

Selon le type de volume désiré, les mesures seront plus ou moins nombreuses. Les différentes parties de l'arbre (tige, branches) n'étant jamais des solides de forme géométrique parfaitement connue comme le sont les cylindres, les cônes, etc..., le principe est de mesurer sur chacune d'elles le diamètre à différentes hauteurs et d'en déduire le volume par calcul ; celui-ci sera naturellement d'autant plus précis que le nombre de diamètres mesurés sera élevé. On conçoit que ces mesures sont plus faciles et plus précises sur arbres abattus que sur arbres debout, d'où le plan de ce paragraphe :

- | | |
|---------------------------------|---|
| § 21 Mesures sur arbres debout | } Calcul du volume à partir
de ces mesures : § 23. |
| § 22 Mesures sur arbres abattus | |

21 MESURES SUR ARBRES DEBOUT

211 Mesures de grosseur (diamètre ou circonférence)

La grosseur d'un arbre est traditionnellement décrite par les grandeurs suivantes : diamètre de référence, circonférence de référence, surface terrière. On mesure le diamètre ou la circonférence et on en déduit la surface terrière par calcul, grâce aux formules relatives au cercle :

$$\begin{aligned} \text{Surface terrière} &= \frac{\pi}{4} (\text{diamètre de référence})^2 \\ &= \frac{1}{4\pi} (\text{circonférence de référence})^2 \end{aligned}$$

La surface terrière est donc une grandeur conventionnelle qui donne une approximation de la surface de la section de référence. La connaissance de la valeur exacte de celle-ci est en effet pratiquement impossible sur un arbre debout et sur un arbre abattu, elle impose le planimétrage de la section.

211.1 Définition du diamètre et de la circonférence de référence

Parmi tous les diamètres et toutes les circonférences que l'on peut mesurer, le diamètre de référence et la circonférence de référence jouent un rôle essentiel. Sur un arbre vertical, ce diamètre (ou cette circonférence) est mesuré :

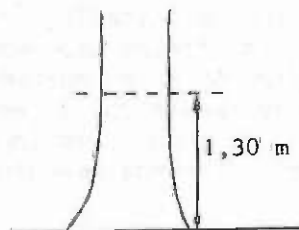
- à 1,30 m du sol (4 pieds-3 inches) pour les arbres sans contrefort ou à contrefort ou racines aériennes inférieures à 1 m. de haut. Le diamètre de référence est alors traditionnellement appelé diamètre à hauteur d'homme. Il est recommandé d'éviter cette expression manifestement ambiguë et de prendre toutes les précautions nécessaires pour que le niveau de la mesure ne dépende pas de la taille de l'opérateur.
- à 30cm au-dessus de la fin du contrefort ou des racines aériennes si ceux-ci ont plus de 1 m de haut.

Quand le diamètre de référence n'est pas mesuré à 1,30 m du sol, la hauteur à laquelle il est mesuré doit être indiquée. La page suivante illustre quelques cas qui se posent dans la pratique pour définir le diamètre de référence.

- 7 -
DIAMETRE DE REFERENCE

Terrain plat

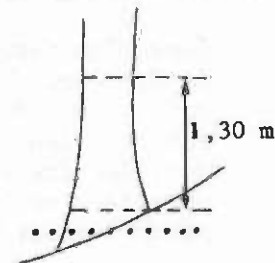
Arbre droit sans contrefort ou à contrefort inférieur à 1 mètre ou à racines aériennes inférieures à 1 mètre.



Terrain incliné

Arbre vertical

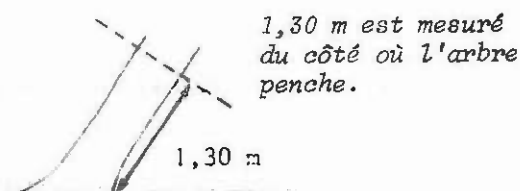
En principe, la base de l'arbre est le niveau marqué (place de la graine). Pour des raisons pratiques, on mesure 1,30m côté amont.



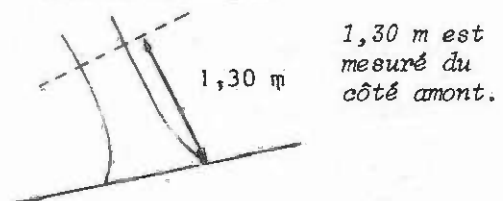
Arbres penchés

La longueur 1,30m doit être mesurée parallèlement à l'arbre et non verticalement. La section mesurée doit être perpendiculaire à l'axe de l'arbre et non horizontale.

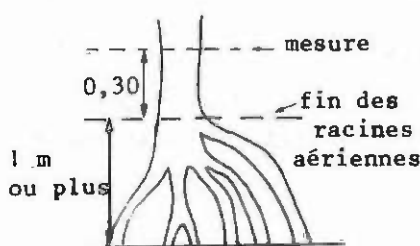
Terrain plat



Terrain incliné

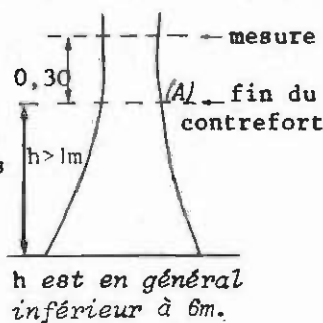


Arbres à racines aériennes supérieures à 1 mètre

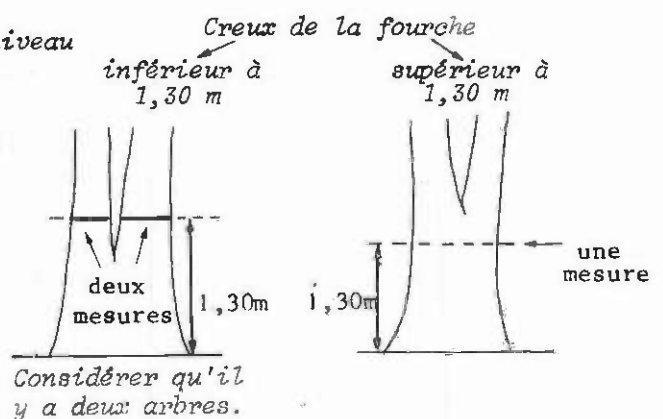


Arbre à contrefort supérieur à 1 mètre

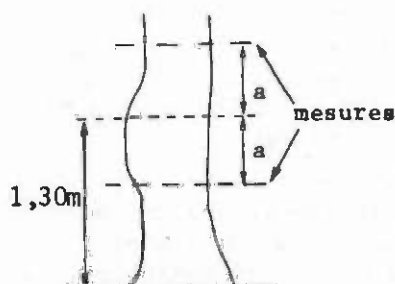
Pour bien apprécier le niveau (A) s'éloigner de l'arbre.



Arbres fourchus



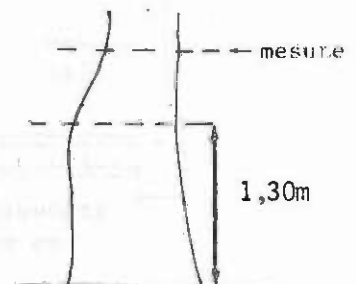
Anomalie à 1,30 m (noeud, bosse, déformation, ...)



Les mesures doivent être faites en dehors de la partie déformée.

Faire si possible 2 mesures à égale distance du niveau 1,30m et prendre la moyenne.

Mais il se peut qu'une seule mesure soit possible.

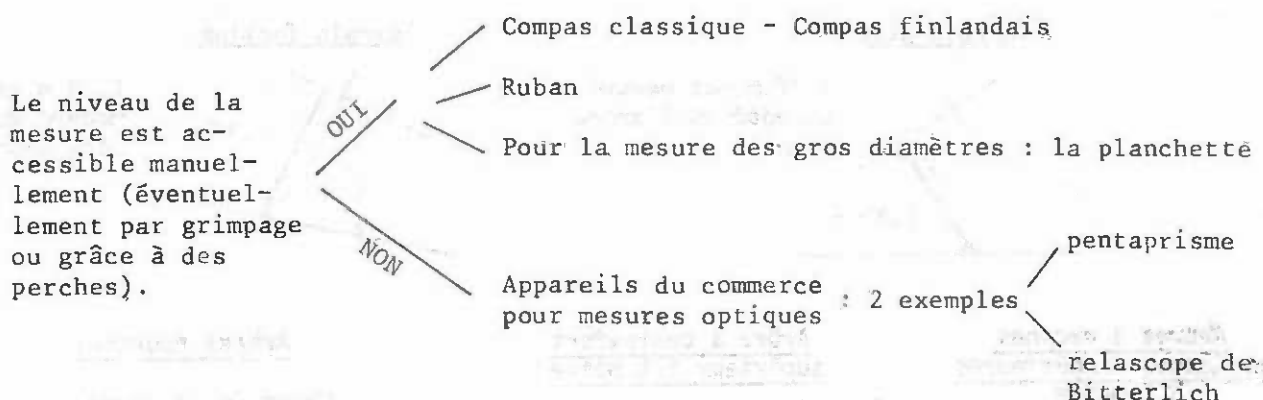


Remarques :

- Si le diamètre doit être mesuré ultérieurement pour connaître l'accroissement, il faut matérialiser le niveau de la mesure (peinture...). Au cas où ce repère entraînerait une réaction de l'arbre, il est prudent de le mettre à une distance fixe (par exemple 10 cm) du niveau de la mesure et de noter la hauteur de ce niveau par rapport au sol pour le cas où le repère disparaîtrait.
- Lors d'un inventaire ou d'une mensuration de parcelle, on ne mesure le diamètre de référence que si l'arbre a atteint une certaine taille. En général, le diamètre de référence n'est mesuré que s'il est supérieur à 5 cm ; auparavant, on ne mesure que la hauteur, sauf dans les études axées sur la régénération, auquel cas la mesure des diamètres nécessite un équipement spécial (compas miniaturisés - pieds à coulisse).

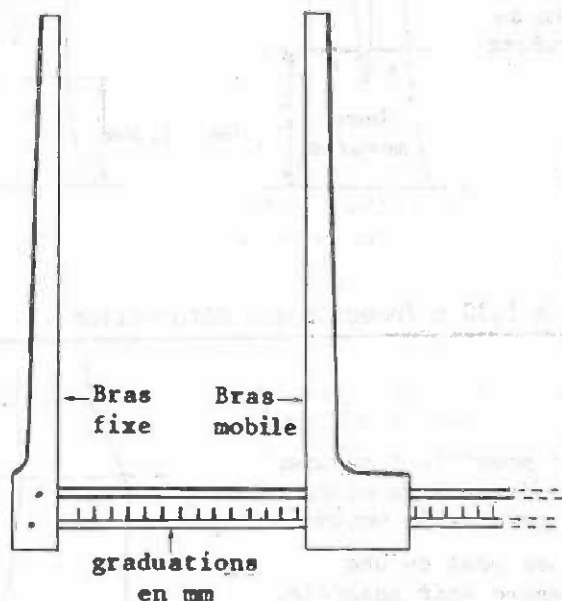
211.2 Pratique de la mesure des diamètres et des circonférences sur arbres debout

Le schéma suivant indique le plan du paragraphe :



211.21 Mesure du diamètre au compas

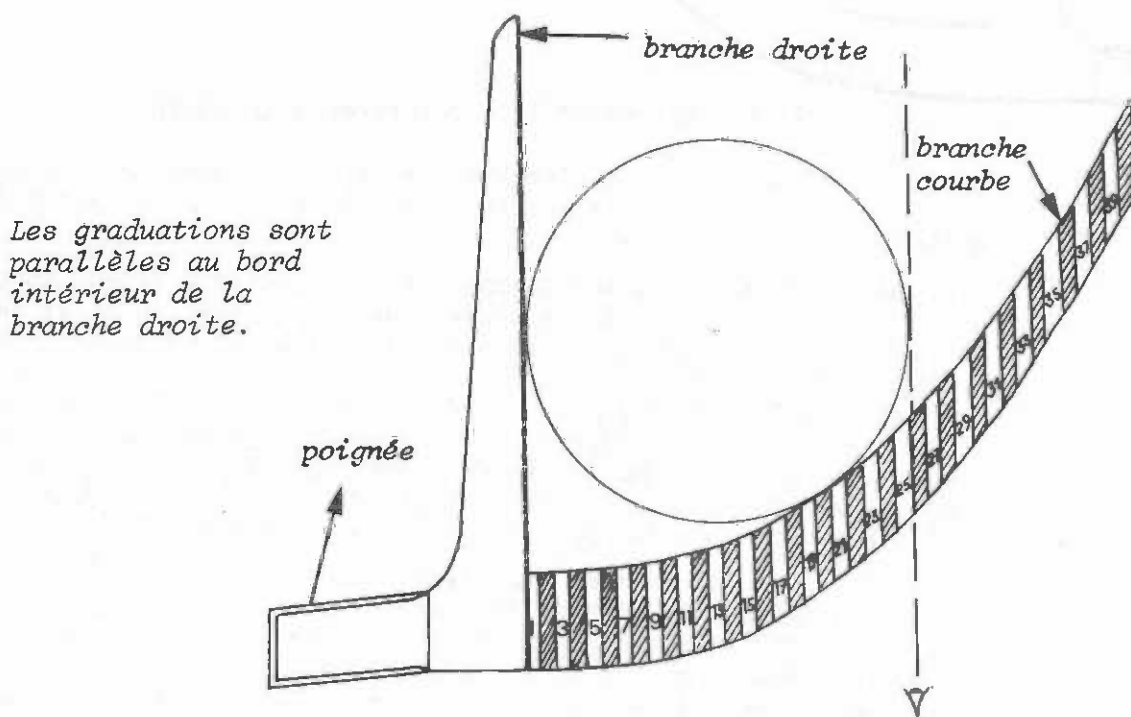
211.211 Le compas classique



- Préférer un compas métallique à un compas en bois (stabilité climatique - facilité de nettoyage).
- Tenir horizontal.
- Ne pas trop serrer les bras contre l'arbre (écorce molle).
- Vérifier fréquemment le parallélisme des bras.
- Faire au minimum une mesure, sans choisir la direction. Pour plus de précision ou pour un arbre méplat, faire une deuxième mesure dans la direction perpendiculaire et prendre la moyenne arithmétique.
- Faire la mesure avec la précision maximum permise par la graduation (au cm le plus proche en général ; au mm le plus proche si possible).

Divers perfectionnements peuvent être apportés à l'appareil, dont le schéma ci-dessus montre le type le plus simple : graduations supplémentaires (circonférence, surface terrière), réglage par vis de la position finale du bras mobile, déplacement par roulettes du bras mobile, adjonction d'un système d'enregistrement automatique de la mesure sur bande de papier perforé ou sur mini cassette,...

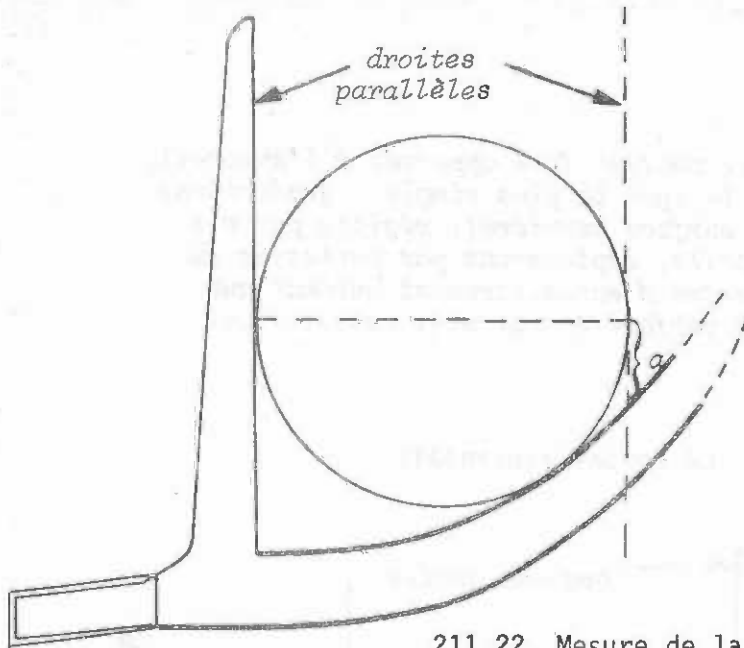
211.212 Le compas finlandais



Tenir la poignée d'une seule main, bras tendu, en plaçant le compas perpendiculairement à l'axe de la tige. Viser parallèlement aux traits des graduations.

Avantages sur le compas traditionnel :

- pas de partie mobile,
- fixé au bout de perches graduées emboîtables, l'appareil permet de mesurer des diamètres jusqu'à environ 8 m du sol, et même jusqu'à une douzaine de mètres si on utilise des jumelles pour la lecture,
- appareil facile à construire en contreplaqué (de 9 mm) ; graduer les deux faces si on veut le tenir de la main droite ou de la main gauche, vernir le tout.



La forme courbe de la branche qui porte les graduations est telle que la distance a ne dépende pas de la grosseur de l'arbre, ce qui assure une précision identique pour des arbres de grosseurs différentes ($a = 5,5$ cm dans l'appareil représenté page précédente).

211.22 Mesure de la circonférence au ruban

L'usage du ruban s'impose sur les gros arbres car le compas est impraticable. Pour les petits arbres aussi, le ruban est préférable au compas. En effet :

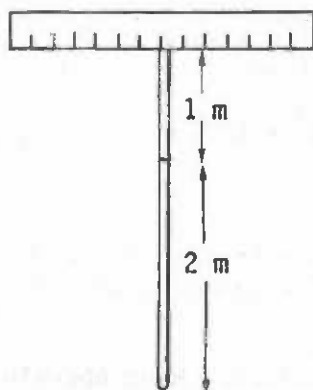
- le ruban estime une grandeur appelée circonférence (c'est en fait le périmètre de l'enveloppe convexe de la section), dont la définition n'est pas ambiguë tandis qu'il existe une infinité de diamètres. Par référence au cercle, le quotient par π de la circonférence mesurée est pris pour diamètre (certains rubans comportent une graduation en diamètres). Une propriété mathématique ajoute une justification supplémentaire à cette pratique : la circonférence mesurée divisée par π est égale à la moyenne de l'infinité des diamètres que l'on pourrait mesurer au compas.
- les mesures au ruban sont plus fiables que les mesures au compas : le ruban, pourvu qu'il soit inextensible, est plus robuste et le risque de compression de l'écorce est plus faible qu'avec le compas. C'est essentiellement pour cette raison que l'on entend dire que le diamètre mesuré au ruban est systématiquement supérieur au diamètre mesuré au compas et c'est pour corriger ce biais que la norme française par exemple définit la circonférence à 1,30 m comme référence de la grosseur d'un arbre. Nous ne recommandons pas cette définition par souci d'uniformisation d'une part et aussi parce que des études détaillées, à la fois pratiques et théoriques, ont montré que la différence entre $D_{1,30m}$ et $\frac{1}{\pi} C_{1,30m}$ est en général faible et n'a pas en fait un caractère réellement systématique.
- L'essentiel est de bien placer le ruban dans un plan perpendiculaire à l'axe de la tige après avoir enlevé lianes, lichens, ... (mais veiller à ne pas entamer l'écorce). Préférer les rubans munis d'un crochet à l'extrémité pour fixation dans l'écorce, ce qui permet à une seule personne de mesurer un gros arbre. Les rubans toilés sont souvent extensibles et peu solides. Les rubans métalliques sont meilleurs de ce point de vue mais manquent de souplesse et se tortillent de façon désagréable. Des matériaux modernes comme la fibre de verre suppriment ces inconvénients.

- Faire la mesure avec la précision maximum permise par la graduation : au cm le plus proche en général (82,4 → 82 ; 82,6 → 83), au mm le plus proche si possible. Cependant, pour des mesures rapides effectuées dans des conditions difficiles par du personnel non spécialisé, les mesures "au centimètre couvert" (82,4 → 82 ; 82,6 → 83), bien que biaisées, sont préférables car moins sujettes à une mauvaise interprétation.

211.23 Procédé de la planchette pour la mesure du diamètre à faible hauteur (5 à 6 m au maximum)

211.231 Confection de la planchette

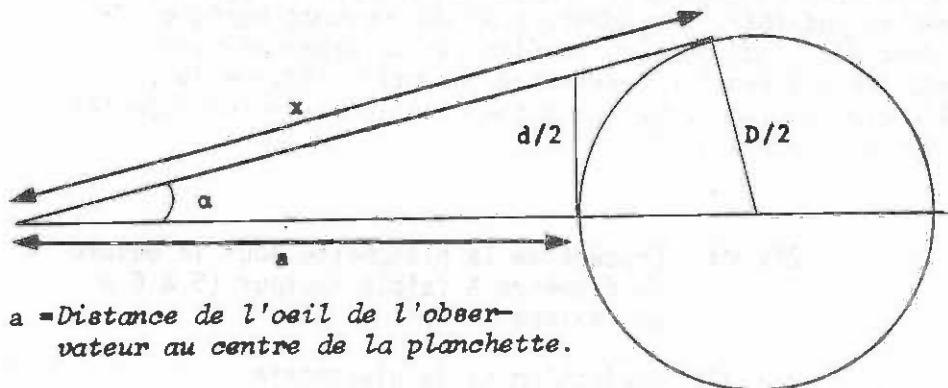
- Prendre une planche de 150 cm × 10 cm × 1 cm et la peindre en blanc.
- Fixer en son milieu une perche de 1 m de long et sur cette perche un manche amovible de 2 m de long.



- Indiquer à la peinture noire les limites et les numéros des classes comme indiqué ci-dessous :

Classes	Limites inférieures des classes	
	Limites exactes D (cm)	Limites à porter sur la planchette: d (cm)
2	15	14.9
3	25	24.7
4	35	34.4
5	45	44.0
6	55	53.6
7	65	63.0
8	75	72.4
9	85	81.7
10	95	90.9
11	105	99.9
12	115	108.9
13	125	117.9
14	135	126.7
15	145	135.5

Justification : pour éviter les erreurs de parallaxe, les limites de classes sur la planchette sont rectifiées :



On établit facilement que :

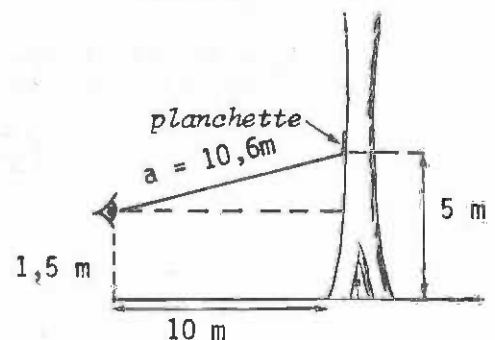
$$d = \frac{D}{\sqrt{1 + \frac{D}{a}}}$$

a = Distance de l'œil de l'observateur au centre de la planchette.

Le mode opératoire qui suit suppose que l'observateur se place à une distance horizontale de 10 m de l'arbre. Si la planchette est à hauteur de son œil, a = 10 m.

Sinon, la hauteur maximum à laquelle peut être mise la planchette étant d'environ 5 m et en admettant que le terrain est plat et que l'œil de l'observateur est à 1,5 m du sol, la distance a vaut alors :

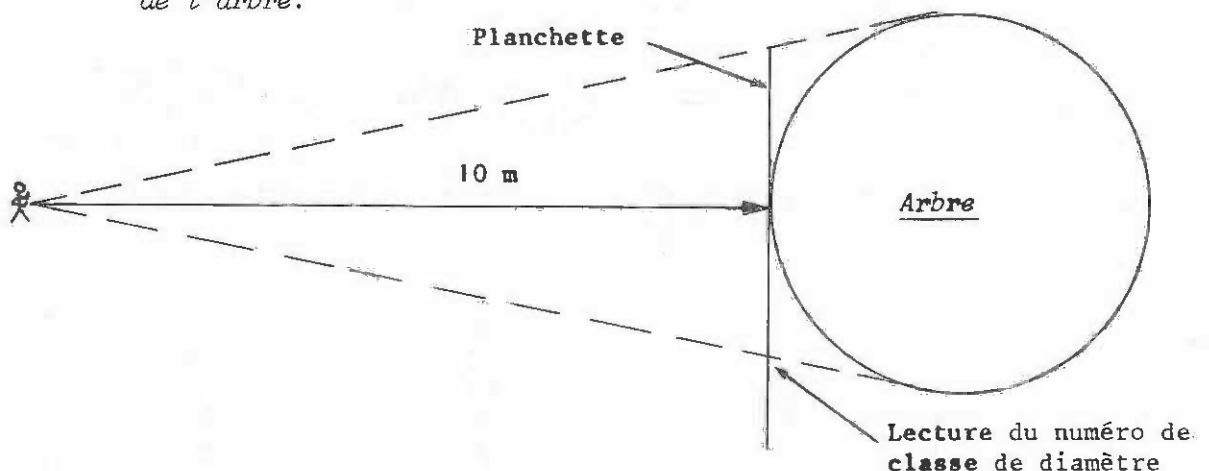
$$\sqrt{10^2 + (5 - 1,5)^2} = 10,6 \text{ m}$$



On peut donc estimer que a vaut en moyenne 10,3 m. C'est avec cette valeur qu'ont été calculés les diamètres rectifiés d à porter sur la planchette.

211.232 Mode opératoire

- L'observateur se place à une distance horizontale de 10 m de la face de l'arbre.



- Un aide place la planchette contre l'arbre au niveau de la mesure. Il est important que la planchette soit perpendiculaire à la ligne de visée. L'extrémité gauche de la planchette doit être alignée avec la limite gauche du fût par rapport à l'observateur.
- Lire le numéro de la classe de diamètre sur la partie droite de la planchette.

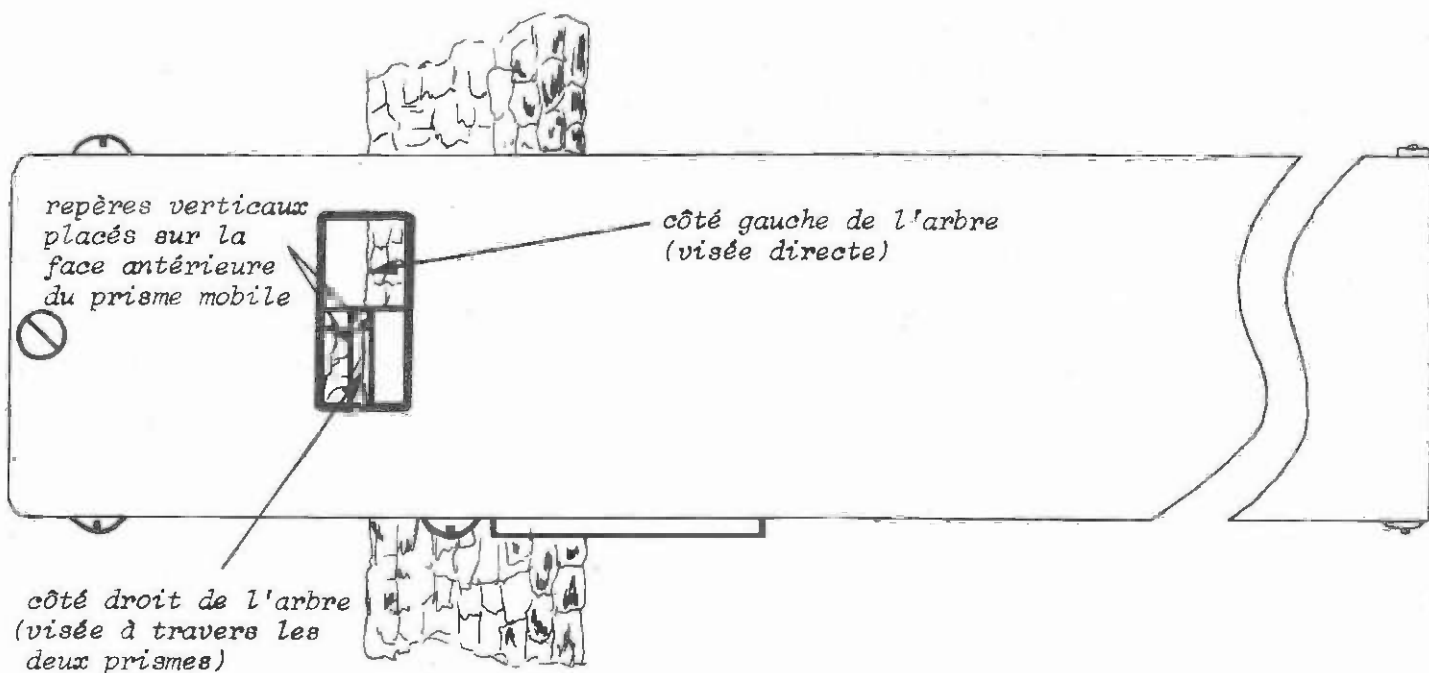
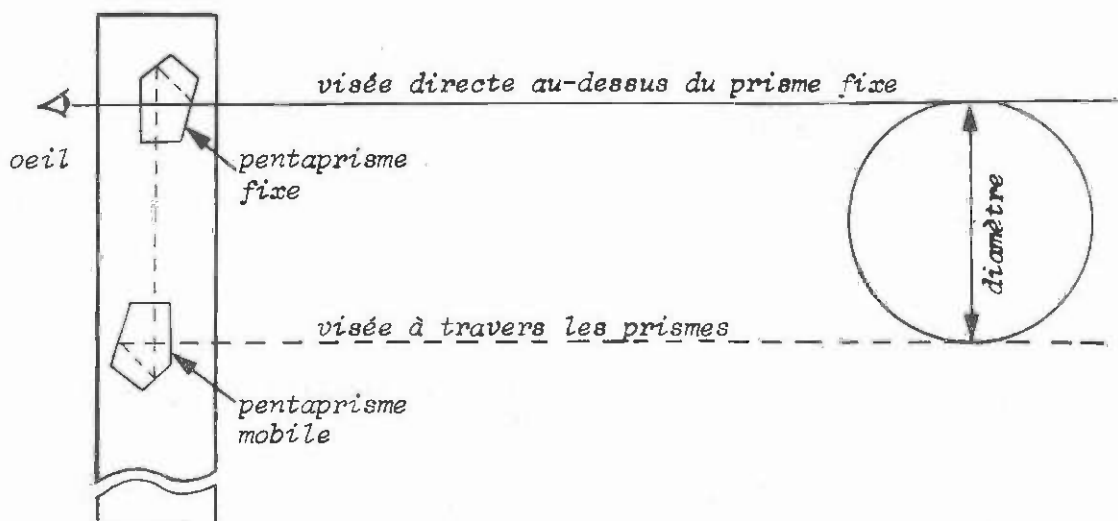
211.24 Le compas pentaprisme de Wheeler

Ce dendromètre optique a deux avantages :

- l'observateur peut se placer à n'importe quelle distance de l'arbre et cette distance n'a pas à être connue,
- il permet de mesurer un diamètre à n'importe quel niveau de la tige.

Mais il exige une bonne visibilité : un bon contraste entre l'arbre et l'arrière plan est nécessaire.

Schéma montrant le cheminement des visées à travers l'appareil



Tenir l'appareil à 8-10 cm des yeux, échelle graduée vers le haut. Viser dans la fenêtre. La plupart des opérateurs ouvrent les deux yeux.

A travers la partie supérieure de la fenêtre, on voit directement le bord gauche de l'arbre et dans la partie inférieure, on voit le bord droit à travers les deux prismes. Bouger le prisme mobile de la main droite jusqu'à ce que le bord droit soit aligné verticalement avec le bord gauche, au milieu des deux repères verticaux. Lire le diamètre sur la graduation.

L'appareil est commercialisé en 3 longueurs :

44 cm → diamètre maximum 36 cm

69 cm → diamètre maximum 62 cm

95 cm → diamètre maximum 86 cm.

Pour vérifier le réglage du curseur, viser un objet de largeur connue et régler le curseur de façon à lire la valeur exacte. Vérifier aussi que la mesure ne dépend pas de la distance (certains appareils ont des défauts de fabrication).

211.25 Mesure du diamètre au relascope de Bitterlich

Le relascope de Bitterlich est un appareil assez universel pour les forestiers qui permet les principales mesures suivantes :

- a) diamètre d'arbre à hauteur quelconque
- b) hauteur d'arbre
- c) surface terrière de peuplement
- d) certaines longueurs horizontales
- e) pente d'un terrain.

Sa description, le principe de son fonctionnement, et son maniement pour les mesures c) d) e) , ne sont pas fournis ; ce qui suit est le mode d'emploi de l'appareil (dans sa version à bandes larges, plus adaptée à la mesure des gros arbres que la version à bandes étroites) pour la mesure des diamètres à différentes hauteurs du fût.

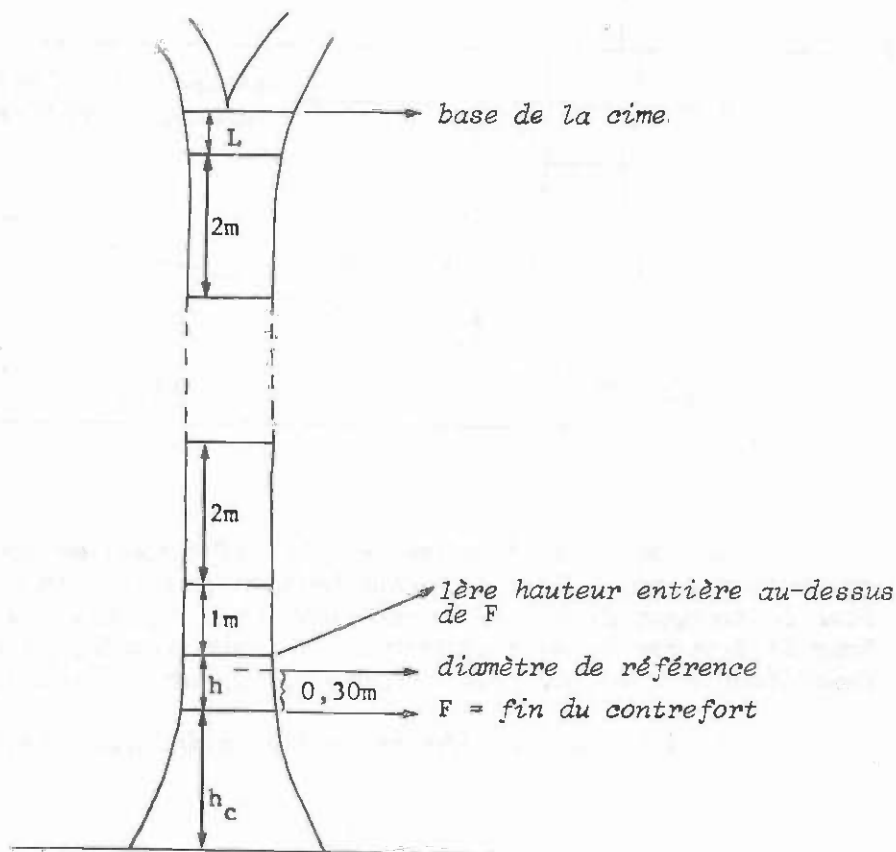
Mesure des diamètres au Relascope de BITTERLICH à bandes larges

pour le calcul d'un volume fût

- 1/ Se placer à une distance horizontale D du centre de l'arbre égale au moins aux $2/3$ de sa hauteur. (D peut être égal à 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 mètres).
- 2/ Le fût doit être vu complètement. Dégager la végétation si nécessaire.
- 3/ Mesurer la hauteur h_c du contrefort, le diamètre de référence (au ruban ou à la planchette) et l'épaisseur de l'écorce.
- 4/ H désignant la première hauteur entière (lue sur la bande correspondant à la distance D) située au-dessus de la fin du contrefort, mesurer :
 - le diamètre à la fin du contrefort
 - la hauteur h entre H et la fin du contrefort
 - le diamètre aux hauteurs $H, H+1, H+3, H+5$, etc... de 2m en 2m.

Ne pas mesurer le diamètre si l'arbre est déformé à ce niveau.

- 5/ Estimer la hauteur L entre la dernière mesure et la découpe supérieure (base de la cime) ($L < 2m$).
- 6/ Mesurer le diamètre à la découpe supérieure.
- 7/ Relever les parties apparemment non utilisables (défauts, insertion d'une grosse branche,...).
- 8/ Faire les cotations qualitatives (voir § 41).



Les mesures sont rassemblées dans un imprimé qui est conçu pour calculer le volume de l'arbre grâce à une machine programmable : il n'est donc pas prévu de place pour inscrire le volume de chaque tronçon. Modifier en conséquence l'imprimé si les calculs sont à faire à la main.

Le passage des unités-relascope aux valeurs réelles se fait grâce à la relation :

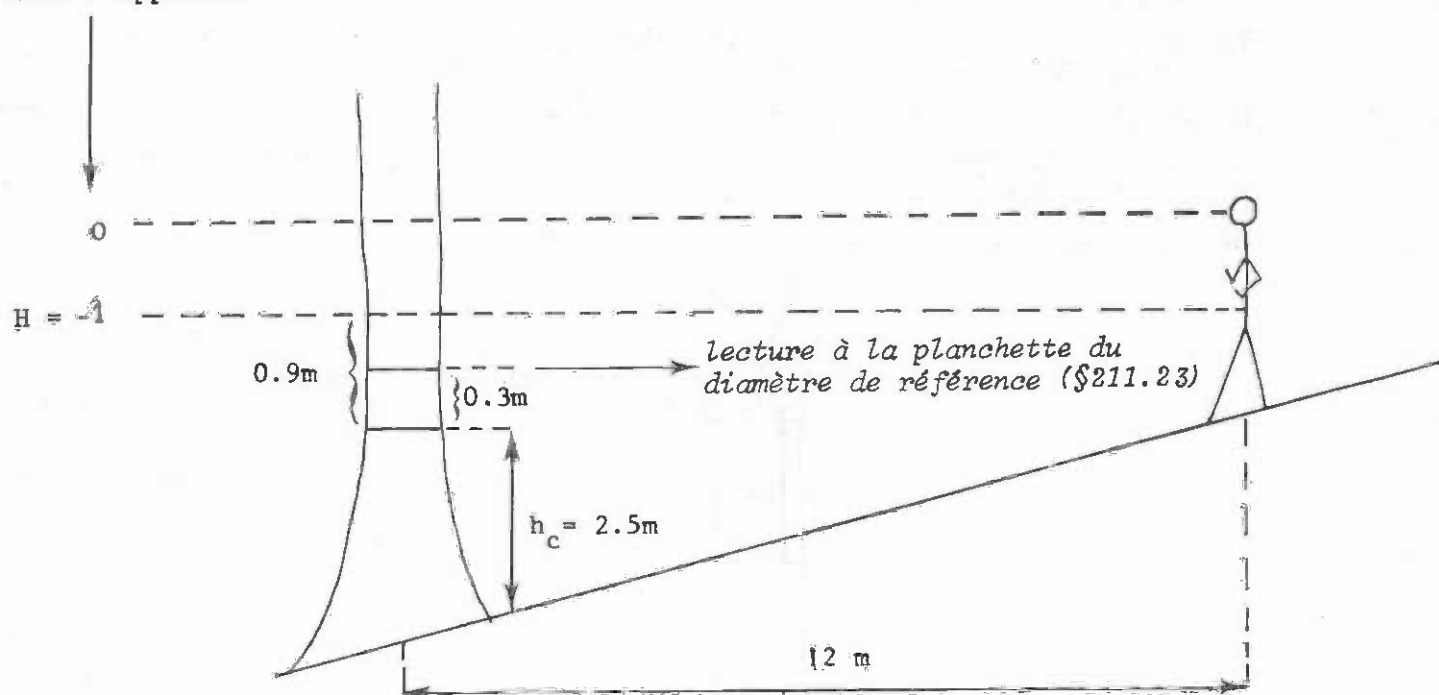
une bande en cm = $2 \times D$ en mètres (ex. : $D = 10m$, 1 bande = 20cm).

Remarque :

Si les mesures sont effectuées par grimpage, un imprimé de même type est à utiliser. Les deux colonnes relatives aux unités relascope contiennent alors les diamètres sur et sous-écorce.

Exemple : L'imprimé qui suit est relatif à un arbre mesuré ainsi :

hauteurs lues
dans l'appareil



Les calculs de volume ont été effectués en appliquant la formule de Smalian (voir § 231) à chaque tronçon compris entre deux mesures. Pour le tronçon du bas (0,9m de haut) on a appliqué la formule du cylindre. Pour le tronçon de 4m contenant la branche cassée, la longueur de la partie inutilisable a été estimée à 1,8m → longueur utilisable = 2,2 m.

L'épaisseur de l'écorce a été estimée constante le long du fût.

Imprimé pour le cubage d'arbres sur pied au
Relascope de Bitterlich (Volume fût)

[illegible]

212 Mesures de hauteur

212.1 Définitions

La hauteur totale d'un arbre est la longueur de la ligne droite joignant le pied de l'arbre (niveau du sol) à l'extrémité du bourgeon terminal de la tige. Pour les arbres fourchus, il y a une hauteur totale si la fourche est au-dessus de 1,30 m et autant de hauteurs totales que de tiges si la fourche est inférieure à 1,30 m.

De la même façon que pour les volumes, on définit des hauteurs à des découpes données : la hauteur "bois fort" sera par exemple la longueur de la ligne joignant le pied de l'arbre à la découpe 7 cm de diamètre de la tige.

Remarques :. pour les arbres très mal conformés ou pour des arbustes à tiges multiples comme on en rencontre en savane, la notion de diamètre a peu de sens pratique ; la hauteur totale devient alors la caractéristique essentielle.

. la hauteur totale a peu de sens concret pour les arbres dont la cime est cassée ou morte. Eviter d'utiliser de tels arbres pour construire un tarif de cubage.

212.2 Mesures de hauteur sur arbre debout

Les mesures de hauteur sont plus longues et plus délicates que les mesures de diamètre. Elles sont parfois impossibles (manque de visibilité).

On mesure une hauteur :

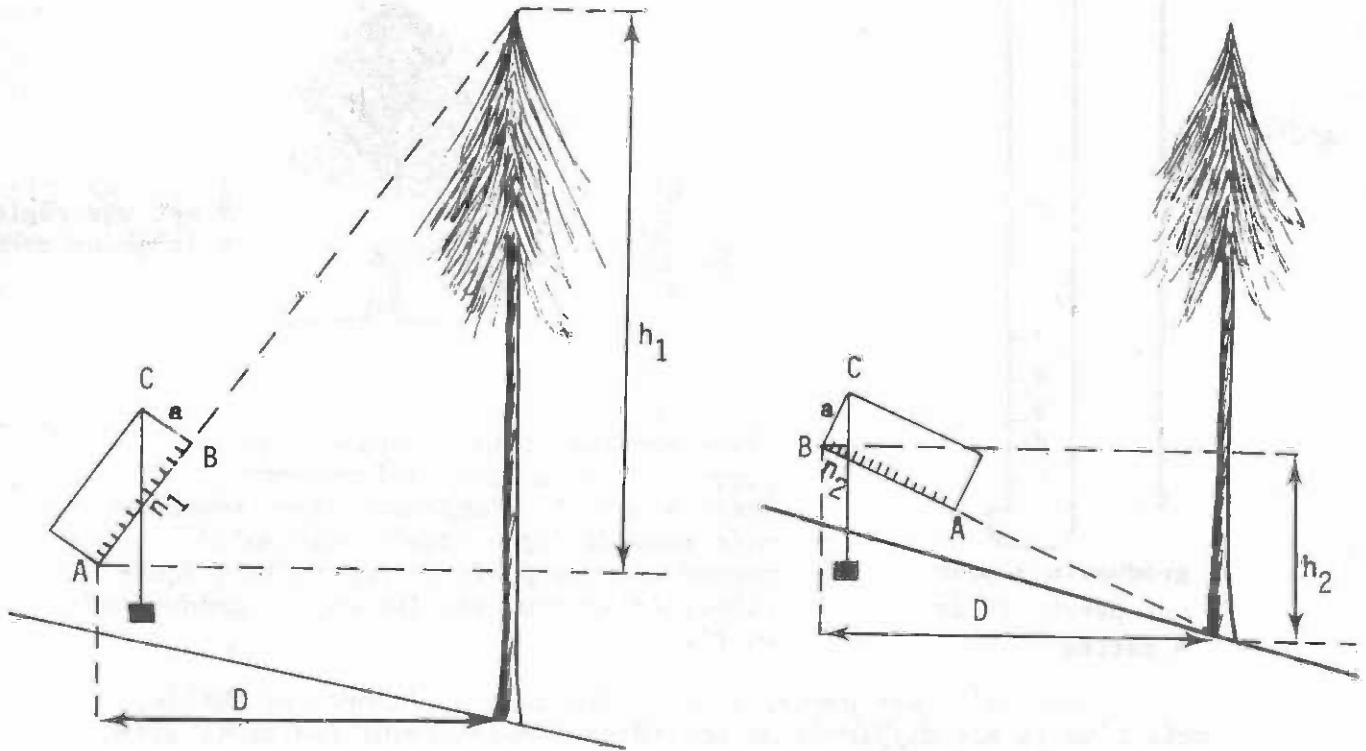
- soit grâce à un système de perches emboîtables graduées que l'on applique contre le fût. Ceci n'est possible que pour de faibles hauteurs (de l'ordre d'une dizaine de mètres),
- soit, le plus fréquemment, par procédé optique grâce à un dendromètre.

212.21 Quelques dendromètres

Il existe une très grande variété de dendromètres. Nous nous limiterons à décrire le principe de deux appareils simples à fabriquer et à citer quelques exemples d'appareils du commerce.

212.211 Principe de deux appareils simples à fabriquer

- La "planchette dendrométrique" est une planchette munie d'un fil à plomb fixé à un coin :



AB est gradué en centimètres à partir de B sur les deux faces.

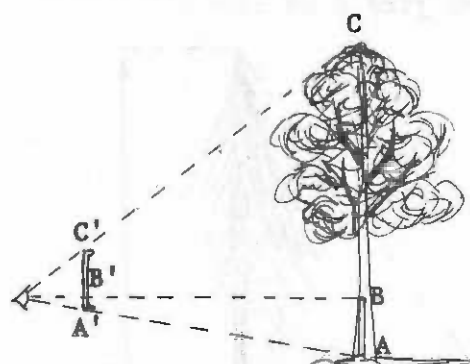
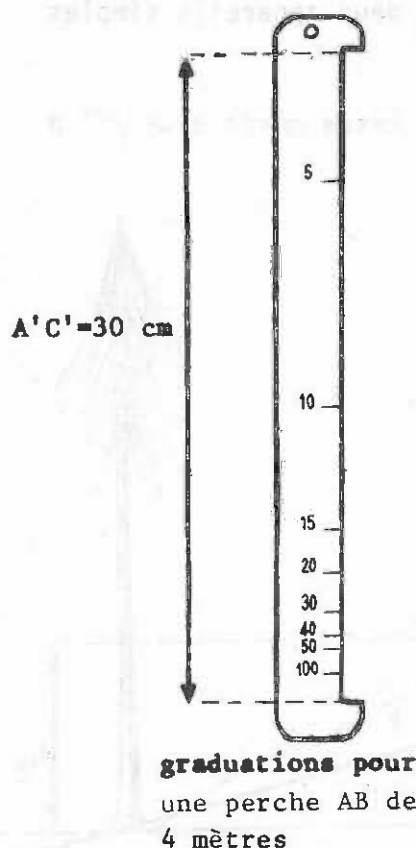
$$H_{\text{tot}} = h_1 + h_2 \quad \text{avec : } h_1 = D \frac{n_1}{a} \quad \text{et} \quad h_2 = D \frac{n_2}{a}$$

Si $D = 10 \text{ m}$ et $a = 10 \text{ cm}$, H_{tot} en mètres est la somme $n_1 + n_2$ en centimètres.

Il est difficile de faire la lecture avec une précision meilleure que le $1/2 \text{ cm}$; l'erreur sur la somme des deux lectures est donc de 1 cm au maximum ; l'incertitude sur la hauteur est donc de l'ordre du mètre si $D = 10 \text{ mètres}$, de l'ordre de 2 mètres si $D = 20 \text{ mètres}$, etc... C'est pourquoi il n'est pas recommandé d'utiliser un tel appareil à plus de 10 mètres de l'arbre ; la hauteur maximum que l'on peut mesurer est alors de l'ordre de la dizaine de mètres.

Cet appareil nécessite de mesurer la distance du point de visée à l'arbre. Voici un appareil qui évite cette mesure :

- Le dendromètre CHRISTEN



L'observateur tient l'appareil de façon à voir la hauteur à mesurer entre A' et C'. L'appareil étant immobile mais tenu de façon souple pour qu'il prenne bien sa position verticale d'équilibre, la hauteur est lue sur la graduation en B'.

Plus A'C' est grand, plus la distance à l'arbre est faible, mais plus il est difficile de contrôler simultanément les trois alignements C'C, B'B, A'A.

Le plus souvent, on prend un appareil de longueur $A'C' = 30 \text{ cm}$, ce qui amène à se placer à une distance de l'arbre dont l'ordre de grandeur est la hauteur à mesurer.

La relation $A'B' = \frac{AB}{AC} A'C'$ permet de tracer les graduations.

Voici quelques valeurs de la graduation A'B' en fonction de la longueur AB de la perche et de la hauteur AC de l'arbre, pour un appareil de longueur $A'C' = 30 \text{ cm}$.

AB → AC ↓	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m
5 m	180 mm	240 mm	300 mm		
6 m	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm	
10 m	90 mm	120 mm	150 mm	180 mm	210 mm
11 m	82 mm	109 mm	136 mm	164 mm	191 mm
15 m	60 mm	80 mm	100 mm	120 mm	140 mm
16 m	56 mm	75 mm	94 mm	113 mm	131 mm
20 m	45 mm	60 mm	75 mm	90 mm	105 mm
21 m	43 mm	57 mm	71 mm	86 mm	100 mm
30 m	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm
31 m	29 mm	39 mm	48 mm	58 mm	68 mm
40 m	23 mm	30 mm	38 mm	45 mm	53 mm
41 m	22 mm	29 mm	37 mm	44 mm	51 mm

Ce tableau montre que la précision de la mesure est d'autant plus faible que la hauteur mesurée est grande et que la perche AB est courte.

Dans la pratique, cet appareil n'est utilisé que pour des hauteurs inférieures à une vingtaine de mètres (ce qui est souvent suffisant pour la mesure des hauteurs de fût en forêt tropicale), car au-delà, l'arbre a peu de chances d'être visible en totalité, la distance de l'observateur à l'arbre devient trop grande et la précision trop faible comme le montre le calcul suivant : une précision meilleure que $x = 3$ mm sur la lecture B' semble difficile à obtenir. Imposons qu'une telle incertitude se traduise par une incertitude y d'au plus 1 mètre sur le résultat AC.

La relation suivante qui lie x et y :

$$AC = \sqrt{AB \times A'C' \times \frac{y}{x}}$$

montre que si $A'C' = 30$ cm et $x = 3$ mm, la condition $y \leq 1$ m est réalisée si :

AC $\leq$ 20 m pour une perche AB de 4 mètres

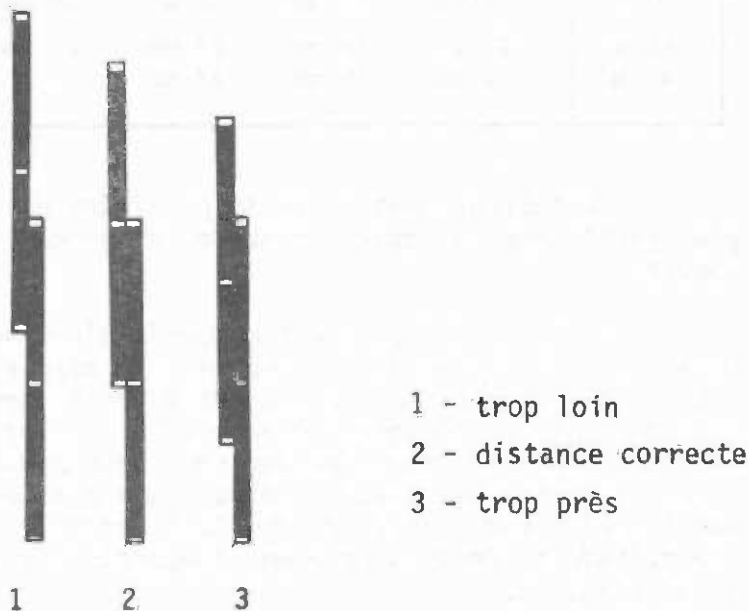
AC $\leq$ 22,4m pour une perche AB de 5 mètres

AC $\leq$ 24,5m pour une perche AB de 6 mètres.

212.212 Cinq dendromètres du commerce

Ces appareils sont évidemment plus précis.

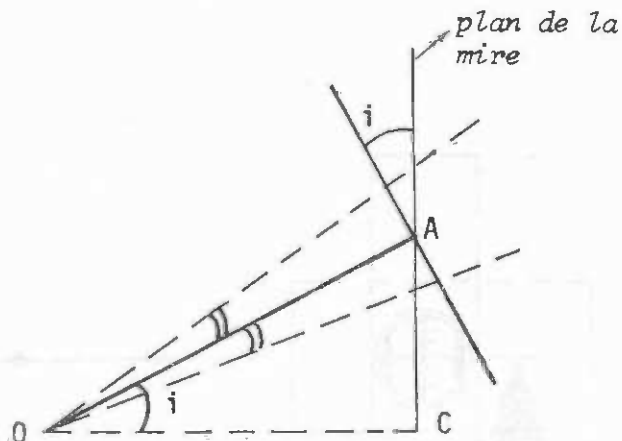
- Le dendromètre BLUME-LEISS, est composé d'un alisimètre à pendule immobilisable au moment de la visée devant quatre échelles graduées en hauteurs et une cinquième en angles. Les échelles des hauteurs correspondent à un éloignement de l'arbre à mesurer de 15, 20, 30 40 m. Ces distances sont mesurables grâce à un dioptré donnant 2 images décalées d'une petite mire pliante que l'on accroche à l'arbre ; sur cette mire sont tracés 3 traits équidistants de 45 cm sur une face, et de 60 cm sur l'autre face, ce qui correspond, lorsque les images de 2 traits viennent en coïncidence décalée, à des distances de 15, 20, 30 ou 40 mètres.



On vise et quand le pendule a atteint sa position d'équilibre, on l'immobilise grâce à une gâchette. La hauteur est donnée directement sur l'échelle correspondant à la distance.

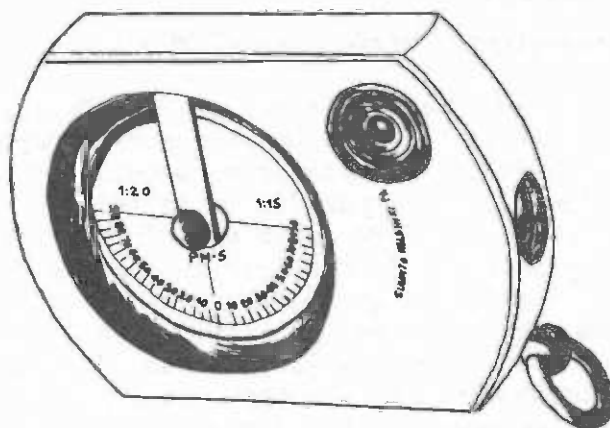
En montagne, lorsque la visée sur la mire est inclinée, on mesure son inclinaison à l'aide de l'échelle graduée en angles et on calcule, d'après une table gravée sur l'appareil, la correction à apporter à la hauteur lue. On voit la mire obliquement sous l'angle i , la longueur de mire interceptée est donc divisée par $\cos i$; d'autre part, on mesure l'oblique OA et pas l'horizontale $OC = OA \cos i$. La hauteur vraie est donc égale à la hauteur lue multipliée par $\cos^2 i$.

$$\begin{aligned} \text{hauteur vraie} &= \text{hauteur lue} \times \cos^2 i \\ &= \text{hauteur lue} - \text{hauteur lue} \times \sin^2 i \end{aligned}$$



Une table gravée sur l'appareil donne les valeurs de $\sin^2 i$.

- Le dendromètre HAGA est pratiquement identique et offre l'avantage que seule l'échelle correspondant à la distance choisie est visible, ce qui supprime un risque d'erreur. Un point délicat sur ces deux appareils : bien veiller à ce que l'action sur la gâchette n'immobilise pas le pendule dans une position légèrement différente de sa position exacte.
- Le dendromètre SUUNTO.

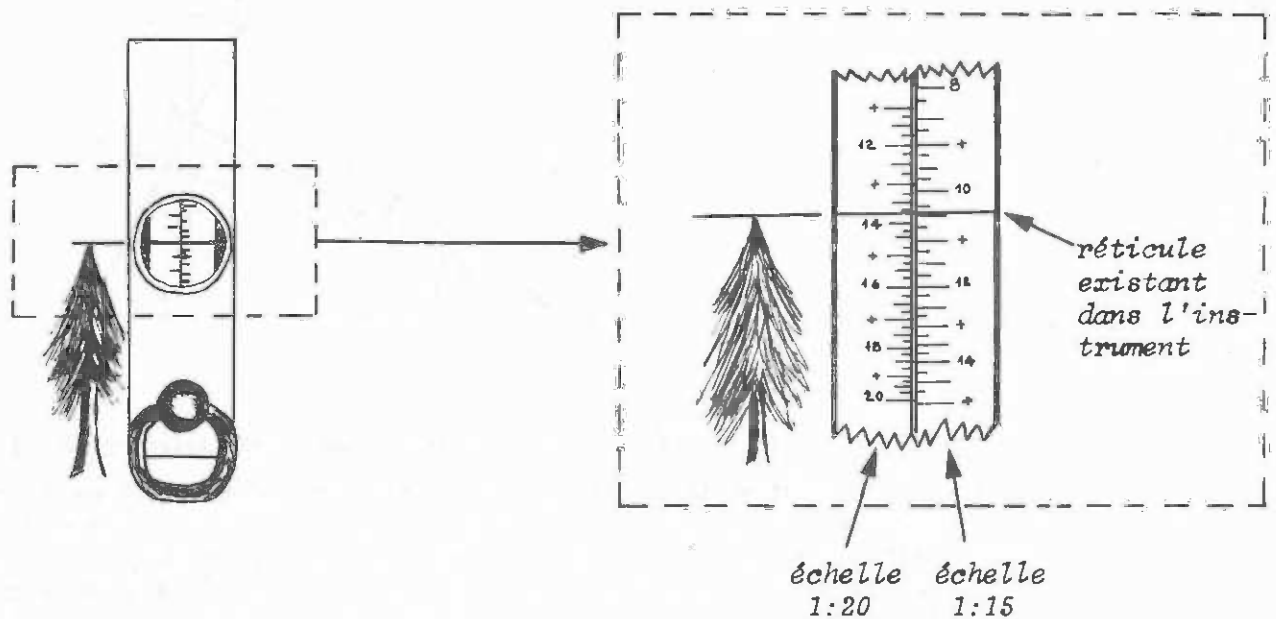


Grandeur réelle.

Il faut se placer à une distance donnée de l'arbre (15, 20, 30 ou 40 mètres). On place la mire contre l'arbre à hauteur des yeux (mire identique à celle utilisée avec le dendromètre BLUME-LEISS). La distance est correcte quand, vus à travers le dioptré, les deux repères de la mire coïncident.

Viser dans l'appareil. Lui faire décrire un arc vertical jusqu'à ce que le réticule soit aligné avec le point visé.

Viser simultanément, en ouvrant les deux yeux, à travers et le long de l'appareil. La hauteur est la hauteur au-dessus du niveau des yeux.



Avantage par rapport au dendromètre BLUME-LEISS : *visée et lecture simultanées.*

Inconvénient : *visée plus difficile.*

- Tout appareil mesurant des angles ("clisimètre" ou "clinomètre") peut être utilisé, la hauteur par rapport à l'horizontale étant le produit de la distance horizontale à l'arbre par la tangente de l'angle. Les appareils où la lecture est faite au moment de la visée sont préférables pour éviter l'inconvénient signalé dû à la gâchette. C'est le cas du clinomètre SUUNTO et du Relascope de Bitterlich, appareils très utilisés par les forestiers. Le premier comporte une graduation des angles en tangente ; on se place à n'importe quelle distance de l'arbre, mais le produit de la distance par la tangente est à faire. Le relascope donne automatiquement la hauteur si on se place à 20, 25, ou 30 m de l'arbre (modèle à bandes étroites) ou à une distance égale à un

nombre pair de mètres compris entre 4 et 20 (modèle à bandes larges).

- Tous ces appareils donnent une précision maximum quand on se place à une distance de l'arbre sensiblement égale à sa hauteur. Cette précision est, dans les conditions d'emploi optimum de chaque appareil, de l'ordre du pour-cent.

Recommandation : Etalonner chaque appareil dès réception : il n'est pas rare en effet de constater des écarts allant jusqu'à 3 % entre deux appareils de la même marque.

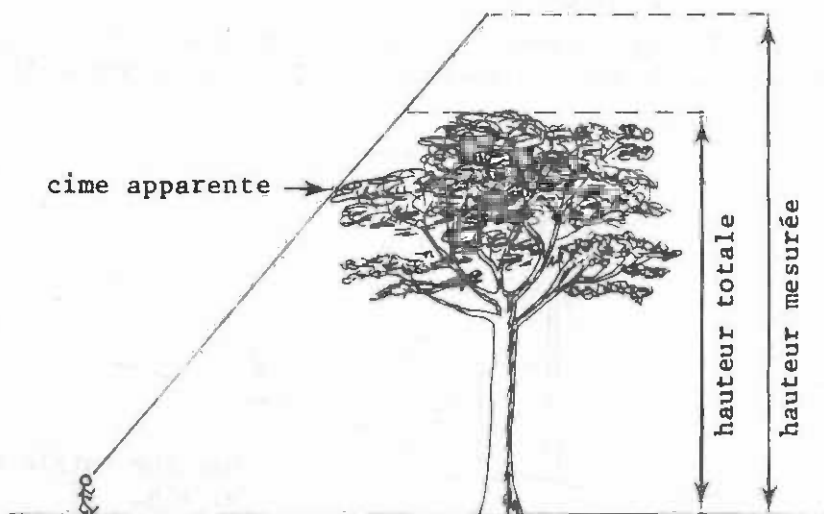
212.22 Quelques remarques d'ordre pratique

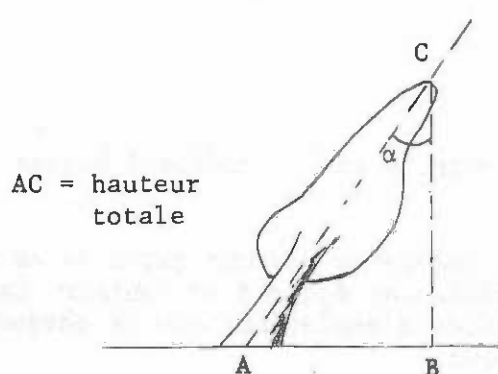
212.221 Même s'il est illusoire de tenter de mesurer une hauteur avec une précision meilleure que le décimètre pour les petits arbres (quelques mètres) ou que le mètre pour les grands arbres, il est recommandé, afin de perdre le moins possible de précision, de faire la mesure avec la précision maximum permise par l'appareil utilisé, disons à titre indicatif :

- au cm le plus proche pour les hauteurs inférieures à 2 m
- au dm le plus proche pour les hauteurs comprises entre 2 et 5 m,
- au $\frac{1}{2}$ m le plus proche pour les hauteurs comprises entre 5 et 10 m,
- au m le plus proche pour les hauteurs supérieures à 10 m.

212.222 Il ne faut mesurer une hauteur totale que si on est certain de voir la cime exacte ; si c'est une cime apparente qui est visée, la hauteur mesurée surestime la hauteur vraie.

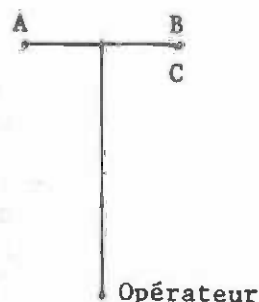
Cette surestimation peut être très importante : elle est d'environ 20 % dans le cas ci-contre.





212.223 Mesure d'une hauteur sur un arbre incliné.

vue de dessus :



L'opérateur ne doit pas se placer dans le plan vertical défini par l'arbre mais perpendiculairement à ce plan à égale distance de A et B.

Si on utilise le dendromètre CHRISTEN (ou tout autre appareil qui ne mesure pas forcément des longueurs verticales), on place la perche de référence le long de AC et on vise AC, ce qui donne la hauteur exacte.

Avec un dendromètre qui ne mesure que des longueurs verticales (Blume-Leiss, relascope de Bitterlich, dendromètre SUUNTO,...), une correction est nécessaire en principe, car la hauteur mesurée est BC et non AC:

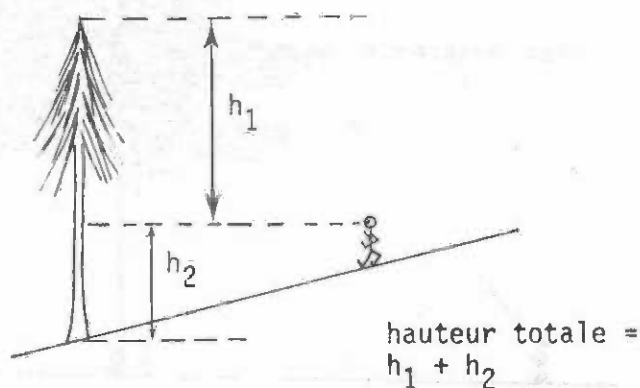
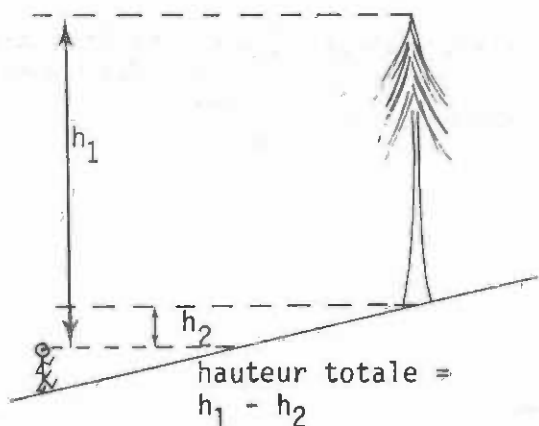
$$AC = \sqrt{AB^2 + BC^2} = \frac{BC}{\cos \alpha}$$

Mais cette correction est faible en général :

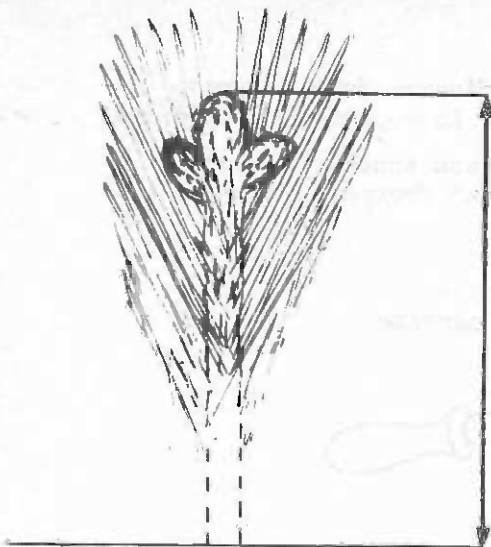
$$\text{erreur relative} = \frac{AC - BC}{AC} = 1 - \cos \alpha \quad \left\{ \begin{array}{l} = 1,5 \% \text{ pour } \alpha = 10^\circ \\ = 3,4 \% \text{ pour } \alpha = 15^\circ \end{array} \right.$$

212.224 Cas des dendromètres qui mesurent la hauteur au-dessus de l'oeil de l'observateur.

A la mesure au sommet, il faut retrancher ou ajouter la mesure à la base selon que l'oeil est en-dessous ou au-dessus du pied de l'arbre :



En terrain horizontal, on peut se dispenser de la mesure au pied de l'arbre car h_2 est alors connu (distance de l'oeil au sol).



Exemple d'un jeune pin

hauteur
totale

212.225 La définition de la hauteur totale fait intervenir l'extrémité du bourgeon terminal de la tige ; ce n'est pas forcément le point le plus élevé de l'arbre. La distinction n'a une conséquence pratique (qui peut être importante) que pour les petits arbres dont le sommet est accessible manuellement.

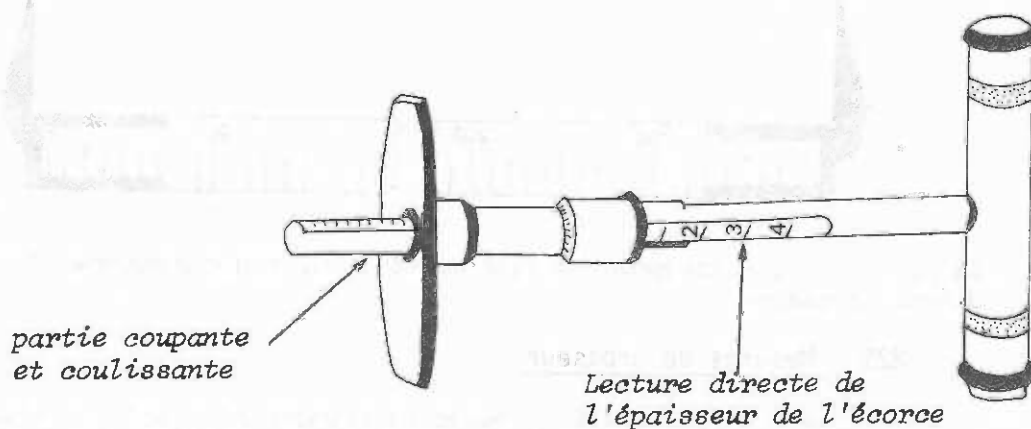
213 Mesures d'épaisseur d'écorce

Connaître le volume sous écorce est une nécessité quand c'est un volume utilisable que l'on veut connaître car l'écorce est en général sans utilité.

La proportion du volume d'écorce dans le volume sur écorce varie de quelques pour-cent à une vingtaine de pour-cent pour la majorité des espèces. Cette proportion est d'autant plus importante que l'arbre est jeune, que l'altitude augmente et d'une façon générale, que les conditions de croissance sont plus difficiles.

Des appareils ont été spécialement conçus pour mesurer l'épaisseur de l'écorce. Ils mesurent l'épaisseur sur le rayon (capacité maximum environ 5 cm) mais attention : certains sont gradués en épaisseur sur le diamètre : la mesure lue est alors le double de la mesure effectuée.

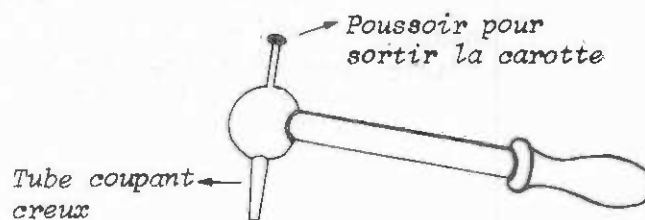
a/ La jauge à écorce



Placer l'appareil perpendiculairement à l'arbre et pousser la poignée jusqu'à ce que toute l'écorce (mais seulement elle ! c'est la partie délicate de l'opération) ait été traversée. Ne pas utiliser de

maillet pour faciliter le travail. Faire de préférence deux mesures, en deux points diamétralement opposés et prendre la moyenne arithmétique.

b/ Voici un appareil plus simple, le "marteau sondeur", car on l'utilise comme un marteau, le tube coupant devant frapper l'arbre à angle droit.



L'appareil a été conçu pour prendre rapidement de petites carottes de bois mais il est parfois utilisé pour des mesures rapides d'écorces fines (environ 2 cm d'épaisseur au maximum). Cette utilisation est déconseillée car la mesure peut être très inexacte.

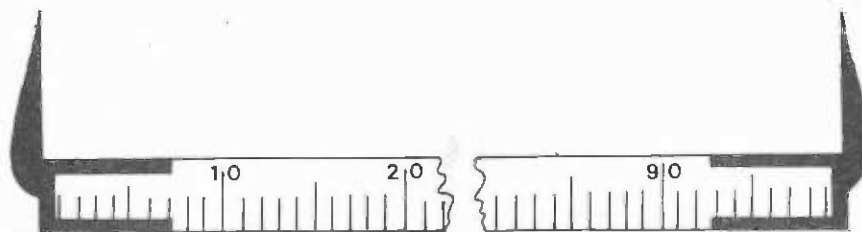
22 MESURES SUR ARBRES ABATTUS

Remarque importante : Quelles que soient les mesures effectuées sur un arbre abattu, il faut connaître son diamètre de référence.

Si possible, le diamètre de référence est à mesurer avant abattage, sinon, reconstituer, en examinant la souche, ce qu'était le niveau du diamètre de référence et y faire la mesure.

221 Mesures de longueur

Elles se font au ruban décimétrique et s'expriment en mètres avec au moins une décimale (arrondir au dm ou au cm le plus proche) ; on utilise parfois aussi une règle graduée d'un mètre de long munie d'une pointe d'acier à chaque extrémité.



En piquant alternativement chaque pointe, une seule personne fait rapidement la mesure.

222 Mesures de grosseur

Elles se font aussi au ruban en prenant bien soin de placer le ruban perpendiculairement à l'axe de la tige et de bien l'appliquer sur tout le pourtour. S'il est difficile de glisser le ruban sous l'arbre, même en s'aidant d'une aiguille d'acier courbée attachée au ruban, on mesure le diamètre au compas.

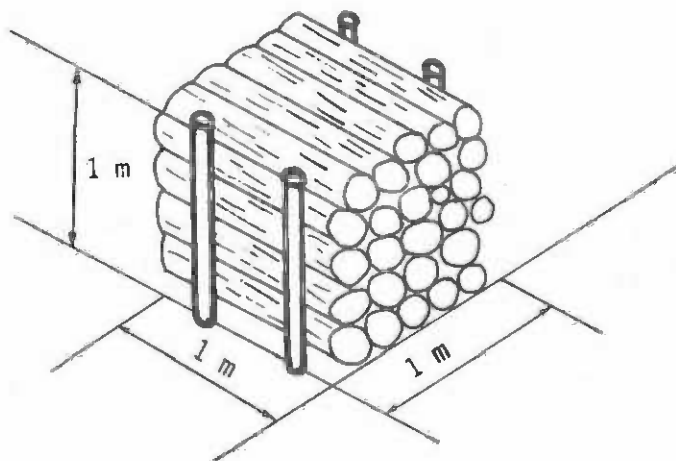
223 Mesure précise des diamètres sous écorce ou sous aubier

L'utilisation d'un mesureur d'écorce est évidemment possible, mais on peut profiter du fait que l'arbre est abattu pour l'écorcer et/ou le désaubier et mesurer les diamètres sous écorce et/ou sous aubier à différentes hauteurs.

224 Cubage par enstérage de petites tiges ou branches

Le volume obtenu s'exprime en stères, avec une décimale.

Un stère est le volume d'encombrement occupé par des bois d'un mètre de long empilés sur un mètre de large et un mètre de haut.



C'est donc un volume qui contient de l'air et du bois dans des proportions variables selon la forme des morceaux de bois. Le coefficient d'empilage est le volume de bois exprimé en m³ contenu dans un stère ; si les bois enstérés étaient tous cylindriques et de même diamètre, le coefficient d'empilage serait $\frac{\pi}{4} = 0,785$. Il varie dans la pratique entre 0,45 (petites branches de mauvaise forme) à 0,80 (quartiers refendus empilés tête-bêche).

Il est difficile d'estimer avec précision un coefficient d'empilage. Voici quelques indications pour estimer le volume de bois contenu dans une pile parallélépipédique. Pour plus de détails, voir les références bibliographiques 9 et 13.

- Si les bois ne sont pas trop petits, on peut les mesurer individuellement :

- . diamètre à chaque extrémité et à mi-longueur
- . et calculer leur volume par la formule de Newton (cf. § 231).

Cette opération est longue et oblige à défaire la pile. On peut plus simplement mesurer les diamètres de tous les bois sur chaque face de la pile (inutile d'accoupler les deux mesures relatives au même bois) : par application de la formule de Smalian (cf. § 231) à chaque pièce, on obtient :

$$\begin{array}{l} \text{Volume de bois} \\ \text{contenu dans la} \\ \text{pile} \end{array} = \frac{\pi}{8} \underset{\substack{\downarrow \\ \text{longueur} \\ \text{des bois}}}{L} \left\{ (\Sigma D^2)_{\text{face 1}} + (\Sigma D^2)_{\text{face 2}} \right\}$$

Faire la même opération sur quelques piles et prendre pour coefficient d'empilage :

$$\frac{\text{Volume total de bois contenu dans les piles}}{\text{Somme des volumes des piles en stères}}$$

Il est possible de calculer l'intervalle de confiance de cette estimation. Voir un manuel sur les techniques de sondage au chapitre "estimation par le quotient". Par exemple : Réf. 7.

Il est possible aussi de peser la pile (le bois est parfois vendu au poids), ce qui permet en outre de calculer la densité.

- Si les bois sont de très faible diamètre, la seule méthode abordable est la pesée mais le problème de l'estimation du volume reste posé si on veut exprimer en m³ le bois empilé. Il faut alors immerger le bois dans l'eau et mesurer le volume déplacé ...

Remarque : quand les bois enstérés sont façonnés à la hache, les extrémités sont "en pointe de crayon". Prendre pour longueur des pièces la longueur de la partie non taillée.

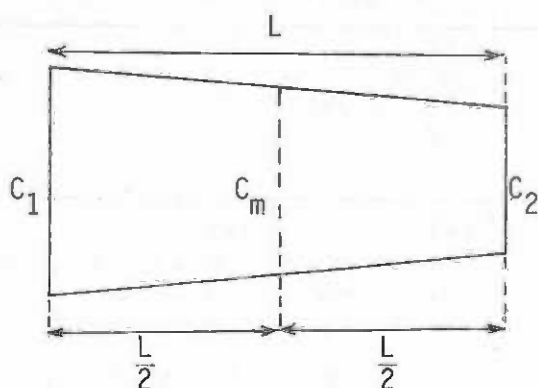
Attention : Plus les pièces empilées sont courtes, droites et grosses, plus le coefficient d'empilage est fort. Si on empile par exemple des bois de 2m de long, il ne faut donc pas leur appliquer un coefficient d'empilage qui aurait été déterminé sur des bois analogues, mais de 1m seulement de long ; la différence entre les deux coefficients d'empilage est souvent importante (de l'ordre de 20 pour-cent plus fort pour des bois d'un mètre de long que pour des bois de deux mètres de long, mais ceci est à vérifier cas par cas).

23 CALCUL DIRECT DU VOLUME D'UN ARBRE A PARTIR DES MESURES FAITES SUR LUI

231 Procédés de calcul

Le volume cherché sera obtenu par addition des volumes de ses constituants. Le calcul de base consiste donc à calculer le volume d'un tronçon (de tige ou de branche).

Volume d'un tronçon de longueur L



C_1 et C_2 sont les circonférences aux extrémités.

C_m est la circonférence à mi-longueur.

D_1, D_2, D_m sont les diamètres correspondants.

Différents modes de calcul sont possibles :

Si on connaît C_m : $V = \frac{C_m^2}{4\pi} L = \frac{\pi}{4} D_m^2 L$ (1) - Huber

Si on connaît C_1 et C_2 : $V = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{C_1^2 + C_2^2}{2} \right) L = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D_1^2 + D_2^2}{2} \right) L$ (2) - Smalian

$$V = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{C_1 + C_2}{2} \right)^2 L = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right)^2 L \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} V &= \frac{1}{12\pi} (C_1^2 + C_2^2 + C_1 C_2) L \\ &= \frac{\pi}{12} (D_1^2 + D_2^2 + D_1 D_2) L \end{aligned} \right\} \quad \begin{array}{l} (4) - \text{formule} \\ \text{du tronc de c\^one} \end{array}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Si on connaît } C_1, C_2 \text{ et } C_m : V &= \frac{L}{24\pi} (C_1^2 + 4C_m^2 + C_2^2) \\ &= \pi \frac{L}{24} (D_1^2 + 4D_m^2 + D_2^2) \end{aligned} \right\} \quad \begin{array}{l} (5) - \text{Newton -} \\ \text{Simpson} \end{array}$$

Remarquer que $(3) < (4) < (2)$ et que $(4) - (3) = \frac{(2) - (4)}{2} = \frac{\pi L}{48} (D_1 - D_2)^2$

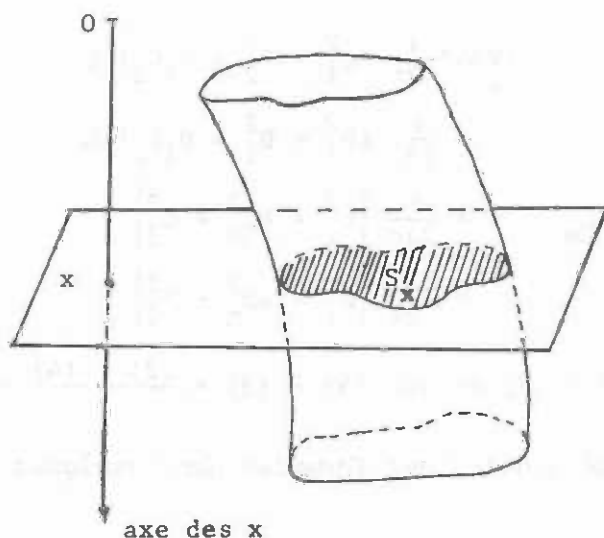
Voyons ce que donnent ces formules dans quelques cas classiques :

Si le tronçon est :	la formule (1)	la formule (2)	la formule (3)	la formule (4)	la formule (5)
Un cylindre  $C_1 = C_m = C_2$	est exacte	est exacte	est exacte	est exacte	est exacte
Un tronc de parabolôïde  $C_m^2 = \frac{1}{2} (C_1^2 + C_2^2)$	est exacte	est exacte	(*) sous-estime le volume réel de 3ε	(*) sous-estime le volume réel de 2ε	est exacte
Un tronc de cône  $C_m = \frac{1}{2} (C_1 + C_2)$	(*) sous-estime le volume réel de ε	(*) surestime le volume réel de 2ε	(*) sous-estime le volume réel de ε	est exacte	est exacte
Un tronc de néloïde  $C_m^{2/3} = \frac{1}{2} (C_1^{2/3} + C_2^{2/3})$	(*) sous-estime le volume réel de $\frac{3\varepsilon - \varepsilon'}{2} > \frac{4\varepsilon}{3} > 4\varepsilon'$	(*) surestime le volume réel de $3\varepsilon - \varepsilon' > \frac{8\varepsilon}{3} > 8\varepsilon'$	(*) sous-estime le volume réel de $\varepsilon' < \frac{\varepsilon}{3}$	(*) surestime le volume réel de $\varepsilon - \varepsilon' > \frac{2\varepsilon}{3} > 2\varepsilon'$	est exacte

avec : $\varepsilon = \frac{\pi L}{48} (D_1 - D_2)^2$ et $\varepsilon' = \frac{\pi L}{16} \left\{ D_1^{2/3} D_2^{1/3} - D_1^{1/3} D_2^{2/3} \right\}^2$

($\varepsilon > 3\varepsilon'$)

La formule (5), appelée aussi formule des 3 niveaux, est en fait valable pour tout solide (pas forcément de révolution) tel que la surface de la section soit un polynôme du 3ème degré de la distance de cette section à une section origine :



$$S_x = a + bx + cx^2 + dx^3$$

C'est bien le cas pour le cylindre, le paraboloïde, le cône et le néloïde, car ces solides sont engendrés par la rotation autour de l'axe des x d'une courbe d'équation $y = ax^b$ avec :

cylindre	: $b = 0$	d'où	$S_x = \pi a^2$
paraboloïde	: $b = \frac{1}{2}$	d'où	$S_x = \pi a^2 x$
cône	: $b = 1$	d'où	$S_x = \pi a^2 x^2$
néloïde	: $b = \frac{3}{2}$	d'où	$S_x = \pi a^2 x^3$

On peut donc penser que pour calculer le volume d'une tige dont on connaît des circonférences espacées d'une longueur L, il est préférable d'appliquer la formule (5) à des tronçons de longueur 2L plutôt que l'une des formules (1) à (4) aux tronçons de longueur L. Ce n'est pas évident car les conditions de validité de la formule de Newton, bien qu'assez générales, ne sont pas forcément vérifiées par chaque tronçon.

En fait, la formule (5) étant un peu moins commode à manier, ce sont plutôt les autres formules qui sont utilisées dans la pratique. Laquelle est la meilleure ? On ne peut répondre à cette question qui est d'ailleurs peu importante car la précision sur l'estimation du volume dépend plus des mesures de diamètre (précision et nombre) que du procédé de calcul utilisé.

Remarque : On peut considérer que si $\frac{C_2}{C_1}$ est supérieur à 0,82 les 5 formules donnent des résultats équivalents car, pour chacun des cas marqués (*) dans le tableau précédent, l'erreur relative est alors inférieure à 1 %.

Quelle que soit la façon dont un volume a été calculé, on l'exprime en m³ avec 3 ou 4 décimales.

232 Recommandations sur les mesures à effectuer en fonction des volumes recherchés

Les recommandations suivantes sont faites en ce qui concerne les mesures à effectuer pour estimer directement le volume d'un arbre.

		Volume désiré (sur écorce)		
		Volume tige total	Volume tige à une découpe fixée (par exemple : volume bois fort)	Volume total et volume tige + branches bois fort
ARBRE DEBOUT (mesures optiques)	<u>1</u>	<u>Obligatoire</u> .Diamètre de référence D_R .Diamètre à la souche D_S .Longueur entre D_R et D_S .Un diamètre à un niveau plus élevé que D_R, par exemple, diamètre à environ $1/4 H_{tot}$ ou $1/2 H_{tot}$ (préférable) H_{tot} = hauteur totale <u>Si possible</u> - Diamètre à d'autres hauteurs ; c'est ce que prévoit l'imprimé pour le cubage des arbres sur pied au relascope de Bitterlich (§ 212.22) : diamètre tous les 2 m avec une mesure intercalaire dans la partie basse	<u>2</u> <u>Obligatoire</u> .Diamètre de référence D_R .Diamètre à la souche D_S .Longueur entre D_R et D_S .$H_{déc}$ = hauteur à la découpe .Un diamètre à un niveau plus élevé que D_R, par exemple diamètre à environ $1/4 H_{déc}$ ou $1/2 H_{déc}$ (préférable) <u>Si possible</u> - Diamètre à la découpe et diamètres à d'autres hauteurs	Ce volume ne peut être mesuré que sur arbre abattu.
ARBRE ABATTU	<u>3</u>	<u>Obligatoire</u> .Diamètre de référence D_R .Diamètre à la souche D_S .Longueur entre D_R et D_S .H_{tot} = hauteur totale .Diamètre à $1/2 H_{tot}$ <u>Si possible</u> - Diamètre tous les mètres ou tous les deux mètres à partir de la souche	<u>4</u> <u>Obligatoire</u> .Diamètre de référence D_R .Diamètre à la souche D_S .Longueur entre D_R et D_S .$H_{déc}$ = hauteur à la découpe .Diamètre à $H_{déc}$ et $1/2 H_{déc}$ <u>Si possible</u> - Diamètre tous les mètres ou tous les deux mètres à partir de la souche	Tige : voir <u>3</u> et <u>4</u> Branches : deux possibilités - procéder pour chaque grosse branche comme pour la tige et enstérer les petites branches, - plus simplement : enstérer toutes les branches.

Quel que soit le volume désiré, il est bon de toujours prendre les mesures énumérées en [1] ; elles permettent, moyennant des interpolations, de calculer le volume tige compris entre n'importe quelle découpe inférieure et n'importe quelle découpe supérieure.

Remarques :

- 1 - L'obtention du volume sous écorce ne peut se faire avec précision que sur arbre abattu car on peut mesurer à chaque hauteur l'épaisseur de l'écorce. Sur un arbre debout, on mesure l'écorce au diamètre de référence et on fait une hypothèse sur la décroissance de l'écorce avec la hauteur, grâce à des informations recueillies sur des arbres abattus. En absence d'informations de ce type, on est forcé de faire une hypothèse simplificatrice : le plus souvent on suppose alors que l'épaisseur de l'écorce est constante. Voir le paragraphe 36 sur ce sujet.
- 2 - Les mesures indiquées dans le tableau permettent d'obtenir des volumes bruts. Les mesures supplémentaires à prendre pour obtenir des volumes nets dépendent de la nature du volume utilisable concerné. L'imprimé pour le cubage des arbres sur pied au relascope de Bitterlich (§ 211.25) montre une façon simple de relever les parties défectueuses d'un fût d'arbre de forêt dense.
- 3 - Problème posé par la souche.
Le niveau d'abattage dépend de l'essence, de la grosseur de l'arbre, des habitudes locales et évolue avec le matériel utilisé. Un volume calculé sur un arbre debout contient donc une incertitude due à la hauteur inconnue de la souche. Pour pouvoir calculer facilement le volume en fonction de diverses hypothèses sur la hauteur de la souche, un procédé simple (valable seulement pour les arbres sans contrefort) consiste à fournir un volume où la partie située sous le diamètre de référence D_R est le cylindre de diamètre D_R allant jusqu'au sol. De ce volume qui contient la souche, il est facile, quand on connaît la hauteur d'abattage, de déduire le volume abattu. Voir exemple 233.2.

233 Exemples

233.1 Prenons l'exemple d'un arbre abattu sur lequel on a mesuré, sur écorce, les diamètres tous les mètres à partir de la souche. Calculons le volume total et le volume bois fort de la tige.

Voici 5 modes de calcul différents pour des découpages en tronçons de 1 mètre.

Hauteurs m		Diamètre cm	Volume en m ³ [n] : Formule utilisée					Hauteurs m
			Méthode 1	Méthode 2	Méthode 3	Méthode 4	Méthode 5	
Hauteur totale Hauteur bois fort	9,5		[4] 0,0027	[4] 0,0027	[4] 0,0027	[4] 0,0027	[4] 0,0027	9,5
	7,4	7	[2] 0,0009	[3] 0,0009	[2] 0,0009	[2] 0,0009	[2] 0,0009	7,4
	7,2	8						7,2
	6,7	x = 9	[2] 0,0064	[3] 0,0064	[2] 0,0064		[2] 0,0028	6,7
	6,2	10				[5] 0,0166	[1] 0,0079	
			[2] 0,0106	[3] 0,0104				5,7
	5,2	13			[5] 0,0279		[1] 0,0133	4,7
			[2] 0,0180	[3] 0,0177				
	4,2	17				[5] 0,0452	[1] 0,0227	3,7
			[2] 0,0271	[3] 0,0269			[1] 0,0314	2,7
	3,2	20			[5] 0,0700			
			[2] 0,0465	[3] 0,0452			[1] 0,0616	1,7
	2,2	28				[5] 0,1194		
1,3	d = 31	[2] 0,0710	[3] 0,0707			[1] 0,0804	0,7	
1,2	32			[5] 0,1598				
0,7	y = 33,5	[2] 0,0883	[3] 0,0881		[2] 0,0883	[2] 0,0461	0,2	
0,2	35							
Volume tige total		m3	0,2715	0,2690	0,2677	0,2731	0,2698	
Volume tige bois fort		m3	0,2688	0,2663	0,2650	0,2704	0,2671	

Note : d = diamètre de référence = 31 cm

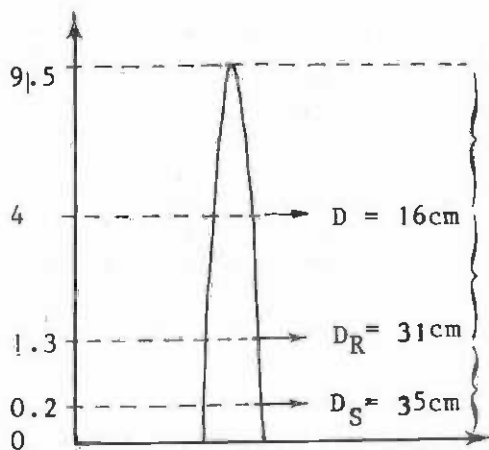
$\left. \begin{matrix} x \\ y \end{matrix} \right\}$ = diamètres estimés (par la moyenne) utilisés dans la méthode 5.

On constate bien que les 5 modes de calcul donnent des résultats très voisins (il en est toujours ainsi quand les tronçons sont courts). On ne peut naturellement pas dire lequel est le plus proche de la vérité.

233.2 Arbre mesuré sur pied pour le volume tige total. Cas où on ne dispose que des mesures obligatoires (case **I** du tableau du paragraphe 232).

Pour le tronçon supérieur, une hypothèse est à faire sur la forme. Supposons que c'est un cône.

Hauteurs
en m



$$\text{Formule du cône : } \frac{\pi}{12} \times 0,16^2 \times 5,5 = 0,03686$$

$$\text{Formule de Smalian : } \frac{\pi}{4} \left(\frac{0,16^2 + 0,31^2}{2} \right) 2,7 = 0,12904$$

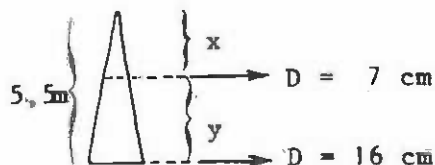
$$\text{Cylindre de diamètre 31cm : } \frac{\pi}{4} \times 0,31^2 \times 1,3 = 0,09812$$

$$\underline{0,2640}$$

$$\Rightarrow \text{Volume tige total} = \left(0,2640 - \frac{\pi}{4} \times 0,31^2 \times H_S \right) \pi^3$$

hauteur de la souche en m.

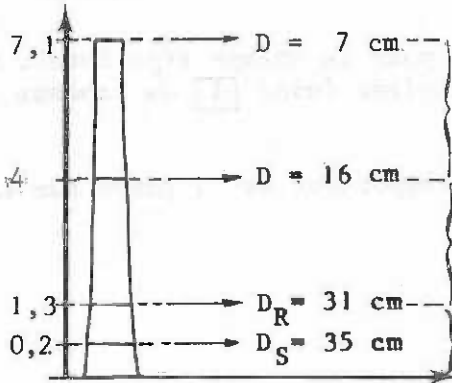
Pour estimer le volume bois fort sans disposer de la hauteur à laquelle se situe la découpe $D = 7\text{ cm}$, il faut commencer par estimer cette hauteur, ce qui nécessite une hypothèse sur la forme du dernier tronçon ; supposons encore qu'il est conique :



$$\frac{x}{5,5} = \frac{7}{16} \rightarrow x = 2,4\text{ m et } y = 3,1\text{ m}$$

Calcul du volume tige bois fort :

Hauteur en
mètres



Formule du tronc de cône : $\frac{\pi}{12} \left(0,07^2 + 0,16^2 + 0,07 \times 0,16 \right) 3,1 = 0,03384$

Formule de Smalian : $\frac{\pi}{4} \left(\frac{0,16^2 + 0,31^2}{2} \right) 2,7 = 0,12904$

Cylindre de diamètre 31cm : $\frac{\pi}{4} \times 0,31^2 \times 1,3 = 0,09812$

0,2610

$\Rightarrow \text{Volume tige bois fort} = (0,2610 - \frac{\pi}{4} \times 0,31^2 \times H_S) \text{ m}^3$
↓
hauteur de la souche en m

Dans ces deux calculs de volume, la mesure D_S n'est pas utilisée puisque sous D_R , l'arbre est assimilé à un cylindre. Cependant, les informations D_R , D_S , hauteur entre D_R et D_S , sont utiles pour étudier la forme de la base des arbres.

24 ETUDE DE LA FORME DES ARBRES

Le diamètre de référence et la hauteur totale ne suffisent évidemment pas à décrire complètement la forme d'un arbre. Nous nous limiterons à l'étude de la forme de la tige car il n'est pas possible d'indiquer pour toutes les espèces une méthode unique pour décrire la morphologie de toutes les parties constitutives d'un arbre ; d'autre part, de telles observations (par exemple : nombre, angle d'insertion et rectitude des branches, etc...) sont utiles surtout pour les généticiens et ce domaine sort du cadre de ce manuel.

241 Mesure de la forme de la tige par un coefficient

241.1 Définitions

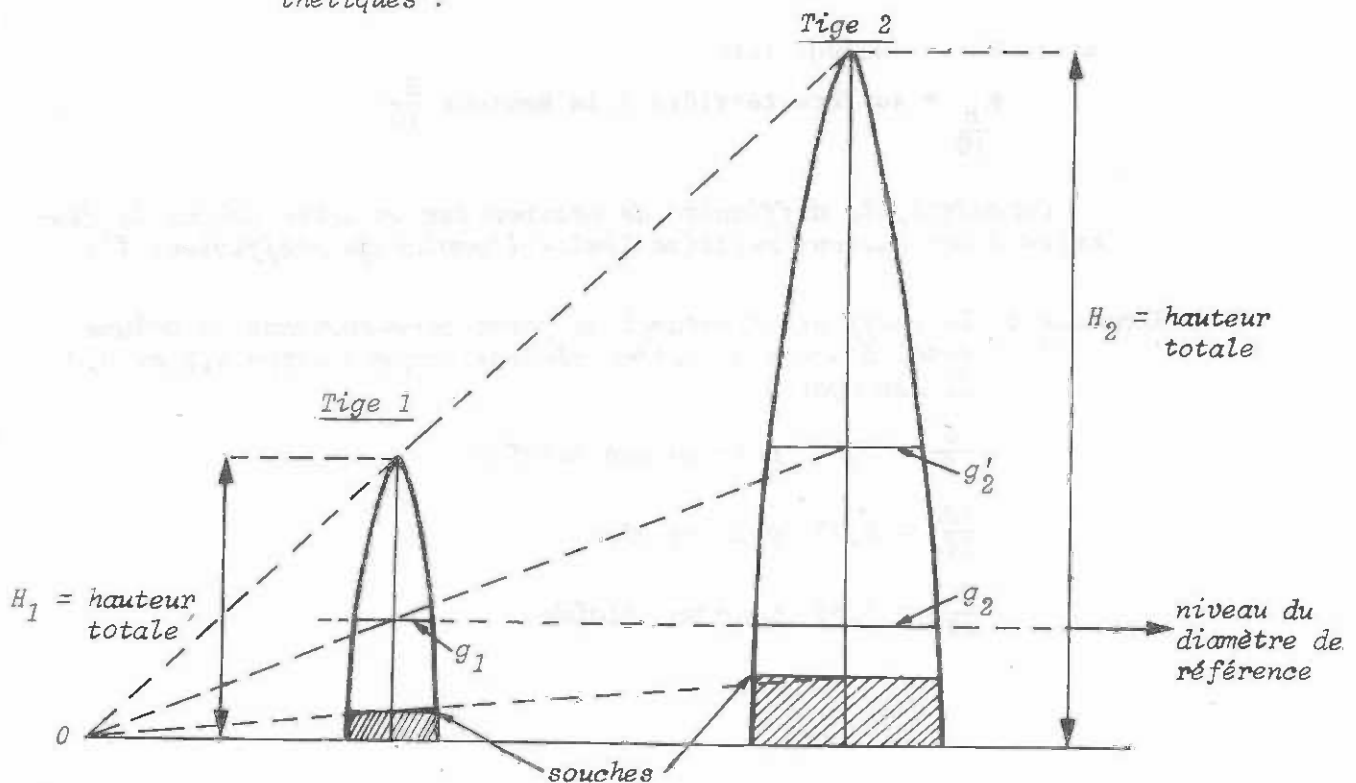
Le coefficient le plus simple est appelé coefficient de forme :

$$f = \frac{\text{volume}}{(\text{surface terrière de référence}) \times \text{hauteur totale}}$$

A chaque volume que l'on peut considérer dans un arbre est donc associé un coefficient de forme. Le plus utilisé est relatif au volume total de la tige mais on peut considérer le coefficient de forme relatif au volume de la tige jusqu'à une découpe donnée.

Le coefficient de forme f qualifie mal la forme d'une tige :

- (a) : deux tiges qui ont le même f n'ont pas forcément la même forme et surtout :
- (b) : deux tiges de même forme n'ont pas le même f ; considérons en effet deux tiges de même forme, c'est-à-dire deux tiges homothétiques :



La tige 2 est l'image de la tige 1 par l'homothétie de centre 0 et de rapport $k = \frac{H_2}{H_1}$

Considérons les volumes-tige V_1 et V_2 (on peut y faire entrer ou non le volume de la souche ; cela n'affecte pas le calcul), et les coefficients de forme correspondants :

$$f_1 = \frac{V_1}{g_1 H_1} \quad \text{et} \quad f_2 = \frac{V_2}{g_2 H_2}$$

Les relations : $V_2 = k^3 V_1$, $H_2 = k H_1$ et $g'_2 = k^2 g_1$

montrent que : $\frac{f_1}{f_2} = \frac{g_2}{g'_2}$

Puisque g_2 est supérieur à g'_2 , f_1 est supérieur à f_2 .

Hohenadl a supprimé l'inconvénient (b) en définissant un coefficient, appelé coefficient naturel de forme de la tige, (par opposition à f qui est parfois appelé coefficient artificiel de forme) :

$$f' = \frac{\text{Volume de la tige}}{\frac{g_H}{10} \times H}$$

où : H = hauteur totale

$\frac{g_H}{10}$ = surface terrière à la hauteur $\frac{H}{10}$

Cependant, la difficulté de mesurer sur un arbre debout le diamètre à une hauteur relative limite l'emploi du coefficient f' .

Remarque : le coefficient naturel de forme correspondant au volume total d'une tige est en général compris entre 0,3 et 0,6. Il est égal à :

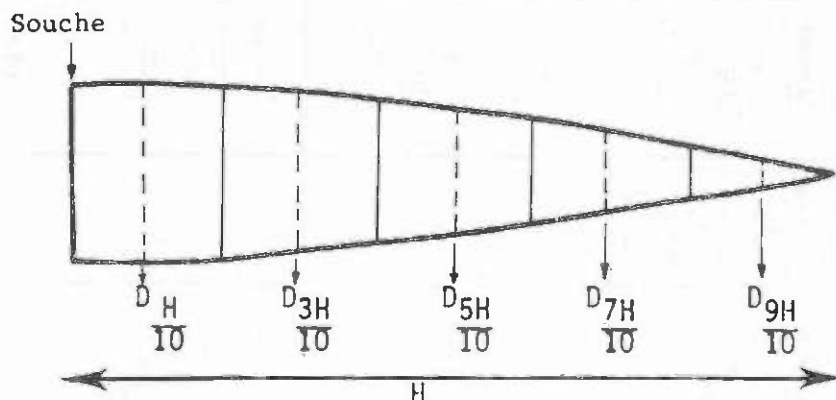
$$\frac{5}{9} = 0,56 \quad \text{pour un paraboloïde}$$

$$\frac{100}{243} = 0,41 \quad \text{pour un cône}$$

$$\frac{250}{569} = 0,34 \quad \text{pour un néloïde.}$$

241.2 Comment calculer f ou f'

Pour calculer le coefficient f ou f' d'une tige, il faut commencer par calculer le volume. On a vu au paragraphe 23 que le principe est de diviser la tige en tronçons et d'ajouter les volumes des tronçons. Par exemple, si on divise la tige en 5 tronçons de même longueur et si on mesure le diamètre au milieu de chacun d'eux :



L'application de la formule de Huber à chaque tronçon donne :

$$f = \frac{1}{5} \frac{D^2_{\frac{H}{10}} + D^2_{\frac{3H}{10}} + D^2_{\frac{5H}{10}} + D^2_{\frac{7H}{10}} + D^2_{\frac{9H}{10}}}{(\text{diamètre de référence})^2}$$

$$f' = \frac{1}{5} \frac{D^2_{\frac{H}{10}} + D^2_{\frac{3H}{10}} + D^2_{\frac{5H}{10}} + D^2_{\frac{7H}{10}} + D^2_{\frac{9H}{10}}}{D^2_{\frac{H}{10}}}$$

Pour calculer le coefficient de forme moyen d'un lot de n arbres, on peut procéder de différentes façons ; en voici trois :

	Moyenne du coefficient naturel de forme	Moyenne du coefficient artificiel de forme
(1)	$\frac{\sum_{i=1}^n f_i \left(\frac{D_H^2}{10} \right)_i^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_H^2}{10} \right)_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \left(\frac{D_H^2}{10} \right)_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_H^2}{10} \right)_i}$ $\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_H^2}{10} \right)_i^2}{\frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_H^2}{10} \right)_i^2}$	$\frac{\sum_{i=1}^n f_i \left(D_R^2 H \right)_i^2}{\sum_{i=1}^n \left(D_R^2 H \right)_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \left(D_R^2 H \right)_i}{\sum_{i=1}^n \left(D_R^2 H \right)_i}$ $\frac{\sum_{i=1}^n \left(D_R^2 H \right)_i^2}{\frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^n \left(D_R^2 H \right)_i^2}$
(2)	$\frac{\sum_{i=1}^n f_i \left(\frac{D_H^2}{10} \right)_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_H^2}{10} \right)_i} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_H^2}{10} \right)_i}$ $\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_H^2}{10} \right)_i}{\frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_H^2}{10} \right)_i}$	$\frac{\sum_{i=1}^n f_i \left(D_R^2 H \right)_i}{\sum_{i=1}^n \left(D_R^2 H \right)_i} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{\sum_{i=1}^n \left(D_R^2 H \right)_i}$ $\frac{\sum_{i=1}^n \left(D_R^2 H \right)_i}{\frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^n \left(D_R^2 H \right)_i}$
(3)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{\frac{\pi}{4} \left(\frac{D_H^2}{10} \right)_i}$	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{\frac{\pi}{4} \left(D_R^2 H \right)_i}$
	$\frac{D_H}{10}$ = diamètre à la hauteur $\frac{1}{10} H$ H = hauteur totale	D_R = diamètre de référence H = hauteur totale

Chacune de ces trois expressions est une moyenne pondérée des coefficients de forme individuelle, le poids accordé à un arbre étant $(D_H^2)^2$ dans (1) et (D_H^2) dans (2) ; dans (3), tous les arbres ont le même poids. La formule à prendre dépend de la façon dont la variance de V varie en fonction de D_H^2 , la règle étant : si la variance de V est proportionnelle à $(D_H^2)^\alpha$, c'est-à-dire si la variance du coefficient de forme est proportionnelle à $(D_H^2)^{\alpha-2}$, donner à l'arbre le poids $(D_H^2)^{2-\alpha}$.

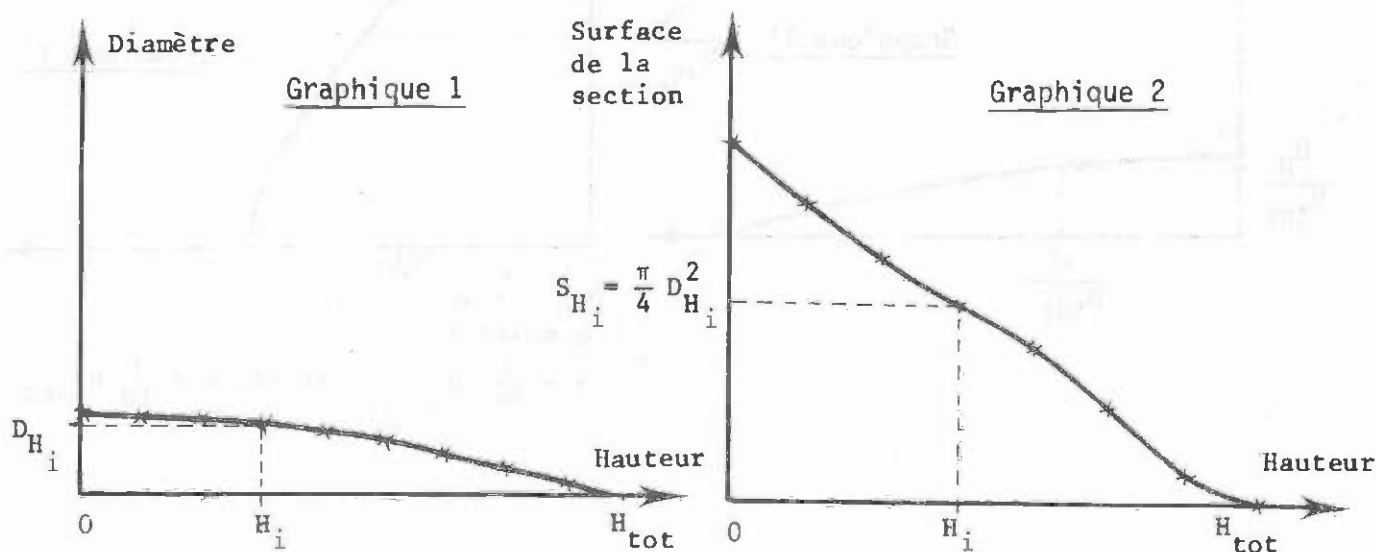
La formule (1) est donc valable si la variance de V ne dépend pas de D^2H ($\alpha = 0$), la formule (2) est valable si la variance de V est proportionnelle à D^2H ($\alpha = 1$) et la formule (3) est valable si la variance de V est proportionnelle à $(D^2H)^2$ ($\alpha = 2$).

Dans la pratique, il faut donc en principe commencer par estimer α ; le problème se pose aussi avant de calculer un tarif de cubage par régression comme on le verra aux paragraphes 353.14 et 353.2. On constate souvent que α est compris entre 1 et 2 ; ce sont donc les formules (2) ou (3) que l'on utilise le plus souvent ; si l'on n'a pas de connaissance précise sur la façon dont la variance de V varie avec (D^2H) , il est recommandé d'utiliser la formule (2) ; c'est d'autre part la formule la plus commode car elle fait intervenir explicitement le volume total du lot d'arbres $\sum_{i=1}^n V_i$.

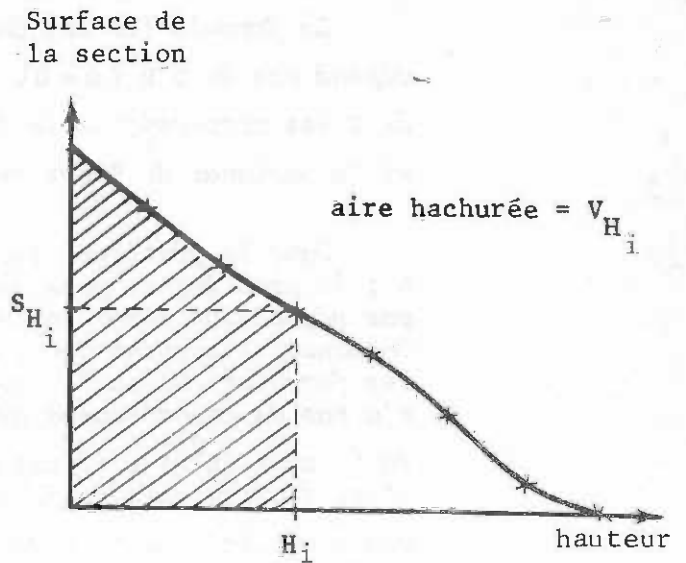
242 Description du profil de la tige par l'équation d'une courbe

242.1 Les représentations possibles - Problème de la transformation des variables

Ayant mesuré le diamètre à différentes hauteurs, on peut représenter les mesures par deux types de graphique :

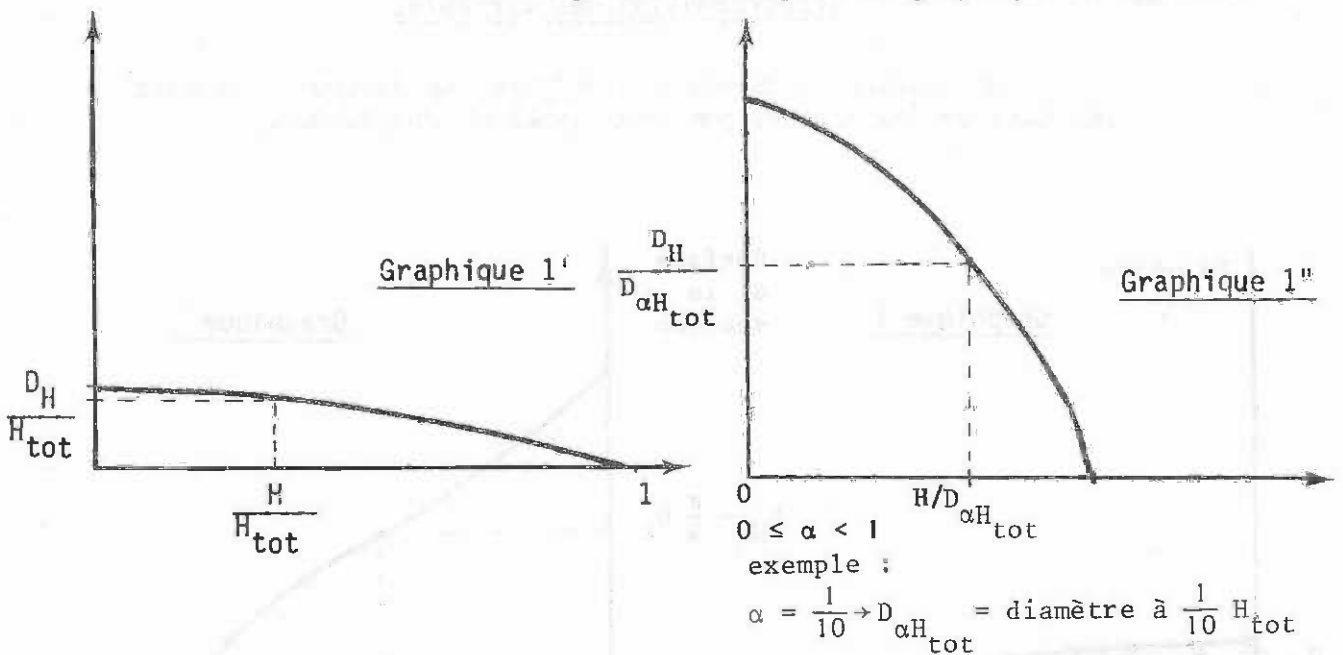


Le graphique 1 offre l'avantage de représenter la tige telle qu'on la voit ; le graphique 2 présente l'intérêt de visualiser le volume V_{H_i} jusqu'à une hauteur H_i donnée.

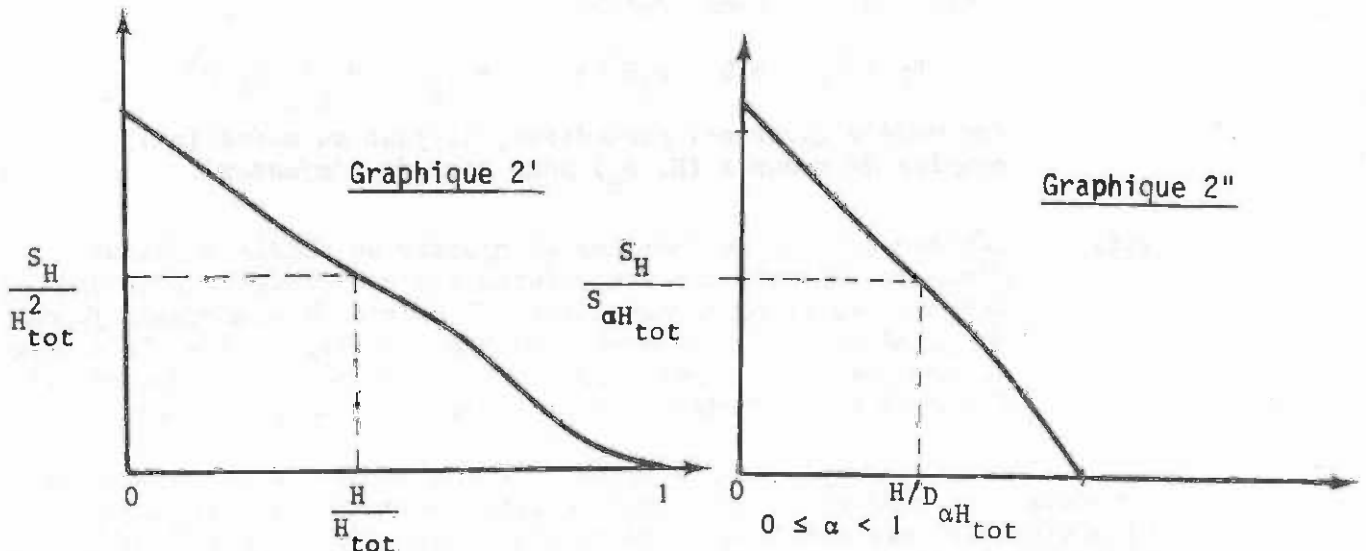


Pour que deux arbres de même forme soient représentés par la même courbe, et que deux arbres ayant des courbes identiques aient la même forme, il faut transformer les échelles.

Voici deux possibilités pour le graphique de type 1 :



et les deux possibilités correspondantes pour le graphique de type 2 :



Exemple :

$$\alpha = \frac{1}{10} \rightarrow \begin{cases} D_{\alpha H_{tot}} & = \text{diamètre à } \frac{1}{10} H_{tot} \\ S_{\alpha H_{tot}} & = \text{surface de la section à } \frac{1}{10} H_{tot} \end{cases}$$

Les graphiques 1' et 2' sont toujours faisables ; les graphiques 1'' et 2'' ne le sont que si on a mesuré sur chaque arbre le diamètre à une hauteur relative donnée.

242.2 Ajustement de courbes de profil par calcul

242.21 Principes

L'intérêt d'avoir une formule de la courbe de profil est de permettre facilement le calcul du volume de la portion de tige comprises entre deux hauteurs H_1 et H_2 .

Il est naturel de commencer par envisager la formule :

$$S_H = b_0 + b_1 H + b_2 H^2 + b_3 H^3 \quad (\text{voir exemple 242.221})$$

car nous avons vu au paragraphe 231 que cette relation est vérifiée par la plupart des solides géométriques simples auxquels se compare une tige.

Si cette formule traduit mal la forme, voici deux solutions possibles :

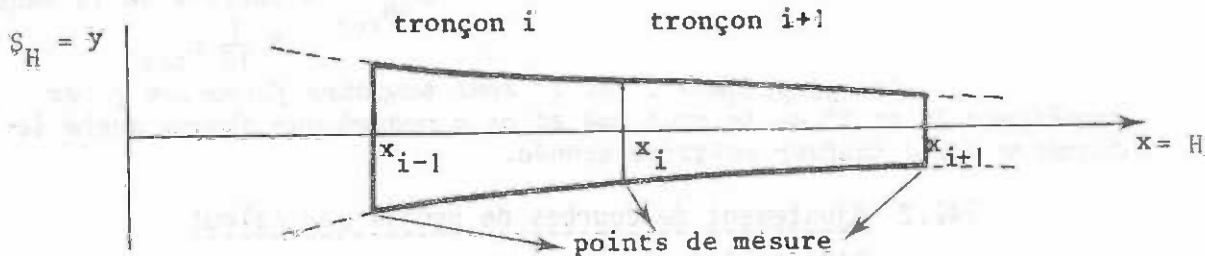
- (i) essayer un polynôme de degré plus élevé ; le modèle s'écrit alors sous la forme générale :

$$S_H = b_0 + b_1 H + b_2 H^2 + \dots + b_p H^p = \sum_{k=0}^p b_k H^k$$

(ce modèle ayant $p+1$ paramètres, il faut au moins $(p+1)$ couples de mesures (H, S_H) pour pouvoir l'ajuster).

- (ii) diviser la tige en tronçons et ajuster un modèle à chacun d'eux en imposant des contraintes aux coefficients pour que les courbes se raccordent bien. Il existe de nombreuses façons de procéder, selon le nombre de mesures disponibles, le nombre de tronçons considérés, les modèles pris pour les tronçons et les conditions fixées pour le raccordement des courbes.

L'exemple du § 242.222 illustre un cas où on dispose de 4 points de mesure et où on considère deux tronçons. La méthode des "fonctions splines cubiques" (voir BONEVA et al. réf. 1) est le cas extrême des méthodes de ce type car les tronçons considérés sont définis par deux mesures successives de diamètre :



A chaque tronçon, on ajuste une cubique :

tronçon i : $\hat{y} = a_i + b_i x + c_i x^2 + d_i x^3$

tronçon i+1 : $\hat{y} = a_{i+1} + b_{i+1} x + c_{i+1} x^2 + d_{i+1} x^3$

Les coefficients des cubiques sont obtenus en écrivant qu'à chaque point de mesure $\hat{y}$ est égal à y et que ses dérivées première et seconde sont égales aux dérivées première et seconde de la cubique relative au tronçon adjacent, ce qui s'écrit :

$$a_i + b_i x_i + c_i x_i^2 + d_i x_i^3 = y_i$$

$$a_i + b_i x_{i-1} + c_i x_{i-1}^2 + d_i x_{i-1}^3 = y_{i-1}$$

$$b_i + 2c_i x_i + 3d_i x_i^2 = b_{i+1} + 2c_{i+1} x_i + 3d_{i+1} x_i^2$$

$$c_i + 3d_i x_i = c_{i+1} + 3d_{i+1} x_i$$

Si on connaît les coefficients de la cubique relative au tronçon $i+1$, on peut résoudre ce système de 4 équations et obtenir les valeurs de a_i , b_i , c_i , d_i .

La résolution se fait donc de proche en proche : on fixe la forme du dernier billon (par exemple : forme conique), on en déduit la cubique de l'avant dernier billon et ainsi de suite de proche en proche jusqu'au premier billon (on peut de façon symétrique fixer la forme du premier billon et obtenir les cubiques de proche en proche en allant du bas au haut de l'arbre).

Remarques :

- On peut calculer la courbe de profil du fût seulement ; ce qui a été dit reste valable à condition de remplacer la hauteur totale par la hauteur du fût dans les modèles de courbes ; un modèle simple (polynôme du 3ème degré) est en général suffisant.
- On peut exprimer le diamètre, et non plus la surface de la section, en fonction de la hauteur. Le modèle utilisé le plus souvent est aussi un polynôme :

$$D_H = \sum_{k=0}^p c_k H^k$$

- D'après ce qui a été dit au paragraphe précédent, on transforme les modèles ainsi pour obtenir des coefficients caractéristiques de la forme :

$$y = \sum_{k=0}^p b'_k x^k \quad ; \quad y = \frac{S_H}{H_{tot}^2} \quad x = \frac{H}{H_{tot}}$$

$$y = \sum_{k=0}^p b''_k x^k \quad ; \quad y = \frac{S_H}{S_{\alpha H_{tot}}} \quad x = \frac{H}{D_{\alpha H_{tot}}}$$

$$(0 \leq \alpha < 1)$$

$$y = \sum_{k=0}^p c'_k x^k \quad ; \quad y = \frac{D_H}{H_{tot}} \quad x = \frac{H}{H_{tot}}$$

$$y = \sum_{k=0}^p c_k'' x^k \quad ; \quad y = \frac{D_H}{D_{\alpha H_{\text{tot}}}} \quad x = \frac{H}{D_{\alpha H_{\text{tot}}}}$$

(0 ≤ α < 1)

Des variantes peuvent être apportées à ces modèles (cf. réf. 6 - 9 - 13).

- Formule pour calculer un volume connaissant une courbe de profil.

Supposons que la courbe de profil soit :

$$S = b_0 + b_1 H + \dots + b_p H^p$$

↓
surface de la
section à la hauteur H.

L'intégrale de S est $g(H) = b_0 H + b_1 \frac{H^2}{2} + \dots + b_p \frac{H^{p+1}}{p+1}$

Le volume de la portion de tige comprise entre les hauteurs H_1 et H_2 est $g(H_2) - g(H_1)$.

Si le profil est connu par la relation reliant le diamètre à la hauteur :

$$D = c_0 + c_1 H + \dots + c_p H^p$$

il faut commencer par écrire l'expression de $S = \frac{\pi}{4} D^2$; le volume cherché est $g(H_2) - g(H_1)$ où $g(H)$ est l'intégrale de S ; les calculs sont plus longs et moins précis ; c'est pourquoi il est préférable d'exprimer une courbe de profil sous la forme $S = f(H)$ plutôt que $D = f(H)$.

Pour calculer le volume jusqu'à une découpe donnée, on applique la méthode ci-dessus après avoir calculé la hauteur de cette découpe. Ce calcul est facile par examen de la courbe de profil mais, en ordinateur, il pose des problèmes que nous ne pouvons aborder ici.

- Il est essentiel de vérifier que la courbe de profil obtenue est réaliste, c'est-à-dire que y n'est jamais négatif et décroît quand x augmente.

242.22 Exemples

242.221 Quatre points de mesure - Ajustement d'une cubique

Reprenons l'arbre de l'exemple 233.2. Ajustons le modèle

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 \quad ; \quad y = \frac{S_H}{H_{\text{tot}}^2} \quad x = \frac{H}{H_{\text{tot}}}$$

La résolution du système :

$$\begin{cases} a + b \frac{0,2}{9,5} + c \left(\frac{0,2}{9,5} \right)^2 + d \left(\frac{0,2}{9,5} \right)^3 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{0,35}{9,5} \right)^2 \\ a + b \frac{1,3}{9,5} + c \left(\frac{1,3}{9,5} \right)^2 + d \left(\frac{1,3}{9,5} \right)^3 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{0,31}{9,5} \right)^2 \\ a + b \frac{4}{9,5} + c \left(\frac{4}{9,5} \right)^2 + d \left(\frac{4}{9,5} \right)^3 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{0,16}{9,5} \right)^2 \\ a + b + c + d = 0 \end{cases}$$

donne : $a = 1,1035 \times 10^{-3}$

$b = -1,7385 \times 10^{-3}$

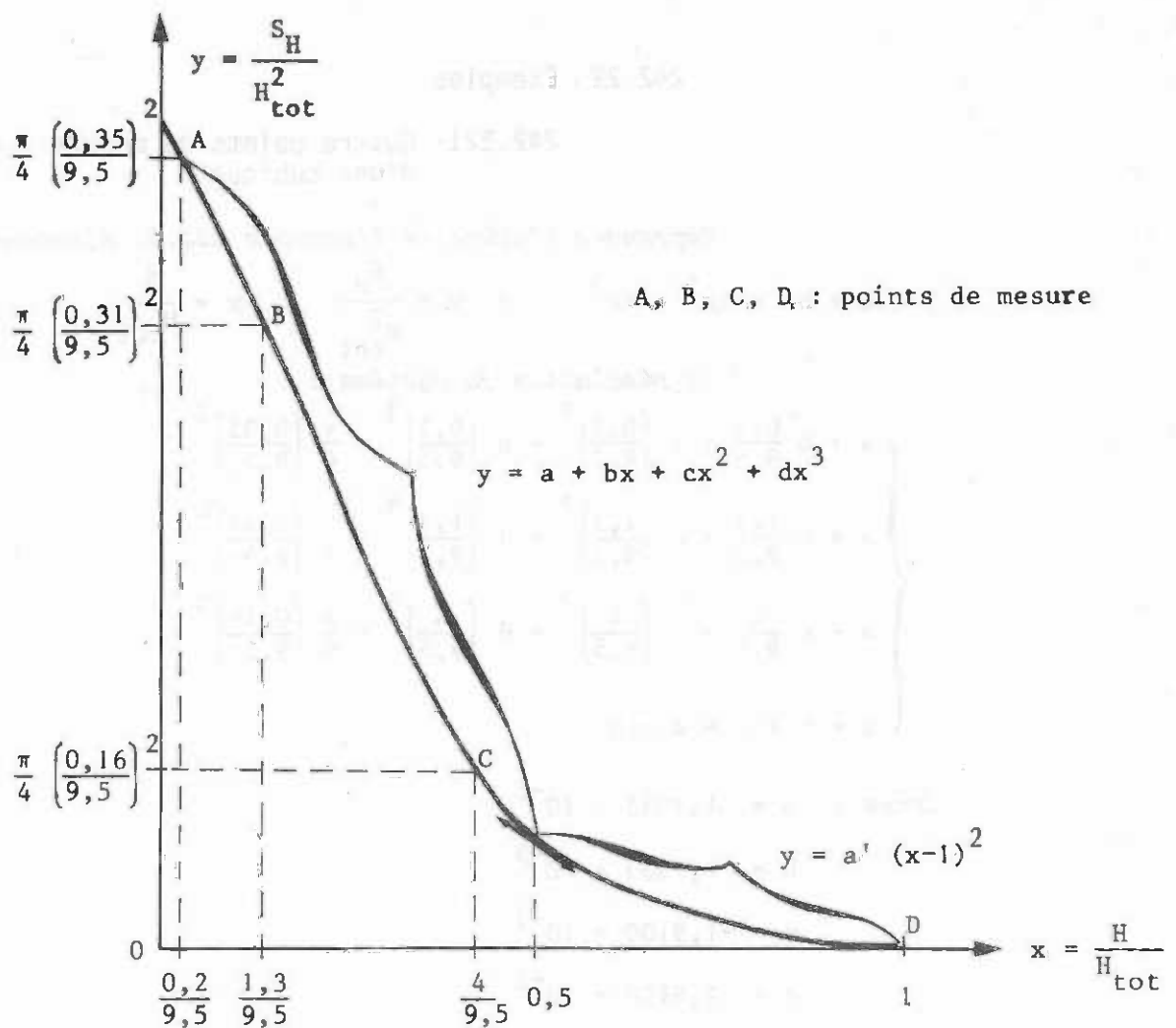
$c = -1,9100 \times 10^{-3}$

$d = 2,5450 \times 10^{-3}$

Cette courbe n'est pas admissible car y est négatif si x est compris entre 0,55 et 1.

242.222 Quatre points de mesure - Division en deux tronçons et ajustement d'une courbe à chacun d'eux

Reprenons l'arbre précédent. Supposons que la moitié supérieure de la tige soit un cône et ajustons une cubique à la moitié inférieure en imposant qu'au point où elles se rencontrent, les deux courbes soient tangentes.



Le système à résoudre est :

$$\begin{cases} a + b \frac{0,2}{9,5} + c \left(\frac{0,2}{9,5} \right)^2 + d \left(\frac{0,2}{9,5} \right)^3 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{0,35}{9,5} \right)^2 & \text{passage par A} \\ a + b \frac{1,3}{9,5} + c \left(\frac{1,3}{9,5} \right)^2 + d \left(\frac{1,3}{9,5} \right)^3 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{0,31}{9,5} \right)^2 & \text{passage par B} \\ a + b \frac{4}{9,5} + c \left(\frac{4}{9,5} \right)^2 + d \left(\frac{4}{9,5} \right)^3 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{0,16}{9,5} \right)^2 & \text{passage par C} \\ \left. \begin{aligned} a + b \cdot 0,5 + c (0,5)^2 + d (0,5)^3 &= a' (0,5-1)^2 \\ b + 2c \cdot 0,5 + 3d (0,5)^2 &= 2a' (0,5-1) \end{aligned} \right\} & \begin{aligned} &\text{au point d'abscisse } 0,5 \\ &\text{les deux courbes se ren-} \\ &\text{contrent et sont tangentes} \end{aligned} \end{cases}$$

On obtient :

$$\begin{aligned} a &= 1,0976 \times 10^{-3} \\ b &= -1,4004 \times 10^{-3} \\ c &= -4,7336 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d &= 7,4226 \times 10^{-3} \\ a' &= 0,5671 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

La courbe correspondante est tracée ci-dessus. L'ajustement est correct.

242.223 Description du profil moyen de trois tiges par une cubique

Voici 3 arbres sur lesquels on a mesuré les diamètres à différentes hauteurs (H est en mètres et D_H en centimètres).

arbre 1		arbre 2		arbre 3	
H	D_H	H	D_H	H	D_H
0,2	44	0,3	57	0,3	66
1,2	39	1,3	52	1,3	61
1,3	38	2,3	47	2,3	56
2,2	34	3,3	43	3,3	52
3,2	31	4,3	39	4,3	48
4,2	27	5,3	36	5,3	44
5,2	25	6,3	33	6,3	41
6,2	22	7,3	31	7,3	38
7,2	20	8,3	29	8,3	36
8,2	17	9,3	26	9,3	34
9,2	12	10,3	23	10,3	32
9,8	7	11,3	19	11,3	29
10	0	12,3	13	12,3	25
		12,8	7	13,3	21
		13	0	14,3	14
				14,8	7
				15	0

Ces tiges ont-elles la même forme ?

Calculons les valeurs de $\frac{H}{H_{\text{tot}}} = x$ et de $\frac{\pi}{4} \left(\frac{D_H}{H_{\text{tot}}} \right)^2 = y$, les hauteurs et les diamètres étant exprimés en mètres.

arbre 1		arbre 2		arbre 3	
x	$10^4 y$	x	$10^4 y$	x	$10^4 y$
0,02	15,205	0,023	15,099	0,020	15,205
0,12	11,946	0,100	12,566	0,087	12,989
0,13	11,341	0,177	10,266	0,153	10,947
0,22	9,079	0,254	8,593	0,220	9,439
0,32	7,548	0,331	7,069	0,287	8,042
0,42	5,726	0,408	6,023	0,353	6,758
0,52	4,909	0,485	5,061	0,420	5,868
0,62	3,801	0,562	4,466	0,487	5,041
0,72	3,142	0,638	3,908	0,553	4,524
0,82	2,270	0,715	3,142	0,620	4,035
0,92	1,131	0,792	2,458	0,687	3,574
0,98	0,385	0,869	1,678	0,753	2,936
1	0	0,946	0,785	0,820	2,182
		0,984	0,228	0,887	1,539
		1	0	0,953	0,684
				0,987	0,171
				1	0

La représentation graphique de ces valeurs montre que la relation entre y et x est pratiquement la même d'un arbre à l'autre. Les trois arbres peuvent donc être considérés comme ayant la même forme. Voyons si le modèle :

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3$$

exprime bien la forme commune.

Ce modèle pourrait être ajusté par régression. Plus simplement, on a calculé, selon la méthode décrite dans l'annexe A, (§ A 1.4) les coefficients en résolvant le système de quatre équations à quatre inconnues obtenu en forçant la courbe à passer par les quatre points suivants :

x	0	0,3	0,675	1
y	16×10^{-4}	$7,66 \times 10^{-4}$	$3,50 \times 10^{-4}$	0

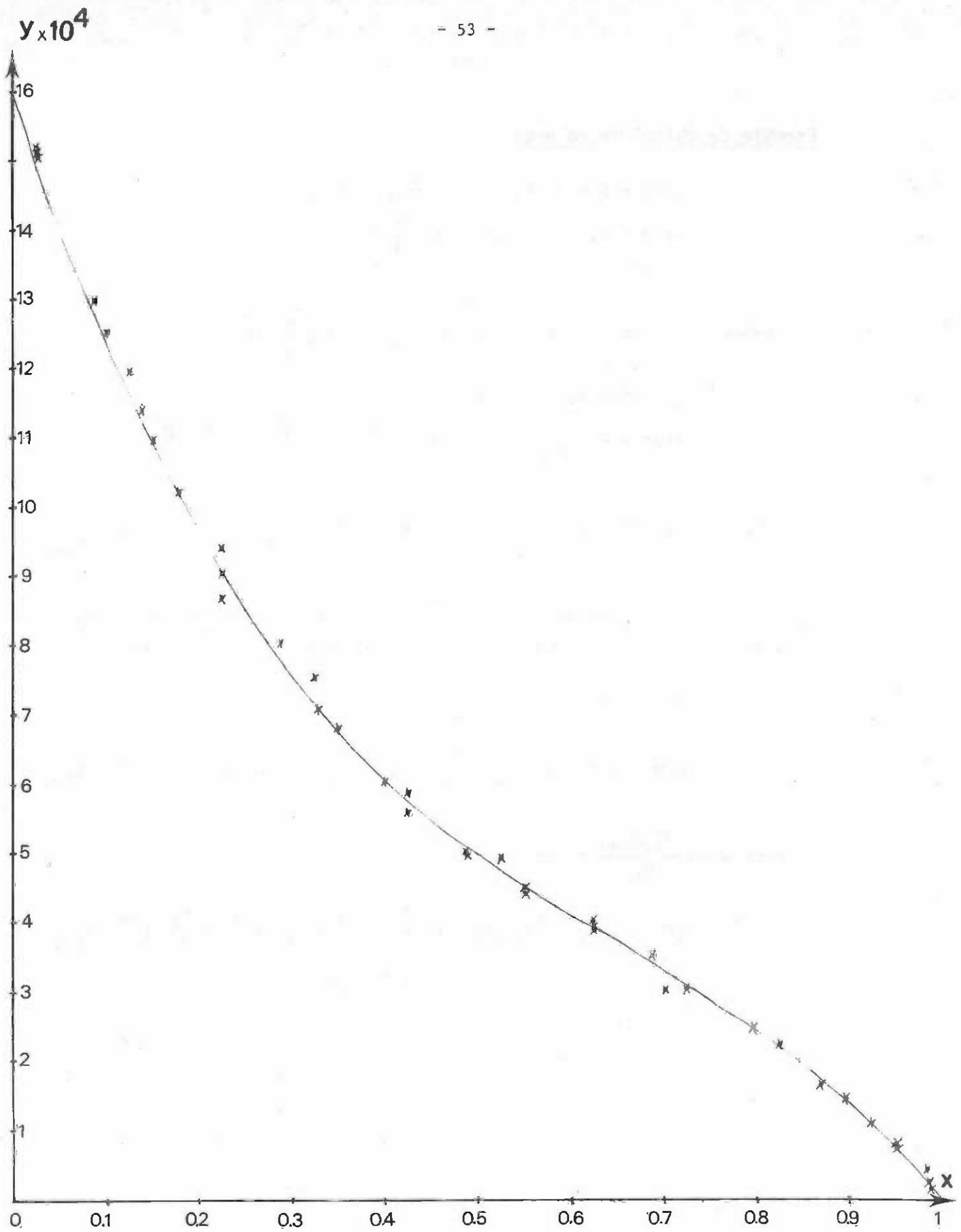
Le résultat est : $a_0 = 16 \times 10^{-4}$

$$a_1 = -40,1434 \times 10^{-4}$$

$$a_2 = 48,4310 \times 10^{-4}$$

$$a_3 = -24,2876 \times 10^{-4}$$

La courbe correspondante est tracée sur le graphique ; l'ajustement est très bon.



Exemple de calcul de volumes :

L'équation de la courbe de profil est :

$$\frac{S}{H_{\text{tot}}^2} = a_0 + a_1 \frac{H}{H_{\text{tot}}} + a_2 \frac{H^2}{H_{\text{tot}}^2} + a_3 \frac{H^3}{H_{\text{tot}}^3}$$

soit : $S = a_0 H_{\text{tot}}^2 + a_1 H_{\text{tot}} H + a_2 H^2 + \frac{a_3}{H_{\text{tot}}} H^3$

L'intégrale de S est :

$$g(H) = a_0 H_{\text{tot}}^2 H + a_1 H_{\text{tot}} \frac{H^2}{2} + a_2 \frac{H^3}{3} + \frac{a_3}{H_{\text{tot}}} \frac{H^4}{4}$$

soit : $g(H) = \left(a_0 x + \frac{a_1}{2} x^2 + \frac{a_2}{3} x^3 + \frac{a_3}{4} x^4 \right) H_{\text{tot}}^3$ avec $x = \frac{H}{H_{\text{tot}}}$

Le volume de la tige compris entre les hauteurs H_1 et H_2 est $g(H_2) - g(H_1)$; par exemple, le volume total d'une tige est :

$$V_{\text{tot}} = g(H_{\text{tot}}) - g(H_{\text{souche}})$$

$$g(H_{\text{tot}}) = \left(a_0 + \frac{a_1}{2} + \frac{a_2}{3} + \frac{a_3}{4} \right) H_{\text{tot}}^3 = 6,00007 \times 10^{-4} \times H_{\text{tot}}^3$$

Supposons $\frac{H_{\text{souche}}}{H_{\text{tot}}} = \frac{1}{100}$:

$$\begin{aligned} g(H_{\text{souche}}) &= \left(a_0 10^{-2} + \frac{a_1}{2} 10^{-4} + \frac{a_2}{3} 10^{-6} + \frac{a_3}{4} 10^{-8} \right) H_{\text{tot}}^3 \\ &= 15,80089 \times 10^{-6} \times H_{\text{tot}}^3 \end{aligned}$$

donc : $V_{\text{tot}} = 5,84206 \times 10^{-4} \times H_{\text{tot}}^3$ avec H_{TOT} en mètres et V_{tot} en m^3 .

Le volume total de la tige d'un arbre de hauteur totale 14 mètres est ainsi :

$$V_{\text{tot}} = 5,84206 \times 10^{-4} \times (14)^3 = 1,6031 m^3$$

quel est le volume bois fort de cette tige ? La hauteur H_7 à laquelle

se situe la découpe 7 cm de diamètre est telle que :

$$\frac{\frac{\pi}{4} (0,07)^2}{14^2} = a_0 + a_1 x_7 + a_2 x_7^2 + a_3 x_7^3 \quad \left(x_7 = \frac{H_7}{14} \right)$$

Par approximations successives à partir de la valeur $x = 0,987$ lue sur la courbe, on obtient $x_7 = 0,987608$; en remplaçant x_7 par cette valeur et H_{tot} par 14 dans l'expression de $g(H)$, on obtient :

$$g(H_7) = 1,64605 \text{ m}^3.$$

$$\text{Or, } g(H_{\text{souche}}) = 15,80089 \times 10^{-6} \times (14)^3 = 0,04336 \text{ m}^3$$

d'où le volume bois fort de la tige : $1,64605 - 0,04336 = 1,6027 \text{ m}^3$.

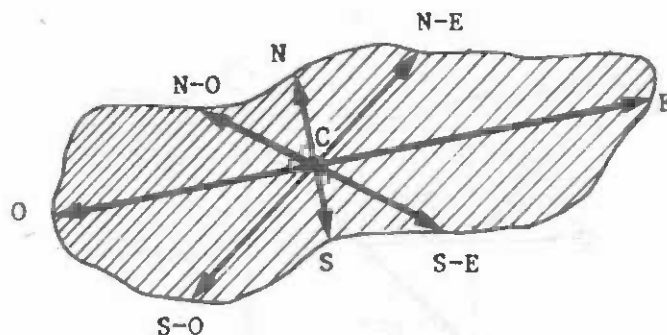
243 Mesures sur le houppier

Une description complète de la forme d'un arbre comprend des mesures sur le houppier ; ces mesures ne sont possibles que si ce houppier est totalement visible.

Hauteur : distance séparant l'extrémité du fût du sommet de l'arbre.
..... Grandeur mesurée au dendromètre, par différence de deux mesures.

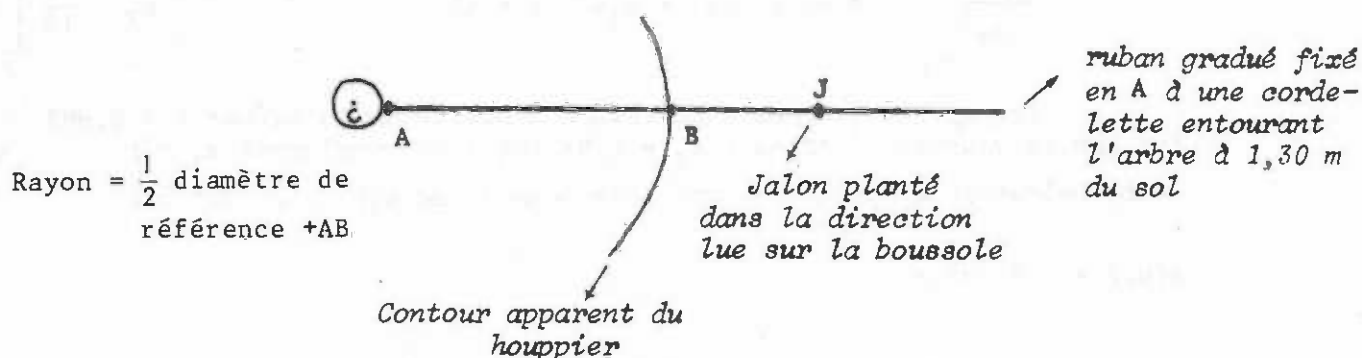
Mesures sur la projection horizontale : Pour décrire correctement la projection horizontale du houppier, il faut mesurer un nombre de rayons d'autant plus grand que cette surface s'éloigne du cercle : on mesure au minimum 4 rayons, de préférence 8, dans des directions faisant des angles égaux :

Exemple : mesure de 8 rayons



C = Centre de la tige

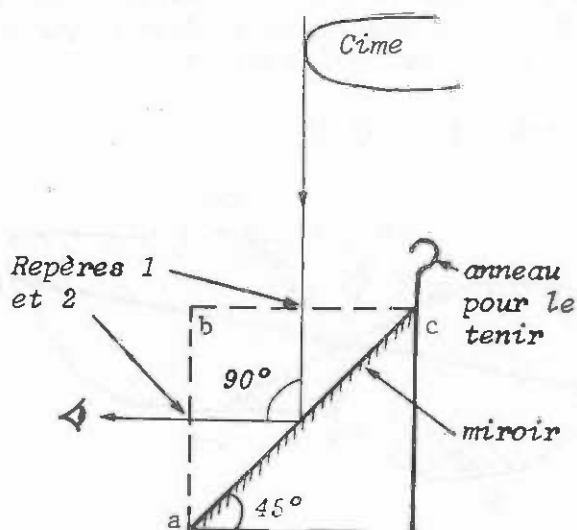
Procédure pour mesurer le rayon dans une direction :



On se déplace sur la ligne AJ et on repère le point B à l'aide d'un appareil. Voici deux exemples d'appareil de ce type :

a/ Appareil à miroir

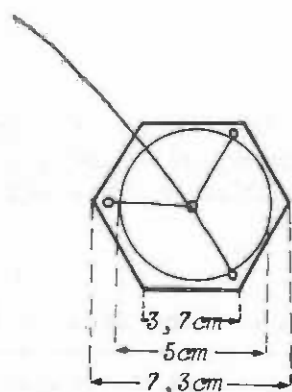
Description : L'appareil qui est équilibré, se maintient vertical. Il est constitué d'un miroir plan faisant 45° avec l'horizontale, de deux plaques de verre (ab) et (bc) au milieu desquelles sont tracés deux traits : les repères 1 et 2. L'observateur doit se placer de façon que l'image du repère 2 coïncide avec le repère 1. Il suffit alors de faire coïncider le point extrême du houppier avec ces deux repères et on obtient la projection de ce point sur le sol, indiqué par le fil à plomb fixé à l'appareil.



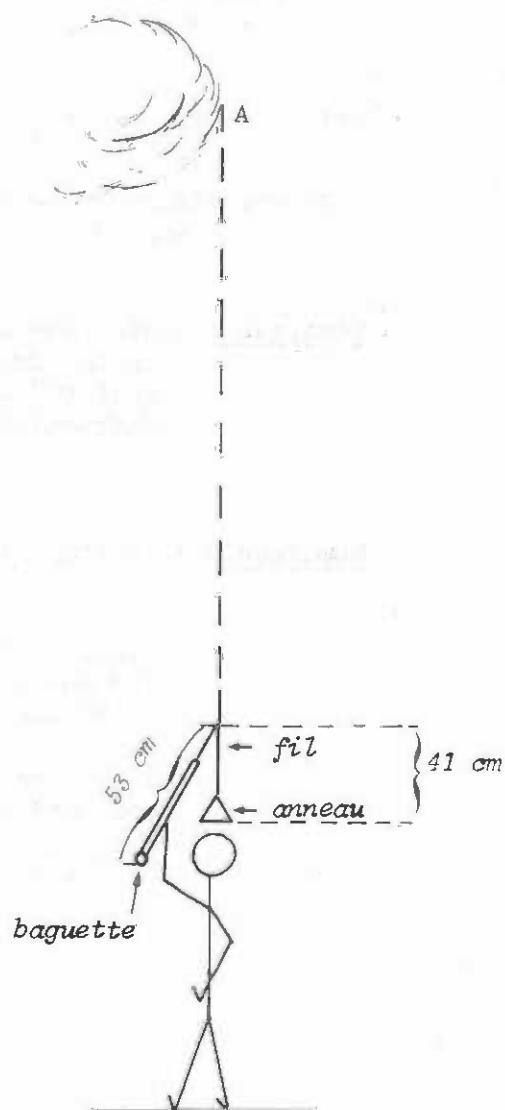
Cet appareil est d'un usage difficile lorsque l'arbre est en contact avec un voisin car le miroir ne permet de voir qu'une petite partie du houppier, il est donc délicat de reconnaître les branches de l'un parmi celles de l'autre. Son utilisation provoque donc de grandes pertes de temps.

b/ Appareil de PUN CHUN (*)

Description : Il est constitué d'une baguette, d'une ficelle et d'un anneau. Cet appareil, contrairement au précédent, permet de voir une grande partie de l'arbre et donc de repérer beaucoup plus rapidement le point (A). Il a de plus l'avantage d'être très simple et facile à construire.



Anneau vu de haut



(*) WAHEED KHAN M.A. (1971) - Pun-Chun crown meter - Indian Forester 96 - n°6 pages 332-337

Grandeurs calculées à partir de ces mesures :

(1)
$$S_{\text{houp.}} = \pi \frac{\sum_{i=1}^n r_i^2}{n}$$

↓

surface de la projection
horizontale du houppier

$\left\{ \begin{array}{l} r_i = \text{rayon mesuré dans la direction } i \\ n = 4 \text{ ou } 8 : \text{nombre de rayons mesurés} \end{array} \right.$

$$(ii) \quad D_{\text{houp.}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} S_{\text{houp.}}} = 2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n r_i^2}{n}}$$

↓
diamètre de
la cime

$$(iii) \quad \underset{\substack{\downarrow \\ \text{volume d'encombrement} \\ \text{du houppier}}}{VE_{\text{houpp.}}} = \frac{1}{3} S_{\text{houpp.}} \times \underset{\substack{\downarrow \\ \text{hauteur du} \\ \text{houppier}}}{H_{\text{houpp.}}}$$

Remarque 1 : Bien que ces caractéristiques de la cime soient importantes dans les études de croissance, elles sont rarement prises en compte dans les modèles à cause des difficultés de mesure.

Remarque 2 : Le rapport $\frac{V_{\text{houpp}}}{VE_{\text{houpp}}}$ = Volume de bois contenu dans le houppier / Volume d'encombrement du houppier

est un nombre inférieur à 1, de même nature que le coefficient d'empilage, qui peut servir à estimer pour un arbre debout V_{houp} à partir de VE_{houp} .

Il est recommandé, chaque fois que l'on abat un arbre pour mesurer V_{houp} , de mesurer avant abattage H_{houp} , et S_{houp} et d'en déduire VE_{houp} .

3 MESURE INDIRECTE DU VOLUME D'UN PEUPEMENT : LES TARIFS DE CUBAGE

31 PRINCIPE ET DEFINITIONS

Pour estimer le volume d'un peuplement, on peut évidemment mesurer directement le volume de chaque arbre et ajouter tous ces volumes. Le procédé devient vite impraticable et on a recours aux tarifs de cubage.

Un tarif de cubage est un tableau chiffré, une formule ou un graphique, qui donne une estimation du volume d'un arbre ou d'un ensemble d'arbres en fonction de diverses variables qui sont les entrées du tarif.

Les entrées du tarif sont des caractéristiques de l'arbre (diamètre de référence, hauteur totale, ...) ou du peuplement (surface terrière/ha, hauteur moyenne, ...) plus facilement mesurables que le volume lui-même.

On appelle tarif individuel un tarif qui fournit le volume d'un arbre en fonction d'entrées relatives à l'arbre et tarif de peuplement un tarif qui fournit le volume d'un peuplement directement en fonction d'entrées qui sont relatives au peuplement lui-même.

En fait, un tarif de cubage individuel ne peut permettre d'estimer avec une bonne précision le volume d'un seul arbre. Un tel tarif sert surtout à estimer le volume d'un lot d'arbres comme somme de volumes d'arbres individuels.

Exemples de tarifs individuels :

- à 1 entrée (D)
 - (i) $V = a + bD + cD^2 + dD^3$
cas particuliers : $V = a + bD^2$, $V = a + bD^2 + cD^3$, ...
 - (ii) $V = a D^b$
- à 2 entrées (D et H)
 - (i) $V = a + bH + c\sqrt{D^2H} + dD^2H$
cas particuliers : $V = a + bD^2H$, $V = a + bH + cD^2H$, ...
 - (ii) $V = a D^b H^c$
- à 3 entrées (D, H, $D_{H/2}$)
 - $V = a D^b H^c D_{H/2}^d$

Dans ces tarifs,

- V = volume fût (ou volume tige jusqu'à une découpe)
- D = diamètre de référence
- H = hauteur totale
- $D_{H/2}$ = diamètre à la hauteur $H/2$

Exemples de tarifs de peuplement :

- à 2 entrées (G et H) : $V = a + bG + cH + dGH + eGH^2$

cas particuliers: $V = a + bGH,$

$V = a + bG + cGH,$

$$V = a G^b H^c$$

où $\left\{ \begin{array}{l} V = \text{volume tige/ha (ou volume tige jusqu'à une découpe/ha)} \\ G = \text{surface terrière à l'ha} \\ H = \text{hauteur moyenne ou hauteur dominante} \end{array} \right.$

- à 3 entrées (N_1, N_2, N_3): $V = a_1 N_1 + a_2 N_2 + a_3 N_3$

où $\left\{ \begin{array}{l} V = \text{volume/ha sur écorce du bois de feu} \\ N_1 = \text{nombre/ha des brins de hauteur totale} < 2m \\ N_2 = \text{nombre/ha des brins de hauteur totale comprise entre 2 et 6m} \\ N_3 = \text{nombre/ha des brins de hauteur totale} > 6m \end{array} \right.$

Ce dernier modèle est bien adapté aux peuplements pour lesquels les mesures de diamètre sont plus compliquées que les mesures de hauteur (arbres à tiges multiples, de mauvaise forme,...).

Remarques :

- (i). Il existe des tarifs de type intermédiaire entre les tarifs individuels et les tarifs de peuplement : ils donnent le volume d'un arbre en fonction de variables relatives à l'arbre et de variables relatives au peuplement où il est situé. Ce sont les tarifs individuels dont les coefficients sont des fonctions connues de variables relatives au peuplement.

Exemple : $V = (a + bH_{\text{dom}}) + (c + dH_{\text{dom}}) D^2$

où V est le volume de l'arbre de diamètre D.

On dit que c'est un tarif individuel paramétré : on peut en effet considérer ce tarif comme une famille de tarifs individuels :

$V_i = a_i + b_i D^2$, H_{dom} étant le paramètre qui permet de choisir le tarif à appliquer aux arbres d'un peuplement donné. Pour construire un tel tarif, on peut ajuster directement V aux 3 variables H_{dom} , D^2 , $D^2 H_{\text{dom}}$ ou commencer par établir un tarif par classe de H_{dom} et en déduire l'équation globale. Voir sur ce sujet l'annexe A (§ A.1.5 et A.1.6).

(ii) . *Un tarif de cubage à deux entrées est plus précis qu'un tarif à une entrée mais son utilisation est moins commode. C'est pour-quoi on commence parfois par déduire du tarif à deux entrées un tarif à une seule entrée adapté au peuplement à cuber ; on peut pour cela conseiller la procédure suivante :*

- dans le peuplement à cuber pour lequel on dispose d'un tarif à deux entrées $V = f(D, H)$, mesurer D et H sur une trentaine d'arbres,
- puis, calculer leur volume par $V = f(D, H)$ et construire grâce à cette trentaine d'arbres un tarif donnant V en fonction de D seul,
ou : établir sur cette trentaine d'arbres une loi
 $H = g(D)$ et prendre pour tarif à une entrée
 $V = f(D, g(D))$.

(iii). *Un tarif de cubage doit être considéré comme un outil qu'il faut entretenir ; par exemple, il doit être mis à jour grâce à des données supplémentaires, au fur et à mesure que les plantations vieillissent et s'étendent en surface.*

32 CHOIX DES ENTREES

Les entrées du tarif doivent :

- être peu nombreuses et faciles à mesurer, pour que le tarif ait une portée assez générale et soit facile à utiliser,
- être des variables bien corrélées avec le volume,
- être peu corrélées entre elles pour que le pouvoir explicatif d'une variable persiste quand les autres sont introduites dans le modèle.

En général, on n'utilise pas plus de deux entrées : la première est toujours le diamètre de référence, la seconde est le diamètre à une hauteur fixe (par exemple 5 mètres) ou à une hauteur relative ou la hauteur du fût ou la hauteur totale ou le diamètre de la cime ... Parmi ces variables, la hauteur du fût et le diamètre à une hauteur fixe sont les plus faciles à mesurer, le diamètre à hauteur fixe s'avérant souvent plus intéressant que la hauteur

33 SCHEMA DE LA PROCEDURE A SUIVRE POUR CUBER UN PEUPLEMENT PAR UN TARIF

- | | | |
|-----------------------------------|---|--|
| <i>Par un tarif individuel</i> | { | <ul style="list-style-type: none"> - Prendre un échantillon de n arbres dans le peuplement (voir § 34) et mesurer directement le volume de chacun d'eux. Calculer le tarif. - Sur les N-n arbres qui n'ont pas servi à faire le tarif, mesurer les caractéristiques constituant les entrées du tarif. - Estimer le volume V du peuplement par : $V = \left[\begin{array}{l} \text{somme des volumes} \\ \text{des n arbres ayant ser-} \\ \text{vi à faire le tarif} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{somme des volumes des} \\ \text{N-n arbres estimés grâce} \\ \text{au tarif} \end{array} \right]$ |
| <i>Par un tarif de peuplement</i> | { | <ul style="list-style-type: none"> - Sur des peuplements analogues au peuplement étudié, mesurer le volume/ha V et d'autres caractéristiques plus facilement mesurables qui seront les entrées du tarif. - Sur le peuplement étudié, mesurer les variables constituant les entrées du tarif et appliquer la formule. |

En fait, cette procédure doit être fréquemment modifiée car on ne peut calculer un tarif spécial à chaque peuplement. Dans la pratique on utilise donc très souvent un tarif qui n'a pas été établi à partir d'un échantillon provenant du peuplement à cuber.

C'est légitime si la relation qui lie le volume aux entrées du tarif est sensiblement la même dans le peuplement et dans l'échantillon qui a servi à construire le tarif, donc :

- . pour un tarif individuel, il faut que la variabilité de la forme des arbres soit identique dans le peuplement et dans l'échantillon. On s'efforcera donc que tous les facteurs qui influencent la forme des arbres aient la même variabilité dans le peuplement et dans l'échantillon (variabilité génétique, des conditions de station, des traitements sylvicoles, des âges et de la dimension des arbres). Plus on souhaite que le domaine de validité d'un tarif soit large, plus il faudra donc que l'échantillon qui a servi à l'établir soit diversifié,
- . il en va de même pour un tarif de peuplement : on veillera à ce que la variabilité des conditions de station, des densités des peuplements et des traitements sylvicoles soient analogues dans le peuplement à cuber et dans l'échantillon de placeaux utilisé pour faire le tarif.

34 CHOIX DE L'ECHANTILLON NECESSAIRE A LA CONSTRUCTION D'UN TARIF

341 Tarif individuel

On peut admettre qu'il faut, pour un tarif individuel applicable à un peuplement monospécifique homogène, entre 50 et 100 arbres pour un tarif à une entrée et entre 80 et 150 arbres pour un tarif à deux entrées. Pour couvrir une vaste région, on est amené à construire un tarif propre à chaque sous-région homogène. La comparaison de ces tarifs peut amener à en regrouper certains ; c'est ainsi que l'on trouve dans la littérature des tarifs construits à partir de plusieurs milliers d'arbres.

Le nombre d'arbres à prendre en considération n'est pas le seule critère ; il faut encore choisir les peuplements dans lesquels seront prélevés ces arbres et à l'intérieur de ces peuplements choisir les arbres échantillons ; quelques recommandations à ce sujet :

- Diviser la zone pour laquelle on veut établir le tarif en parcelles homogènes (sur le plan des conditions de milieu, des traitements sylvicoles, etc...)
- Diviser les parcelles en classes d'âge et prendre pour règles :

$$(1) \quad \frac{\text{Nombre d'arbres-échantillon dans la classe d'âge de la parcelle}}{\text{Nombre total d'arbres-échantillon}} = \frac{\text{Surface de la classe d'âge dans la parcelle}}{\text{Surface de la zone}}$$

- (2) Dans une classe d'âge d'une parcelle, prendre le même nombre d'arbres-échantillon dans chacune des classes de surface terrière.

En réalité, ces principes peuvent être difficiles à appliquer car la répartition en classes d'âge peut être impossible (forêts plantées dont l'histoire est mal connue, forêts naturelles non traitées,...). On remplacera alors les règles ci-dessus par les règles plus simples :

$$(1') \quad \frac{\text{Nombre d'arbres-échantillon dans la parcelle}}{\text{Nombre total d'arbres-échantillon}} = \frac{\text{Surface de la parcelle}}{\text{Surface de la zone}}$$

- (2') Dans une parcelle, prendre le même nombre d'arbres-échantillon dans chacune des classes de surface terrière.

Remarque sur les règles (2) et (2') :

Ce que l'on veut c'est connaître le volume moyen des arbres qui ont une valeur donnée des entrées du tarif ($D_{1,30}$, H_{tot} , ...) ; la variabilité du volume augmentant en général avec la taille des arbres, il est plus utile de mesurer un gros arbre qu'un petit. Les règles (2) et (2') ont pour but d'éviter que la majorité des arbres appartiennent à un faible nombre de classes de grosseur. Bien réaliser qu'un échantillon pris selon une règle du genre "un arbre pris au hasard tous les n" n'est pas ce que l'on recherche.

On veut par exemple un tarif de cubage pour des arbres de forêt dense dont le diamètre varie de 20 cm à 1 m. On découpe l'étendue des surfaces terrières en 10 classes égales ; les limites des classes de diamètres correspondantes sont donc :
200 - 369 - 482 - 573 - 651 - 721 - 785 - 844 - 899 - 951 - 1000 (mm)
On prendra dans chacune de ces classes une dizaine d'arbres au hasard, selon un dispositif de sondage qui couvre toute la zone.

Remarque sur les forêts mélangées :

Le nombre d'essences qui composent la forêt naturelle est souvent tel qu'il est impossible d'établir un tarif par essence. On est donc obligé de faire des tarifs par groupe d'essences. La procédure la plus simple consiste à décider des regroupements d'essences au vu du graphique des données (V en fonction de D^2 ou D^2H).

342 Tarif de peuplement

Ces tarifs étant jusqu'à présent moins utilisés que les tarifs individuels, la pratique expérimentale est insuffisante pour que l'on puisse faire des recommandations sûres. Considérer en conséquence que ce qui suit est donné à titre indicatif :

- . prendre au moins une trentaine de placeaux,
- . surface d'un placeau en ares = H_{dom} en mètres, avec un seuil minimum de 10 ares. ($H_{dom} = 20 \text{ m} \rightarrow$ placeau de 20 ares,
 $H_{dom} = 9 \text{ m} \rightarrow$ placeau de 10 ares,...).

Exemple :

On veut un tarif donnant le volume bois de feu de peuplements de savane dont la hauteur moyenne est de l'ordre de 6 mètres. On choisit le 2ème modèle du paragraphe 31 :

$$V = a_1 N_1 + a_2 N_2 + a_3 N_3 \quad \text{où } N_i \text{ est le nombre/ha d'arbres}$$

de la classe de hauteur i (remarquer que le coefficient a_i s'interprète ici comme le volume moyen d'un arbre de la classe de hauteur i).

Procédure à suivre :

- prendre au hasard 30 placeaux de 30m × 30m,
- avant abattage, faire l'inventaire de chaque placeau par classe de hauteur. L'identification des espèces n'est pas indispensable,
- abattre et enstérer chaque placeau,
- ajuster le modèle sur les données (V , N_1 , N_2 , N_3) des placeaux.

35 LES DIFFERENTES FAÇONS DE CALCULER LE TARIF GRÂCE AUX DONNÉES RECUEILLIES

351 La méthode directe

C'est la méthode qui semble la plus naturelle à première vue. Chaque variable qui est une entrée du tarif est divisée en classes.

Pour un tarif à une entrée, on calcule le volume moyen dans chaque classe.

Pour un tarif à deux entrées, on constitue un tableau en croisant les classes des deux entrées, on ventile les arbres (tarif individuel) ou les placeaux (tarif de peuplement) dans les cases de ce tableau et on calcule le volume moyen dans chaque case.

... etc ...

On obtient ainsi un volume pour chaque combinaison des variables explicatives. Le tarif est obtenu. On peut ensuite ajuster à ces valeurs une formule si nécessaire (voir annexe A).

Avantage : *Simplicité des calculs.*

Inconvénients : . *Le tarif est très peu précis pour les combinaisons de variables explicatives pour lesquelles on ne dispose que de quelques mesures. La loi de variation obtenue pour le volume peut avoir des irrégularités.*
.*On est incapable d'estimer avec quelle précision le tarif permet de calculer le volume d'un peuplement.*

352 Les méthodes graphiques

Elles ne sont faciles à appliquer en pratique que pour les tarifs à une entrée (voir annexe A) : on place les arbres (tarif individuel) ou les placeaux (tarif de peuplement) sur un graphique avec le volume en ordonnées et la variable explicative (entrée du tarif) en abscisses. Pour quelques valeurs de l'abscisse, on place un point à la valeur moyenne des volumes correspondants à cette abscisse et on trace à la main une courbe continue passant au mieux par ces points (voir annexe A).

Avantages : . *pratiquement aucun calcul.*
.*Le tarif est "régulier" (supériorité sur la méthode directe).*
.*La représentation graphique attire l'attention sur les valeurs aberrantes. On évite instinctivement des anomalies telles que des volumes négatifs.*

Inconvénients : . *Le résultat dépend de l'habileté du traceur et de sa connaissance intuitive des lois de variation du volume en fonction des variables explicatives utilisées.*
.*Ici aussi, on est incapable d'estimer avec quelle précision le tarif permet de calculer le volume d'un peuplement. C'est l'inconvénient majeur.*

353 La méthode statistique de la régression

C'est surtout cette méthode qui est utilisée, car l'inconvénient d'avoir à faire des calculs s'amenuise au fur et à mesure du développement des machines à calculer.

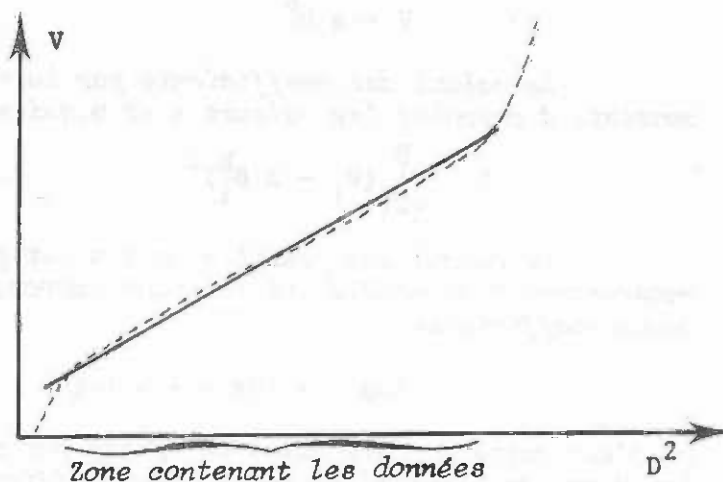
353.1 A propos du choix du modèle de régression

Quelques exemples de modèles ont été donnés au paragraphe 31 et beaucoup d'autres sont utilisés ; il n'est pas possible de recommander un modèle unique (pour les tarifs individuels par exemple, cela signifierait que pour toutes les espèces et dans toutes les conditions de station, le coefficient de forme varie de la même façon en fonction de D et H). Attirons l'attention sur quelques points importants.

353.11 Simplicité du modèle

Toujours essayer d'avoir le modèle le plus simple possible, c'est-à-dire avec le moins de coefficients possible. Plus les coefficients sont nombreux, plus V risque de varier de façon illogique en fonction des entrées.

Exemple :



La courbe — est la droite $V = a + bD^2$. Le modèle $V = a + bD^2 + cD^4 + dD^6 + eD^8$ peut être représenté par une courbe aussi bizarre que la courbe ---- : les deux courbes seront très voisines dans la partie utilisable du tarif mais une très légère extrapolation sera beaucoup plus dangereuse avec le modèle compliqué.

Dans la pratique, les modèles à deux coefficients $V = a + bD^2$, $V = aD^b$, $V = a + bD^2H$, $V = a(D^2H)^b$, donnent souvent de bons résultats et doivent être essayés d'abord.

La première chose à faire est de représenter les données : pour un tarif à une entrée, graphique de V en fonction de D^2 , pour un tarif à plusieurs entrées, graphique de V en fonction de D^2H et aussi, si les données sont suffisamment nombreuses, graphique de V en fonction de D^2 par classe de H (ou par classe d'une autre variable explicative). Ces graphiques permettent de faire un premier choix de la forme du modèle et d'étudier la variance du volume en fonction des entrées, afin de décider avec quelle fonction de pondération sera ajustée la régression.

353.12 A propos des modèles où c'est une fonction de V et non V lui-même que l'on ajuste

Prenons l'exemple du modèle suivant, qui est très utilisé (tarif dit "logarithmique").

$$V = a D^b$$

Le calcul des coefficients par la méthode des moindres carrés consiste à chercher les valeurs a et b qui minimisent l'expression :

$$\sum_{i=1}^n (V_i - a D_i^b)^2$$

Ce calcul est possible mais n'est pas simple. Aussi se ramène-t-on à un modèle qui soit une expression linéaire des nouveaux coefficients :

$$\log V = \log a + b \log D$$

et c'est cette formule que l'on ajuste par régression. C'est donc $\log V$ et non V que l'on prédit. Les coefficients a et b que l'on trouve sont tels que $\log a + b \log D$ est une estimation de la moyenne des logarithmes des volumes des arbres de diamètre D.

La quantité $a D^b$ est donc une estimation de la moyenne géométrique (et non pas arithmétique) des volumes des arbres de diamètre D. Or, la moyenne géométrique est systématiquement inférieure à la moyenne arithmétique (exemple : les 4 nombres 3, 4, 7, 10 ont pour moyenne géométrique : $(3 \times 4 \times 7 \times 10)^{1/4} = 5,38$ et pour moyenne arithmétique $\frac{1}{4} (3+4+7+10) = 6$).

Un tarif logarithmique sous-estime donc systématiquement les volumes.

A cet inconvénient (qui peut être partiellement corrigé, voir annexe A - § A.2.3) s'en ajoute un autre : si on estime grâce au

tarif le volume total d'un peuplement de N arbres par $a \sum_{i=1}^N D_i^b$,

on ne peut connaître la précision de cette estimation car la théorie de la régression ne fournit que la précision avec laquelle on connaît

$$\sum_{i=1}^N \log V_i$$

Il semble donc préférable de ne faire appel aux tarifs logarithmiques que si on ne parvient pas à ajuster un modèle simple où V apparaît non transformé.

353.13 Ajustement d'un modèle "par morceaux"

S'il est difficile d'ajuster un modèle unique couvrant toute la zone de variation des données (par exemple, persistance de biais pour les petits arbres et/ou les grands arbres), une solution est de diviser la zone de variation en tranches et d'ajuster un modèle à chacune d'elles.

Voici deux façons de procéder.

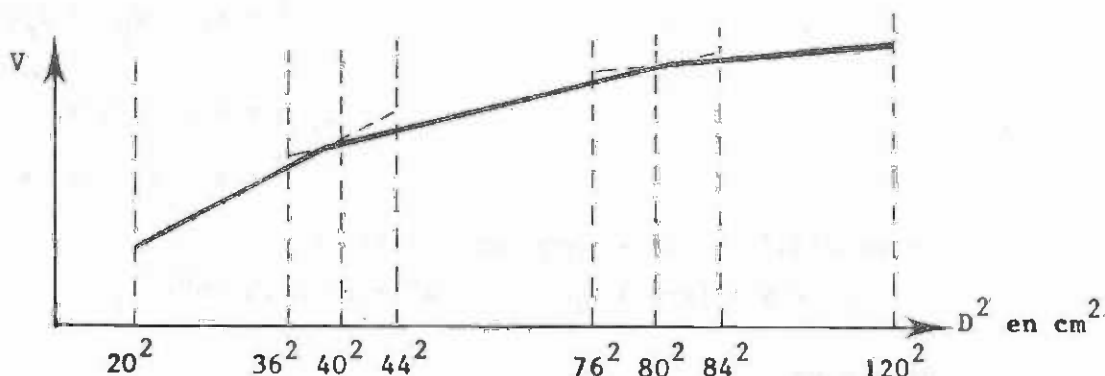
(i) Méthode où on effectue plusieurs calculs de régression

Pour que les raccordements s'effectuent bien, on prend des tranches qui se chevauchent (d'environ 20 %).

exemple : les diamètres des arbres vont de 20 à 120 cm,
l'examen du nuage de points montre que :

- un modèle de type $V = a_1 + b_1 D^2$ convient pour les arbres $20 < D < 40$ cm
- un modèle de type $V = a_2 + b_2 D^2$ convient pour les arbres $40 < D < 80$ cm
- un modèle de type $V = a_3 + b_3 D^2$ convient pour les arbres $80 < D < 120$ cm.

On ajustera le premier modèle sur les arbres tels que $20 < D < 44$ cm, le deuxième sur les arbres tels que $36 < D < 84$ cm et le troisième sur les arbres tels que $76 < D < 120$ cm :

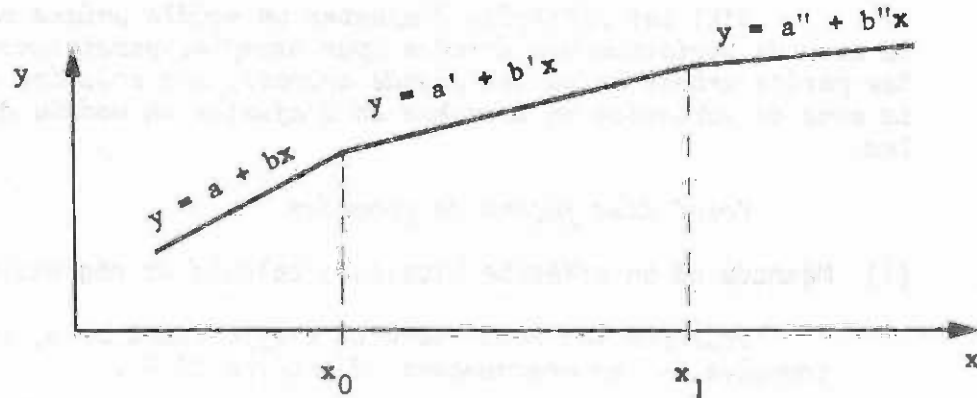


et on prendra la ligne brisée — pour tarif.

Cette procédure a l'avantage de se ramener à une succession d'ajustements de modèles simples mais elle présente l'inconvénient de ne pas permettre le calcul exact de la variance résiduelle : on ne peut donc pas calculer avec quelle précision le tarif permet d'estimer le volume d'un lot d'arbres. C'est pourquoi la procédure suivante, bien qu'un peu plus compliquée sur le plan des calculs, est plutôt conseillée :

(ii) Méthode où on effectue un seul calcul de régression

Reprenons l'exemple ci-dessus :



On fixe les valeurs $x_0 = 40$ et $x_1 = 80$ et on ajuste le modèle suivant à 4 paramètres :

$$y = a + bz_1 + b'z_2 + b''z_3 \quad \text{avec } z_1 \begin{cases} = x & \text{si } x \leq x_0 \\ = x_0 & \text{si } x \geq x_0 \end{cases}$$

$$z_2 \begin{cases} = 0 & \text{si } x \leq x_0 \\ = x - x_0 & \text{si } x_0 \leq x \leq x_1 \\ = x_1 - x_0 & \text{si } x \geq x_1 \end{cases}$$

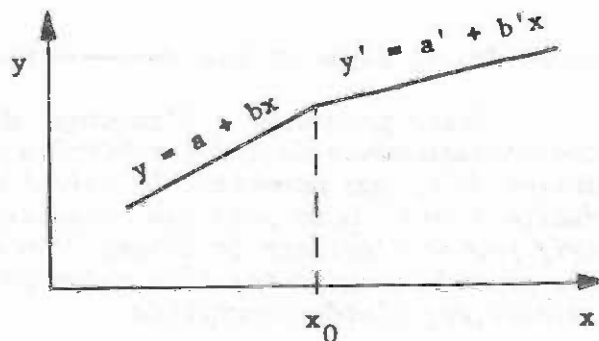
$$z_3 \begin{cases} = 0 & \text{si } x \leq x_1 \\ = x - x_1 & \text{si } x \geq x_1 \end{cases}$$

on en déduit a' et a'' par les relations :

$$a' = a + (b - b') x_0 \quad a'' = a' + (b' - b'') x_1$$

Remarques :

.. Pour ajuster seulement deux droites,

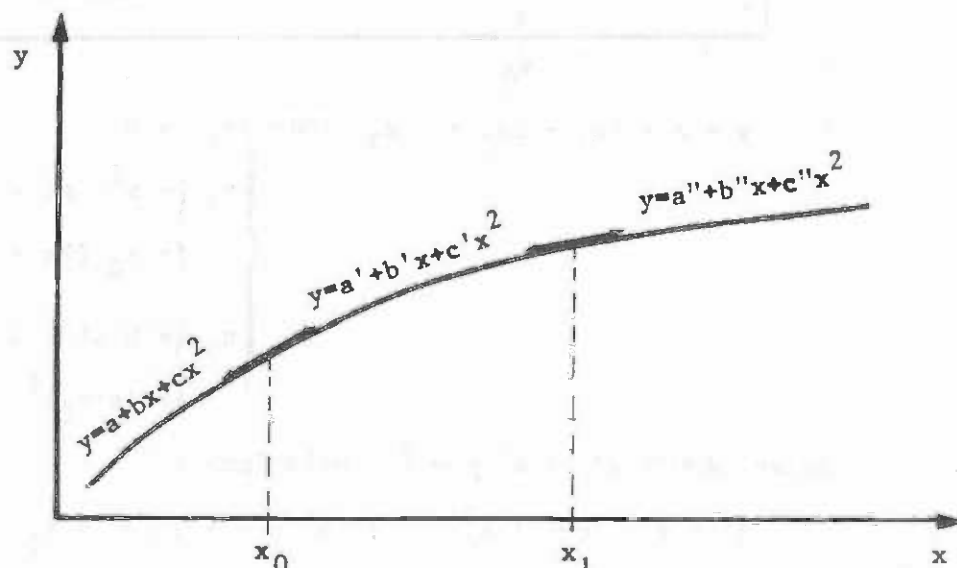


on fixe la valeur x_0 et on ajuste le modèle suivant à 3 paramètres :

$$y = a + bz_1 + b'z_2 \text{ avec } \begin{cases} z_1 = x & \text{si } x \leq x_0 \\ z_1 = x_0 & \text{si } x \geq x_0 \\ z_2 = 0 & \text{si } x \leq x_0 \\ z_2 = x - x_0 & \text{si } x \geq x_0 \end{cases}$$

on en déduit a' par $a' = a + (b-b') x_0$

. Pour ajuster trois paraboles qui soient tangentes aux points de rencontre :



on fixe les valeurs x_0 et x_1 et on ajuste le modèle suivant à 5 paramètres :

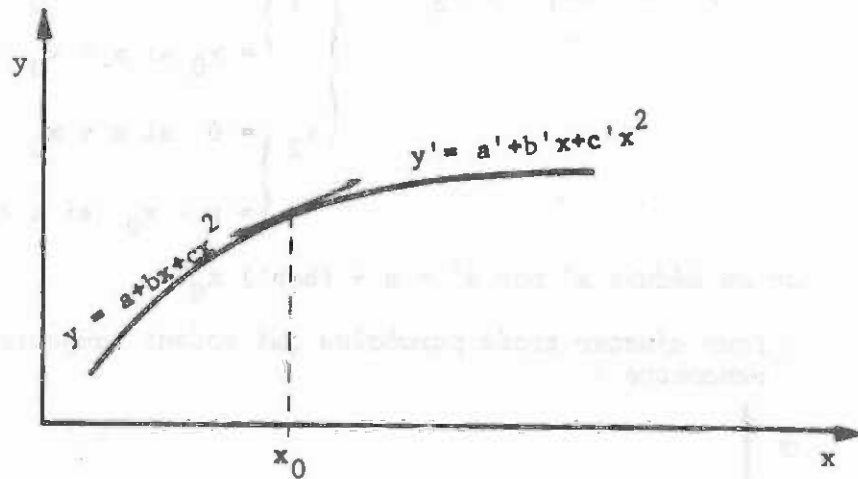
$$y = a' + b'z_1 + c'z_2 + cz_3 + c''z_4 \text{ avec } \begin{cases} z_1 = x \\ z_2 = \begin{cases} 2x x_0 - x_0^2 & \text{si } x \leq x_0 \\ x^2 & \text{si } x_0 \leq x \leq x_1 \\ 2x x_1 - x_1^2 & \text{si } x_1 \leq x \end{cases} \\ z_3 = \begin{cases} (x_0 - x)^2 & \text{si } x \leq x_0 \\ 0 & \text{si } x_0 \leq x \end{cases} \\ z_4 = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq x_1 \\ (x - x_1)^2 & \text{si } x_1 \leq x \end{cases} \end{cases}$$

on en déduit a, b, a'', b'' par les relations :

$$a = a' + (c-c') x_0^2 ; b = b' - 2(c-c') x_0 ;$$

$$a'' = a' - (c'-c'') x_1^2 ; b'' = b' + 2(c'-c'') x_1 ;$$

- Modèle pour ajuster seulement deux paraboles qui aient même tangente au point de rencontre :



$$y = a + bz_1 + cz_2 + c'z_3 \quad \text{avec} \quad \begin{cases} z_1 = x \\ z_2 = \begin{cases} x^2 & \text{si } x \leq x_0 \\ x_0(2x - x_0) & \text{si } x \geq x_0 \end{cases} \\ z_3 = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq x_0 \\ (x - x_0)^2 & \text{si } x \geq x_0 \end{cases} \end{cases}$$

on en déduit a' et b' par les relations :

$$a' = a - (c - c') x_0^2 \quad ; \quad b' = b + 2(c - c') x_0$$

353.14 Régression pondérée ou régression non pondérée ?

La régression doit être faite avec pondération chaque fois que la variance du volume dépend des variables explicatives. Sans entrer dans les justifications mathématiques, disons que ceci est nécessaire pour pouvoir estimer correctement la précision avec laquelle le tarif permettra de connaître le volume d'un peuplement ; si le calcul de cette précision n'est pas jugé nécessaire et si l'on cherche uniquement un bon ajustement (c'est-à-dire sans biais et avec de faibles résidus), la pondération n'est pas indispensable.

Il n'est pas facile de connaître la façon dont la variance du volume dépend des entrées ; cela nécessite de très nombreuses données, bien supérieures au nombre dont on dispose couramment. Cependant, chaque fois que de très nombreux échantillons ont pu être collectés, on a constaté que la variance du volume augmentait, souvent très rapidement, avec la taille des arbres. Ceci incite à recommander l'emploi systématique de la régression pondérée,

Quand on a peu de données, il est impossible d'estimer avec précision la fonction de pondération et on se limite souvent aux hypothèses suivantes :

$$\begin{array}{ll} (a_1) \text{ variance de } V \text{ proportionnelle à } (D^2) & \left. \begin{array}{l} (a_2) \text{ variance de } V \text{ proportionnelle à } (D^2)^2 \end{array} \right\} \text{ Tarif à une entrée} \\ (b_1) \text{ variance de } V \text{ proportionnelle à } (D^2H) & \left. \begin{array}{l} (b_2) \text{ variance de } V \text{ proportionnelle à } (D^2H)^2 \end{array} \right\} \text{ Tarif à deux entrées} \end{array}$$

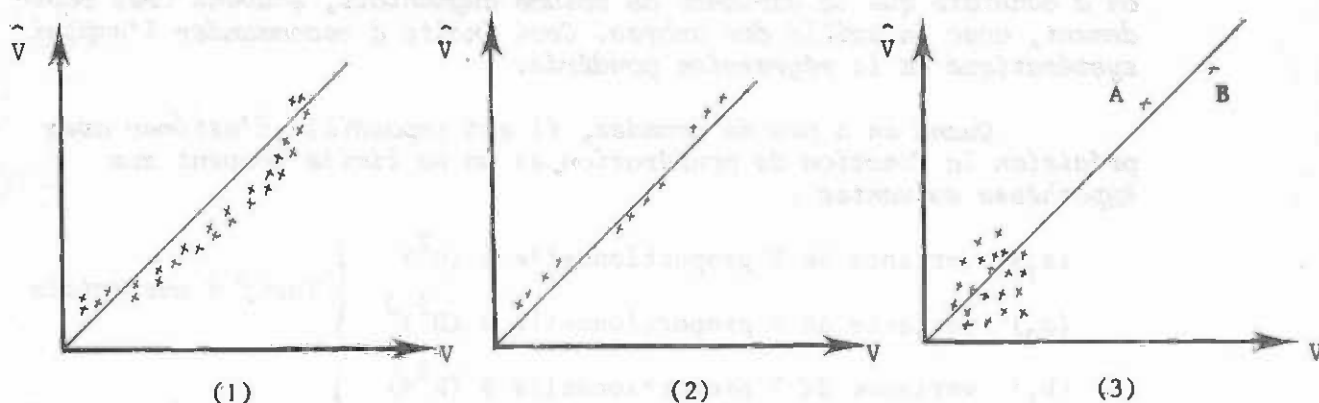
On ajuste alors le modèle successivement avec les deux hypothèses et on retient le meilleur ajustement, c'est-à-dire celui qui réalise le meilleur compromis entre les exigences : absence de biais, faible écart-type résiduel, simplicité du modèle. C'est le principe du programme décrit dans la référence bibliographique 3. Ce programme ajuste les 4 modèles :

$$\begin{array}{ll} V = a + bD^2 & \left. \begin{array}{l} V = a + bD + cD^2 \end{array} \right\} \text{ sous les hypothèses } (a_1) \text{ et } (a_2) \\ V = a + bD^2H & \left. \begin{array}{l} V = a + b\sqrt{D^2H} + c(D^2H) \end{array} \right\} \text{ sous les hypothèses } (b_1) \text{ et } (b_2) \end{array}$$

353.15 Comment juger de la qualité d'une régression.

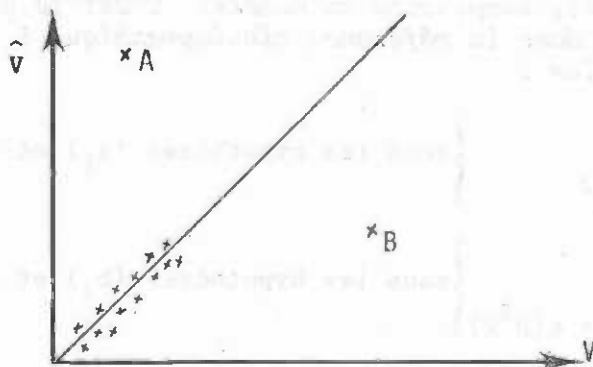
Ne jamais juger de la qualité d'une régression au vu de la seule valeur numérique du coefficient de corrélation multiple R (coefficient de corrélation entre $\hat{V}$ et $V = V$ ajusté).

Il se peut que R soit élevé et que l'ajustement soit mauvais : voici trois cas typiques d'une telle situation :



- (1) modèle biaisé
- (2) échantillon non homogène
- (3) présence d'arbres "anormaux" (sans les arbres A et B, R serait faible).

Il se peut aussi que R soit faible et que l'ajustement soit bon ; ce peut être le cas par exemple quand quelques arbres sont "anormaux" :



Pour les arbres autres que A et B, l'ajustement est bon. Sans les arbres A et B, R serait élevé.

De nombreuses quantités autres que R sont utilisées : les plus courantes sont l'écart-type des résidus :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (r_i - \bar{r})^2}{n-c}} \quad \text{où} \quad r_i = V_i - \hat{V}_i, \quad \bar{r} = \frac{1}{n} \sum r_i,$$

c = nombre de coefficients du modèle
 n = nombre de données (arbres)

et le coefficient de variation résiduel :

$$\frac{s}{\bar{V}} \quad \text{où} \quad \bar{V} = \frac{1}{n} \sum V_i \quad (\text{moyenne des volumes mesurés})$$

(pour un modèle avec terme constant où V apparaît non transformé, le numérateur de s s'écrit simplement :

$$\sqrt{\sum V^2 - \sum \hat{V}^2} \quad \text{car alors} \quad \sum V = \sum \hat{V} \quad \text{et} \quad \sum V \hat{V} = \sum \hat{V}^2.$$

On utilise parfois aussi la "déviatiion globale" :

$$\frac{\sum V - \sum \hat{V}}{\sum \hat{V}}$$

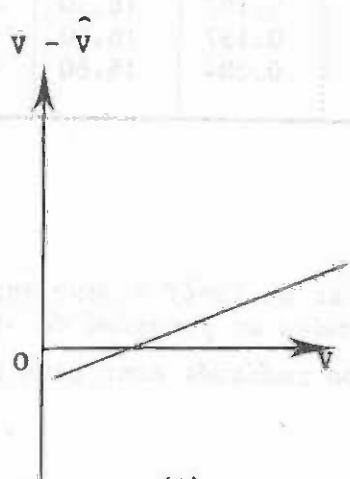
ou la "déviatiion moyenne" :

$$\frac{\sum |V - \hat{V}|}{\sum \hat{V}}$$

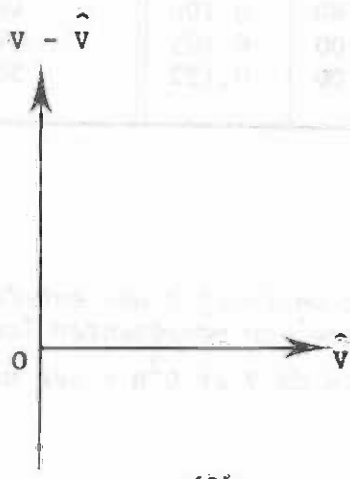
Ce qui a été dit pour R peut être répété pour chacune de ces grandeurs : elles ne peuvent à elles seules permettre de juger de la qualité d'un ajustement.

Pour juger réellement de la qualité d'une régression, il faut :

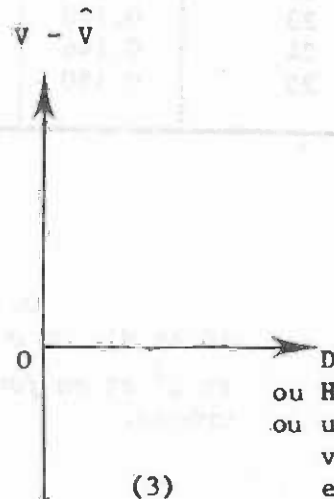
- (i) tracer sur un même graphique le nuage de points et la courbe ajustée. Pour un tarif à une entrée, ce sera le graphique de V en fonction de D ; pour un tarif à deux entrées, il est recommandé, quel que soit le modèle, de représenter V en fonction de D²H.
- (ii) calculer les résidus $V - \hat{V}$ et les visualiser : trois types de graphique sont possibles :



(1)



(2)



(3)

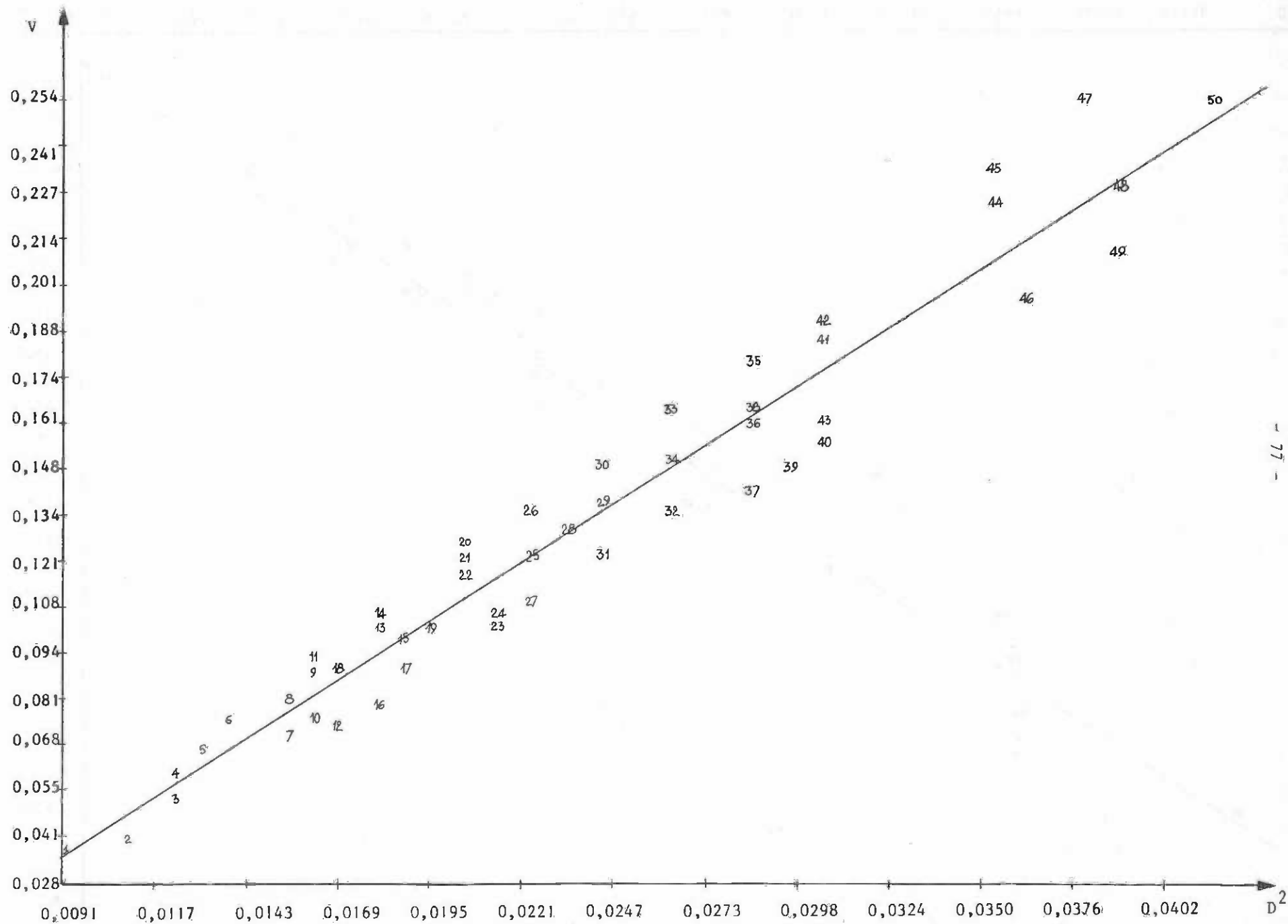
En l'absence de biais, le graphique (1) est bien équilibré autour d'une droite ascendante (la pente de la droite de régression de $V - \hat{V}$ en fonction de V est $1 - R^2$) ; sur le graphique (2) c'est autour de l'axe des abscisses que se dispersent les points. En présence de biais, les graphiques (3) aident à décider dans quel sens le modèle est à corriger (voir annexe A, § A 2.6).

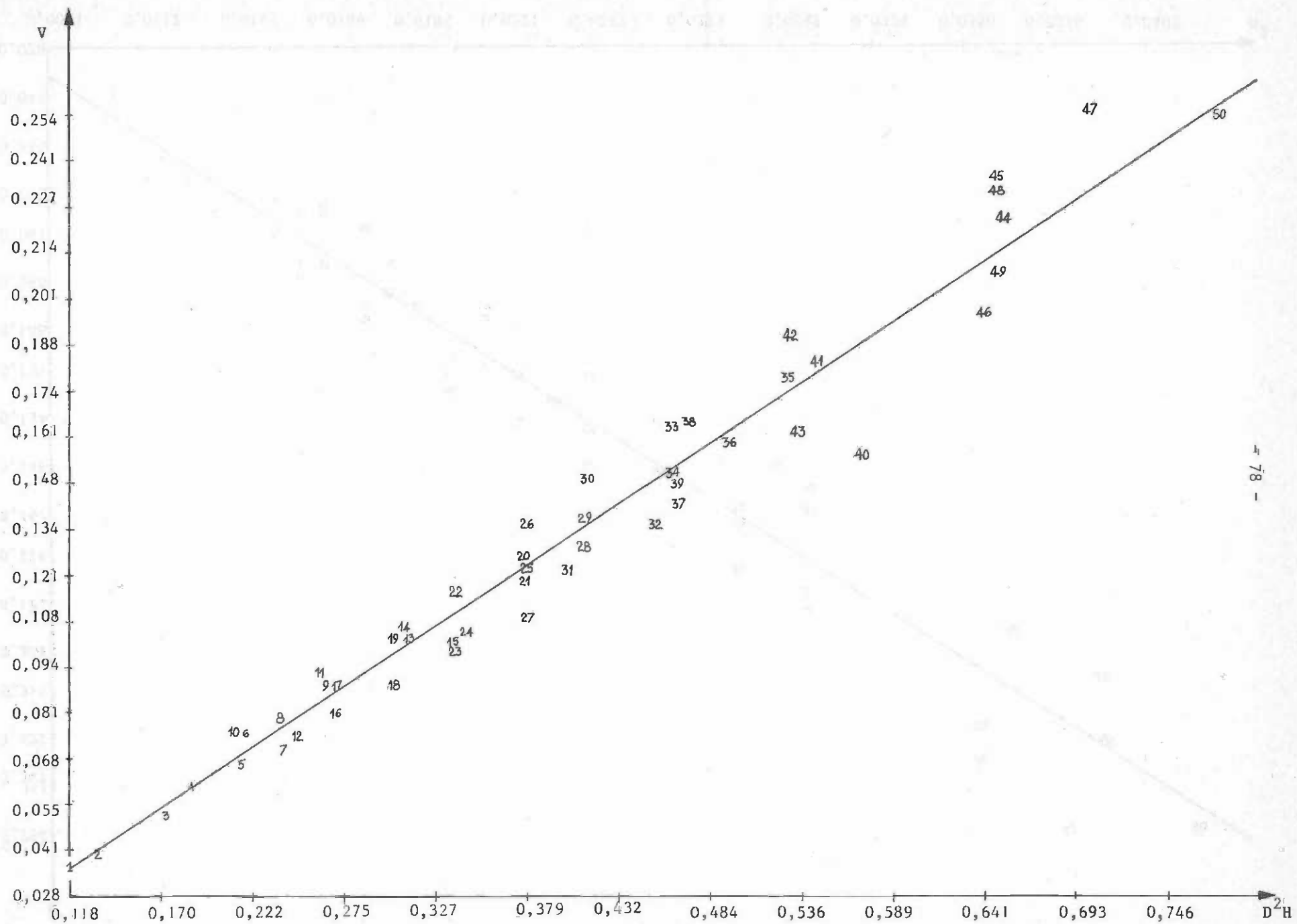
353.2 Exemple

Voici les valeurs du diamètre de référence, de la hauteur totale et du volume tige bois fort de 50 arbres.

Arbre n°	D _m	H _m	V _{m3}	Arbre n°	D _m	H _m	V _{m3}
1	0.095	12.90	0.037	26	0.150	17.00	0.135
2	0.105	12.00	0.040	27	0.150	16.90	0.108
3	0.111	14.00	0.052	28	0.153	17.50	0.132
4	0.111	15.00	0.060	29	0.156	17.00	0.138
5	0.115	16.50	0.067	30	0.156	17.00	0.148
6	0.118	15.90	0.075	31	0.156	16.30	0.123
7	0.124	15.40	0.070	32	0.162	17.16	0.135
8	0.124	15.30	0.080	33	0.162	17.50	0.165
9	0.127	16.50	0.090	34	0.162	17.50	0.150
10	0.127	13.00	0.075	35	0.169	18.50	0.180
11	0.127	16.05	0.093	36	0.169	17.30	0.160
12	0.131	14.50	0.074	37	0.169	16.30	0.140
13	0.134	17.40	0.102	38	0.169	16.50	0.165
14	0.134	17.10	0.107	39	0.172	15.70	0.148
15	0.137	18.00	0.100	40	0.175	18.50	0.156
16	0.134	15.00	0.080	41	0.175	17.70	0.184
17	0.137	14.50	0.090	42	0.175	17.30	0.191
18	0.131	17.70	0.090	43	0.175	17.40	0.162
19	0.140	15.50	0.103	44	0.188	18.50	0.225
20	0.143	18.20	0.127	45	0.188	18.50	0.235
21	0.143	18.50	0.120	46	0.191	17.50	0.197
22	0.143	16.50	0.117	47	0.194	18.50	0.256
23	0.146	15.80	0.100	48	0.197	16.50	0.230
24	0.146	16.00	0.105	49	0.197	16.60	0.210
25	0.150	17.00	0.122	50	0.204	18.60	0.254

On veut un tarif à une entrée (D) et un tarif à deux entrées (D et H). On commence par représenter les données en fonction de V et D² et en fonction de V et D²H : les numéros indiqués sont ceux des arbres.





Ces graphiques suggèrent comme modèles simples :

$$V = a + bD^2 \quad \text{et} \quad \bar{V} = a + bD^2H$$

Pour ajuster ces modèles par régression, on commence par étudier comment la variance du volume varie en fonction de D^2 et de D^2H . On calcule pour cela la variance de V pour quelques groupes d'arbres choisis de façon telle que D^2 (ou D^2H) soit sensiblement constant dans un groupe.

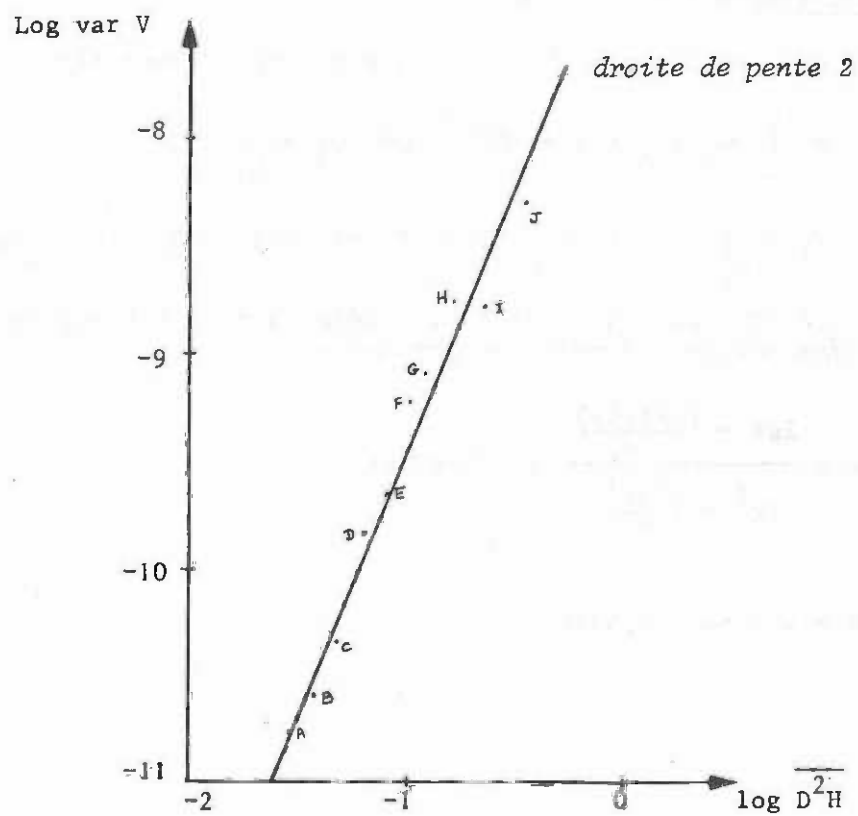
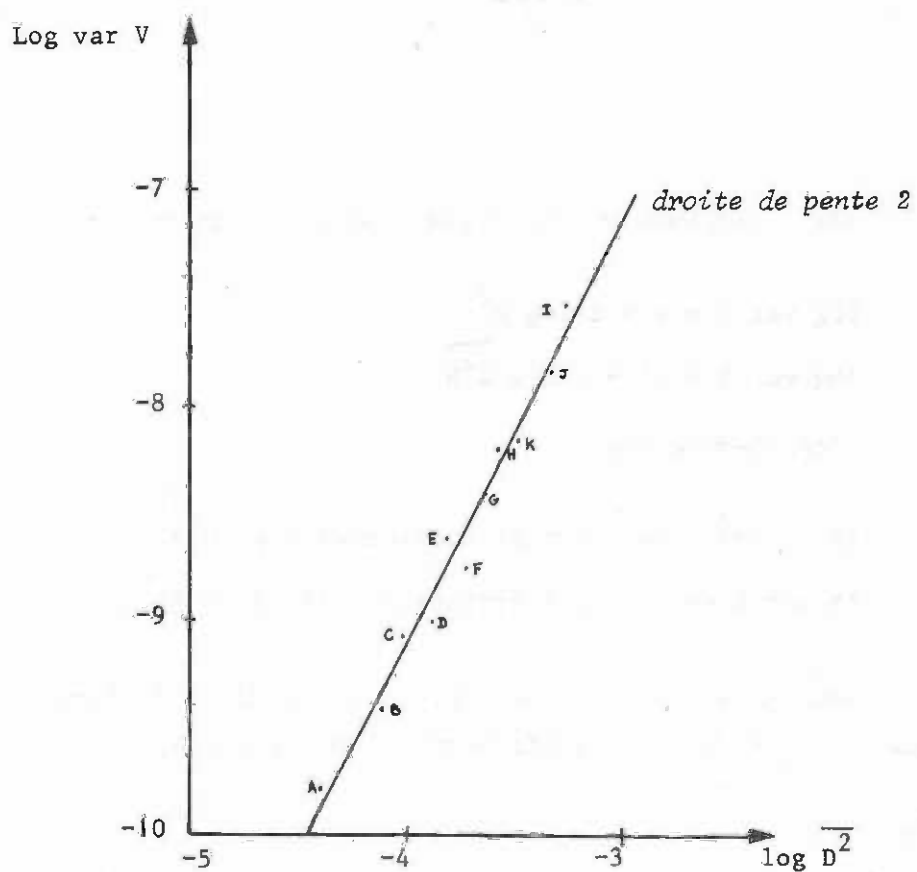
Etude du lien entre var V et D^2

n° groupe	n° des arbres	$\bar{D^2}$ =moyenne de D^2	log $\bar{D^2}$	Variance de $V = \text{var } V$	log var V
A	3 - 4 - 5	0,012652	- 4,370	0,0000563	- 9,784
B	9 - 10 - 11 - 12 - 18 -	0,016540	- 4,102	0,0000833	- 9,393
C	13 - 14 - 15 - 16 - 17 -	0,018217	- 4,005	0,0001162	- 9,060
D	20 - 21 - 22 - 23 - 24 -	0,020886	- 3,869	0,000123	- 9,006
E	25 - 26 - 27 -	0,022382	- 3,800	0,0001823	- 8,610
F	29 - 30 - 31 -	0,024327	- 3,716	0,0001580	- 8,751
G	32 - 33 - 34 -	0,026354	- 3,636	0,000225	- 8,399
H	35 - 36 - 37 - 38 -	0,028461	- 3,559	0,0002729	- 8,206
I	47 - 48 - 49 -	0,038532	- 3,257	0,000532	- 7,539
J	44 - 45 - 46 -	0,0356728	- 3,333	0,000388	- 7,855
K	40 - 41 - 42 - 43 -	0,030650	- 3,485	0,0002849	- 8,163

Etude du lien entre var V et $\overline{D^2H}$

n° groupe	n° des arbres	$\overline{D^2H}$ =moyenne des D^2H	$\log \overline{D^2H}$	Variance de V = var V	$\log \text{var V}$
A	5 - 6 - 10 -	0,215987	- 1,533	0,0000213	- 10,755
B	7 - 8 - 12 -	0,240027	- 1,427	0,0000253	- 10,583
C	9 - 11 - 16 - 17 -	0,266856	- 1,321	0,0000323	- 10,342
D	13 - 14 - 18 - 19 -	0,305533	- 1,186	0,0000537	- 9,833
E	15 - 22 - 23 - 24 -	0,339384	- 1,081	0,0000643	- 9,651
F	20 - 21 - 25 - 26 - 27	0,378446	- 0,972	0,0000983	- 9,227
G	28 - 29 - 30 - 31 -	0,408047	- 0,896	0,000110	- 9,113
H	32 - 33 - 34 - 37 - 38 - 39 -	0,461998	- 0,772	0,000156	- 8,769
I	35 - 41 - 42 - 43 -	0,533143	- 0,629	0,0001529	- 8,786
J	44 - 45 - 46 - 48 - 49	0,646497	- 0,436	0,0002443	- 8,317

*Les graphiques ($\log \text{var V}$, $\log \overline{D^2}$) et ($\log \text{var V}$, $\log \overline{D^2H}$)
sont donnés à la page suivante.*



Ces graphiques montrent que l'on peut admettre :

$$\log \text{ var } V = \alpha + 2 \log \overline{D^2}$$

$$\log \text{ var } V = \alpha' + 2 \log \overline{D^2 H}$$

C'est-à-dire que :

la variance de V est proportionnelle à $(\overline{D^2})^2$

la variance de V est proportionnelle à $(\overline{D^2 H})^2$.

Pour le tarif à une entrée, le poids donné à l'arbre i sera donc : $w_i = \frac{1}{D_i^4}$; pour le tarif à deux entrées, il sera

$$\frac{1}{D_i^4 H_i^2}.$$

RESULTATS

Tarif à une entrée : $V = a + bD^2$

a et b sont les nombres qui minimisent l'expression :

$$S = \sum_{i=1}^n w_i (V_i - a - bD_i^2)^2 \quad \text{où} \quad w_i = \frac{1}{D_i^4}$$

En posant $y_i = \frac{V_i}{D_i^2}$ et $x_i = \frac{1}{D_i^2}$, S s'écrit aussi $S = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2$

Il s'agit donc d'ajuster le modèle $y = ax + b$ par la méthode classique des moindres carrés. On obtient :

$$a = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} = -0,02464$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} = 6,5916$$

$$\text{VR (variance résiduelle)} = \frac{1}{n-2} \left\{ \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} - a \left[\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n} \right] \right\}$$

$$= 0,27501$$

$$\text{var } a = \frac{\text{VR}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} = 0,0000169$$

$$\text{var } b = \frac{\text{VR}}{n} + \bar{x}^2 \text{ var } a = 0,04483$$

$$\text{cov } (a,b) = -\bar{x} \text{ var } a = -0,0008153$$

Le volume d'un peuplement de N arbres sur chacun desquels on a mesuré D sera estimé par :

$$V_{\text{TOT}} = Na + b \sum_{i=1}^N D_i^2$$

L'intervalle de confiance de V_{TOT} est, au niveau 0,95 :

$$V_{\text{TOT}} \pm 2 \sqrt{\text{var } V_{\text{TOT}}}$$

avec : $\text{var } V_{\text{TOT}} = N^2 \text{ var } a + \alpha^2 \text{ var } b + 2N\alpha \text{ cov}(a,b) + \beta(\text{VR})$

où on a posé : $\alpha = \sum_{i=1}^N D_i^2$ et $\beta = \sum_{i=1}^N D_i^4$

Tarif à deux entrées : $V = a + bD^2H$

a et b sont les nombres qui minimisent l'expression :

$$S = \sum_{i=1}^n w_i (V_i - a - bD_i^2 H_i)^2 \quad \text{où } w_i = \frac{1}{(D_i^2 H_i)^2}$$

En posant $y_i = \frac{V_i}{D_i^2 H_i}$ et $x_i = \frac{1}{D_i^2 H_i}$, S s'écrit :

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2$$

On ajuste donc le modèle $y = ax + b$ par la méthode classique des moindres carrés ; on obtient :

$$\begin{aligned} a &= - 0,003609 \\ b &= 0,33677 \\ \text{var } a &= 0,000004922 \\ \text{var } b &= 0,00005569 \\ \text{cov } (a,b) &= - 0,0000149 \\ \text{VR} &= 0,000533 \end{aligned}$$

Le volume d'un peuplement de N arbres sur chacun desquels on a mesuré D et H sera estimé par :

$$V_{\text{TOT}} = Na + b \sum_{i=1}^N D_i^2 H_i$$

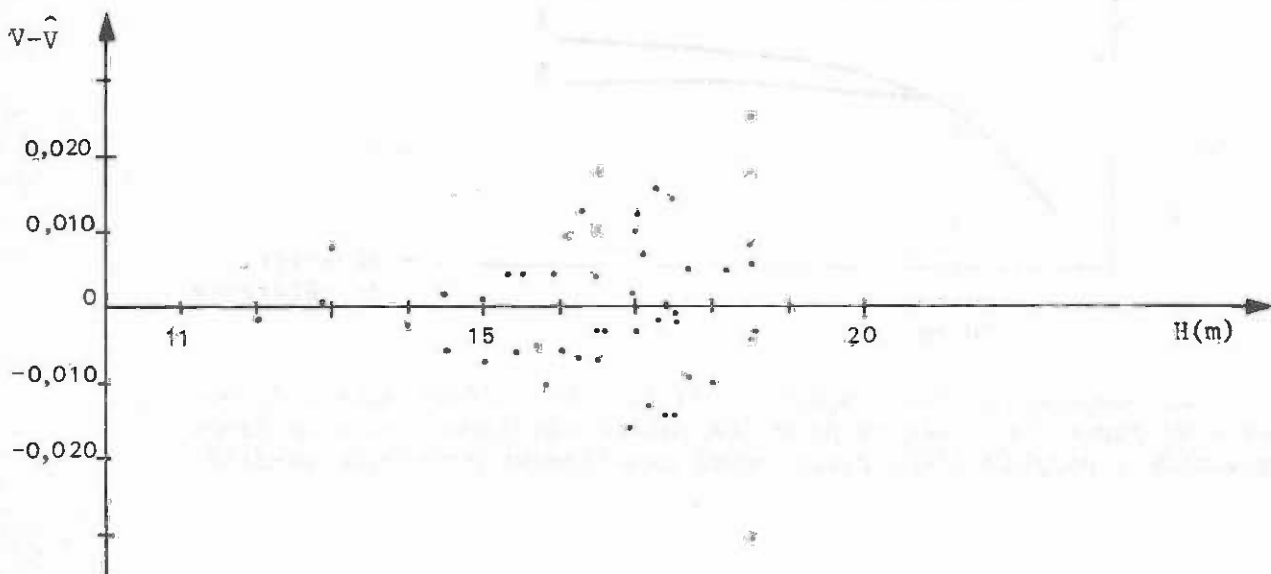
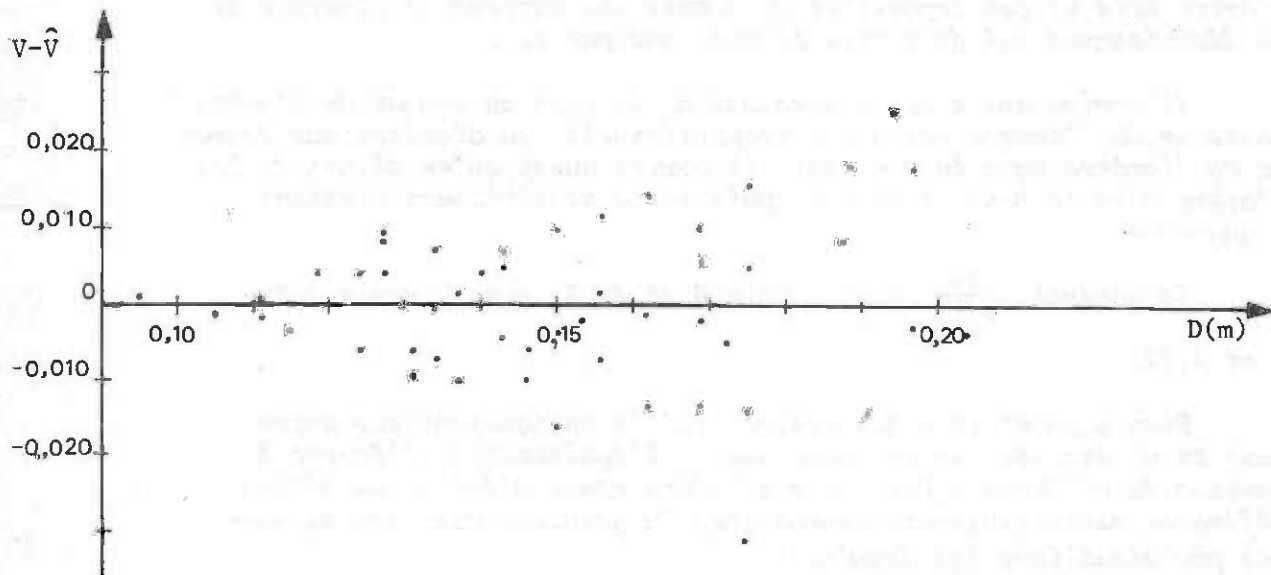
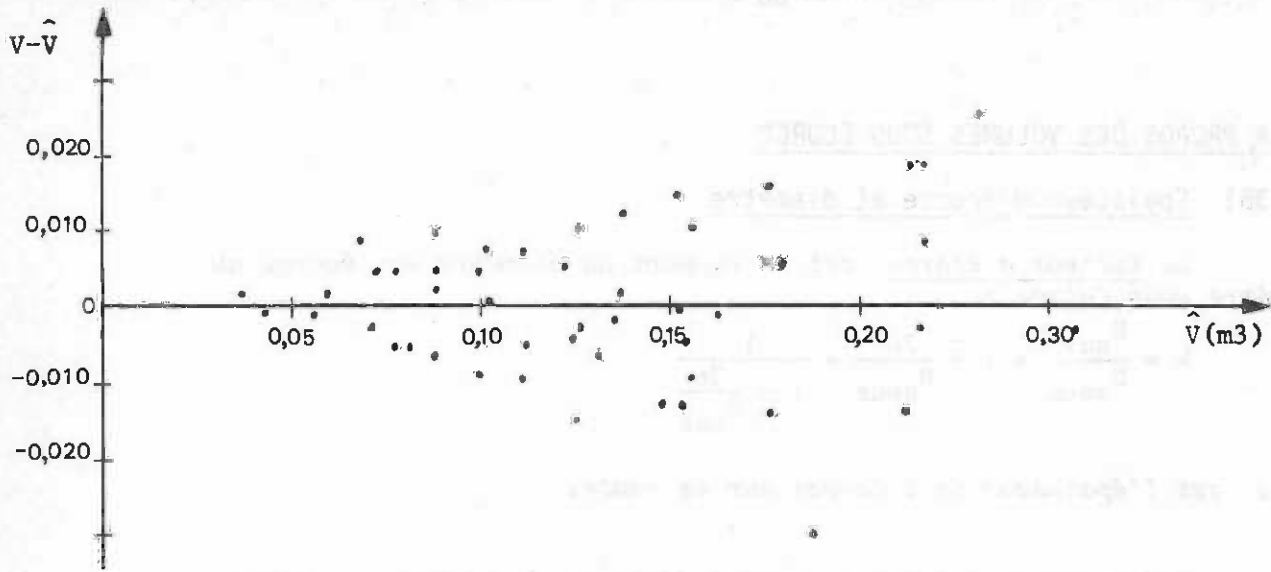
L'intervalle de confiance de V_{TOT} est, au niveau 0,95 :

$$V_{\text{TOT}} \pm 2 \sqrt{\text{var } V_{\text{TOT}}}$$

$$\text{avec : } \text{var } V_{\text{TOT}} = N^2 \text{ var } a + \alpha^2 \text{ var } b + 2Na \text{ cov } (a,b) + \beta \text{ (VR)}$$

$$\text{où on a posé } \alpha = \sum_{i=1}^N D_i^2 H_i \text{ et } \beta = \sum_{i=1}^N D_i^4 H_i^2 .$$

Les trois graphiques de la page suivante sont relatifs au tarif à 2 entrées ; ils montrent que le tarif est correct : les résidus n'ont pas tendance à varier systématiquement, ni avec $\hat{V}$, ni avec D , ni avec H .



36 A PROPOS DES VOLUMES SOUS ECORCE

361. Épaisseur d'écorce et diamètre

Le facteur d'écorce est le rapport du diamètre sur écorce au diamètre sous écorce :

$$k = \frac{D_{\text{sur}}}{D_{\text{sous}}} = 1 + \frac{2e}{D_{\text{sous}}} = \frac{1}{1 - \frac{2e}{D_{\text{sur}}}}$$

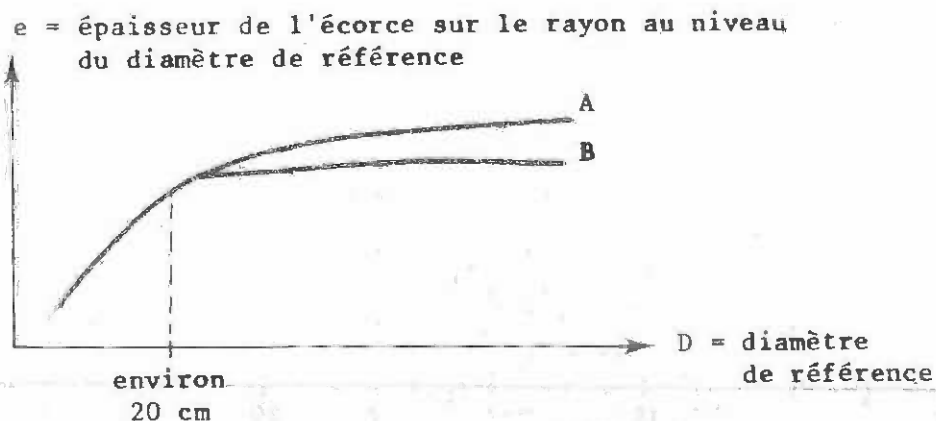
où e est l'épaisseur de l'écorce sur le rayon.

L'épaisseur de l'écorce tend à diminuer de la base au sommet de l'arbre mais il est impossible de donner une expression générale de cette décroissance qui doit être étudiée cas par cas.

Il arrive que k reste constant de la base au sommet de l'arbre : l'épaisseur de l'écorce est alors proportionnelle au diamètre sur écorce (donc au diamètre sous écorce) mais il arrive aussi qu'en allant du bas de l'arbre vers le haut, k diminue puis reste sensiblement constant, puis augmente.

En général, $\frac{2e}{D_{\text{sur}}}$ varie entre 6 et 10 %, donc k varie entre 1,06 et 1,12.

Bien souvent (cas des mesures faites optiquement sur arbre debout) on ne dispose sur un arbre que de l'épaisseur de l'écorce à la hauteur de référence. Pour voir si l'épaisseur d'écorce au niveau de référence varie systématiquement avec la grosseur des arbres, commencer par visualiser les données :



Le nuage de points a souvent l'allure A : l'épaisseur d'écorce augmente de façon non linéaire pour les petits diamètres, puis de façon moins rapide ; parfois l'épaisseur reste sensiblement constante au-delà

d'un certain diamètre (courbe B), mais la liaison est rarement très nette. Les modèles les plus utilisés pour traduire cette relation sont :

$$\begin{array}{ll}
 (1) & e = a_0 + a_1 D \\
 (2) & e = \frac{D}{a_0 + a_1 D} \\
 (3) & e = a_0 D^{a_1} \quad (a_1 < 1)
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \end{array}} \right\} \begin{array}{l} e = \text{épaisseur de l'écorce sur} \\ \text{le rayon au niveau du} \\ \text{diamètre de référence} \\ \\ D = \text{diamètre de référence} \end{array}$$

Bien remarquer qu'appliquer une telle relation à un arbre donné pour estimer l'épaisseur de l'écorce à différents niveaux de mesure du diamètre n'est pas correct a priori, car c'est donner aux variables entrant dans la relation une signification différente de leur définition.

362 Volume sur écorce - Volume sous écorce

362.1 Le pourcentage d'écorce est le rapport du volume de l'écorce au volume sur écorce.

$$P = \frac{V_{\text{écorce}}}{V_{\text{sur}}} = 1 - \frac{V_{\text{sous}}}{V_{\text{sur}}} = \frac{\frac{V_{\text{sur}}}{V_{\text{sous}}} - 1}{\frac{V_{\text{sur}}}{V_{\text{sous}}}}$$

A chaque volume considéré correspond donc un pourcentage d'écorce. Le pourcentage d'écorce relatif au volume fût est le plus souvent considéré.

Pour un arbre, le lien entre P et le facteur d'écorce k dépend du volume considéré et de la variation de k avec la hauteur.

Pour se faire une idée de la forme de la liaison, il semble raisonnable de supposer que le coefficient de forme du fût est le même sur écorce et sous écorce, ce qui s'écrit :

$$\frac{V_{\text{sur}}}{g_{\text{sur}} \times H} = \frac{V_{\text{sous}}}{g_{\text{sous}} \times H} \quad (g = \text{surface terrière})$$

On en déduit :

$$(4) \quad P = 1 - \frac{g_{\text{sous}}}{g_{\text{sur}}} = 1 - \frac{1}{k^2} = \frac{2e}{D_{\text{sur}}} \left(2 - \frac{2e}{D_{\text{sur}}} \right)$$

(exemple : $\frac{2e}{D_{\text{sur}}} = 8 \% \rightarrow k = 1,087 \rightarrow P = 15,4 \%$).

362.2 Passage du volume sur écorce au volume sous écorce

Si on a mesuré le volume sur écorce et le volume sous écorce d'un ensemble d'arbres, une première méthode est de calculer deux tarifs :

$$V_{\text{sur}} = f(D_{\text{sur}}) \quad \text{ou} \quad f(D_{\text{sur}}, H)$$

$$V_{\text{sous}} = g(D_{\text{sur}}) \quad \text{ou} \quad g(D_{\text{sur}}, H)$$

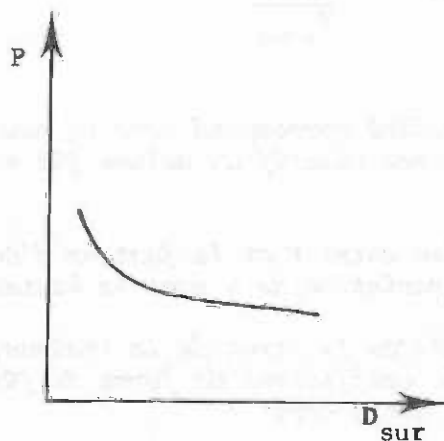
en contrôlant que V_{sous} est toujours inférieur à V_{sur} car il peut arriver que les lignes de régression se croisent.

La méthode suivante est plus employée :

- on calcule le tarif donnant le volume sur écorce :

$$V_{\text{sur}} = f(D_{\text{sur}}) \quad \text{ou} \quad V_{\text{sur}} = f(D_{\text{sur}}, H)$$

- on cherche une formule reliant le pourcentage d'écorce aux entrées du tarif. C'est en général seulement au diamètre de référence que l'on relie P :



Les modèles suivants :

$$P = a_0 + \frac{a_1}{D_{\text{sur}}} + \frac{a_2}{D_{\text{sur}}^2}$$

(conséquence de (1) et (4))

$$P = a_0 e^{-a_1 D_{\text{sur}}}$$

donnent souvent satisfaction.

- on prend pour tarif donnant le volume sous écorce la formule :

$$V_{\text{sous}} = (1 - P) V_{\text{sur}}$$

Exemples :

$$\left. \begin{array}{l} v_{\text{sur}} = a_0 + a_1 D^2 \\ p = a_2 + \frac{a_3}{D} + \frac{a_4}{D^2} \end{array} \right\} \Rightarrow v_{\text{sous}} = \left(1 - a_2 - \frac{a_3}{D} - \frac{a_4}{D^2} \right) (a_0 + a_1 D^2)$$

(D
désigne
D_{sur})

$$\left. \begin{array}{l} v_{\text{sur}} = a_0 + a_1 D^2 \\ p = a_2 e^{-a_3 D} \end{array} \right\} \Rightarrow v_{\text{sous}} = \left(1 - a_2 e^{-a_3 D} \right) (a_0 + a_1 D^2)$$

4 ESTIMATION DES VOLUMES UTILES

Les mesures faites en forêt sur un arbre debout ou abattu fournissent principalement des volumes bruts ; les mesures complémentaires qui peuvent être faites (sondage à la tarière pour détecter les creux, observation de défauts apparents, ...) ne peuvent que fournir des indications sur les volumes utilisables. Connaitre ces derniers impose de poursuivre les observations jusque sur les lieux de transformation du bois.

Voici un exemple de procédure utilisée dans les forêts denses tropicales (réf. 17) qui permet, si elle est menée complètement, de passer des volumes fût bruts aux volumes utilisés.

41 UN EXEMPLE DE METHODE APPLIQUEE EN FORET DENSE TROPICALE

411 Recueil des données

La procédure comprend deux phases.

411.1 On effectue dans la région inventoriée des appréciations qualitatives d'arbres sur pied destinées à ventiler le volume brut du fût en différentes fractions correspondant chacune à une qualité de bois sur pied.

Le fût de chaque arbre est virtuellement divisé en trois parties d'égales hauteurs et chaque partie reçoit trois notes (ces notes vont chacune de 1 à 5 - Voir la page suivante) qui qualifient respectivement : la forme du fût, son aspect sanitaire et l'aspect du bois. Les trois notes données à chaque tiers de fût sont regroupées en une seule variant de 1 à 5 selon la correspondance suivante :

Ensemble des 3 notes données au 1/3 de fût			Note globale donnée au 1/3 de fût	Ensemble des 3 notes données au 1/3 de fût			Note globale donnée au 1/3 de fût
Forme (F)	Aspect sanitaire (S)	Aspect du bois (B)		Forme (F)	Aspect sanitaire (S)	Aspect du bois (B)	
1	1	1	1	1	3	1	3
1	1	2		1	3	2	
2	1	1		2	3	1	
2	1	2		1	3	3	
1	2	1	2	3	3	1	
2	2	1		2	3	2	
1	2	2		2	3	3	
2	2	2		3	3	2	
1	1	3		3	3	3	
1	2	3		un 4 à la troisième colonne.			
2	2	3		Tous les ensembles avec un ou plusieurs 4 (sauf un 4 à la troisième colonne).			
2	2	3		Tous les ensembles avec un ou plusieurs 5.			
3	1	1					
3	1	2					
3	1	3					
3	2	2					
3	2	3					

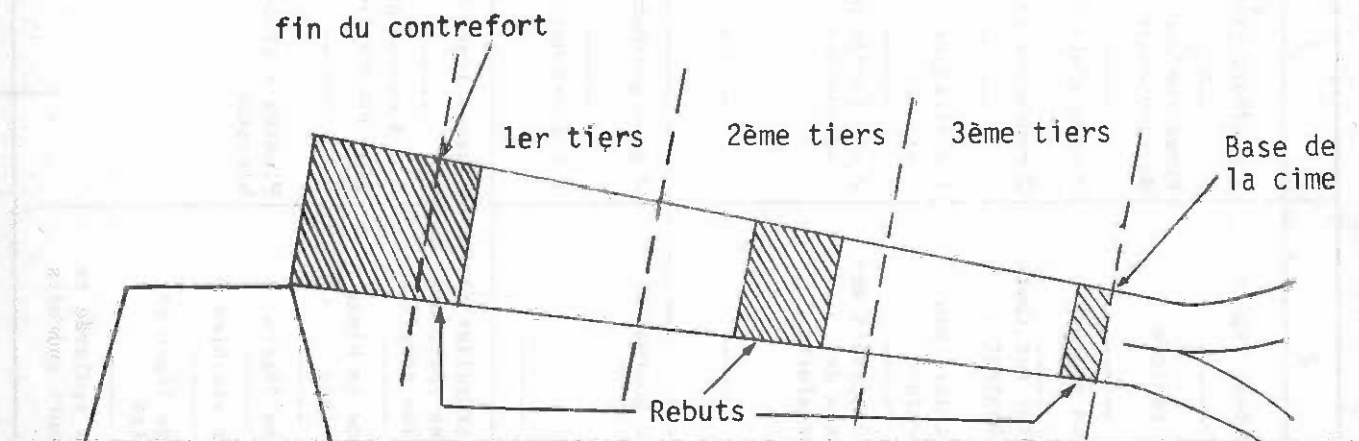
VALEUR DES NOTES

Notes →	1	2	3	4	5
FORME (F)	Droite et Cylindrique	1 courbure légère ----- Forme conique ----- Section ovale ----- 1 méplat sur toute la hauteur ----- 1 gouttière peu accentuée ----- 2 ou 3 méplats au-dessus des contreforts -----	1 courbure prononcée ----- Forme conique + Section ovale ----- 2 ou 3 méplats ----- 2 courbures légères ----- 1 contrefort allongé ----- 2 gouttières peu accentuées -----	1 courbure prononcée + 1 contrefort allongé ou + 1 gouttière 2 m ou + 2 ou 3 méplats ----- 1 contrefort allongé + 1 gouttière 2 m ou + 2 ou 3 méplats ----- 1 gouttière 2 m + 2 ou 3 méplats ----- 2 courbures (prononcées) ----- 1 courbure prononcée + 1 courbure légère ----- 1 côte	Section cannelée Section côtelée (2 côtes ou plus) ----- 1 coude ----- 1 "baïonnette" ----- 1 gouttière prononcée de 2 mètres -----
ASPECT SANITAIRE (S)	Saine (ni gourmand, ni noeuds couverts)	1 gros gourmand -----	2 gros gourmands ----- 1 traînée noire -----	Plus de 2 gros gourmands ----- 1 branche cassée 1 trou de pic	Pourriture visible au pied ----- 1 noeud pourri Tronc sonnante creux
ASPECT DU BOIS (B)	Fil droit et aucun défaut (ni épines, ni picots, ni grains d'orge, ni traces de blessures, ni broussins, etc...)	Fil irrégulier (très légères côtes dans tous les sens) ----- 1 trace de blessure cicatrisée ----- 1 bosse légère ----- Epines visibles ----- Vissage léger et localisé ----- Ecorce soulevée en plusieurs endroits	Vissage léger < 15° ----- 2 à 3 bosses ou gros noeuds cicatrisés ----- Plusieurs traces de blessure	Vissage léger < 15° + léger bosselage ----- Plus de 3 bosses en gros noeuds cicatrisés	Fil vissé à > 15° ----- Roulant bosselé -----

On estime en moyenne que le volume du fût se répartit ainsi entre les tiers de hauteur : 44 % pour le tiers inférieur, 33 % pour le tiers médian, 23 % pour le tiers supérieur. On peut alors ventiler le volume brut du fût dans les 5 classes de qualité apparente.

411.2 Les 5 qualités qui résultent de la 1ère phase étant appréciées d'après des défauts extérieurs visibles sur arbres debout, ne traduisent qu'approximativement la qualité réelle du bois. Une deuxième phase consiste à se rendre sur des exploitations forestières situées à proximité de la région inventoriée : on effectue avant abattage les appréciations qualitatives sur des arbres et après abattage, on suit l'évolution de chaque tiers de fût :

- a/ Mesure des parties éventuelles laissées en forêt avant le débardage au tracteur : rebut à la culée, rebut dû à l'éêtage et éventuellement rebut dans le fût lui-même pour éliminer un gros défaut.



- b/ Mesure des rebuts éventuels laissés après le débardage sur le parc de chargement.
- c/ Si possible, mesure des parties laissées sur le parc de la scierie, ou avant chargement sur bateau en cas d'exportation.

On conçoit que ces opérations sont délicates et nécessitent un personnel qui s'y consacre à plein temps pendant plusieurs mois. Souvent la phase c/est impossible à effectuer.

412 Analyse des résultats

412.1 Si seules les phases a/ et b/ sont effectuées, on peut estimer pour chacune des 5 qualités apparentes le pourcentage du volume qui sort de la forêt.

Exemple : Région de SIBITI ZANAGA (République Populaire du CONGO)
Okoumé exploité pour déroulage à Pointe-Noire : 76 arbres observés.

Qualités apparentes	1	2	3	4	5	Total
Répartition du volume fût des 76 arbres	42,9%	35,1%	12,9%	1,7%	7,4%	100 %
Pourcentage du volume sorti de forêt	73,6%	56,7%	10,6%	9 %	25,8%	
Volume sorti de forêt Volume fût brut sur pied, toutes qualités	31,6%	20 %	1,4%	0,2%	1,9%	55 %

$$0,429 \times 0,736$$

55 % est le coefficient de commercialisation global : il représente le rapport :

$$\frac{\text{Volume sorti de forêt}}{\text{Volume sur pied}}$$

Supposons que les appréciations qualitatives effectuées sur N arbres lors d'un inventaire d'une forêt aient fourni les résultats suivants :

Qualités apparentes	1	2	3	4	5	Total
Répartition du volume fût des N arbres	50 %	30 %	8 %	2 %	10 %	100 %

On peut estimer, si cette forêt est destinée à être exploitée dans le même but et dans les mêmes conditions, que son pourcentage de commercialisation sera :

$$(0,50 \times 0,736) + \dots + (0,10 \times 0,258) = 57,4 \%$$

412.2 Si la phase c/ est effectuée, on peut de plus ventiler ce volume en différentes catégories (exportation en grume, sciage local,...).

42 ESTIMATION DE VOLUMES UTILES PAR UN TARIF DE CUBAGE

On peut procéder par voie directe : abattre un échantillon d'arbres, mesurer sur chacun d'eux le volume utile V_u et établir un tarif $V_u = f(D)$ ou $V_u = f(D, H)$.

Cette procédure est rarement suivie car elle exige un échantillon beaucoup plus important que celui qui est nécessaire à l'établissement d'un tarif donnant le volume brut : à la variabilité de la forme des arbres s'ajoute en effet la variabilité des défauts internes.

On procède donc en général par voie indirecte :

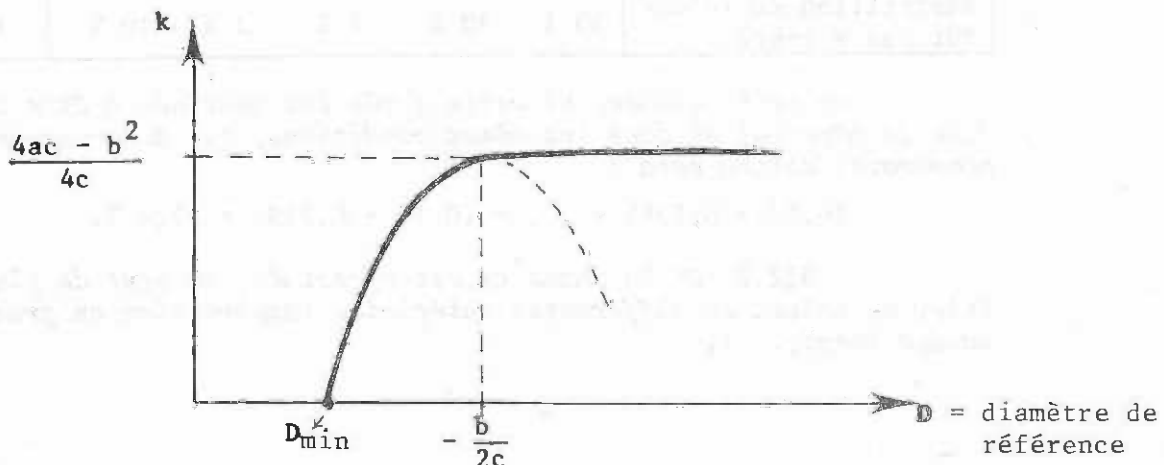
- (a) établissement grâce à un échantillon d'arbres, d'un tarif donnant le volume brut V
- (b) abattage d'arbres (appartenant de préférence à l'échantillon), mesure du volume brut V et du volume utile V_u
ce qui donne pour chaque arbre le rapport $k = \frac{V_u}{V}$
- (c) grâce à ces valeurs, ajustement d'un modèle donnant k en fonction des entrées du tarif ; on se limite en général à un modèle en fonction de D seul.

1er exemple : $k = a + bD + cD^2$; cette parabole part d'un point où le diamètre de référence est égal à $D_{\min}$, diamètre minimum d'une bille utilisable :

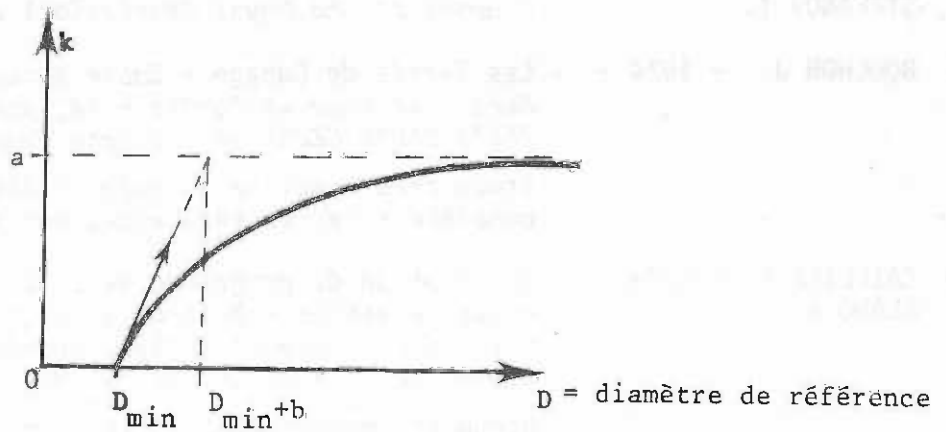
$$D_{\min} = \frac{\sqrt{b^2 - 4ac} - b}{2c}$$

Pour $D = -\frac{b}{2c}$, la parabole atteint son maximum.

La partie descendante n'est pas utilisée ; on la remplace par un palier horizontal.



2ème exemple : $k = a \left(1 - e^{-\frac{D_{\min} - D}{b}} \right)$



(d) on prend alors pour tarif "volume-utile" l'expression :

$$V_u = kV$$

où V est la fonction établie en (a) et k la fonction établie en (c).

BIBLIOGRAPHIE SUCCINCTE DE LA PARTIE I

- 1 BONEVA L.I. - 1971 - Splines transformations : three new diagnostic aids for the statistical data-analyst -
KENDALL D. *Journal of the Royal Statistical Society Vol.33, p1-71.*
STEFANOV I.
- 2 BOUCHON J. - 1974 - Les Tarifs de Cubage - *Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts - 19, avenue du Maine - 75732 PARIS CEDEX 15 (Texte français seulement)*
Etude très complète du sujet - Bibliographie très complète - Peu de références aux forêts tropicales.
- 3 CAILLIEZ F. - 1979 - Description du programme de calcul de tarifs de
BLANC N. cubage d'arbres - Note n° 17 - *Centre Technique Forestier Tropical - 45Bis, avenue de la Belle Gabrielle - 94130 NOGENT SUR MARNE France*
Document interne au C.T.F.T., envoyé gratuitement sur simple demande - Texte français seulement.
Description détaillée d'un programme utilisé au C.F.T.F. - Exposé mathématique - Listings FORTRAN et notice d'utilisation - Exemple.
- 4 DRAPER N.R. - 1966 - Applied Regression Analysis - Edit. J. WILEY
SMITH H. Exposé mathématique complet de niveau élevé.
- 5 FREESE F. - 1964 - Linear Regression Methods for Forest Research -
USDA Forest Service Research Paper - FLP17
Petit manuel très clair sur les techniques de régression.
- 6 HUSCH B. - 1971 - Forest Mensuration - The Ronald Press Co., NEW-YORK
MILLER C.I. Livre de dendrométrie comprenant 4 chapitres sur
BEERS T.W. l'inventaire forestier.
- 7 LANLY J.P. - 1977 - Manuel d'Inventaire Forestier - FAO - ROME.
Versions anglaise et française.
Essentiellement consacré à l'inventaire des forêts tropicales hétérogènes, livre utile pour la dendrométrie de ces peuplements.
- 8 LETOUZEY R. - 1969 - Manuel de Botanique Forestière - Afrique Tropicale -
3 fascicules. *Centre Technique Forestier Tropical - 45Bis, avenue de la Belle Gabrielle - 94130 NOGENT SUR MARNE France*
Le fascicule I comprend une description complète (en termes qualitatifs) de la morphologie des arbres

- 9 LOETSCH F. - 1964 - Forest Inventory - Vol. 1
HALLER K.E.
- LOETSCH F. - 1973 - Forest Inventory - Vol. 2 - BLV Verlagsgesellschaft -
ZÖHRER F. - München - Bern - Wien
HALLER K.E.

Bien que principalement consacrés à l'inventaire forestier, ces deux livres très complets contiennent de très importants développements sur les problèmes de dendrométrie - Nombreuses références aux forêts tropicales.

- 10 MACKAY E. - 1964 - Dasometria - Escuela Superior de Ingenieros de Montes -
Madrid (en espagnol)

Nombreuses études géométriques ; pas de références aux forêts tropicales ni de bibliographie.

- 11 MATERN B. - 1956 - On the geometry of the Cross-Section of a Stem -
Meddelanden Från - Statens Skogsforskningsinstitut.
Band 46 - NR 11

Article sur l'étude mathématique de la forme des sections - Conséquences pratiques.

- 12 PARDE J. - 1961 - Dendrométrie - Ecole Nationale des Eaux et Forêts-
14, rue Girardet - 54042 NANCY - France (Texte français seulement).

Livre très utile et très pratique bien qu'un peu ancien - Lecture facile - Peu de références aux forêts tropicales.

- 13 PRODAN M. - 1965 - Holzmesslehre - J.D. Sauerländer's Verlag -
Frankfurt am Main (En allemand)

Livre très complet sur la dendrométrie, la construction des tarifs et l'estimation des accroissements. Nombreuses références bibliographiques.

- 14 PRODAN M. - 1968 - Forest Biometrics - Pergamon Press (Traduction de
Forstliche Biometrie - 1961).

Illustration, sur des problèmes forestiers, de nombreuses techniques statistiques - Nombreuses illustrations numériques.

- 15 SNEDECOR G.W. - 1967 - Statistical Methods (Sixième édition) (Versions
anglaise et française)

Manuel de base sur les méthodes statistiques -
Pas de référence particulière aux problèmes forestiers.

EVALUATION DE LA QUALITE DES BOIS

Outre les manuels de dendrométrie cités plus haut, citons

16

IUFRO, Section 25 - 1969, Compte-rendu de la conférence tenue à Reinbek, Allemagne, par le groupe de travail sur "les problèmes dendrométriques dans les inventaires forestiers tropicaux".

Mitt. Bundesforsch. anst. f. Forst - und Holzw. Komm. verl. Max Wiedebusch, HAMBURG.

Compte-rendu des débats et des documents soumis à cette conférence qui était surtout centrée sur l'évaluation de la qualité et sur les études de recolement.

17

Centre Technique Forestier Tropical - Revue Bois et Forêts des Tropiques - n° 129 - 1970 - "Estimation des volumes commercialisables dans les inventaires forestiers tropicaux par sondages" - LANLY J.P. - LEPITRE C. -

18

C.F.I. - University of Oxford - Department of Forestry - 1977 - Appendices to "A manual on species and provenances research with particular reference to the tropics" Tropical Forestry Papers n° 10 A.

Imprimé pour le cubage d'arbres sur pied au Relascope de Bitterlich (Volume fût)

Essence code 		Bloc Layon Parcelle 		Ecorce Hauteur au-dessus du sol m	
Mensurateur : Date : 		Emplacement 		F S B 	
Distance horizontale m		Cotation		Epaisseur sur le rayon mm	

Cocher les parties non utilisables		Hauteurs relatives lues	Unités Relascope lues		Hauteurs relatives lues	Unités Relascope lues
			bandes 1/4 de bandes			bandes 1/4 de bandes