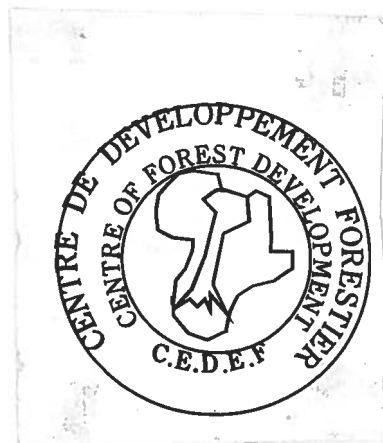


COLLECTION D.N.A

TECHNIQUES DE MESURES DES ARBRES ET DES PEUPLEMENTS FORESTIERS

Tome 2

DJOMO NJEPANG ADRIEN



CEDEF

Centre de Développement Forestier

Le CEDEF est un centre qui s'est donné pour mission de :

- contribuer à l'exploitation des ressources forestières;
- protéger l'environnement;
- vulgariser les techniques et outils simples.

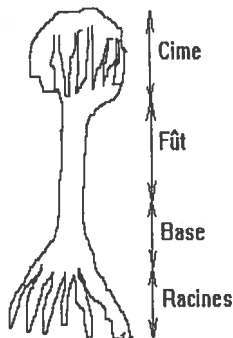
Dans cette optique, nous avons édité des ouvrages dont la liste est la suivante :

- Techniques de mesures des arbres et des peuplements forestiers. Tome1 et Tome2.
- Notions de Cartographie.
- Utilités des photographies aériennes dans la planification des ressources forestières.
- Présentation d'une exploitation forestière type : cas de Sofibel Bélabo.
- Barème de cubage vol1 et vol2.
- Méthodes de construction des tables de cubage et de production des arbres et des peuplements forestiers.

De même, nous avons conçu et monté des instruments d'utilisation facile pour la mesure des arbres et des peuplements forestiers.

Le CEDEF intervient sur le terrain par :

- la formation des cadres et techniciens forestiers;
- l'assistance technique;
- la réalisation des services en sous-traitance.
- la vulgarisation des méthodes d'aménagement forestier et sylvicoles.



L'arbre est le bien le plus précieux de notre environnement. Il est en outre un produit commercial. Protégeons-le par une exploitation rationnelle.

AVANT PROPOS

Le mesurage des arbres et des peuplements forestiers est un problème quotidien en foresterie. La science qui se penche sur cette étude est la dendrométrie.

Dans le tome 1, nous avons traité essentiellement des techniques de mesures des arbres sur pied ou abattus. Dans ce tome, l'accent est beaucoup plus porté sur l'évaluation des peuplements forestiers. De ce fait, nous avons présenté des outils nécessaires à la collecte, à l'analyse et au traitement des données recueillies dans ces peuplements. Ainsi, le document est structuré comme suit :

- Notions de statistique nécessaires en dendrométrie.
- Techniques de base d'échantillonnage.
- Stratification forestière du territoire.
- Télédétection et application.
- Les inventaires forestiers.
- Les inventaires par échantillonnage sous angle constant.

En gardant à l'esprit qu'il s'agit d'une oeuvre humaine, susceptible d'être perfectible, nous pensons tout de même que ce livre peut être utilisé par:

- * des élèves des Lycées Techniques,
- * des élèves de l'ENEF,
- * des techniciens d'entreprise
- * des étudiants,
- * des ingénieurs,
- * des chercheurs,
- * des enseignants,
- * des opérateurs économiques,
- * des administrateurs,

tous opérant dans le secteur Forêt et environnements.

Nous tenons à remercier particulièrement le Dr Foahom Bernard pour toutes les remarques et suggestions faites dans ce livre. Nos remerciements s'adressent également à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de cet ouvrage; nous pensons à M. Nguenang Jean Pierre, à l'équipe d'Agésfo et son directeur M. Kouomo Clotaire, à Tchinkou Pulchérie, M. Tema-teu Louis.

C'est avec un très grand plaisir que nous accueillerons toute critique, suggestion, commentaires ou corrections à nous adressé par nos lecteurs.

DJOMO N. ADRIEN

CHAPITRE I
NOTIONS DE STATISTIQUES
NECESSAIRES
EN DENDROMETRIE

CHAPITRE I NOTIONS DE STATISTIQUES NECESSAIRES EN DENDROMETRIE

I.1 INTRODUCTION

La dendrométrie est la science qui apprend à mesurer les arbres et les peuplements forestiers. La statistique quant-à elle est la branche de la mathématique appliquée ayant pour but l'étude des faits et des données numériques. Dès lors, on comprend qu'il est difficile d'envisager dendrométrie sans statistique. Ceci se justifie davantage avec l'emploi des calculatrices programmables et de l'ordinateur. Nous allons donc traiter dans les lignes qui suivent des notions essentielles de cette science dont a besoin le dendrométricien pour le traitement de ses données.

I.2 DESCRIPTION DES DONNEES RECUEILLIES SUR LE TERRAIN.

Lorsqu'on a recueilli des données sur le terrain, la première chose à faire est de les regrouper c'est-à-dire les présenter de façon simple, facile à comprendre et à visualiser. Le meilleur moyen d'y parvenir est de dresser des tableaux ou des graphiques. Ce travail s'effectue de façons méthodique suivant qu'il s'agisse d'une variable aléatoire discrète ou continue et aussi en fonction du nombre total d'individus dans la population. Le regroupement des données recueillies s'effectue directement dans un ensemble ou mieux dans un tableau où tous les événements sont représentés. En foresterie, on a le plus souvent affaire à des variables statistiques continues c'est-à-dire des variables qui peuvent prendre toutes les valeurs réelles comprises dans un intervalle. Par exemple, la hauteur, le diamètre et le volume des arbres sont des variables statistiques continues.

Dans le cas des variables continues, on regroupe généralement les données en classe. Il s'agit d'intervalles semi-ouvert notée $[a,b[$ où «a» représente la borne inférieure et «b» la borne supérieure. Le milieu de la classe s'obtient en posant:
 $m = (a+b)/2$ et la largeur de celle-ci est: $l = b - a$.

En général, dans un regroupement statistique la largeur de la classe est identique dans toutes les classes et le milieu de celle-ci est la valeur attribuée par défaut à tous les événements de cette classe.

Par exemple, au cours d'un inventaire le travail à effectuer est de prendre des mesures de diamètre d'arbres échantillons d'une population donnée; le travail du technicien consistera à prendre ces mesures de diamètres avec la précision recherchée et de noter les résultats dans une ou plusieurs fiches conçues à cet effet. Au bureau, lors du traitement des données, on doit commencer par les regrouper; pour ce faire, on doit procéder par étapes.

* Si la variable à étudier est le diamètre à hauteur de poitrine, on pourra dans un but de simplification grouper les résultats en classe de diamètre. Ainsi par exemple si la largeur de la classe est de 10, sera considéré comme appartenant à la classe de 70 cm tous les arbres dont le diamètre est compris entre 65 et 75 cm. De même, si la largeur de la classe est de 5, les arbres de classe 70 cm seront tous les arbres de diamètre compris entre 67.5 cm et 72.49 cm.

* On détermine ensuite la fréquence de chaque classe de diamètre, c'est à dire le nombre de fois qu'apparaît cette classe de diamètre.

* On récapitule les résultats dans un tableau.

Voici un exemple d'inventaire réalisé dans une population préalablement stratifiée, c'est-à-dire les peuplements ont été regroupés en blocs homogènes appelés strates. On y a distingué 4 strates : DHS, DHC, SA, SJ.

DHS : Forêt Dense Humide Sempervirente.
 DHC : Forêt Dense Humide Semi-Caducifoliée.
 SA : Forêt Secondaire Adulte.
 SJ : Forêt Secondaire Jeune.

Classe de diamètre (cm)	Strates				Total
	DHS	DHC	SA	SJ	
60	-	-	2	10	12
70	-	-	15	8	23
80	2	3	5	4	14
90	20	18	3	1	42
100	30	21	1	-	52
110	42	8	-	-	50
120	27	2	-	-	29
130	13	-	-	-	13
140	5	-	-	-	5
150	2	-	-	-	2
Total	141	52	26	23	242

A titre d'exemple, on lit dans ce tableau que la fréquence absolue ou le nombre d'arbres de classe de diamètre 80 dans la strate SA est de 5 et celui des arbres de classe diamètre 130 dans la strate DHC est nulle etc.

On peut également regrouper les données en tenant compte des fréquences relatives et des fréquences absolues cumulées.

La fréquence relative d'une classe est égale à la fréquence absolue de cette classe divisée par le nombre total d'individus.

on pose $f_i = \frac{n_i}{N}$ où n_i : fréquence absolue.
 N : nombre total d'individus.
 f_i : fréquence relative de la classe i .

Elle peut être exprimée en pourcentage. La somme des fréquences relatives est égal à 1 (ou à 100 si elle est exprimée en pourcentage).

La fréquence absolue ou relative cumulée s'obtient par sommation successive des fréquences absolues ou relatives.

On peut donc dresser un autre tableau dans lequel sont représentées les fréquences relatives et cumulées.

Classe de diamètre	Fréquence absolue (n_i)	Fréquence absolue cumulée ($\sum n_i$)	Fréquence relative f_i (%)	Fréquence relative cumulée ($\sum f_i$)
60	12	12	5,0	5,0
70	23	35	9,5	14,5
80	14	49	5,8	20,3
90	42	91	17,4	37,7
100	52	143	21,4	59,1
110	50	193	20,7	79,8
120	29	222	12,0	91,8
130	13	235	5,3	97,1
140	5	240	2,1	99,2
150	2	242	0,8	100,0
Total	242		100,0	

Les tableaux de distribution de fréquence suffisent en général pour décrire la population. Cependant certains graphiques permettent d'avoir une idée beaucoup plus rapide et visuelle de cette distribution. On peut donc distinguer:

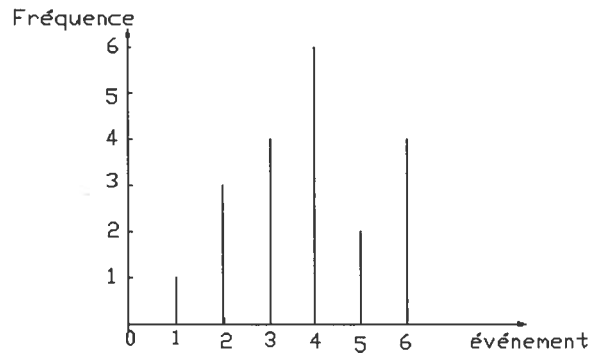
Les diagrammes en bâtons.

Ce type de diagramme est beaucoup plus utilisé lorsqu'on a affaire à des variables statistiques discrètes c'est-à-dire lorsque les événements sont constitués des nombres finis.

Exemple :

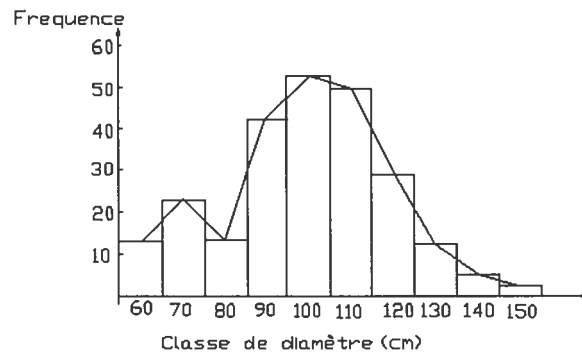
On détermine au cours d'une série de 20 lancers de dé le nombre de fois qu'apparaît chaque face. Au terme de la série, on obtient les nombres 1, 3, 4, 6, 2, 4 correspondant respectivement aux faces 1,

2, 3, 4, 5, 6. Construisons le diagramme en bâtons correspondant.



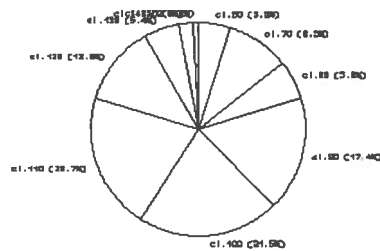
- L'histogramme

L'histogramme est beaucoup plus pratique pour illustrer la distribution des fréquences des variables aléatoires continues groupées en classes.



- Les diagrammes à secteurs.

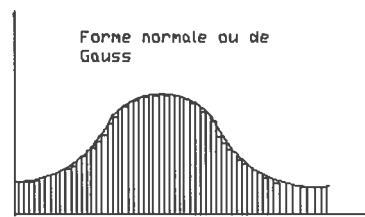
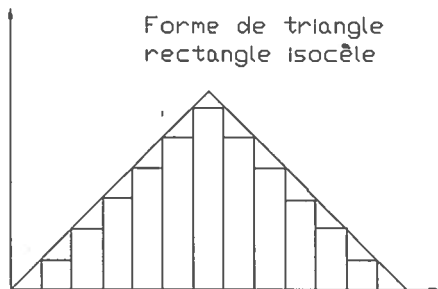
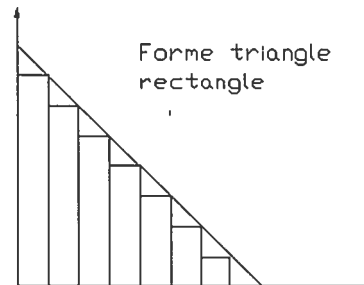
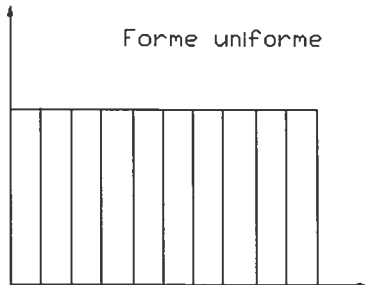
C'est un cercle subdivisé en plusieurs secteurs de taille variable représentant chacun selon son importance un événement de la variable statistique considérée.



Les tableaux et les graphiques présentent la distribution des

fréquences de façon simple facile à visualiser. Il reste encore que ces données sont difficiles à manier. Pour palier à cette difficulté, on remplace ces données par un petit nombre de paramètres qui caractérisent la position de la valeur centrale et la dispersion des autres données autour de cette valeur.

Quelques formes de distribution de fréquences.



I.3 CARACTERISTIQUES DE POSITION OU MESURE DE LA TENDANCE CENTRALE.

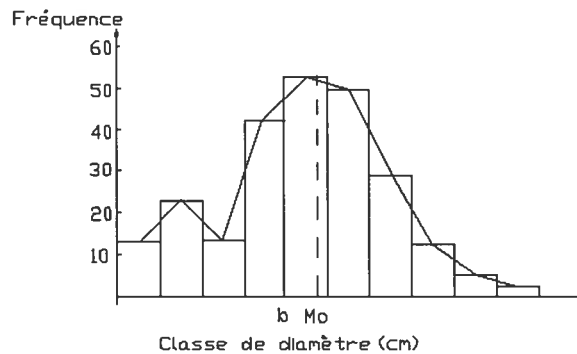
Trois paramètres sont généralement utilisés pour caractériser la tendance centrale d'une distribution. Il s'agit de la médiane, du mode et la moyenne. De tous ces paramètres, la moyenne est celui qui est le plus utilisé car non seulement il est facile à calculer, mieux encore il est très utilisé pour la détermination des paramètres de dispersion.

I.3.1 Le mode.

D'une façon simple, le mode correspond à la donnée qui apparaît le plus fréquemment, c'est-à-dire ayant la plus haute fréquence. Pour les données groupées en classes, le mode est la classe ayant la plus haute fréquence. Pour déterminer avec précision le mode à l'intérieur de la classe modale, en posant:

$$Mo = bo + \frac{\Delta 1}{\Delta 1 + \Delta 2} L$$

- On bo : borne inférieure de la classe modale.
 $\Delta 1$: différence entre la fréquence de la classe modale et celle de la classe précédente.
 $\Delta 2$: différence entre la fréquence de la classe modale et celle de la classe qui suit.
 L : largeur de la classe modale.



Dans cet exemple, la classe modale est de 100 cm. On peut déterminer avec précision le mode à l'intérieur de classe modale. Nous avons alors :

- $bo = 95$ cm
 $\Delta 1 = 52 - 42 = 10$.
 $\Delta 2 = 52 - 50 = 2$. et $L = 10$ cm.
il vient :

$$Mo = 95 + \frac{10}{10 + 2} \times 10 = 103 \text{ cm}$$

Quelques caractéristiques du mode.

- Il est facile à calculer mais est moins utilisé par rapport aux autres paramètres.
- On peut avoir plus d'un mode dans une distribution de fréquence. Dans ce cas on parle de distribution bi-modale s'il y en a 2, ou pluri-modale s'il y en a plus de 2.
- Il peut aider à subdiviser la population en populations beaucoup plus homogènes, lorsqu'il y a la présence de plusieurs modes dans une distribution.
- IL ne tient pas compte de toutes les données et n'est pas par conséquent influencé par les données extrêmes.

- Le choix des classes peut influencer sa valeur.

I.3.2 La médiane.

La médiane est la donnée qui sépare les individus supposés rangés par ordre croissant ou décroissant, en deux groupes d'effectif égal. IL correspond à la donnée :

$$\text{de rang } \frac{N + 1}{2} \text{ si } N \text{ est impair.}$$

$$\text{milieu entre les données de rang } \frac{N}{2} \text{ et } \frac{N}{2} + 1 \text{ si } N \text{ est pair}$$

avec N effectif total de la population.

Lorsque les données sont regroupées dans un tableau, il est plus facile de déterminer la médiane à l'aide de la fréquence relative cumulée. Dans ce cas, la médiane est la première valeur de la variable où la fréquence relative cumulée atteint ou dépasse 0,5 (ou 50% si elle exprimée en pourcentage). Pour les données groupées en classe, on peut déterminer avec précision la médiane à l'intérieur de la classe médiane, on pose:

$$Md = b + \left(\frac{0,5 - F}{f} \right) L$$

avec :

b : borne inférieure de la classe médiane

F : fréquence relative cumulée de la classe qui précède la classe médiane.

f : fréquence relative de la classe médiane.

L : largeur de la classe médiane.

N.B. On peut remplacer 0,5 par 50 si la fréquence relative est exprimée en pourcentage %.

Dans le cas de notre exemple, pour déterminer la médiane, on peut procéder de 2 façons :

1- Soit constater dans la table que la fréquence relative cumulée dépasse pour la première fois 50% dans la classe de diamètre 100 cm. Il s'agit donc de la classe médiane.

2- L'effectif total de la population N est de 242. La valeur de la variable correspondant au rang N/2 et N/2 + 1 c'est-à-dire 121 et 122 est la classe de diamètre 100 cm.

Puisque $\frac{100 + 100}{2} = 100$, cette classe est donc la classe de diamètre.

Pour déterminer avec précision la médiane à l'intérieur de cette classe, on a :

$b = 95$ cm; $F = 37,7$; $f = 21,4$; $l = 10$ cm. D'où

$$Md = 95 + \left(\frac{50 - 37,7}{21,4} \right) 10 = 100,75 \text{ cm}$$

Quelques caractéristiques de la médiane.

- Elle est facile à déterminer et est plus utilisée que le mode, mais moins que la moyenne.
- Elle ne tient pas compte de toutes les données, mais plutôt de la position. Elle n'est donc pas par conséquent influencée par les données extrêmes.
- Elle est surtout utilisée lorsque la distribution des fréquences est dissymétrique.
- Le choix des classes peut influencer sa valeur, si on regroupe les données en classes.

I.3.3 La moyenne

Il s'agit de la moyenne arithmétique. C'est la somme de toutes les valeurs de la variable statistique x_i divisée par l'effectif total N .

$$\mu = \frac{\sum x_i}{N}$$

Dans le cas des données regroupées dans une table, il est plus facile de calculer la moyenne en utilisant la formule suivante :

$$\mu = \frac{\sum n_i \cdot x_i}{N} \quad \text{avec :}$$

x_i : valeur de la variable statistique de rang i .

n_i : fréquence absolue de x_i .

N : effectif total

On peut aussi calculer la moyenne en utilisant la fréquence relative; Dans ce cas, la formule utilisée est la suivante :

$$\mu = \sum f_i \cdot x_i; \quad f_i : \text{fréquence relative de } x_i.$$

Exemple : La moyenne de la population étudiée ci-dessus est de :

$$\mu = \frac{12 \times 60 + 23 \times 80 + \dots + 5 \times 140 + 2 \times 150}{242} = 99,59 \text{ cm}$$

Quelques caractéristiques de la moyenne.

- Elle est beaucoup plus utilisée et peut se calculer algébriquement même avec des calculatrices.
- Elle tient compte de toutes les données et n'est pas influencée par les valeurs extrêmes.
- Le choix des classes n'influencent pas cette valeur.
- Elle est beaucoup plus souple car, on peut combiner les moyennes des sous groupes d'une population pour en obtenir celle de la population. Ceci n'est pas possible avec les autres paramètres de position.

I.4 PARAMETRES DE DISPERSION

Les paramètres de position caractérisent la tendance centrale d'une distribution de fréquence. Or, nous savons que 2 populations distinctes peuvent avoir la même moyenne sans être distribuées de la même façon. Il est donc important de savoir comment sont étalées les données autour de cette tendance centrale. Les paramètres de dispersion permettent de répondre à cette question. Ces paramètres sont : l'étendue, l'écart moyen, l'écart type, la variance, le coefficient de variation.

I.4.1 L'étendue

L'étendue est la distance entre la plus grande donnée et la plus petite. On obtient sa valeur en faisant la différence entre la plus grande donnée x_g et la plus petite x_p ($x_g - x_p$). Dans le cas des données groupées en classes, l'étendue est la différence entre la borne supérieure b_s de la dernière classe et la borne inférieure b_i de la première classe ($b_s - b_i$).

L'étendue de la population étudiée ci-dessus est de :
 $b_s = 155 \text{ cm}; \quad b_i = 55 \text{ cm}; \Rightarrow E = 155 - 55 = 100 \text{ cm}.$

L'étendue est facile à calculer et sa valeur ne tient compte que des valeurs extrêmes. Elle est utilisée pour avoir une idée rapide

sur la dispersion et peut aussi servir pour grouper les données en classes.

I.4.2 Ecart moyen

On distingue l'écart absolu moyen par rapport à la moyenne et par rapport à la médiane.

I.4.2.1 Ecart absolu moyen par rapport à la médiane.

C'est la moyenne des écarts en valeur absolue, entre chaque donnée et la médiane. Elle s'exprime comme suit :

$$Emd = \frac{\sum |x_i - Md|}{N}$$

Dans le cas des données regroupées dans un tableau, il plus facile d'utiliser la formule suivante :

$$Emd = \frac{\sum n_i \cdot |x_i - Md|}{N} \text{ ou encore } Em = \frac{\sum f_i \cdot |x_i - \mu|}{N}$$

Calculons l'écart absolu par rapport à la médiane des données précédentes :

$$Emd = \frac{12 \cdot |60 - 100,75| + 23 \cdot |70 - 100,75| + \dots + 2 \cdot |150 - 100,75|}{242}$$
$$= 15,18 \text{ cm}$$

I.4.2.2 Ecart absolu moyen par rapport à la moyenne.

C'est la moyenne des écarts en valeur absolue, entre chaque donnée et la valeur moyenne. Elle s'exprime comme suit :

$$Em = \frac{\sum |x_i - \mu|}{N}$$

Dans le cas des données regroupées dans un tableau, il plus facile d'utiliser la formule suivante :

$$Em = \frac{\sum n_i \cdot |x_i - \mu|}{N} \text{ ou encore } Em = \frac{\sum f_i \cdot |x_i - \mu|}{N}$$

Calculons l'écart absolu par rapport à la moyenne des données précédentes :

$$Em = \frac{12 \cdot |60-99,59| + 23|70-99,59| + \dots + 2|150-99,59|}{242}$$

$$= 15, 14 \text{ cm}$$

* L'écart moyen comme nous le voyons tient compte de toutes les données et leur accorde la même importance.

* La présence des valeurs absolues ne facilite pas beaucoup les manipulations algébriques.

I.4.3 La variance

La variance est la moyenne des carrés des écarts entre chaque donnée et la moyenne des données. Elle s'exprime de la façon suivante :

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}$$

Dans le cas des données groupées, cette formule devient :

$$\sigma^2 = \frac{\sum n_i \cdot (x_i - \mu)^2}{N} \text{ ou } \sigma^2 = \frac{\sum f_i \cdot (x_i - \mu)^2}{N}$$

Calculons la variance de la population citée en exemple :

$$\sigma^2 = \frac{12(60-99,59)^2 + 23(70-99,59)^2 + \dots + 2(150-99,59)^2}{242}$$

$$= 375,86 \text{ cm}^2$$

* La variance tient également compte de toutes les données.

* La présence des carrés accorde plus d'importance aux grands écarts et sa valeur est donc fortement influencée par les données extrêmes.

* Son unité est le carré des unités des données.

I.4.4 L'écart type

L'écart type est la racine carré de la variance. L'introduction de la racine carrée permet de ramener son unité à celle des données. C'est donc une mesure de dispersion qui désigne l'écart standard entre les données de la population et la moyenne. On écrit :

$$\sigma^2 = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}}$$

Pour les données condensées on utilise la formule :

$$\sigma^2 = \sqrt{\frac{\sum n_i \cdot (x_i - \mu)^2}{N}} \quad \text{ou} \quad \sigma = \sqrt{f_i \cdot (x_i - \mu)^2}$$

L'écart type de la population d'étude est : $\sigma = \sqrt{375,86}$
 $= 19,39 \text{ cm}$

* L'écart type est le paramètre de dispersion le plus utilisé.

* En plus d'avoir l'avantage d'un traitement algébrique facile, son résultat permet d'avoir directement une idée sur la répartition des données autour de la moyenne. Plus ce résultat est grand, plus les données sont éloignées de la moyenne. Inversement, plus ce résultat est petit, plus les données sont rapprochées de la moyenne.

* Son unité de mesure est celle des données.

I.4.5 Le coefficient de variations

Le coefficient de variation est une mesure de dispersion relative exprimée en pourcentage qui permet d'indiquer l'homogénéité de la population. Par exemple, lorsque le coefficient de variations est inférieur à 15%, on peut la considérer comme étant homogène et lorsqu'il est supérieur à 15%, il indique que les données sont dispersées. On l'obtient à l'aide de la formule suivante :

$$\rho = cv = \frac{\sigma}{\mu} \times 100$$

Dans le cas de notre population d'étude, cv est de

$$cv = \frac{19,39}{99,59} \times 100 = 19,5 \%$$

Les données sont légèrement dispersées autour de la moyenne.

* Le coefficient de variation peut permettre de comparer la dispersion entre 2 ou plusieurs variables ayant des unités différentes.

I.5 DONNEES BIDIMENSIONNELLES

Très souvent, on est amené à analyser 2 ou plusieurs variables statistiques; par exemple le diamètre et la hauteur ou le diamètre et le volume etc. Dans ce cas, pour effectuer l'analyse, on peut poser :

X : diamètre de l'arbre
Y : hauteur de l'arbre

On étudie dans un premier temps chaque variable aléatoire et on détermine : la moyenne, la variance, l'écart type, le coefficient de variation, l'erreur de mesure etc. Ensuite, on analyse les relations existantes entre ces deux variables aléatoires. Ceci nous amène à utiliser des instruments statistiques tels que la covariance, la corrélation, l'équation de régression etc.

I.5.1 La covariance

Pour déterminer la covariance entre deux variables statistiques X et Y, on pose :

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N} \text{ avec}$$

x_i : valeur de la variable statistique X de rang i.

y_i : valeur de la variable statistique Y de rang i.

\bar{x} : moyenne des données x_i .

\bar{y} : moyenne des données y_i .

La covariance peut aussi se calculer à l'aide des formules équivalentes suivantes :

$$\sigma_{XY} = \text{cov}(X, Y) = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{N} \text{ ou aussi}$$

$$\sigma_{XY} = \text{cov}(X, Y) = \frac{\sum_{ij} (x_i - y_j)(y_i - y_j)}{2N^2}$$

Le signe de la covariance indique si la relation entre X et Y est croissante ou décroissante. Cette relation est croissante lorsqu'il est positif et négatif dans le cas contraire.

I.5.2 La corrélation

De même que l'écart type, la covariance dépend des unités des données ce qui implique une sensibilité aux changements d'échelle.

On définit donc une statistique sans unité appelée corrélation entre X et Y pour pallier à cet inconvénient. Elle se calcule grâce à la formule suivante :

$$\rho_{XY} = \text{corrélation (X, Y)} = \frac{\text{cov (X, Y)}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$$

La corrélation est une valeur comprise entre -1 et 1.

* A titre indicatif, nous pouvons dire que, lorsque :

- . $\rho < 0,4$, les deux variables sont indépendantes.
- . $0,4 < \rho < 0,6$ il existe une faible relation entre les variables.
- . $\rho > 0,6$, les deux variables sont fortement liées.

Exemple :

Dans une surface forestière contenant 18 arbres, on effectue les mesures de diamètre et de hauteur. On a obtenu les résultats suivants :

Arbre n°	Diamètre (cm)	Volume (m³)	Arbre n°	Diamètre (cm)	Volume (m³)
1	64	4,775	10	83,8	7,100
2	60	3,967	11	72	4,602
3	52	1,577	12	119	12,159
4	72	4,783	13	72	3,924
5	91,8	4,981	14	72	3,779
6	104,8	9,366	15	58,3	3,619
7	64,8	4,202	16	100	7,121
8	63	3,735	17	94,3	6,186
9	117	6,485	18	35,8	1,631

1- Calculer le diamètre moyen \bar{x} et le volume moyen \bar{y} des arbres de cette population.

2- Calculer l'écart type des diamètres σ_X et celui des volumes des arbres σ_Y .

3- Déterminer la covariance entre X et Y.

4- Déterminer la corrélation ρ .

Solution :

Soient les variables aléatoires :

X : diamètre de l'arbre.

Y : volume de l'arbre.

$$1) \bar{x} = \frac{\sum x_i}{18} = 77,6 \text{ cm} \quad \bar{y} = \frac{\sum y_i}{18} = 5,222 \text{ m}^3$$

$$2) \sigma_X = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{18}} = 22,109 \text{ cm}$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{18}} = 2,507 \text{ m}^3$$

3) covariance entre X et Y.

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{\sum x_i y_i - 18 \bar{x} \bar{y}}{18} = \frac{8167,83 - 7294,09}{18} = 48,54$$

4) corrélation entre X et Y;

$$\rho_{XY} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} = \frac{48,54}{22,109 \cdot 2,507} = 0,876$$

I.5.3 Equation de régression.

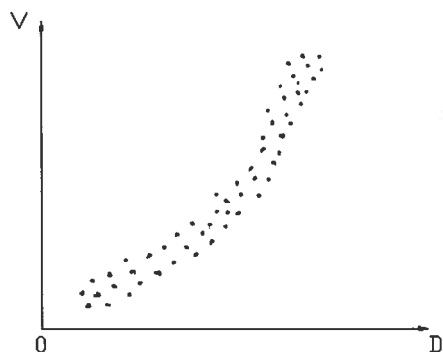
Après avoir illustré à l'aide d'un graphique la relation qui existe entre deux ou plusieurs variables, il est important d'établir une équation de régression qui détermine de façon mathématique cette relation.

Si on a par exemple les variables aléatoires suivantes:

V : volume

D : diamètre

On peut construire un graphique où sont représentés les nuages de point qui illustrent cette relation. On porte alors en abscisses le diamètre et en ordonnées le volume.



Grâce à ces nuages de points, on peut construire une équation de régression. cette équation peut être de la forme suivante :

- $V = a + bD$
- $V = a + bD^2$
- $V = a + bD + cD^2$
- $V = aD^b$
- etc.

I.6 ETUDE D'UNE LOI STATISTIQUE USUELLE : LA LOI DE GAUSS OU LOI NORMALE.

Il existe plusieurs lois de probabilités utilisées en statistique telles que : la loi binomiale, la loi hypergéométrique, la loi de poisson, la loi normale etc. De toutes ces lois, la loi normale est la plus importante et la plus utilisée en dendrométrie pour plusieurs raisons :

- La distribution normale a été tablée et on gagne beaucoup de temps en les utilisant directement;
- Lorsque les mesures n'ont pas une distribution normale, une transformation d'échelle peut entraîner une normalité approximative;
- Lorsque le nombre d'échantillons est élevé, la distribution des moyennes d'échantillons tend vers la normale même si celle de la population originale ne l'est pas.
- Dans la pratique, les paramètres sont assez souvent estimés valablement par une loi normale même si les observations ne proviennent pas d'une distribution normale.

Elle s'énonce de la façon suivante :

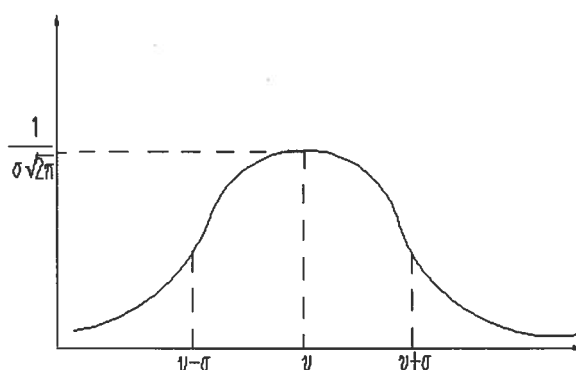
Si on mesure une grandeur soumise à une infinité de causes de variations petites et indépendantes ou quasi indépendantes, on verra en général que les résultats se regroupent autour d'une moyenne de façon systématique. De plus, la fréquence diminue rapidement en s'éloignant de la moyenne. La représentation graphique donne une courbe en forme de cloche. On définit une loi qui permet de calculer les probabilités des variations d'une telle grandeur. Cette loi est la loi normale ou loi de Gauss. Sa densité est une fonction $f(x)$ qui est définie pour tout x par:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Cette fonction dépend donc de deux paramètres qui sont :

μ : c'est l'espérance mathématique ou la moyenne.
 σ^2 : c'est la variance autour de la moyenne.

Soit X : la variable aléatoire associée à cette grandeur. On note $X \mapsto N(\mu, \sigma^2)$ et on lit X suit une loi normale de paramètres μ et σ^2 .



Graphique de la fonction de densité $f(x)$ d'une grandeur obéissant à la loi de Gauss

Quelques caractéristiques de la courbe d'une loi normale.

- 1- Courbe en forme de cloche.
- 2- Courbe symétrique par rapport à la moyenne μ .

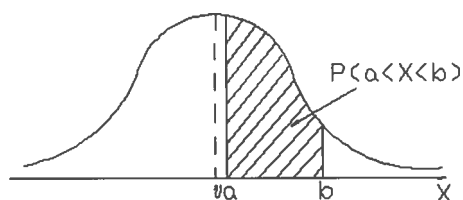
3- Le mode, la moyenne et la médiane sont confondus; leur valeur est égale à μ .

4- Le maximum de cette courbe correspond à l'ordonnée $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$

lorsque $x = \mu$.

Lorsqu'on veut évaluer la probabilité pour qu'une variable aléatoire soit comprise entre a et b , on ramène la loi normale à une loi centrée réduite grâce à la transformation linéaire

$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$. Cette variable aléatoire a pour espérance 0 et pour variance 1.



Ainsi, si X est une variable aléatoire obéissant à une loi normale, $X \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$, la variable aléatoire centrée réduite obéit aussi à une loi normale $Z \rightarrow N(0, 1)$. Grâce à cette transformation, on ramène le calcul de probabilité de X à un calcul de probabilité de Z .

$$P(a < X < b) = P\left(\frac{a - \mu}{\sigma} < \frac{X - \mu}{\sigma} < \frac{b - \mu}{\sigma}\right) = P\left(\frac{a - \mu}{\sigma} < Z < \frac{b - \mu}{\sigma}\right)$$

L'avantage de cette transformation est qu'il existe une table (voir table2) qui permet de lire directement la valeur de la probabilité $P(0 < Z < Zi)$.

Quelques exemples d'utilisation de la loi normale centrée réduite

Exemple 1 :

Soit X : une variable aléatoire qui suit une loi normale $X \rightarrow N(3, 16)$.

1- Calculer la probabilité $P(-2 < X < 4)$.

2- La probabilité $P(X \geq 3)$.

Solution :

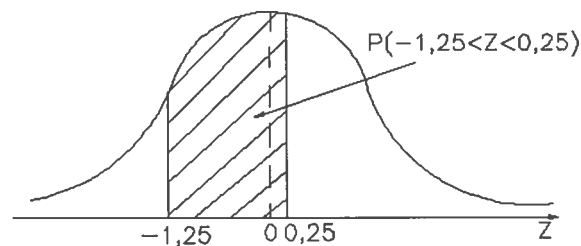
1) Soit $X \rightarrow N(3, 16)$; La transformation $Z = \frac{X - 3}{4} \rightarrow N(0, 1)$

$$P(-2 < X < 4) = P\left(\frac{-2 - 3}{4} < \frac{X - 3}{4} < \frac{4 - 3}{4}\right)$$

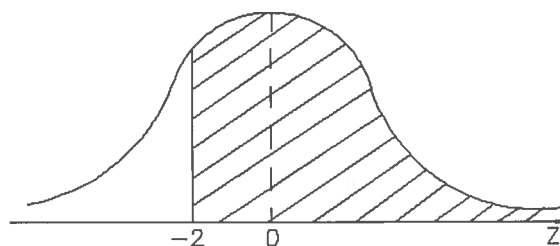
$$\begin{aligned} \Rightarrow P(-2 < X < 4) &= P(-1,25 < Z < 0) + P(0 < Z < 0,25) \\ &= P(0 < Z < 1,25) + P(0 < Z < 0,25); \end{aligned}$$

On lit dans la table les valeurs de ces probabilités. On obtient:

$$P(-2 < X < 4) = 0,3944 + 0,0987 = 0,4931$$



$$2) P(X \geq 5) = P\left(\frac{X - 3}{4} \geq \frac{3 - 5}{4}\right) = P(Z \geq -2)$$



$$\begin{aligned} \Rightarrow P(Z \geq -2) &= 0,5 + P(-2 < z < 0) \\ &= 0,5 + P(0 < Z < 2) = 0,5 + 0,4772 = 0,9772. \end{aligned}$$

Exemple 2 :

On considère une population constituée d'arbres dont la mesure de diamètre obéit à une loi normale de moyenne 63 cm et d'écart type 9,23 cm.

Si on choisit un arbre au hasard dans cette population, déterminer la probabilité que le diamètre soit compris entre 70 et 95 cm.

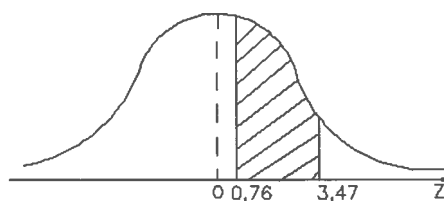
Solution :

Soit la variable aléatoire X : mesure de diamètre.
 $X \rightarrow N(63; 9,23^2)$

On cherche $P(70 < X < 95)$. Pour trouver cette probabilité, on

fait la transformation $Z = \frac{X - 63}{9,23}$

$$\begin{aligned} P(70 < X < 95) &= P\left(\frac{70 - 63}{9,23} < \frac{X - 63}{9,23} < \frac{95 - 63}{9,23}\right) \\ &= P(0,76 < Z < 3,47) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \Rightarrow P(0,76 < Z < 3,47) &= P(0 < Z < 3,47) - P(0 < Z < 0,76) \\ &= 0,4997 - 0,2794 = 0,22. \end{aligned}$$

I.7 ECHANTILLONNAGE

Très souvent, lors des études statistiques, la population concernée est trop grande pour qu'on puisse envisager la couvrir entièrement. Dans ce cas, on y prélève un échantillon représentatif et on étudie dans cet échantillon les variables statistiques. A partir des résultats ainsi obtenus, on déduit les conclusions dans la population toute entière.

Cependant, en pratique, l'échantillon prélevé n'est pas toujours une représentation exacte de la population. Il existe donc des

erreurs dues à l'échantillonnage qu'on doit chercher à contrôler. Pour réduire ces erreurs, on doit insister sur le choix de l'échantillon. Un bon échantillon correspond à celui pour lequel

sa moyenne \bar{x} tend vers μ et sa variance s^2 tend vers σ^2 de la population. La connaissance des éléments tels que la taille de la population, la distribution des individus à l'intérieur de celle-ci...aident le statisticien à bien faire son choix. Il existe plusieurs modes de sélection. Nous y reviendrons au prochain chapitre.

I.8 ESTIMATION

I.8.1 Généralités

Un des problèmes que l'on rencontre en statistique et notamment en dendrométrie est que les paramètres de la population (μ , σ^2 , σ , etc) ne sont pas connus. Puisque la population est généralement très grande, on prélève un échantillon de taille n et on y effectue l'estimation de ces paramètres. Les valeurs ainsi obtenues sont les estimés de ce paramètre et les variables aléatoires associées les estimateurs. On utilise les symboles différents pour distinguer l'estimé du paramètre. Ainsi :

\bar{x} est l'estimé de μ .

s^2 est l'estimé de σ^2 .

s est l'estimé de σ .

Les formules utilisées pour obtenir ces différentes estimations sont les suivantes :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Ces formules donnent une estimation ponctuelle des paramètres en question. Le plus souvent, on a besoin de construire un intervalle qui aura une grande probabilité de contenir la valeur de ce paramètre. Cet intervalle s'appelle intervalle de confiance et la probabilité qu'un tel intervalle contienne la valeur de ce paramètre s'appelle niveau de confiance; on le note $1 - \alpha$; il est souvent exprimé en pourcentage.

Soit $[a, b]$ cet intervalle; cette probabilité s'écrit :

$$P(a \leq U \leq b) = 1 - \alpha.$$

α représente le risque d'erreur que cet intervalle ne contienne pas la valeur du paramètre U . On peut interpréter le niveau de confiance de la manière suivante : si on construit des intervalles de confiance du paramètre U pour tous les échantillons possibles de la population, $1 - \alpha$ représente la proportion de ces intervalles qui contiendra U et α celle qui exclura la valeur de U . $1 - \alpha$ peut aussi être interprété comme étant le pourcentage de chance pour que $P(a < U \leq a)$ soit juste et α le pourcentage de chance pour qu'elle soit fausse.

I.8.2 construction d'un intervalle de confiance pour la moyenne

Soit un échantillon suffisamment grand, $n \geq 30$; nous pouvons

faire l'approximation suivante $\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma_{\bar{X}}} \rightarrow N(0, 1)$ (loi normale centrée réduite).

Le problème est de construire un intervalle qui contienne la

moyenne μ de la population. Or, nous savons que $\sigma_{\bar{X}}$ dépend de σ , que la distribution de probabilité de X a un effet sur la

distribution de probabilité de \bar{X} , que l'approximation $\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma_{\bar{X}}}$

dépend de la taille de n . Pour construire cet intervalle, il convient donc de distinguer 4 cas :

- 1- Cas où σ est connu et $X \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$ ($n < 30$).
- 2- Cas où σ est connu et $n \geq 30$.
- 3- Cas où σ est inconnu et $X \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$ ($n < 30$).
- 4- Cas où σ est inconnu et $n \geq 30$.

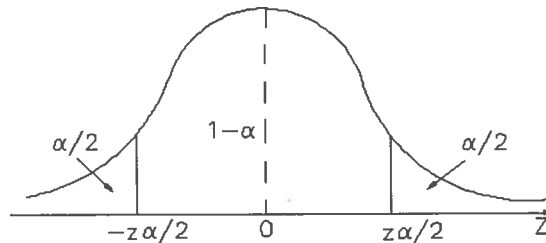
I.8.2.1 Cas où σ est connu et $X \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$.

La variable X obéit à une loi normale $N(\mu, \sigma^2)$. Ceci entraîne que la variable aléatoire \bar{X} obéit également à une normale $N(\mu, \sigma_{\bar{X}}^2)$.

Ainsi, la transformation $Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma_{\bar{X}}}$ obéit à une loi normale centrée réduite $N(0, 1)$.

Le niveau de confiance étant $1 - \alpha$, on peut alors écrire :

$$P(-Z\alpha/2 < Z < Z\alpha/2) = 1 - \alpha \text{ ou } P(Z > Z\alpha/2) = \alpha/2$$



$$P(-Z\alpha/2 < Z < Z\alpha/2) = P(-Z\alpha/2 < \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma_{\bar{X}}} < Z\alpha/2) = 1 - \alpha$$

$$\Rightarrow P(-\sigma_{\bar{X}} \cdot Z\alpha/2 < \bar{X} - \mu < \sigma_{\bar{X}} \cdot Z\alpha/2) = 1 - \alpha$$

$$\Rightarrow P(-\sigma_{\bar{X}} \cdot Z\alpha/2 < \mu - \bar{X} < \sigma_{\bar{X}} \cdot Z\alpha/2) = 1 - \alpha$$

$$\Rightarrow P(\bar{X} - \sigma_{\bar{X}} \cdot Z\alpha/2 < \mu < \bar{X} + \sigma_{\bar{X}} \cdot Z\alpha/2) = 1 - \alpha$$

Ceci signifie qu'au niveau $1 - \alpha$, l'intervalle de confiance est

$[\bar{x} - \sigma_{\bar{x}} \cdot Z\alpha/2; \bar{x} + \sigma_{\bar{x}} \cdot Z\alpha/2]$. Il suffit de lire la valeur de $Z\alpha/2$

dans la table (table2) et de calculer \bar{x} et $\sigma_{\bar{x}}$ pour obtenir cet intervalle.

I.8.2.2 Cas où σ est connu et $n \geq 30$.

Si $n \geq 30$, l'approximation suivante est valable : $\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma_{\bar{X}}} \rightarrow N(0, 1)$

Par un raisonnement analogue au cas précédent, on aboutit à un

intervalle de confiance de la forme $[\bar{x} - \sigma_{\bar{x}} \cdot Z\alpha/2; \bar{x} + \sigma_{\bar{x}} \cdot Z\alpha/2]$ au niveau de confiance $1 - \alpha$.

I.8.2.3 Cas où σ est inconnu et $X \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$; ($n < 30$).

σ étant inconnu, on ne peut faire qu'une estimation ponctuelle en posant :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Un problème survient tout de même; s est une estimation

ponctuelle de σ . L'approximation $\frac{\bar{X} - \mu}{\bar{sx}}$ n'obéit plus à une loi normale.

$\frac{\bar{X} - \mu}{\bar{sx}}$ est un ensemble de variables aléatoires qu'on note T_{n-1} . On appelle cette distribution, distribution de STUDENT. On écrit :

$$T_{n-1} = \frac{\bar{X} - \mu}{\bar{sx}} \quad n - 1 \text{ est le nombre de degré de liberté.}$$

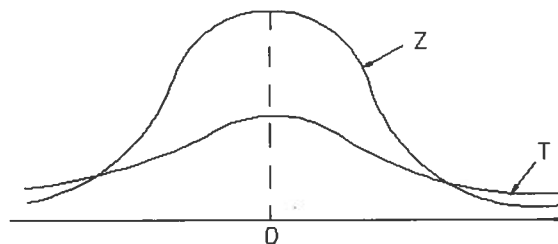
Quelques caractéristiques de cette distribution

1) $E(T_{n-1}) = 0$

2) $\text{Var}(T_{n-1}) = \frac{n-1}{n-3}$

3) Si $n \rightarrow \infty$ alors $T_{n-1} \rightarrow N(0, 1)$.

4) Sa courbe ressemble à celle de la loi normale, mais elle est beaucoup plus aplatie.



5) La distribution de T_{n-1} varie selon les valeurs de n ; on devrait donc construire une table pour chaque valeur de n .

La valeur t_i de la variable T_{n-1} se définit par la probabilité

$$P(T_{n-1} > t_i) = i$$

A partir de $T_{n-1} = \frac{\bar{X} - \mu}{s\bar{X}}$, on aboutit grâce à un raisonnement

analogue au premier cas à un intervalle de confiance de la forme $[\bar{x} - s\bar{x}.t\alpha/2; \bar{x} + s\bar{x}.t\alpha/2]$ au niveau $1 - \alpha$.

Pour obtenir cet intervalle, il suffit de lire la valeur de $t\alpha/2$ dans la partie de la table de Student (table3) correspondant à

$\alpha/2$ et de calculer \bar{x} et $s\bar{x}$ de la façon suivante :

$$s\bar{x} = \sqrt{\frac{s^2}{n}} : \text{tirage avec remise.}$$

$$s\bar{x} = \sqrt{\frac{s^2}{n} \left(\frac{N - n}{N - 1} \right)} : \text{tirage sans remise.}$$

Pratiquement, lorsque $n \geq 30$, on peut obtenir la variable

$$\frac{\bar{X} - \mu}{s\bar{x}} \text{ par une approximation par la loi normale.}$$

I.8.2.4 Cas où σ est inconnu et $n \geq 30$

Lorsque $n \geq 30$, nous pouvons faire l'approximation de la variable

$$\frac{\bar{X} - \mu}{s\bar{x}} \text{ par une loi normale centrée réduite.}$$

On peut donc, à l'aide d'un raisonnement analogue au premier cas obtenir un intervalle de confiance de la forme

$$[\bar{x} - s\bar{x}.t\alpha/2; \bar{x} + s\bar{x}.t\alpha/2] \text{ au niveau } 1 - \alpha.$$

I.8.3 EXEMPLES

Exemple1 :

Dans un peuplement forestier, on cherche à connaître le volume moyen de l'arbre. Pour cela, on sélectionne dans ce peuplement un échantillon de 42 arbres. Le calcul de la moyenne et de

l'écart type donnent $\bar{x} = 8,763 \text{ m}^3$ et $s = 2,367 \text{ m}^3$.

Construire un intervalle de confiance au niveau 95% pour estimer la moyenne de cette population.

Solution :

Soit la variable aléatoire X : Volume d'un arbre du peuplement forestier.

L'écart type de la population n'est pas connu de même que la distribution de X dans celle-ci. Cependant, la taille de l'échantillon est suffisamment grande pour qu'on fasse l'approximation suivante :

$$\frac{\bar{X} - \mu}{\frac{s\bar{x}}{\sqrt{n}}} \rightarrow N(0, 1).$$

De plus, le nombre d'arbres dans la population n'étant pas spécifié, on suppose qu'il trop grand par rapport à celui de l'échantillon. On peut donc assimiler cette sélection à un tirage avec remise; d'où :

$$s\bar{x} = \sqrt{\frac{s^2}{n}} = \sqrt{\frac{5,603}{42}} = 0,361 \text{ m}^3$$

$1 - \alpha = 0,95 \Rightarrow \alpha = 0,05 \Rightarrow \alpha/2 = 0,025$. D'où,
 $P(0 < Z < Z_{0,025}) = 0,5 - 0,025 = 0,4750$. On lit dans la table de la loi normale $Z_{0,025} = 1,96$. L'intervalle cherché a la forme

$$[\bar{x} - s\bar{x}.Z\alpha/2; \bar{x} + s\bar{x}.Z\alpha/2].$$

$$[\bar{x} - s\bar{x}.Z\alpha/2; \bar{x} + s\bar{x}.Z\alpha/2] = [8,763 - 0,361 \times 1,96; 8,763 + 0,361 \times 1,96] \\ = [8,055; 9,471] \text{ au niveau } 95\%.$$

Donc $\mu \in [8,055; 9,471]$ au niveau 95%.

Exemple 2 :

Nous voulons déterminer le diamètre moyen des arbres contenus dans une surface forestière donnée. Pour cela, on sélectionne un échantillon de 18 arbres sur lequel on prend les mesures de diamètre.

1- 28 cm	5- 47 cm	9- 59 cm	13- 66 cm	17- 58 cm
2- 70 cm	6- 80 cm	10- 59 cm	14- 42 cm	18- 33 cm
3- 65 cm	7- 82 cm	11- 63 cm	15- 75 cm	
4- 93 cm	8- 72 cm	12- 100cm	16- 69 cm	

En supposant que le diamètre des arbres obéit à une loi normale, construire un intervalle de confiance au niveau 90%.

Solution :

Soit X : diamètre de l'arbre. $X \sim N(\mu, \sigma^2)$.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{\sum x_i}{18} = 64,5 \text{ cm}; \quad s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{17}}$$

Le niveau de confiance est $1 - \alpha = 0,90 \Rightarrow \alpha = 0,10 \Rightarrow \alpha/2 = 0,05$
D'après la table de STUDENT (table3), $t_{0,05}$ pour $18 - 1 = 17$ degrés de liberté est égal à 1,74.

L'intervalle de confiance cherché a la forme :

$$\left[\bar{x} - t_{\alpha/2} \cdot \sqrt{\frac{s^2}{n}} ; \bar{x} + t_{\alpha/2} \cdot \sqrt{\frac{s^2}{n}} \right]$$
$$= \left[64,5 - 1,74 \cdot \sqrt{\frac{18,9^2}{18}} ; 64,5 + 1,74 \cdot \sqrt{\frac{18,9^2}{18}} \right]$$
$$= [56,75; 72,25].$$

$\Rightarrow \mu \in [56,75; 72,25]$ au niveau 90%.

I.8.4 Construction d'un intervalle de confiance pour la variance

Lorsque la variance σ^2 de la population n'est pas connu, on peut obtenir une estimation ponctuelle de celle-ci grâce à la formule

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Puisqu'il s'agit d'une estimation, il faut donc construire un

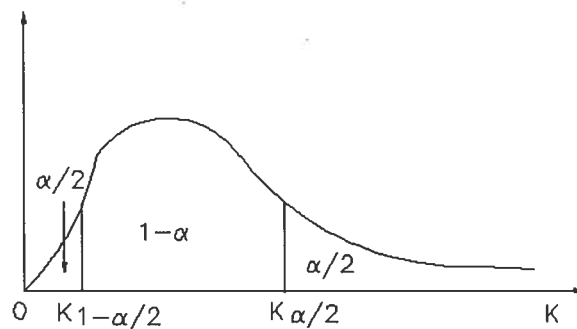
intervalle de confiance ayant une probabilité $1 - \alpha$ de contenir σ^2 .
Le théorème de base pour y parvenir est le suivant :

Soient X_1, X_2, \dots, X_n , n variables aléatoires indépendantes obéissant à une loi normale $N(\mu, \sigma^2)$; La variable aléatoire K_{n-1} telle que :

$$K_{n-1} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2} \text{ obéit à une loi dite de Khi 2 à } n-1 \text{ degré de liberté.}$$

Voici quelques caractéristiques de cette loi :

- 1) $E(K_{n-1}) = n - 1$.
- 2) $\text{var}(K_{n-1}) = 2(n - 1)$.
- 3) Si $n \rightarrow \infty$, alors $K_{n-1} \rightarrow N[n-1, 2(n-1)]$.
- 4) Sa courbe se situe à droite de zéro et a la forme d'une dissymétrie qui diminue au fur et à mesure que n augmente.



- 5) Sa distribution varie en fonction de n et on doit en principe construire un intervalle de confiance pour chaque valeur de n comprise entre 2 et 30. Pour $n > 30$, on utilise l'approximation

suivante : $K_i = \frac{1}{2} [Z_i + \sqrt{2(n-1) - 1}]^2$

Soit à construire un intervalle de confiance de K_{n-1} au niveau $1 - \alpha$.

$$K_{n-1} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2} = \frac{nS^2}{\sigma^2} \rightarrow \text{Khi 2 à } n - 1 \text{ degré de liberté.}$$

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n} \text{ est une estimation ponctuelle de la variable aléatoire } S^2. \text{ D'où :}$$

$$P(K_{1-\alpha/2} \leq K_{n-1} \leq K_{\alpha/2}) = 1 - \alpha$$

$$\Rightarrow P(K_{1-\alpha/2} \leq \frac{nS^2}{\sigma^2} \leq K_{\alpha/2}) = 1 - \alpha$$

$$\Rightarrow P\left(\frac{1}{K_{1-\alpha/2}} \geq \frac{\sigma^2}{nS^2} \geq \frac{1}{K_{\alpha/2}}\right) = 1 - \alpha$$

$$\Rightarrow P\left(\frac{nS^2}{K_{1-\alpha/2}} \geq \sigma^2 \geq \frac{nS^2}{K_{\alpha/2}}\right) = 1 - \alpha$$

$$\Rightarrow P\left(\frac{nS^2}{K_{\alpha/2}} \leq \sigma^2 \leq \frac{nS^2}{K_{1-\alpha/2}}\right) = 1 - \alpha$$

L'intervalle de confiance cherché au niveau $1 - \alpha$ a la forme:

$$\left[\frac{ns^2}{K_{\alpha/2}}; \frac{ns^2}{K_{1-\alpha/2}} \right] \text{ pour la variance.}$$

$$\left[\sqrt{\frac{ns^2}{K_{\alpha/2}}}; \sqrt{\frac{ns^2}{K_{1-\alpha/2}}} \right] \text{ pour l'écart type.}$$

Il suffit de calculer s^2 et de lire (voir table4) les valeurs de $K_{1-\alpha/2}$ et $K_{\alpha/2}$ au niveau de confiance $1 - \alpha$, suivant les valeurs de n .

Exemple :

Nous voulons estimer la variance du volume des arbres de 2 peuplements forestiers. Pour cela, on prélève dans le premier un échantillon de 20 arbres sur lequel on calcule la variance; $s^2 = 7,324$. Dans le second peuplement, on prélève un échantillon de 50 arbres et on calcule la variance; $s^2 = 9,843$.

En supposant que le volume des arbres de ces peuplements obéit à une loi normale,

1- Construire au niveau 90% l'intervalle de confiance sur la variance du peuplement 1.

2- Construire au niveau 95% l'intervalle de confiance sur la variance du peuplement 2.

Solution :

1- Niveau de confiance $1-\alpha = 0,90 \Rightarrow \alpha/2 = 0,05$ et $1-\alpha/2 = 0,95$. Selon la table de K_{n-1} (table3) pour $20 - 1 = 19$ degrés de liberté,

on a : $K_{0,05} = 30,14$; $K_{0,95} = 10,12$.

L'intervalle de confiance cherché a la forme :

$$\left[\frac{ns^2}{K_{\alpha/2}}; \frac{ns^2}{K_{1-\alpha/2}} \right] = \left[\frac{20 \times 7,324}{30,14}; \frac{20 \times 7,324}{10,12} \right]$$
$$= [4,860; 14,474] \text{ pour la variance } \sigma^2.$$
$$\text{soit } [2,205; 3,805] \text{ pour l'écart type } \sigma.$$

2- Niveau de confiance $1-\alpha = 0,95 \Rightarrow \alpha/2 = 0,025$ et $1-\alpha/2=0,975$.

$n - 1 = 50 - 1 = 49 > 30$. On doit donc obtenir la valeur de $K_{\alpha/2}$

par la relation $K_i = \frac{1}{2} [Z_i + \sqrt{2(n-1) - 1}]^2$

$$\Rightarrow K_{0,025} = \frac{1}{2} [Z_{0,025} + \sqrt{2 \times 49 - 1}] = \frac{1}{2} [1,96 + \sqrt{97}]^2 = 69,72.$$

$$K_{0,975} = \frac{1}{2} [Z_{0,975} + \sqrt{2 \times 49 - 1}] = \frac{1}{2} [-1,96 + \sqrt{97}]^2 = 31,12.$$

L'intervalle de confiance cherché est donc :

$$\left[\frac{ns^2}{K_{0,025}}; \frac{ns^2}{K_{0,975}} \right] = \left[\frac{50 \times 9,843}{69,72}; \frac{50 \times 9,843}{31,12} \right]$$
$$= [7,059; 15,815] \text{ pour la variance } \sigma^2.$$
$$\text{soit } [2,657; 3,977] \text{ pour l'écart type } \sigma.$$

I.9 LES TESTS D'HYPOTHESE.

I.9.1 Généralités

Le plus souvent, on observe un fait ou un phénomène dans une population et on a besoin de le confirmer. Par exemple, les résultats des inventaires antérieurs dans un peuplement forestier indiquent que la moyenne du volume des arbres est de $12,431 \text{ m}^3$. Pour vérifier ce résultat, on sélectionne un échantillon de cette population et on effectue un test qui nous permet de confirmer ou de rejeter ce résultat. Pour y parvenir, on pose deux hypothèses:

La première se note H_0 ; on l'appelle hypothèse nulle c'est-à-dire celle qui n'amène pas de changement ou encore celle qui confirme le résultat.

La deuxième se note H_1 ; c'est l'hypothèse alternative ou contre hypothèse.

Ainsi, dans le cas du peuplement forestier,
Ho : $\mu = 12,431 \text{ m}^3$ et H1 : $\mu \neq 12,431 \text{ m}^3$.

D'une façon générale, si on considère un paramètre quelconque φ d'une variable aléatoire, on a :

Hypothèse nulle : Ho : $\varphi = \varphi_0$; φ_0 est une estimation du paramètre φ .

Hypothèse alternative H1 : elle peut prendre l'une des formes suivantes :

H1 : $\varphi \neq \varphi_0$; test bilatéral

H1 : $\varphi > \varphi_0$; test unilatéral à droite.

H1 : $\varphi < \varphi_0$; test unilatéral à gauche.

L'aboutissement d'un test d'hypothèse est une prise de décision. Or nous savons que les hypothèses sont basées sur des estimations ponctuelles du paramètre φ . Ainsi, la valeur de cette estimation ne peut donc pas être exacte. On accepte cette valeur si elle est proche de φ_0 et la rejette si elle s'en éloigne. Cependant, lors de la prise de décision, il peut survenir 2 types d'erreurs :

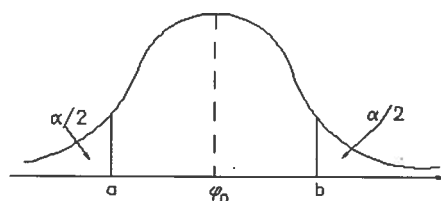
- **erreurs de première espèce notée α ;**

c'est la probabilité de rejeter Ho alors que Ho est vraie c'est-à-dire la probabilité de considérer $\varphi \neq \varphi_0$ alors que $\varphi = \varphi_0$. On écrit :

$\alpha = P(\text{rejeter Ho}; \text{Ho vraie})$.

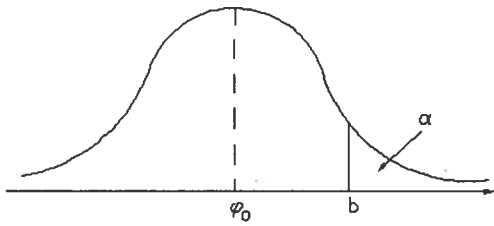
Ce type d'erreur se présente comme suit :

Test bilatéral



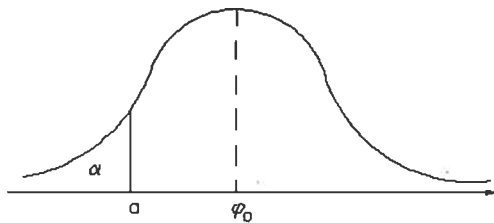
Au niveau de signification α , l'intervalle de rejet est $]-\infty, a[\cup]b, +\infty[$.

Test unilatéral à droite :



Au niveau de signification α , l'intervalle de rejet est $]b, +\infty[$.

Test unilatéral à gauche :



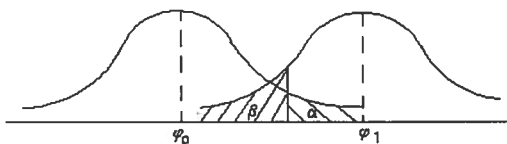
Au niveau de signification α , l'intervalle de rejet est $] -\infty, a[$.

- erreur de 2ième espèce notée β

C'est la probabilité d'accepter H_0 alors que H_0 est fausse, c'est-à-dire la probabilité d'accepter que $\varphi = \varphi_0$ alors que $\varphi = \varphi_1$.

On note $\beta = P(\text{accepter } H_0, H_0 \text{ fausse})$.

Pour illustrer cette erreur, considérons le test unilatéral à droite. On sait que H_0 est fausse c'est-à-dire que l'estimation $\hat{\varphi}$ se trouve plutôt centrée autour d'une autre valeur φ_1 .



Ce graphique montre que si α diminue, alors β augmente et inversement, si β diminue, α augmente.

Cette erreur peut prendre l'une des formes suivantes :

$\beta = P(a \leq \hat{\varphi} \leq b; \varphi = \varphi_1)$ test bilatéral.

$\beta = P(\hat{\varphi} \leq b; \varphi = \varphi_1)$ test unilatéral à droite.

$\beta = P(\hat{\varphi} \geq a; \varphi = \varphi_1)$ test unilatéral à gauche.

A partir de cette erreur de 2^{ème} espèce, on définit la **puissance du test** $1 - \beta$. C'est la probabilité de prendre une bonne décision lorsque H_0 est fautive c'est-à-dire la probabilité de détecter que $\varphi \neq \varphi_0$ lorsque $\varphi = \varphi_1$.

1.9.2 Applications

1- Test d'hypothèses sur la moyenne.

Lors d'un test d'hypothèse sur la moyenne, on doit tout comme dans le cas de la construction d'un intervalle de confiance considérer les 4 cas suivants :

- 1- Cas où σ est connu et $X \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$.
- 2- Cas où σ est connu et $n \geq 30$.
- 3- Cas où σ est inconnu et $X \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$.
- 4- Cas où σ est inconnu et $n \geq 30$.

On connaît la distribution de probabilité de l'estimateur \bar{X} dans chacun de ces cas. On peut donc pour chaque cas déterminer l'intervalle d'acceptation ou de rejet au niveau de signification α .

Exemple :

Un exploitant forestier possède une parcelle de forêt qu'il désire gérer. L'inventaire national effectué dans ce domaine indique que le volume moyen de l'arbre est de $9,450 \text{ m}^3$. Pour vérifier ce résultat, il sélectionne un échantillon de 25 arbres et trouve un volume moyen de $8,736 \text{ m}^3$ et un écart type $s = 2,418 \text{ m}^3$.

En considérant que le volume de l'arbre suit une loi normale, peut-il considérer le résultat de l'inventaire national au niveau de signification $0,05$?

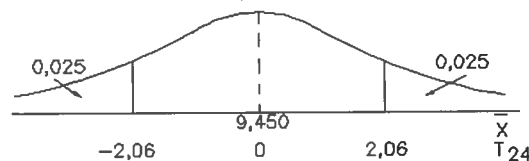
Solution :

- * Soient X : le volume de l'arbre.
 μ : le volume moyen de l'arbre.
- * $H_0 : \mu = 9,450 \text{ m}^3$.
 $H_1 : \mu \neq 9,450 \text{ m}^3$.
- * $\alpha = 0,05$.

* $X \rightarrow N$; σ est inconnu; $n = 25$; $s = 2,418 \text{ m}^3$.

La variable aléatoire $T_{n-1} = T_{24}$ suit une loi de STUDENT à 24 degrés de liberté.

$$T_{24} = \frac{\bar{X} - \mu}{\sqrt{s^2/n}} = \frac{\bar{X} - 9,450}{\sqrt{\frac{(2,418)^2}{25}}} = \frac{\bar{X} - 9,450}{0,484}$$



La zone d'acceptation est : $-2,06 \leq T_{24} \leq 2,06$

$$-2,06 \leq T_{24} \leq 2,06 \Rightarrow -2,06 \leq \frac{\bar{X} - 9,450}{0,484} \leq 2,06$$

$$\Rightarrow -2,06 \times 0,484 + 9,450 \leq \bar{X} \leq 2,06 \times 0,484 + 9,450$$

$$\Rightarrow 8,453 \leq \bar{X} \leq 10,447$$

$8,736 \in [8,453; 10,447]$. On peut donc considérer que le volume est de $9,430 \text{ m}^3$. L'hypothèse est donc acceptée.

2- Test d'hypothèse sur la variance

Il peut arriver qu'on veuille vérifier la véracité de la variance ou de l'écart type d'une variable aléatoire. Dans ce cas, on considère :

* Hypothèse nulle

$H_0 : \sigma^2 = \sigma_0^2$; cas de la variance.
 $\sigma = \sigma_0$; cas de l'écart type.

* Hypothèse alternative

Elle peut prendre l'une des formes suivantes :

$\sigma^2 \neq \sigma_0^2$; $\sigma^2 < \sigma_0^2$; $\sigma^2 > \sigma_0^2$: cas de la variance.

$\sigma \neq \sigma_0; \sigma < \sigma_0; \sigma > \sigma_0$: cas de l'écart type.

On sait déjà (voir paragraphe I.8.4) que la variable aléatoire

$$Kn-1 = \frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2} = \frac{nS^2}{\sigma^2}$$

obéit à une loi de Khi 2 à n-1 degré de liberté. Connaissant la distribution de cette variable, on peut donc construire un intervalle d'acceptation ou de rejet de l'écart type au niveau de signification α .

Exemple :

Sur le marché international, un industriel forestier prétend que l'épaisseur de ses planches a un écart type de 1 mm. Pour vérifier cette affirmation, on prélève un échantillon de 18 planches. On trouve que l'écart type de l'échantillon est de :

1,4 mm. Sachant que l'épaisseur de ces planches obéit à une loi normale, peut-on affirmer au niveau de signification $\alpha = 0,05$ que cet écart type est supérieur à la valeur donné par le forestier ?

Solution :

* Soient X : épaisseur d'une planche.
 σ : écart type des planches du forestier.

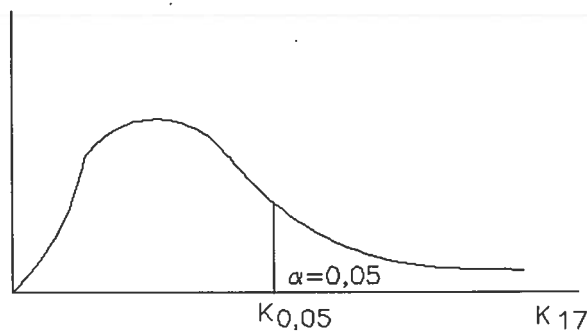
* $H_0 : \sigma = 1$ mm.

* $H_1 : \sigma > 1$ mm.

* $\alpha = 0,05$

* $X \rightarrow N(\mu, \sigma^2) : n = 18; s = 1,4$ mm.

La variable aléatoire K17 est un Khi 2 à 17 degrés de liberté.



L'écart type est supérieur à celui indiqué par le forestier si :

$$K17 > K0,05 = 27,59; \text{ or, } K17 = \frac{18S^2}{1} = 18S^2$$

$$\Rightarrow K_{17} > K_{0,05} \Rightarrow 18s^2 > 27,59 \Rightarrow s^2 > \frac{27,59}{18} \Rightarrow s > 1,23.$$

Puisque $1,4 > 1,23$, on peut donc affirmer que l'écart type de l'échantillon est bien supérieur à celui indiqué par le forestier.

I.10 COMPARAISON DES MOYENNES DE 2 ECHANTILLONS

Très souvent, on travaille sur 2 échantillons différents tirés d'une même population ou non. On est ainsi appelé à comparer les moyennes de ces deux échantillons. Pour cela, on calcule la

différence moyenne \bar{D} entre ceux-ci, et l'écart type de la moyenne des différences. La comparaison s'effectue en testant

l'hypothèse nulle : $\mu_{\bar{D}} = \mu_1 - \mu_2 = 0$ au niveau de signification α .

$$\text{Posons } t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - \bar{D}}{S_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}} = \frac{\bar{D}}{S_{\bar{D}}}$$

* Si $t > t_{\alpha}$, alors l'hypothèse nulle est rejetée c'est-à-dire la différence est significative.

* Si $t < t_{\alpha}$, alors l'hypothèse nulle est acceptée c'est-à-dire la différence n'est pas significative; on peut considérer les deux moyennes comme étant égales au seuil de signification α .

Remarques :

* t_{α} est la valeur de t lue dans la table de STUDENT (table3) au niveau de signification α , en considérant le nombre de degrés de liberté ($d.l$) correspondant à $S_{\bar{D}}$.

* Lorsque la taille n est élevée, ce test peut être effectué par

une distribution normale avec la variable aléatoire $Z = \frac{\bar{D}}{S_{\bar{D}}}$

Dans ce cas, on compare la valeur de Z avec Z_{α} lue dans la table (table2) au niveau de confiance $0,5-\alpha$.

Dans la pratique, on distingue les cas suivants :

1) Cas des couples dans un échantillon (appariement)

On parle le plus souvent des couples lorsqu'on effectue deux expériences différentes sur un même objet. Ainsi, pour chaque

objet testé, on calcule la différence obtenue et on vérifie si

elle est nulle en posant : $t = \frac{\bar{D}}{s\bar{D}}$

Ce test s'effectue grâce à la table de STUDENT (table3) avec n-1 degrés de liberté.

Exemple :

La lecture du volume des tiges à partir de 2 barèmes, l'un basé sur la formule du diamètre moyen (barème1), et l'autre sur la formule de Smalian (barème2), nous a permis d'obtenir les résultats portés dans le tableau ci-dessous. Faire la comparaison de ces deux résultats (niveau de probabilité 95 %).

N° Arbre	Volume1 (Bar1)	Volume2 (Bar2)	Différence
1	11,470	11,797	0,326
2	7,107	7,180	0,073
3	10,938	11,224	0,285
4	6,362	6,417	0,055
5	5,415	5,549	0,134
6	7,526	7,638	0,111
7	9,360	9,496	0,136
8	8,756	8,913	0,157
9	11,181	11,446	0,265
10	8,056	8,284	0,228
11	8,056	8,284	0,228
12	5,032	5,065	0,033
13	8,257	8,422	0,164
14	7,205	7,477	0,272
15	14,076	14,413	0,337
16	10,441	11,059	0,618
17	8,291	8,770	0,479
18	10,384	11,111	0,727
19	21,353	21,748	0,395
20	12,967	13,086	0,119
21	5,582	5,610	0,028
22	5,966	6,291	0,325
23	4,372	4,516	0,145
24	3,706	3,806	0,099
25	28,619	29,175	0,556
26	20,125	21,393	1,268
27	4,008	4,124	0,116
28	4,138	4,239	0,101
29	16,161	16,564	0,403
30	15,024	15,218	0,194

$$\bar{D} = \frac{\sum di}{n} = \frac{8,377}{30} = 0,279 \text{ cm}$$

$$s^2 = \frac{\sum (di - \bar{D})^2}{n - 1} = \frac{1,908}{29} = 0,066 \quad \overline{SD}^2 = \frac{s^2}{n} = \frac{0,066}{30} = 2,19 \cdot 10^{-3}$$

$$\Rightarrow \overline{SD} = 0,047; \quad t = \frac{0,279}{0,047} = 5,962 \text{ avec } 29 \text{ d.d.l.}$$

On lit dans la table, $t_{0,05} = 2,045$ avec 29 d.d.l. $5,962 > 2,045$.

Ce test montre que pour l'échantillon choisi, la différence entre les deux barèmes est significative. En particulier, le barème 1 sous-estime la moyenne.

2- Cas de 2 échantillons indépendants de même effectif

Deux échantillons X et Y issus d'une même population n sont dits indépendants si leur coefficient de corrélation est nulle c'est-à-dire :

$$r = \rho_{xy} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{S_x \cdot S_y} = 0$$

On compare les deux échantillons en posant :

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S(\bar{x} - \bar{y})}$$

On teste cette différence à l'aide de la table de STUDENT avec $2n - 2$ degrés de liberté. Le calcul de \bar{X} et \bar{Y} , moyennes des deux échantillons est aisé. Nous allons voir comment calculer $S(\bar{x} - \bar{y})$.

Quelques propriétés :

$$1- S(\bar{x} - \bar{y})^2 = S\bar{x}^2 + S\bar{y}^2 - 2rS\bar{x} \cdot S\bar{y}.$$

$$2- S(\bar{x} + \bar{y})^2 = S\bar{x}^2 + S\bar{y}^2 + 2rS\bar{x} \cdot S\bar{y}.$$

Puisque les échantillons sont indépendants, $r = 0$. On obtient :

$$S(\bar{x} - \bar{y})^2 = S\bar{x}^2 + S\bar{y}^2 = 2S^2/n. \quad \text{D'où } S(\bar{x} - \bar{y}) = \sqrt{\frac{2S^2}{n}}$$

N.B. $S_{\bar{X}}^2 + S_{\bar{Y}}^2 = 2S^2$ car les deux échantillons sont issus de la même population. Par conséquent, leurs variances sont deux estimations de la variance de la population.

On peut calculer aisément S^2 grâce à la relation :

$$S^2 = \frac{S_1^2 + S_2^2}{2} = \frac{\Sigma(X - \bar{X})^2 + \Sigma(Y - \bar{Y})^2}{2(n - 1)} = \frac{\Sigma x^2 + \Sigma y^2}{2n - 2}$$

Exemple :

Dans 2 échantillons indépendants d'un peuplement forestier, nous avons installé 11 parcelles. Le dénombrement des tiges dans ces parcelles nous a donné les résultats contenus dans le tableau ci-dessous. Vérifions la différence entre ces populations au niveau de probabilité 99%.

	Echantillon 1	Echantillon 2
	37	69
	100	37
	81	30
	84	2
	117	19
	98	12
	97	68
	48	11
	53	62
	99	10
	33	76
n	11	11
Moyenne	77	36
Σx^2	84,72	77,48
d.l	10	10
écart t.	8,47	7,75

$$S^2 = \frac{84,72 + 77,48}{10 + 10} = 8,11 \text{ avec } 20 \text{ d.l. ou encore}$$

$$S^2 = \frac{8,47 + 7,75}{2} = 8,11 \text{ avec } 20 \text{ d.l.}$$

$$\text{d'où } S(\bar{X}-\bar{Y}) = \sqrt{\frac{2s^2}{n}} = \sqrt{\frac{2 \times 8,11}{11}} = 1,21.$$

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S\bar{X}-\bar{Y}} = \frac{77 - 36}{1,21} = 33,38; \quad t\alpha = 2,845$$

33,88 > 2,845; Cette différence est très significative.

3- Cas de 2 échantillons d'effectifs inégaux

Dans ce cas, on vérifie la différence en posant toujours :

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S\bar{X}-\bar{Y}}$$

Cependant, la valeur de $t\alpha$ est lue dans la table (table3) de STUDENT avec $n1 + n2 - 2$ degrés de liberté. De plus, on calcule

$S\bar{X}-\bar{Y}$ grâce à la relation :

$$S\bar{X}-\bar{Y} = \sqrt{S^2 \left(\frac{1}{n1} + \frac{1}{n2} \right)}$$

$n1$: effectif dans l'échantillon X.
 $n2$: effectif dans l'échantillon Y.

$$S^2 = \frac{\Sigma(X - \bar{X})^2 + \Sigma(Y - \bar{Y})^2}{n1 + n2 - 2} = \frac{\Sigma x^2 + \Sigma y^2}{n1+n2-2}$$

4- Cas de 2 échantillons indépendants issus de deux populations différentes.

Dans ce cas, on vérifie l'écart type de la différence en posant :

$$t' = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S\bar{X}-\bar{Y}}$$

On obtient la valeur de l'écart type de la différence des moyennes en posant :

$$S_{X-Y} = \sqrt{\frac{S_x^2}{n_1} + \frac{S_y^2}{n_2}}$$

Ce test ne suit pas la loi t de STUDENT. C'est pour cette raison que nous avons remplacé la quantité t par t'. On calcule le seuil de signification en posant :

$$t'_{\alpha} = \frac{\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

avec : t'_{α} : valeur du seuil de signification de t' au niveau α .

$$\lambda_1 = \frac{S_x^2}{n_1}; \quad \lambda_2 = \frac{S_y^2}{n_2}$$

t_1 et t_2 sont les valeurs lues dans la table de STUDENT au niveau α avec respectivement $n_1 - 1$ et $n_2 - 1$ degrés de liberté.

I.11 ANALYSE DES VARIANCES

Lorsqu'on a plus de 2 échantillons, les méthodes utilisées pour comparer 2 échantillons ne sont plus assez commodes. Dans ce cas, pour comparer les moyennes des échantillons pris 2 à 2 et aussi la différence globale entre les échantillons, on utilise l'analyse des variances.

On désire souvent comparer plusieurs traitements entre-eux. Pour y arriver, on construit plusieurs unités expérimentales dans lesquelles on les applique, sans aucun rangement. Les traitements sont en général répétés plusieurs fois pour éviter des biais dans le résultat. On appelle ce dispositif d'expérience **dispositif complètement randomisé**.

Parfois, dans le souci d'augmenter la précision des résultats, on constitue des blocs dans lesquels on applique de façon aléatoire ces différents traitements. Il s'agit du **dispositif en blocs randomisés**.

Il existe d'autres dispositifs qu'on rencontrera dans des ouvrages spécialisés. Nous allons montrer comment on effectue l'analyse des variances dans les deux cas énumérés ci-dessus.

a) Cas des dispositifs complètement randomisés.

Pour vérifier s'il y a un effet traitement, on construit un tableau d'analyse des variances qui tient compte de 3 sources de variations :

* Les différents traitements testés.

* L'erreur résiduelle entre les observations Y_{ij} et la moyenne des traitements \bar{Y}_i .
 * Le total des variations entre les observations Y_{ij} et la moyenne générale \bar{Y} .

Quelques notations

Y_{ij} : j ième observation sur le traitement i
 avec $1 < i < a$; a : nombre total des traitements.
 $1 < j < k$; k : nombre total de répétition effectuée par traitement.

\bar{Y}_i : moyenne de tous les traitements i.

\bar{Y} : moyenne de toutes les observations.

S.V : Source de Variations.

S.C.E : Somme des Carrés des Ecartés.

d.d.l : degré de liberté.

C.M. : Carré Moyen

Le tableau d'analyse des variances se construit de la façon suivante :

S.V	d.d.l	S.C.E	C.M.
Traitement	a - 1	$\Sigma(\bar{Y}_i - \bar{Y})^2$	$\frac{\Sigma k(\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}{a - 1}$
Erreur résiduelle	N - a	$\Sigma_{ij}(Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2$	$\frac{\Sigma_{ij}(Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{N - a}$
Total	N - 1	$\Sigma_{ij}(Y_{ij} - \bar{Y})^2$	

N.B. Erreur résiduelle = $\Sigma_{ij}(y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 = \text{Total} - \text{traitements}$.

Pour tester globalement l'hypothèse nulle : "les moyennes des traitements effectués sont globalement identiques", on réalise le test F de FISHER (table 5 à 7) en lisant dans la table avec a - 1 et N - a degrés de liberté, au niveau signification α , le seuil de

signification $F\alpha$.

La valeur de F est calculée grâce à la relation :

$$F = \frac{\text{C.M.T}}{\text{C.M.E}}$$

C.M.T : Carré Moyen des traitements.

C.M.E : Carré Moyen des erreurs.

Une méthode simple pour comparer les moyennes entre elles, est le calcul de la P.P.D.S (Plus Petite Différence Significative).

$$\text{P.P.D.S} = t\alpha \sqrt{\frac{2S^2}{n}}$$

$t\alpha$: valeur de t au niveau de signification α .

S^2 : carré moyen de l'erreur résiduelle.

$n = K$: Nombre de répétitions.

La différence entre deux traitements i et i' est significative

si $|\bar{Y}_i - \bar{Y}_{i'}| > \text{P.P.D.S}$.

Exemple :

Nous voulons tester l'effet de 4 engrais chimiques sur la culture du maïs. Pour cela, on applique chaque engrais utilisé dans 4 parcelles différentes et on observe le nombre de reprise après 3 mois. Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant : (N.B. La probabilité requise est de 95%)

	T1	T2	T3	T4
	13	25	20	53
	8	42	97	125
	11	12	18	98
	7	33	25	112
	15	51	100	150
Total	54	163	260	538

Calculs :

$$\text{Traitement} = \sum_k (\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..})^2 = \sum_i \frac{(\sum_j Y_{ij})^2}{k} - \frac{(\sum_{ij} Y_{ij})^2}{N}$$

$$= \frac{\sum T^2}{N} - \frac{(\sum T)^2}{N} \quad (\text{avec } T : \text{Total})$$

$$= \frac{54^2 + 163^2 + 260^2 + 533^2}{5} - \frac{(54 + 163 + 260 + 538)^2}{20}$$

$$= 77305,8 - 51511,25 = 25794,55$$

$$\text{Total} = \sum_{ij} (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 = \sum_{ij} Y_{ij}^2 - \frac{(\sum Y_{ij})^2}{N} = \sum_{ij} Y_{ij}^2 - \frac{(\sum T)^2}{N}$$

$$= 13^2 + 8^2 + \dots + 25^2 + 42^2 + \dots + 112^2 + 150^2 - 51511,25$$

$$= 90691 - 51511,25 = 39179,75$$

Erreur = Total - Traitement

$$= 39179,75 - 25794,55 = 13385,2$$

On obtient donc le tableau d'analyse des variances suivant :

S.V	d.d.l	S.C.E	C.M
Traitement	3	25794,55	8598,18
Erreur résiduelle	16	13385,2	836,575
Total	19	39179,75	

$$F = \frac{8598,18}{836,575} = 10,28$$

$f_{0,05}$ lue dans la table de FISHER (table5) avec 3 et 16 degrés de liberté (d.d.l) donne 3,24.

$10,28 > 3,24 \Rightarrow$ Les traitements ne sont pas identiques.

Comparaison des traitements pris 2 à 2. (probabilité 95%)

$$\text{P.P.D.S} = t_{0,05} \sqrt{\frac{2 \times \text{C.M.E}}{5}}$$

$t_{0,05} = 2,12$ avec 16 d.d.l. C.M.E = 836,575

$$\text{d'où, P.P.D.S} = 2,12 \sqrt{\frac{2 \times 836,575}{5}} = 18,293$$

$\bar{Y}_1 = 10,8$; $\bar{Y}_2 = 32,6$; $\bar{Y}_3 = 52$; $\bar{Y}_4 = 107,6$

T1 et T4 : $\bar{Y}_4 - \bar{Y}_1 = 96,8 > 18,3 \Rightarrow$ traitements différents.

T2 et T3 : $\bar{Y}_3 - \bar{Y}_2 = 19,4 > 18,3 \Rightarrow$ traitements différents.

T1 et T2 : $\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1 = 21,8 > 18,3 \Rightarrow$ traitements différents.

b) Cas d'un dispositif en blocs randomisés.

Dans ce cas, les échantillons sont groupés en blocs dans lesquels, on réalise plusieurs traitements différents. Le but de l'analyse est de tester l'effet traitement dans ces différents blocs, de même que l'effet des blocs. Ensuite, on effectuera la comparaison des moyennes entre elles.

Dans ce dispositif, en plus des 3 sources de variations énumérées plus haut, les blocs constituent eux aussi une autre source de variations.

Quelques notations

* Y_{ij} : observation effectuée sur le traitement i dans le bloc j

avec :

$1 < i < a$; a : nombre de traitements.

$1 < j < b$; b : nombre de blocs.

* $\bar{Y}_{i.}$: moyenne de tous les traitements de rang i .

$$\bar{Y}_{i.} = \frac{\sum_{j=1}^b Y_{ij}}{b}$$

* $\bar{Y}_{.j}$: moyenne de tous les traitements dans le bloc j .

$$\bar{Y}_{.j} = \frac{\sum_{i=1}^a Y_{ij}}{a}$$

* $\bar{Y}..$: moyenne générale de toutes les observations.

$$\bar{Y}.. = \frac{\sum_{ij} Y_{ij}}{N}; \quad \text{avec } N : \text{Nombre de toutes les observations; } N = ab.$$

Le tableau d'analyse de variance se présente comme suit :

S.V	d.d.l	S.C.E	C.M
Traitements	a - 1	$\sum_i b. (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}..)^2$	$\frac{\sum_i b. (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}..)^2}{a - 1}$
Blocs	b - 1	$\sum_j a. (\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}..)^2$	$\frac{\sum_j a. (\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}..)^2}{b - 1}$
Erreur résiduelle	(a-1)(b-1)	D	$\frac{D}{(a-1)(b-1)}$
Total	ab - 1	$\sum_{ij} (Y_{ij} - \bar{Y}..)^2$	

N.B. D = Total - Traitements - Blocs.

Pour tester l'effet traitement, on réalise le test de FISHER. On calcule pour cela la valeur de F et on lit le seuil de signification F_{α} dans la table (table 5 à 7) avec a-1 et (a-1)(b-1) degrés de liberté, au niveau de signification α .

$$F = \frac{C.M.T}{C.M.E} \quad \begin{array}{l} C.M.T : \text{Carré Moyen Traitement} \\ C.M.E : \text{Carré Moyen erreur.} \end{array}$$

Pour tester l'effet bloc, on réalise le même test de FISHER. La valeur de F_{α} est obtenue avec b - 1 et (a - 1)(b - 1) degrés de liberté, au niveau de signification α .

$$F = \frac{C.M.B}{C.M.E} \quad C.M.B : \text{Carré Moyen Bloc.}$$

Pour comparer les traitements entre eux lorsque le test de Fisher

a rejeté l'hypothèse nulle, c'est-à-dire que les moyennes des traitements sont globalement distinctes, on procède de la même façon que précédemment. Ainsi, on détermine la P.P.D.S et on compare la valeur absolue de la différence entre deux traitements par rapport à cette quantité.

Exemple 1 :

Nous voulons tester l'effet traitement et l'effet bloc au niveau de signification $\alpha = 0,05$, dans un dispositif en bloc complètement randomisé. Voici récapitulé dans le tableau, les résultats recueillis sur le terrain.

	T1 (Y1j)	T2 (Y2j)	T3 (Y3j)	Total (TB)
Bloc1	8	11	14	33
Bloc2	10	12	19	41
Bloc3	14	14	14	42
Bloc4	13	16	19	48
Total (TT)	45	53	66	164

Solution :

Traitement

$$\text{Traitement} = \sum_i b(\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2$$

$$= \sum_j \frac{(\sum Y_{ij})^2}{b} - \frac{(\sum Y_{ij})^2}{ab} = \frac{\sum TT^2}{b} - \frac{(\sum TT)^2}{ab}$$

$$\Rightarrow \text{Traitement} = \sum 4(\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2$$

$$= \frac{45^2 + 53^2 + 66^2}{4} + \frac{(45 + 53 + 66)^2}{12} = 56,17$$

Bloc

$$\text{Bloc} = \sum_j a(\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..})^2$$

$$= \sum_i \frac{(\sum Y_{ij})^2}{b} - \frac{(\sum Y_{ij})^2}{ab} = \frac{\sum TB^2}{b} - \frac{(\sum TB)^2}{ab}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \text{Bloc} &= \sum_j 3(\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..})^2 \\ &= \frac{33^2 + 41^2 + 42^2 + 48^2}{3} - \frac{(164)^2}{12} = 38 \end{aligned}$$

Total

$$\sum(Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 = \sum_{ij} Y_{ij}^2 - \frac{(\sum TT)^2}{ab}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \sum(Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 &= 8^2 + 10^2 + \dots + 16^2 + 14^2 + \dots + 14^2 + 19^2 - \frac{(164)^2}{12} \\ &= 118,66. \end{aligned}$$

Erreur résiduelle

$$\begin{aligned} \text{Erreur} &= \text{Total} - \text{Blocs} - \text{Traitements} \\ &= 118,66 - 38 - 56,17 = 24,49 \end{aligned}$$

Le tableau d'analyse des variances se présente comme suit :

S.V.	d.d.l	S.C.E	C.M.
Traitement	2	56,17	28,09
Blocs	3	38	12,67
Erreur résiduelle	6	24,49	4,08
Total	11	118,67	

a) Effet traitement

Pour 2 et 6 degrés de liberté, au niveau $\alpha = 0,05$, $f\alpha = 5,14$.

$$F\alpha = \frac{28,09}{4,08} = 6,88$$

$6,88 > 5,14$; on peut dire que les traitements ne sont pas équivalents.

Comparaison 2 à 2

$$P.P.D.S = t_{0,05} \sqrt{\frac{2 \times C.M.E}{4}} \text{ avec 6 d.d.l.}$$

la valeur de $t_{0,05}$ se lit dans la table 3; $t_{0,05} = 2,447$.

$$\Rightarrow P.P.D.S = 2,447 \sqrt{\frac{2 \times 4,08}{4}} = 3,495$$

$$* |\bar{Y}_1. - \bar{Y}_2.| = |11,25 - 13,25| = 2 < 3,495$$

$\Rightarrow T1$ et $T2$ sont équivalents.

$$* |\bar{Y}_1. - \bar{Y}_3.| = |11,25 - 16,5| = 5,25 > 3,495$$

$\Rightarrow T1$ et $T3$ sont différents.

$$* |\bar{Y}_2. - \bar{Y}_3.| = |13,25 - 16,5| = 3,25 < 3,495$$

$\circ \Rightarrow T2$ et $T3$ sont équivalents.

b) Effet bloc

Pour 3 et 6 degrés de liberté, au niveau $\alpha = 0,05$,

$$f\alpha = 4,76; \quad F\alpha = \frac{12,67}{4,08} = 3,11$$

$3,11 < 4,76$. Il n'y a pas d'effet bloc.

Exemple 2 :

Nous voulons tester l'effet du climat et l'effet des interventions sylvicoles sur la croissance en diamètre de l'eucalyptus. On dispose à cet effet 4 peuplements inéquiennes stationnés dans des zones climatiques différentes. Chaque peuplement est divisé en 3 parcelles. La première est laissée comme témoin; dans la deuxième, on exploite les arbres arrivés à maturité; dans la troisième parcelle, on effectue des éclaircies. On revient après 5 ans et on mesure l'accroissement en diamètre. On a obtenu les accroissements annuels suivants : (Niveau de confiance : 90%)

	Témoin	Exploitation	Eclaircie	Total
Zone 1	0,20	0,22	0,37	0,79
Zone 2	0,29	0,33	0,57	1,19
Zone 3	0,12	0,16	0,29	0,57
Zone 4	0,60	0,87	1,53	3,00
Total	1,21	1,58	2,76	5,55

$$\text{Traitements} = \Sigma 4 (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2$$

$$= \frac{(1,21)^2 + (1,58)^2 + (2,76)^2}{4} - \frac{(5,55)^2}{12} = 0,33$$

$$\text{Blocs} = \text{zones} = \Sigma 3 (\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..})^2$$

$$= \frac{(0,79)^2 + (1,19)^2 + (0,57)^2 + 3^2}{3} - \frac{(5,55)^2}{12} = 1,22$$

$$\text{Total} = \Sigma_{ij} (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2$$

$$= (0,20)^2 + (0,29)^2 + \dots + (0,29)^2 + (1,53)^2 - \frac{(5,55)^2}{12} = 1,76$$

$$\text{Erreur résiduelle} = 1,76 - 1,22 - 0,33 = 0,21.$$

S.V	d.d.l	S.C.E	C.M.
Traitements	2	0,33	0,165
Blocs	3	1,22	0,41
Erreur résiduelle	6	0,21	0,035
Total	11	1,76	

a) Effets des interventions sylvicoles.

$$F\alpha = \frac{0,165}{0,035} = 4,71$$

$f\alpha = 3,46$ avec 2 et 6 degrés de liberté (voir table7) $F\alpha 4,71 > f\alpha \Rightarrow$ les traitements donnent des effets différents sur l'accroissement.

Comparaison des traitements 2 à 2.

$$P.P.D.S = t\alpha \sqrt{\frac{2xC.M.E}{4}} = 1,943x \sqrt{\frac{2x0,035}{4}} = 0,257 \text{ avec } 6 \text{ d.d.l.}$$

Soient Mt : Moyenne témoin
Mexp : Moyenne exploitation;
Mecl : Moyenne éclaircie.

$$|Mt - Mexp| = |0,303 - 0,395| = 0,092 < 0,257;$$

Le test ne permet pas de dire s'il existe une différence d'accroissement les parcelles témoins et celles dans lesquelles il y a eu une intervention par exploitation bien que les moyennes soient différentes.

$$|Mt - Mecl| = |0,303 - 0,69| = 0,387 > 0,257;$$

L'accroissement en diamètre se trouve être amélioré lorsqu'il y a une intervention par éclaircie.

$$|Mexp - Mecl| = |0,395 - 0,69| = 0,295 > 0,257;$$

Le test confirme qu'une intervention par éclaircie augmente l'accroissement en diamètre même par rapport à une intervention uniquement par exploitation des arbres mûrs.

b) Effet des zones climatiques.

$$F\alpha = \frac{0,41}{0,035} = 11,71; \quad f\alpha = 3,29 \text{ avec } 3 \text{ et } 6 \text{ degrés de liberté}$$

Ce résultat montre que les zones climatiques ont globalement une influence sur l'accroissement en diamètre. La comparaison des moyennes par zone (zone 1 = 0,26 cm; zone 2 = 0,40 cm; zone 3 = 0,19 cm; zone 4 = 1 cm) permet de dire que la zone 4 est particulièrement favorable pour l'accroissement en diamètre.

$$1 - \frac{0,40 + 0,19 + 0,26}{3} = 0,71$$

CHAPITRE II
TECHNIQUES DE BASE
D'ECHANTILLONNAGE

CHAPITRE II TECHNIQUES DE BASE D'ECHANTILLONNAGE

II.1 IMPORTANCE DE L'ECHANTILLONNAGE

L'échantillonnage est une opération qui consiste à choisir dans une population un échantillon dans lequel on effectue les mesures. Les résultats ainsi obtenus permettent de caractériser la population dans l'ensemble.

En foresterie, cette technique prend de l'ampleur, surtout en matière d'inventaire. En effet, la taille de la forêt est telle qu'il est difficile d'envisager une couverture complète au cours de cette opération.

Il existe plusieurs type de sondage. On doit toujours opter pour celui qui fournit le maximum de précision, à un coût de revient acceptable.

Nous verrons dans les lignes qui suivent, les éléments caractéristiques de l'échantillonnage, les différents modes de sélection, les différentes formes d'erreur qu'on peut avoir lors d'un échantillonnage, comment calculer l'erreur à craindre dans un échantillonnage aléatoire simple et comment estimer la moyenne et la variance pour quelques modes d'échantillonnage.

II.2 ELEMENTS CARACTERISTIQUES

II.2.1 Population

C'est l'ensemble de la population concernée par l'étude.

Lorsque la taille de la population est trop grande, par exemple, lors d'un inventaire à l'échelon national ou régional, on la subdivise en blocs homogènes appelés **population de référence ou unités de compilation**. Dans chaque unité de compilation où s'effectuent la compilation des données et la présentation des résultats on peut appliquer une option d'inventaire, indépendamment des autres. C'est donc cette population, qu'il importe de définir sur le plan statistique.

Nous devons commencer tout travail d'échantillonnage par la délimitation de la population et si possible des unités de compilation. Ceci a une très grande importance car les résultats ne seront pas valables si on travaille seulement dans une partie de la population ou une autre différente de celle-ci, n'ayant pas avec elle les mêmes caractéristiques.

II.2.2 Unités d'échantillonnage

Au cours d'un échantillonnage, la population entière est découpée

en parcelles (de même dimension ou non) appelées unités de la population. On choisit ensuite, en fonction de la variabilité et de la précision recherchée une proportion de celles-ci dans lesquelles on effectue les mesures. On les appelle unités d'échantillonnage. L'ensemble des unités ainsi choisies forment ce qu'on appelle échantillon.

II.2.3 Variable étudiée

La variable à étudier doit être clairement définie pour permettre aux opérateurs de n'évaluer que celle-ci sur le terrain. Par exemple, au cours d'un inventaire, on peut étudier le nombre de tiges à l'hectare, la surface terrière, le diamètre, la hauteur le volume etc.

Il est à noter qu'au cours d'une étude statistique, on peut avoir affaire à une ou plusieurs variables différentes.

Remarque :

Le fait que nous travaillons sur un échantillon de la population, nous amène à faire des estimations des paramètres de celle-ci à partir des résultats obtenus sur cet échantillon. (cf paragraphe I.8)

II.2.4 Stratification

Lorsqu'une population ou une UC est hétérogène comme c'est souvent le cas en zone tropicale, on la subdivise en peuplements plus ou moins homogènes présentant les mêmes caractéristiques, appelés strates. Nous y reviendrons au prochain chapitre.

II.2.5 Précision

Lors d'un échantillonnage, on doit savoir avant tout avec quelle précision les résultats seront obtenus. Puisque la précision est corrélée avec la taille de l'échantillon, le statisticien doit estimer la taille de l'échantillon qui permettra d'obtenir cette précision.

La précision d'une estimation ne doit pas être exprimée en valeur absolue; par exemple : "la précision des résultats d'inventaire est de $\pm 7\%$ ". On doit toujours mentionner le niveau de probabilité requis pour obtenir cette précision. On corrigerait donc notre assertion en disant : "au niveau de probabilité 95%, la précision des résultats d'inventaire est de $\pm 7\%$ "; Ceci veut dire qu'on a 95 chances sur 100 d'obtenir une précision de $\pm 7\%$, ou encore on a 5 chances sur 100 pour que cette précision ne soit pas de $\pm 7\%$.

Elle permet de construire un intervalle de confiance sur la moyenne. Par exemple, si la moyenne est de 53 tiges à l'ha,

l'intervalle de confiance au niveau 95% est de :

$$\begin{aligned} 53 - 0,07 \times 53 &= 49,29 = 49 \\ 53 + 0,07 \times 53 &= 56,71 = 57 \end{aligned}$$

Ainsi, nous pourrions conclure : au niveau de probabilité 95%, la valeur de la moyenne est comprise entre 49 et 57 tiges à l'ha.

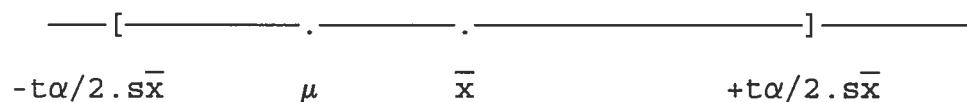
II.2.6 Erreur d'estimation maximale

Lorsque nous prenons la valeur de la moyenne \bar{x} qu'on trouve étant une estimation de la vraie valeur μ , on commet chaque fois une

erreur d'estimation de valeur $|\bar{x} - \mu|$. Puisque l'intervalle de

confiance sur la moyenne est $[\bar{x} - t\alpha/2.s\bar{x}; \bar{x} + t\alpha/2.s\bar{x}]$, alors l'erreur d'estimation maximale qu'on peut commettre lors de

l'estimation de μ est de $t\alpha/2.s\bar{x}$.



La relation qui existe entre la précision et l'erreur d'estimation maximale est la suivante :

$$P = \frac{\text{E.E.M}}{\bar{x}} \times 100$$

II.2.7 Taille n de l'échantillon

Si on connaît à l'avance la précision ou l'erreur d'estimation maximale (E.E.M) recherchée, ceci peut nous amener à déterminer la taille n de l'échantillon à utiliser.

* Cas où on connaît la précision P.

$$P = \frac{\text{E.E.M}}{\bar{x}} \times 100 = t\alpha/2 \cdot \frac{s\bar{x}}{\bar{x}} \times 100 = t\alpha/2 \cdot \frac{s}{\sqrt{n} \cdot \bar{x}}$$

$$= t\alpha/2 \cdot \frac{Cv}{\sqrt{n}} \Rightarrow n = \left(\frac{t\alpha/2 \times Cv}{P} \right)^2$$

Cv : Coefficient de variation.

*** Cas où on connaît l'erreur d'estimation maximale (E.E.M)**

$$E.E.M = t_{\alpha/2} \times \bar{sx} = t_{\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$\Rightarrow n = \left(\frac{t_{\alpha/2} \times S}{E.E.M} \right)^2$$

Le problème qui se pose, dans l'application de ces formules est qu'on ne peut pas connaître la valeur de l'écart type ou du coefficient de variation sans avoir collecté les données sur le terrain. Or, la détermination de la taille de l'échantillon est une opération préalable même à la détermination de l'échantillon. Pratiquement, pour estimer ces variables, on prélève un échantillon réduit de la population qui nous permet d'avoir une idée sur la moyenne, l'écart type et le coefficient de variations. Avec ces paramètres, on pourra donc déterminer la taille de l'échantillon.

Exemple

1- Nous venons d'acquérir une concession forestière et nous voulons déterminer le diamètre moyen des arbres de celle-ci. On désire une E.E.M = 2 cm au niveau de probabilité 95%. Après un prélèvement de 12

arbres, on trouve $\bar{D} = 80$ cm et $S = 5$ cm.

Quelle taille d'échantillon doit-on prélever pour estimer ce diamètre moyen ?

Réponse

Dans la table de STUDENT, la valeur de t est de $t = 2,179$. D'où

$$n = \left(\frac{2,179 \times 5}{2} \right)^2 = 30$$

Il faudra donc prélever environ 30 arbres pour obtenir une E.E.M = 2 cm.

2- Nous voulons déterminer le nombre moyen de tiges à l'ha de Bété et d'Ayous dans un peuplement forestier, avec une précision de 15%, au niveau de probabilité 90%. En prélevant 6 parcelles-échantillon, on trouve :

$$\bar{x} = 20 \text{ tiges à l'ha et } S = 13$$

Déterminer le nombre de parcelle-échantillons qu'il faudra prélever

pour estimer le nombre de tiges à l'ha, à la précision requise.

Réponse

$$n = \left(\frac{Cv \times t}{p} \right)^2 = \left(\frac{S \times t \times 100}{P \cdot \bar{x}} \right)^2$$

la valeur de t lue dans la table est de 1,943.

$$\Rightarrow n = \left(\frac{13 \times 1,943 \times 100}{15 \times 20} \right)^2 = 71 \text{ P.E}$$

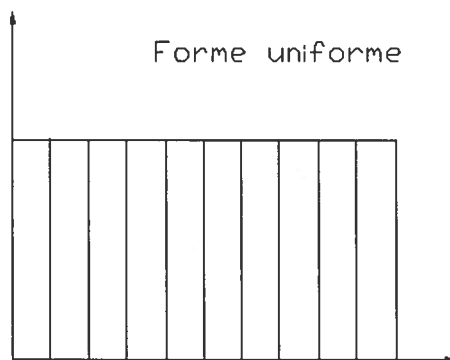
Il faudra environ 71 P.E pour estimer le nombre de tiges à l'ha avec une précision de 15% au niveau de probabilité 90%.

Remarques :

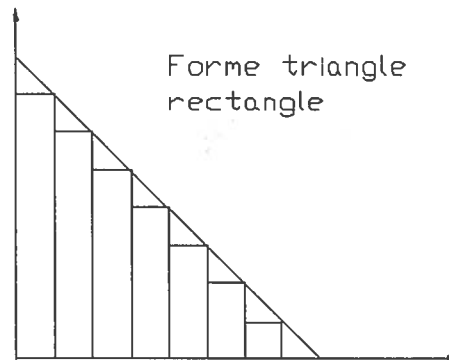
1- Dans ces formules, on n'a pas tenu compte de la correction à apporter lorsque la population est finie. On pourra se référer aux documents spécialisés en cas de besoin.

2- On peut aussi estimer grossièrement la taille de l'échantillon si on connaît l'étendue (maximum - minimum) et approximativement la distribution de la variable dans la population. Si on note h l'étendue de la population, la valeur de l'écart type serait :

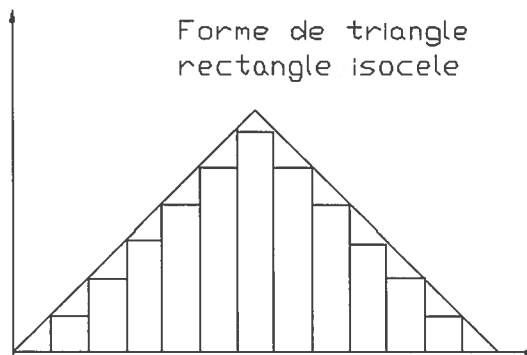
* $S = 0,29 h$ dans le cas d'une distribution uniforme (rectangulaire).



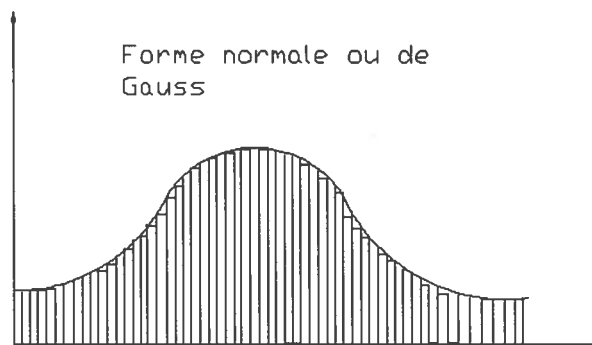
* $S = 0,24$ h pour celle ayant la forme d'un triangle rectangle.



* $S = 0,21$ h lorsqu'elle se présente comme un triangle isocèle.



* $S = 0,17$ h lorsque la distribution est normale.



3- Lorsqu'on estime la taille à l'aide d'un programme informatique, on procède par itération (répétitions successives des niveaux de confiance), afin d'obtenir la meilleure précision correspondant à la taille raisonnable.

4- La taille de l'échantillon est la somme de toutes les unités-échantillons; on la note n. L'intensité d'échantillonnage est le rapport entre la taille de l'échantillon et la taille de la

population; on la note $f = \frac{n}{N}$.

5- Les méthodes d'estimation de la taille de l'échantillon, décrites plus haut sont surtout valables lorsqu'on a affaire à un échantillonnage aléatoire simple.

II.3 LES DIFFERENTS MODES DE SELECTION DES UNITES-ECHANTILLONS

II.3.1 Probabilité de sélection des unités-échantillons.

La théorie d'échantillonnage est appliquée en principe si la probabilité de sélection de chaque unité échantillon est connue. Cette probabilité permet en particulier de savoir avec quelle erreur la moyenne ou le total de la population a été estimé.

Cependant, dans la pratique, il arrive qu'on se fie à l'expérience d'une personne qui a déjà travaillé dans la même population pour effectuer cette sélection. Très souvent, on ne sélectionne pas les unités dans les zones inaccessibles. Même si ces méthodes donnent souvent de bons résultats, on doit souvent être prudent lors de leur application.

Dans la plupart des sondages probabilistes, particulièrement pour les échantillonnages au hasard, chaque unité a la même chance d'être sélectionnée. Dans ce cas, si N est le nombre total d'unités dans la population, alors la probabilité P de chaque unité d'être sélectionné est de :

$$P = \frac{1}{N}$$

Cependant, pour différentes raisons, il peut arriver que cette probabilité de sélection ne soit pas identique d'une unité à l'autre. En particulier, il existe un mode d'échantillonnage avec une probabilité proportionnelle à la dimension (ou à la taille); on la note P.P.D. Dans ce cas, la probabilité de sélection de l'unité est de :

$$P = \frac{S_i}{S} \quad \begin{array}{l} S_i : \text{taille ou surface de l'unité } i. \\ S : \text{taille ou surface de la population.} \end{array}$$

II.3.2 Sélection avec ou sans remise.

*** Sélection avec remise**

La sélection des unités-échantillons s'effectue avec remise lorsqu'après avoir sélectionné une unité de la population, on note le numéro correspondant à cette unité et on la remet dans la population. Ceci veut dire que pour tirer les autres unités, on tient compte de celles déjà tirées.

Pour illustrer ce mode de tirage par un exemple, prenons une urne dans laquelle nous introduisons 30 papiers numérotés de 1 à 30. Ces numéros représentent chacune une unité-échantillon extraite d'une plantation de 30 ha (chaque unité a donc une superficie de 1 ha). Nous voulons sélectionner 5 unités, soit 5 numéros de l'urne. Après avoir mélangé les papiers dans l'urne, on tire le premier numéro, on le note et on le remet dans l'urne. On répète ainsi l'opération jusqu'à obtenir les 5 numéros représentant ces unités-échantillons. On peut dire que ces unités ont été obtenues grâce à un tirage avec remise ou qu'il s'agit d'un échantillonnage avec remise.

*** Sélection sans remise**

La sélection des unités s'effectue sans remise lorsque chaque unité de la population est choisie sans qu'il n'y ait la possibilité qu'une autre déjà tirée soit encore retirée.

Si nous reprenons l'exemple précédent, le tirage des 5 papiers est effectué sans remise si on extrait chaque numéro sans le remettre dans l'urne; ceci veut dire que le premier numéro est tiré parmi 30, le deuxième parmi 29, le troisième parmi 28 etc.

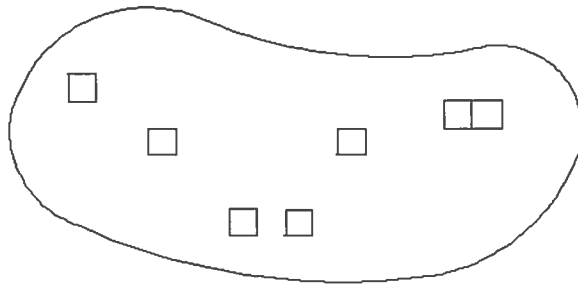
Bien que la plupart des formules utilisées dans la pratique soient valables en réalité pour des sélection avec remise, il est à signaler que le mode de sélection le plus utilisé est le tirage sans remise, car il est rare d'avoir deux mêmes unités dans l'échantillon. Cette approximation est surtout valable lorsque le nombre d'unités-échantillons est petit comparé au nombre total d'unités dans la population.

II.3.3 Sélection au hasard - sélection systématique

*** Sélection au hasard**

La sélection au hasard signifie que chaque unité de la population a la même chance d'être sélectionnée. On ne tient pas compte des différences qui pourraient exister entre ces unités. Dans la pratique, pour effectuer un tirage au hasard, on peut procéder de différentes méthodes. A titre indicatif, nous pouvons citer celle relative à la table des nombres au hasard et celle qui consiste à mélanger les numéros des unités dans l'urne et d'en sélectionner

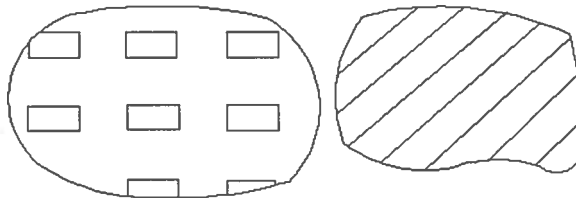
chacun au hasard.



La méthode de sélection au hasard a cet avantage qu'elle permet de déterminer facilement l'erreur à craindre c'est-à-dire de calculer la précision de l'échantillonnage au niveau de probabilité requis. Elle présente cependant de nombreux inconvénients; non seulement sa représentation sur une carte est plus difficile, mais aussi sa matérialisation sur le terrain. De plus, cette méthode laisse souvent des trous c'est-à-dire des parties non sondées dans la population ou le peuplement à inventorier.

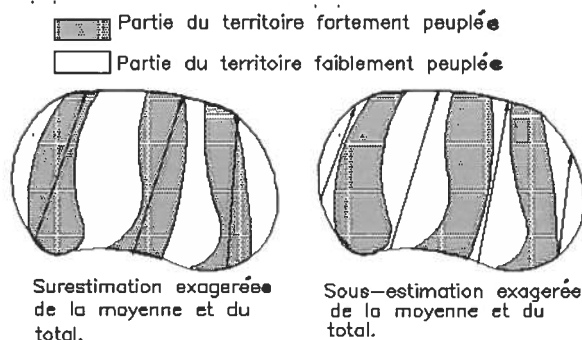
* Sélection systématique

La sélection est dite systématique lorsque les unités-échantillons sont sélectionnées automatiquement de la même façon. Seule la première unité est déterminée soit au hasard, soit suivant une convention préalablement définie. Dans de nombreux sondages systématiques, les unités sont disposées sur des lignes parallèles, placées à égale distance.



L'avantage de la sélection systématique est que les unités sont faciles à représenter sur une carte et à matérialiser sur le terrain. Il y a une bonne répartition des unités, ce qui ne laisse pas de trouées important dans la population. En outre, cette méthode donne une bonne estimation de la moyenne et du total de la variable étudiée dans la population, surtout lorsqu'on dispose les unités en tenant compte de la variabilité des peuplements forestiers.

Cette méthode présente aussi des inconvénients. Le calcul de l'erreur à craindre ou de la précision de l'échantillonnage lorsqu'il doit être rigoureux est difficile à déterminer. Plusieurs chercheurs ont réfléchi sur la question, mais les résultats diffèrent et dépendent aussi de la répartition des unités. Cependant, lorsque l'équidistance entre les unités est suffisamment grande pour qu'on puisse considérer deux unités consécutives comme indépendantes, on estime la précision en utilisant les techniques d'échantillonnage au hasard. Aussi, il peut arriver que les strates soient réparties sur le terrain de façon systématique et que la périodicité des unités d'échantillonnage coïncide avec cette répartition.



qu'il peut arriver que le peuplement soit distribué de façon systématique et que la périodicité de l'échantillonnage coïncide avec cette distribution.

Remarque :

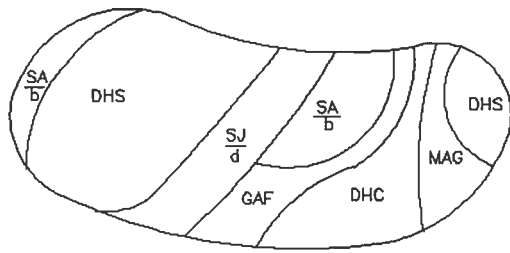
Les avantages de l'inventaire systématique font que, dans la pratique, ce type de sondage soit beaucoup plus utilisé. En inventaire forestier, on recommande, pour éviter des surestimations ou sous-estimations exagérées de la moyenne et du total, d'orienter les lignes d'inventaire perpendiculairement aux vallées et aux grandes lignes du relief.

II.3.4 Sondage stratifié

La stratification consiste à regrouper la population en peuplements plus ou moins homogènes appelés strates. Cette opération peut s'effectuer avant ou après le sondage qui peut être aléatoire ou systématique. A la fin du sondage, chaque strate est compilée et traitée indépendamment des autres. Après avoir traité toutes les strates, on effectue une analyse des variances pour connaître la variance globale dans la population.

L'avantage de la stratification est qu'elle permet de subdiviser la population en peuplements beaucoup plus homogènes et par conséquent,

diminue de façon très efficace la variabilité de la population. Il y a donc un gain de précision par rapport au sondage aléatoire simple.



SA
— Forêt secondaire adulte à b forte densité.

SJ
— : Forêt secondaire jeune d jeune à faible densité.

DHS : Forêt dense humide sempervirente

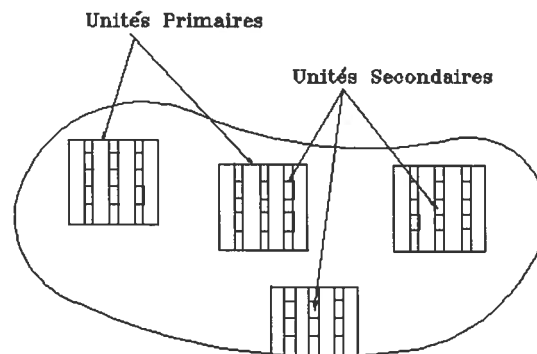
MAG : Mangrove

GAF : Galerie forestière

DHC : Dense humide caducifoliée.

II.3.5 Sondage à 2 degrés

Le sondage à 2 degrés consiste à choisir dans un premier temps, des unités statistiques appelées unités primaires. Dans chacune d'elles, on choisit ensuite d'autres plus petites appelées unités secondaires. C'est dans ces dernières unités que seront effectuées les mesures des variables à estimer.



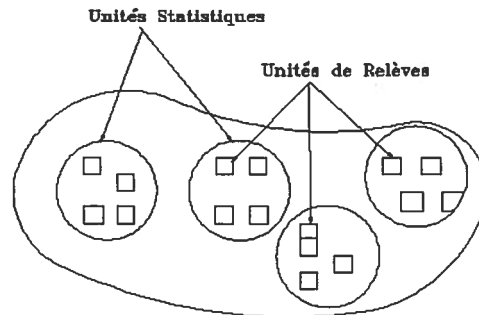
Le sondage à deux degré est effectué le plus souvent lorsque la population est trop grande.

Ce type de sondage a l'avantage de réduire le nombre d'unités à sélectionner car on regroupe dans celles-ci d'autres plus petites. On réduit ainsi les déplacements et donc les coûts de sondage.

II.3.6 Sondage en grappes

Un sondage est en grappes lorsque les unités statistiques sont

regroupées en unités plus petites qui ne sont que des unités de relevés. Il ne faut donc pas confondre unités de relevés et unités secondaires et donc sondage en grappes et sondage à deux degrés.



SONDAGE EN GRAPPES

Une unité de relevé est une celle dans laquelle on prend uniquement les mesures des variables, qu'on va ensuite regrouper au niveau de l'unité statistique sans y faire aucune analyse statistique préalable.

Une unité secondaire quant à elle est une unité statistique.

Pour illustrer cette distinction, supposons que la variable à estimer est le nombre de tiges à l'hectare. Si on a affaire à un sondage en grappes, on va réduire l'unité statistique en plusieurs unités de relevés dans lesquelles on compte le nombre de tiges rencontrées. On additionne ensuite les résultats obtenus dans chacune d'elles pour avoir un nombre total de tiges. Finalement, on obtient le nombre de tiges à l'hectare par rapport à la surface de l'unité statistique. Par contre, dans le cas d'un sondage à deux degrés, on obtient directement le nombre de tiges à l'hectare, par rapport à la surface de l'unité secondaire qui est une unité statistique.

Notons pour conclure que la mise en oeuvre d'un mode d'échantillonnage dépend de la distributions des individus dans la population. On doit toujours tendre vers le type de sondage qui fournit le maximum de précision à un coût de revient acceptable.

II.4 LES DIFFERENTES FORMES D'ERREUR QU'ON PEUT AVOIR LORS D'UN ECHANTILLONNAGE.

Au cours d'un inventaire par échantillonnage, il peut y avoir plusieurs sources d'erreurs qu'on doit toujours avoir présent à l'esprit, afin de mieux les contrôler et de les réduire au strict minimum. On peut avoir des :

- erreurs dues à l'interprétation des photographies aériennes :

ceci s'effectue lorsque le peuplement forestier n'est pas homogène et on recourt à la stratification forestière du territoire. Les erreurs peuvent provenir de la nature des photos (texture, structure, échelle, réflectance, émulsion utilisée) et/ou de l'interprétation (opérateur, préparation des photos, critères d'interprétation).

- erreurs lors de l'estimation des superficies :

Lorsque la population est stratifiée, si on ne procède pas avec attention, on peut arriver à des erreurs d'estimation qui peuvent être considérables. Il faut donc calculer l'écart qui existe entre la surface totale des strates et celle de la population. On trouve ensuite une pondération qui permet de corriger cet écart.

- erreurs d'échantillonnage :

Lors d'un échantillonnage, il faut contrôler plusieurs paramètres afin de pouvoir réduire au maximum les biais :

* connaître si possible, la composition et la probabilité de sélection de tous les échantillons possibles pour un type de sondage donné. Le nombre M d'échantillons possibles qu'on peut avoir lorsqu'on doit y choisir un, contenant n unités-échantillons d'une population finie contenant N unités totales est de :

$$M = C_N^n = \frac{N!}{n!(N - n)!}$$

* Connaître la probabilité de sélection de chaque unité de la population.

* Les unités sélectionnées doivent être représentatives de la population. Par conséquent, si elles sont choisies dans une partie de celle-ci, le résultat sera biaisé si la population n'est pas rigoureusement homogène.

* Choisir le mode d'échantillonnage en tenant compte de la distribution des individus dans la population. On peut utiliser des modes de sondage différents, dans des unités de compilation différentes au cours d'un inventaire.

* Utiliser des formules permettant d'estimer les paramètres (moyenne, écart-type, variance, précision) d'une variable, en tenant compte du mode d'échantillonnage. L'oubli de ce détail peut être une source d'erreur considérable.

- erreurs de mesurage :

Les mesures effectuées sur le terrain doivent être réalisées avec soin. On doit savoir que la théorie d'échantillonnage ne tient pas compte des erreurs de mesures. Celles-ci, lorsqu'elles existent, entraîneront des biais importants dans l'estimation des paramètres de la population. Les différentes sources d'erreur sont les suivantes (on pourra se référer au tome 1 page 7) :

- . mauvaise identification de l'origine d'un instrument.
- . mauvaise lecture.
- . instrument non étalonné ou mal étalonné.
- . instrument inadéquat qui donne des résultats peu précis.
- . mauvaise méthode utilisée pour estimer la valeur d'une mesure.

II.5 PRINCIPE DE CALCUL DE L'ERREUR A CRAINDRE DANS UN ECHANTILLONNAGE ALEATOIRE SIMPLE.

Nous avons vu au paragraphe II.4 que lorsque nous prélevons un échantillon contenant n unités dans une population finie contenant N unités totales, il y a $M = C_N^n$ possibilités totales de choix de l'échantillon. Chacun de ces échantillons devrait

donner une estimation \bar{y}_i ($1 < i < M$) de la moyenne qui peut différer d'un échantillon à l'autre. On doit donc utiliser ces

résultats pour déterminer la valeur de la moyenne \bar{Y} sans biais qui tend vers la valeur vraie μ de la population. On pourra aussi déterminer la variance entre les échantillons et finalement l'erreur à craindre lors de cette estimation.

* Détermination de la moyenne.

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^M p_i \bar{y}_i; \quad p_i : \text{probabilité de sélection de l'échantillon de rang } i.$$

Si chaque échantillon a la même probabilité $p_i = \frac{1}{M}$, alors

cette formule devient :

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^M \bar{y}_i}{M}$$

* Détermination de la variance entre les échantillons

$$V(\bar{Y}) = \sum_{i=1}^M p_i (\bar{y}_i - \bar{Y})^2 = \frac{\sum_{i=1}^M (\bar{y}_i - \bar{Y})^2}{M}$$

Lorsque $p_i = 1/M$, on obtient $V(\bar{Y}) = \frac{\sum_{i=1}^M (\bar{y}_i - \bar{Y})^2}{M}$

$$= \frac{\sigma^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N} \right)$$

σ^2 : variance de la variable étudiée dans la population.

L'erreur d'estimation maximale ou erreur à craindre est donc :

$$e = \text{E.E.M} = t_{\alpha/2} \sqrt{V(\bar{Y})} = t_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\left(1 - \frac{n}{N} \right)}$$

En pratique, puisqu'il est difficile d'étudier la distribution de la moyenne des échantillons, on détermine cette erreur grâce à une estimation S^2 de la variance de la population σ^2 ; ceci est obtenu dans un échantillon tiré au hasard. Il est à noter que S^2

est une estimation sans biais de σ^2 et \bar{y}_i de Y . On peut donc calculer ces valeurs dans un échantillon quelconque de rang i grâce aux formules suivantes :

$$\bar{Y} = \bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^n y_j}{n}$$

$$S^2 = S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y}_i)^2}{n - 1}$$

Pour déterminer cette erreur au niveau de probabilité α , on utilisera plutôt l'approximation suivante :

$$e = t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \sqrt{\left(1 - \frac{n}{N} \right)} = t_{\alpha/2} \cdot S\bar{Y}$$

$S\bar{Y}$: écart type de la moyenne de la variable Y .

II.6 QUELQUES PROPRIETES USUELLES.

1- Soit \bar{Y} l'estimation de la moyenne d'une variable et N le nombre total d'unités dans la population.

$T = N\bar{Y}$ avec T : estimation du total de la variable étudiée.

$V(T) = N^2 V(\bar{Y})$; $V(T)$: Variance du total.

$V(\bar{Y})$: Variance de la moyenne.

2- Soient S_1 et S_2 les surfaces de 2 sous populations indépendantes de moyenne \bar{Y}_1 et \bar{Y}_2 . La population correspondante a une surface totale S et une moyenne \bar{Y} .

$$a) \quad \bar{Y} = \frac{S_1}{S} \bar{Y}_1 + \frac{S_2}{S} \bar{Y}_2.$$

$$b) \quad V(\bar{Y}) = \frac{S_1^2}{S^2} V(\bar{Y}_1) + \frac{S_2^2}{S^2} V(\bar{Y}_2)$$

Nous pouvons généraliser ces formules en considérant le cas où on affaire à une population subdivisée en n sous populations. Dans ce cas, on pose :

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S} \bar{Y}_i$$

$$V(\bar{Y}) = \sum_{i=1}^n \frac{S_i^2}{S^2} V(\bar{Y}_i)$$

3- Soient deux variables X et Y extraites d'une même population.

* Si les deux variables sont indépendantes, on a :

$$a) \quad V(XY) = Y^2 V(X) + X^2 V(Y)$$

$$b) \quad V\left(\frac{X}{Y}\right) = \left(\frac{X}{Y}\right)^2 \left[\frac{V(X)}{X^2} + \frac{V(Y)}{Y^2} \right]$$

* Si les deux variables sont dépendantes, on a :

$$a) \quad V(XY) = Y^2 V(X) + X^2 V(Y) + 2XY \text{cov}(X, Y)$$

$$b) \quad V\left(\frac{X}{Y}\right) = \left(\frac{X}{Y}\right)^2 \left[\frac{V(X)}{X^2} + \frac{V(Y)}{Y^2} - \frac{2\text{cov}(X, Y)}{XY} \right]$$

II.7 ESTIMATION DE LA MOYENNE ET DE LA VARIANCE POUR QUELQUES MODES D'ECHANTILLONNAGE

II.7.1 Unités de même taille

* Echantillonnage aléatoire

* estimation de la moyenne.

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad y_i : \text{valeur de la variable dans l'unité } i.$$

* estimation de la variance de la moyenne \bar{Y} .

$$V(\bar{Y}) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n - 1} \left(\frac{1 - f}{n} \right)$$

$$f = \frac{n}{N} : \text{taux d'échantillonnage.}$$

Ce taux est négligé lorsqu'il est inférieur à 0,1. Dans ce cas, $V(\bar{Y})$ devient :

$$V(\bar{Y}) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n(n - 1)}$$

* Echantillonnage stratifié

* estimation de la moyenne par unité.

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{h=1}^L N_h \bar{y}_h}{N}$$

avec :

N_h : Nombre total d'unités dans la strate h ou surface de celle-ci.

\bar{y}_h : moyenne de la strate h .

$$\frac{1 - \frac{n}{N}}{n} = \frac{N - n}{Nn} = \frac{1}{n} - \frac{1}{N}$$

N : Nombre total d'unités dans la population ou surface totale.

L : Nombre total de strates.

h : indice de chaque strate.

* estimation de la variance de \bar{Y} .

Notons $V(\bar{y}_h)$ la variance de la moyenne \bar{y}_h dans la strate h.

$$V(\bar{y}_h) = \frac{\sum_{i=1}^{nh} (y_i - \bar{y}_h)^2}{nh - 1} \left(\frac{1 - f_h}{nh} \right)$$

avec : nh : nombre d'unités-échantillons dans la strate h.

i : indice de l'unité dans la strate h.

fh : taux de sondage dans la strate h $f_h = \frac{nh}{Nh}$

On a alors :

$$V(\bar{Y}) = \sum_{h=1}^L \frac{Nh^2}{N^2} V(\bar{y}_h)$$

* **Echantillonnage à 2 degrés**

* estimation de la moyenne \bar{Y} .

Notons \bar{y}_i la moyenne dans l'unité primaire i.

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^m y_{ij}}{m} \text{ avec :}$$

y_{ij} : valeur de la variable dans l'unité secondaire j de l'unité primaire i.

m : nombre d'unités secondaires sondées par unité primaire.

i : indice de l'unité primaire.

j : indice de l'unité secondaire.

On alors :

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{y}_i}{n}$$

* estimation de la variance de \bar{Y} .

Notons $V(\bar{y}_i)$ la variance de la moyenne \bar{y}_i dans l'unité primaire i .

$$V(\bar{y}_i) = \frac{\sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{m - 1} \left(\frac{1 - f_2}{m} \right)$$

avec : $f_2 = \frac{m}{M}$: taux de sondage dans l'unité secondaire

M : Nombre total d'unités secondaires.

On a alors :

$$V(\bar{Y}) = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{Y})^2}{n - 1} \left(\frac{1 - f_1}{n} \right) + \frac{\sum_{i=1}^n V(\bar{y}_i)}{n}$$

On peut alors remarquer que lorsque $f_1 < 0,1$ c'est-à-dire négligeable, alors $V(\bar{Y})$ devient :

$$V(\bar{Y}) = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{Y})^2}{n(n - 1)}$$

II.7.2 Unités de tailles différentes

* Echantillonnage aléatoire

* estimation de la moyenne par unité de surface.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i} = \frac{\bar{Y}}{\bar{X}}$$

Y_i : valeur de la variable Y dans l'unité i.

X_i : surface de l'unité i.

\bar{Y} , \bar{X} : moyenne de la variable Y et celle de la surface.

R : moyenne par unité de surface.

* estimation de la variance R.

$$V(R) = \left(\frac{\bar{Y}}{\bar{X}} \right)^2 \left(\frac{1-f}{n} \right) \left[\frac{V(\bar{Y})}{\bar{Y}^2} + \frac{V(\bar{X})}{\bar{X}^2} - 2 \frac{\text{cov}(\bar{X}, \bar{Y})}{\bar{X} \cdot \bar{Y}} \right] \quad (1)$$

* **Echantillonnage stratifié**

* estimation de la moyenne par unité de surface.

$$R = \frac{\sum_{h=1}^L N_h \cdot R_h}{N}$$

$\frac{S_n}{n}$

R_h : moyenne de la strate h.

N_h : Surface de la strate h ou nombre total d'unités dans cette strate.

N : Surface totale ou nombre total d'unités dans la population.

* estimation de la variance de R

Notons $V(R_h)$ la variance de la moyenne dans la strate h. $V(R_h)$ est exprimée à l'aide de la formule (1). On a alors :

$$V(R) = \sum_{h=1}^L \frac{N_h^2}{N^2} V(R_h)$$

CHAPITRE III
STRATIFICATION FORESTIERE
DU TERRITOIRE

(1-18)
3

CHAPITRE III STRATIFICATION FORESTIERE DU TERRITOIRE

La stratification est la division et la répartition du territoire en plusieurs peuplements homogènes ou strates présentant les mêmes caractéristiques. Dans les zones tropicales, la diversité des espèces rend en général le territoire très hétérogène, d'où la nécessité de cette opération lors des inventaires forestiers. Son but est de réduire cette hétérogénéité et d'augmenter la précision des résultats d'inventaire. Pour mener à bien cette opération, on doit au préalable connaître les différents types forestiers existants. C'est sur cette base que seront déterminés les critères de stratification.

III.1 DESCRIPTION DES DIFFERENTS TYPES FORESTIERS.

La forêt est un regroupement de composantes végétales (arbres, arbustes, lianes, herbes etc), animales, inertes (litière, sol, etc) et climatiques. Il existe entre ces différentes composantes des interactions qui en font un écosystème qui varie d'une région à l'autre. Nous nous intéressons à la composante végétale constituée d'arbres...

Lorsque les arbres d'une forêt ont le même âge, on dit que la forêt est équiennne. Lorsque l'âge des arbres varie au sein d'une même forêt, on dit qu'elle est inéquiennne. On distingue plusieurs types de forêts groupées en deux catégories :

- les forêts artificielles
- les forêts naturelles.

III.1.1 Les forêts artificielles.

Ce sont des peuplements forestiers constitués d'arbres qui ont évolué par suite de l'intervention de l'homme pendant ou après sa création.

On utilise dans la pratique différentes terminologies (qui prêtent souvent à confusion) pour caractériser en fonction de l'origine les forêts issues des régénérations artificielles. Ce sont :

Afforestation : Il s'agit des forêts artificielles qui ont été créées sur un terrain qui préalablement ne portait aucun peuplement forestier. C'est l'homme qui a planté les arbres sur toute l'étendue d'un terrain nu.

Reforestation : Il s'agit des forêts artificielles qui ont été créées sur un terrain portant un peuplement forestier. On remplace les arbres existants par d'autres essences. Pour qu'on parle de reforestation, il doit avoir conversion totale de la forêt existante en une autre. Les semences ou les boutures utilisées ne doivent pas provenir de la forêt pré-existante. Elles doivent être prélevées dans un verger ou une forêt où le

génotype et les caractères phénotypiques ont été jugés de bonne qualité.

Régénération artificielle : On parle de régénération artificielle lorsque la forêt a été créée par remplacement de la forêt pré-existante, à partir des semences ou des boutures provenant de celle-ci. On recrée donc la forêt pré-existante.

Régénération naturelle : On classe dans la catégorie des forêts artificielles, les peuplements forestiers issus d'une régénération naturelle, ceux qui ont connu au cours de leur évolution des interventions humaines. Ces interventions peuvent être de l'exploitation sélective des essences de valeur, du déliantage ou des éclaircies.

III.1.2 Les forêts naturelles.

Ce sont des peuplements forestiers qui ont été mis en place et qui ont évolué jusqu'à leur stade adulte sans aucune intervention de l'homme. Ce sont en général des peuplements mélangés c'est-à-dire constitués de plusieurs espèces différentes. Cependant, on trouve souvent des forêts naturelles pures, constituées d'une seule essence.

En zone tropicale, les peuplements sont densément mélangés, ce qui constitue une grande hétérogénéité. Lors de l'évaluation des ressources forestières on est donc obligé de procéder à la stratification pour homogénéiser cette forêt. La stratification forestière conduit à la division du territoire en 3 catégories :

- les terrains forestiers
- les terrains boisés
- les terrains non boisés.

III.1.2.1 Les terrains forestiers.

Ce sont les superficies couvertes d'arbres dont les cimes couvrent plus de 20% de la surface totale et donc la principale utilisation est forestière. On classe sous cette catégorie, les forêts denses, les forêts secondaires et les forêts sur sol hydromorphe.

III.1.2.1.1 Les forêts denses.

Une forêt est dense lorsque les arbres qui la constituent ont atteint la maturité. Les cimes sont jointives. On distingue:

a) Les forêts denses de basse et moyenne altitude.

Les forêts sont de basse altitude lorsque l'altitude moyenne est de 800 m et de moyenne altitude lorsqu'elle se situe entre 800 et 1200 m. On distingue :

*** Les forêts denses humides sempervirentes.**

Ce sont des forêts constitués de grands arbres qui peuvent atteindre jusqu'à 40 à 50 m de hauteur et 250 cm de diamètre. Ces arbres conservent leur feuillage tout au long de l'année. On les rencontre le plus souvent sur des sols ferrallitiques. La précipitation moyenne est de 1500 mm.

*** Les forêts denses humides semi-caducifoliées.**

C'est un type de forêt constituée d'arbres dont une partie perd leur feuille pendant la saison sèche. Elles sont constituées de grands arbres dont la hauteur dépasse souvent 40 m. On les rencontre le plus souvent sur des sols ferrallitiques rouges garnis de cuirasse. La précipitation moyenne est de 1450 à 1750 mm.

*** Les Galeries forestières.**

On les rencontre le plus souvent dans les zones de savane et le long des cours d'eau. Elles s'étalent jusqu'à 500 m de largeur. Elles sont constituées d'arbres de taille moyenne.

b) Les forêts de montagne.

Ce sont des forêts qu'on rencontre à une altitude supérieure à 1200 m. On distingue :

*** Les forêts denses humides de montagne.**

On les rencontre à des altitudes supérieures à 1200 m. Elles sont constituées d'arbres à cimes jointives, de hauteur comprise entre 15 à 25 m. La précipitation moyenne est d'environ 1500 mm.

*** Les forêts denses sèches de montagne.**

Ce sont des forêts qu'on rencontre à des altitudes supérieures à 1500 m, avec une faible précipitation. Les arbres sont de petite taille : entre 10 et 15 m.

*** Les Bambousaies.**

On les rencontre sur la partie supérieure des forêts de montagne. Elles sont constituées de Bambou de hauteur comprise entre 10 et 15 m.

III.1.2.1.2 Les forêts secondaires.

Ce sont des forêts qui s'installent suite à une perturbation de la forêt, soit à cause des coupes, des chablis, des brûlis ou des éclaircies. Elles constituent des étapes transitoire à une forêt dense. On distingue plusieurs phases successives :

- La forêt en régénération
- La forêt secondaire jeune
- La forêt secondaire adulte.

*** La forêt en régénération.**

Lorsqu'il y a une perturbation ou une disparition complète de la forêt, il s'installe des groupements pionniers appelés Gaulis. Ces derniers proviennent des graines des arbres situés en périphérie et qui ont été transportés, soit par le vent, les oiseaux, les animaux, etc. Ils ont en général un tempérament héliophile et un diamètre compris entre 1 et 20 cm.

*** La forêt secondaire jeune.**

Les pionniers vont croître très rapidement et vont donner naissance à ce type de forêt constitués d'arbres de taille moyenne (diamètre compris entre 20 à 50 cm et hauteur entre 10 et 25 m).

Malgré la production des graines par ces essences héliophytes, il apparaît dans le sous bois des essences sciaphytes qui supportent facilement l'ombre.

*** La forêt secondaire adulte.**

Les espèces sciaphytes qu'on trouve dans le sous bois de la forêt secondaire jeune vont croître rapidement et faire la compétition à leurs aînés qui vont disparaître progressivement par mortalité. On retrouve donc dans la strate dominante et co-dominante des forêts secondaires adultes des espèces héliophytes et sciaphytes. La hauteur du peuplement varie entre 20 et 35 m et les diamètres compris entre 20 et 80 cm.

Avec le temps, les essences de lumière vont disparaître complètement pour céder la place aux essences d'ombre. On arrive alors à une forêt primaire.

III.1.2.1.3 Les forêts sur sols hydromorphes.

Ce sont des forêts qui se développent sur des zones gorgées d'eau périodiquement ou en permanence. On distingue :

*** La mangrove.**

On les trouve aux alentours des mers, sur sols plats, impénétrables, inondés périodiquement. Elle est constituée d'arbres sempervirentes pouvant atteindre 20 m de hauteur et 20 cm de diamètre.

*** Les forêts marécageuses inondables.**

Ce type de forêts se trouve sur des sols mal drainés, aux alentours des cours d'eau ou des zones marécageuses. Elles sont constituées des grands arbres pouvant atteindre plus de 35 m.

*** Les forêts marécageuses inondées temporairement.**

Elles se rencontrent le long des cours d'eau de moyenne et grande envergure, sur des sols trempés d'eau. Les arbres ont une hauteur comprise entre 25 et 35 m. Le sol, gorgé d'eau pendant la saison pluvieuse, s'assèche pendant une longue période.

*** Les forêts inondées en permanence.**

Dans ce type de forêts, le sol est régulièrement gorgé d'eau même pendant les périodes les plus sèches. Les arbres ont une hauteur comprise entre 10 et 30 m et atteignent à peine 80 cm de diamètre.

*** Les forêts secondaires à Raphia.**

On rencontre ce type de forêts le long des vallées plus ou moins larges et aussi le long des berges boueuses de certaines rivières. Elles sont essentiellement constituées de raphia; parfois elles sont associées à d'autres essences.

III.1.2.2 Les terrains boisés.

Ce sont les zones peuplées d'arbres dont les cimes couvrent moins de 20 % de la surface totale. Appartiennent également aux terrains boisés, les espaces couverts de buissons, arbustes ou arbres rabougris sur plus de 20 % de la surface totale et qui ne sont pas utilisés comme bois pour la transformation forestière. On y distingue plusieurs types de végétation : les forêts claires, les savanes arborées, les savanes boisées, les steppes arborées. Avant de présenter ces différents peuplements, il convient de distinguer les groupes végétaux suivants : forêt, savane, steppe.

Forêt : regroupement d'arbres, d'arbustes, etc dont les cimes couvrent plus de 20% de la surface totale.

Savane : Formation végétale constituée d'herbes de haute taille (supérieur à 80 cm en fin de saison de végétation) et dont les feuilles sont larges. Elle peut être couverte d'arbres ou d'arbustes parsemés.

Steppe : Formation végétale constituée de touffes d'herbes. Elles sont discontinues (disséminées et espacées), de petite taille (moins de 80 cm en fin de saison de végétation) et leurs feuilles sont étroites. On peut y trouver aussi quelques arbres et arbustes.

Description des terrains boisés :

*** Les forêts claires.**

Ce sont des peuplements constitués d'arbres de petite et moyenne taille, pouvant atteindre 20 m de hauteur; Ils sont plus ou moins espacés et laissent passer la lumière. Au niveau du sol, on trouve des graminées en quantité peu abondante.

*** Les savanes arborées.**

Ce sont les types de savane où les arbres et arbustes sont disséminés entre les graminées. La densité de la couverture ligneuse varie de 2 à 20% et la hauteur des arbres atteint difficilement 10 mètres.

*** Les savanes boisées.**

Ce sont les types de savane où les arbres et arbustes sont disséminés entre les graminées. La densité de la couverture ligneuse varie entre 20 et 50% et la hauteur des arbres atteint difficilement 15 mètres.

*** Les steppes arborées.**

Type de steppe comportant de petits arbres pouvant atteindre difficilement 10 mètres de hauteur et qui sont repartis sur une faible densité (< 20 %).

III.1.2.3 Les terrains non boisés.

Ce sont les espaces constitués des formations qui n'appartiennent ni aux terrains forestiers, ni aux terrains boisés. Ils sont repartis en trois groupes :

- les milieux naturels
- les milieux agricoles
- les milieux urbanisés.

a) Les milieux naturels.

On distingue sous cette catégorie les formations suivantes :

*** Les terrains dénudés et semi-dénudés sec.**

Ce sont des terrains constitués des graminées qui poussent sur des affleurements rocheux, soit de façon discontinue, soit sur sols meubles très minces. Ce sont les groupements saxicoles.

*** Les terrains dénudés humides.**

Ce sont des graminées qui poussent sur sols aquatiques, semi-aquatiques ou marécageuses où il n'y a pratiquement pas d'arbres.

*** Les savanes herbeuses.**

Ce sont les types de savane constitués uniquement d'herbes. Les arbres et les arbustes sont absents. Ici, les herbes ont une hauteur impressionnante en fin de saison de végétation; elles atteignent parfois 2 mètres.

*** Les savanes arbustives.**

Type de savane constitué d'arbustes ne dépassant pas 5 mètres.

*** Les Fourrés.**

Peuplements constitués d'arbustes et des broussailles, qui poussent en forme de touffe.

*** Les Steppes.**

On distingue trois types de steppe :

- les steppes herbacées : constituées uniquement de touffes d'herbes.
- les steppes arbustives : comportant des arbustes atteignant difficilement 5 mètres.
- les steppes buissonnantes : comportant des associations d'arbustes ramifiés dès la base et qui sont difficile à traverser.

b) Les milieux agricoles.

On distingue sous cette appellation :

*** La culture itinérante**

Type de culture où on déplace régulièrement les zones de plantation, pour faire face à l'épuisement du sol.

*** La culture industrielle**

Type de culture pratiquée sur des grandes superficies avec des machines agricoles et des engrais et qui fournit un rendement élevé.

*** Plantation**

Ce sont des cultures pérennes où on peut trouver des produits agricoles tels que : Ananas, Banane, Cacao, Café, Canne à sucre, Palmier à huile, Hévéa etc.

c) Milieux urbanisés.

Ce sont des milieux où l'action de l'homme a été tellement intense au point qu'il est difficile d'envisager un retour à l'état naturel. Appartiennent à ces milieux les groupements suivants :

- les carrières
- les complexes industriels
- les localités (petites villes ou village)
- les villes
- etc.

Type forestiers	Symboles	Types forestiers	Symboles
.Dense Humide Sempervirente	DHS	.Complexe industriel	CD
.Dense Humide Semi-caducifoliée	DHC	.Localité	LO
.Galerie Forestière	GAF	.Ville	VI
.Forêt dense humide de montagne	DHM	.Régénéré	R
.Forêt dense sèche de montagne	DSM	.Inaccessible	IN
.Bambousaie	BAM	.Brûlis partiel	brp
.Forêt Seco. Jeune	SJ	.Chablis partiel	chp
.Forêt Seco. Adulte	SA	.Coupe partielle	cp
.Mangrove	MAG	.Brûlis total	brt
.Forêt marécageuse inondable	MIN	.Coupe totale	ct
.Forêt marécageuse inondée temporair.	MIT	.Culture abandonnée	ca
.Forêt marécageuse inondée en perma.	MIP	.Recru for. en savane	rfs
.Raphiale	MRA	.Reboisement sous couvert	rec
.Forêt claire	FOC	.Reboisement en savane	res
.Savane boisée	SAB	.Reboisement sylvo agricole	rea
.Savane arborée	SAR	.Faible densité	d
.Steppe arborée	STA	.Forte densité	b
		.Culture I. ou viv.	CU
		.Culture industrielle	CI
		.Plantation	P
		.Carrière	CR

Tableau : Quelques symboles utilisés par l'ONADEF lors de la stratification

III.2 LES CRITERES DE STRATIFICATION

Lors de la stratification, il est important de définir les critères pour harmoniser au mieux les résultats. Il existe plusieurs critères de stratification qui doivent être associés lors de cette opération. Nous pouvons citer :

- les critères de répartition de la végétation
- les critères d'aménagement
- les critères de répartition du territoire forestier.

III.2.1 Les critères de répartition de la végétation

Il existe plusieurs cartes de la végétation à l'échelle mondiale, régionale ou locale. Ces cartes définissent de façon globale, la répartition de la végétation dans un milieu. Les critères de répartition sont beaucoup plus basés sur la température, la précipitation, l'altitude et les types de sol. Quelques types de classifications existantes :

- classification de Yangambi (1956)
- classification du Professeur F. White.
- classification de l'UNESCO.
- classification du SPIARF.

S'il est vrai que les cartes de végétation présentent la répartition des types végétaux dans un milieu, elles ne définissent pas de façon détaillée les types forestiers. Elles doivent, lorsqu'elles existent, servir de base à la stratification forestière; on doit s'efforcer d'harmoniser les résultats au maximum.

III.2.2 Les critères d'aménagement.

L'aménagement d'un territoire consiste à le répartir en différentes régions exploitables ou non, dont on attribue à chacune un objectif défini. Pendant cette opération, on tient compte des critères suivants :

- **découpage géographique ou administratif.**

Au cours de cette répartition, on doit tenir compte des différentes unités géographiques ou administratives. (villages, districts, départements, provinces, régions etc.)

- **Appartenance de la forêt.**

On distinguera :

*** les forêts domaniales** : ce sont celles appartenant à l'état et qui ont été l'objet d'un classement lui attribuant un objectif spécifique.

* **les forêts du domaine national** : ce sont les forêts n'ayant fait l'objet d'aucun classement lui attribuant un objectif spécifique. Elles appartiennent également à l'état.

* **les forêts communales** : elles appartiennent à une commune. Elles peuvent être soit plantées par elle sur son terrain, soit ayant été à son profit, l'objet d'un classement.

* **les forêts communautaires** : ce sont les forêts du domaine national gérées par les communautés villageoises à la suite d'une convention passée entre elles et l'administration forestière.

* **les forêts des particuliers** : ce sont des forêts plantées par des personnes physiques ou morales et qui sont assises sur leur domaine.

- Les unités d'aménagement.

Même si la forêt est subdivisée en fonction des unités géographiques ou administratives, on doit y intégrer les unités d'aménagement. Les forêts permanentes constituées des forêts domaniales et communales sont l'objet d'un aménagement spécifique. «L'aménagement d'une forêt permanente se définit comme étant la mise en oeuvre, sur la base d'objectifs et d'un plan arrêté au préalable, d'un certain nombre d'activités d'investissements, en vue de la production soutenue des produits forestiers et de services, sans porter atteinte à la valeur intrinsèque, ni compromettre la productivité future de la dite forêt, et sans susciter d'effets indésirables sur l'environnement physique et social» (d'après la loi Camerounaise n° 94/01 du 20 janvier 1994 portant régime des forêts)

On doit distinguer :

- **les réserves écologiques intégrales** : ce sont des régions dans lesquelles toutes les ressources de toute nature bénéficient d'une protection absolue afin de les conserver dans son état climacique. Toute activité humaine y est strictement interdite.

- **les sanctuaires de flore** : ce sont des superficies destinées à la protection absolue de certaines espèces endémiques végétales. Toute action pouvant concourir à la destruction des espèces concernées y est interdite.

- **les forêts de protection** : ce sont celles destinées à la protection d'écosystèmes fragiles ou présentant un intérêt scientifique. Toute intervention impliquant le prélèvement des ressources du milieu dans un but non scientifique y est interdite.

- **les forêts de récréation** : ce sont celles destinées à créer et/ou à maintenir un cadre de loisirs, en raison de son état esthétique, artistique, sportif ou sanitaire.

- **les forêts d'enseignement et de recherche** : elles sont réservées pour la réalisation des travaux pratiques par des étudiants en sciences forestières, et de projets de recherche scientifiques par des organismes reconnus à cet effet.

- **les périmètres de reboisement** : ce sont des terrains reboisés ou destinés à l'être.

- **les jardins botaniques** : ce sont les sites destinés à associer des plantes spontanées ou introduites, bénéficiant d'une protection absolue, dans un but scientifique, esthétique ou culturel.

III.2.3 Les critères de stratification forestière.

La stratification forestière et même la répartition de la végétation nécessite l'utilisation des documents de télédétection (photographies aériennes, images satellites, images radars etc.). Les critères de stratification seront donc fonction du type de document utilisé. Dans la stratification forestière, les photographies aériennes restent jusqu'aujourd'hui malgré les multiples progrès réalisés en télédétection le principal document utilisé. En outre, il procure un bon résultat si l'échelle et le type d'émulsions sont convenablement choisis. Les critères que nous allons présenter dans les lignes qui suivent sont ceux qu'un bon photo-interpréteur peut discerner sur une photographie aérienne au 1:20.000. Ce sont :

- le milieu.
- le stade de développement.
- l'aspect du feuillage.
- l'altitude.
- les essences dominantes.
- la densité.
- la hauteur.
- la perturbation.

Ces critères sont indicatifs et doivent aider tout organisme ou individu qui veut faire la stratification à définir ses propres critères en fonction du type de document de télédétection utilisé.

a) le milieu.

On doit distinguer :

- les formations forestières sur sol ferme

- les formations forestières sur sol hydromorphes.
- les lacs, cours d'eau, rivières etc.
- les sols nus.

b) le stade de développement.

C'est la position d'un peuplement dans sa série évolutive. On distingue 4 stades de développement :

- Le stade régénéré : comporte les groupements pionniers.
- Le stade jeune : succède aux pionniers.
- Le stade adulte : les essences d'ombre dominant les essences héliophytes.
- Le stade primaire : On trouve essentiellement les sciaphytes. La forêt a fini son évolution. Elle est prête à l'exploitation.

c) L'aspect du feuillage.

Le comportement du feuillage est un critère important car il ne se présente pas de la même façon pendant toutes les périodes de l'année. Il est donc important de connaître les différentes saisons de végétation, pour pouvoir établir la corrélation entre l'aspect du feuillage et la période de prise de vues. On distingue :

- **les forêts sempervirentes** : Ce sont les forêts où les arbres conservent leurs feuilles pendant toute l'année. Ceci signifie que lorsqu'une feuille tombe, elle est rapidement remplacée par une nouvelle.

- **les forêts caducifoliées** : Ce sont les forêts où les arbres perdent complètement leurs feuilles pendant la saison sèche.

- **les forêts semi-caducifoliées** : Ce sont les forêts où on trouve associées les espèces sempervirentes et caducifoliées.

d) L'altitude.

Elle permet de savoir s'il s'agit d'une forêt de basse et moyenne altitude (altitude < 1800 m) ou de montagne (altitude ≥ 1800 m).

e) Les essences dominantes.

Bien que fortement diversifiée, il arrive que la forêt tropicale soit caractérisée par quelques essences très représentées et constituant par conséquent les essences dominantes.

Nous pouvons citer à titre d'exemple la forêt à *Lophira alata* et celle à *Aucoumea klaineana*.

f) La densité.

La densité se définit comme le nombre de tiges par unités de surface (hectare). Elle peut aussi se définir comme étant le rapport de la projection au sol des cimes qui constituent un peuplement forestier par rapport à la surface totale occupée par celui-ci. C'est cette dernière définition qui est plus pratique lors de la stratification sur photographies aériennes.

$$d = \frac{\text{Surface de couverture des cimes}}{\text{Surface totale}} \times 100$$

On distingue trois types de densité :

- Forêt en régénération; densité < 20%
- Faible densité; compris entre 20 et 60 %
- Forte densité; > 60 %.

g) La hauteur.

C'est un critère de stratification très important. En effet, elle permet de déterminer le stade de développement d'un peuplement forestier. On pourra considérer les classes suivantes :

- Forêt primaire : $h \geq 35$ m
- Forêt secondaire adulte $25 \leq h < 35$ m
- Forêt secondaire jeune $15 \leq h < 25$ m
- Forêt en régénération $h < 15$ m

h) La perturbation .

Une forêt, indépendamment de sa position dans la série évolutive peut être perturbée. Ceci est marqué par des trouées à l'intérieur de la strate. Les raisons de cette perturbation sont nombreuses et peuvent être les suivantes :

- chablis : destruction par l'action du vent ou de la neige.
- incendies : destruction par l'action du feu.
- défrichement : coupe de la forêt pour des raisons agricoles, d'installation d'habitations ou des entreprises etc.

De même, pour des raisons précédemment citées, une forêt ou partie de celle-ci peut être complètement rasée.

CHAPITRE IV
TELEDETECTION
ET
APPLICATION

CHAPITRE IV TELEDETECTION ET APPLICATIONS

La télédétection ou détection à distance consiste à prendre des photographies ou des images du sol à partir des avions, des satellites, des radars ou des sondes et d'analyser les documents obtenus pour restituer plus ou moins fidèlement les informations se trouvant sur des portions du globe déterminées. Pendant longtemps, les photographies aériennes sont restées le principal outil de télédétection utilisé en foresterie, notamment dans la stratification, la cartographie et les inventaires, mais aussi dans les autres disciplines (agronomie, pédologie, géologie, urbanisme, météorologie etc). On parlait alors essentiellement de photo-interprétation. Depuis les années 1960, d'autres techniques ont été développées et de multiples progrès réalisés au point que cette discipline s'est affirmée davantage comme une science de base, permettant d'analyser les différentes ressources et leur application. L'importance de cette science, dans l'évaluation des ressources forestières, nous a amené à y consacrer un chapitre entier.

IV.1 NOTIONS PHYSIQUES NECESSAIRES A LA COMPREHENSION DE LA TELEDETECTION.

Les objets se trouvant dans notre environnement réfléchissent ou émettent des ondes électromagnétiques dans des domaines spectraux donnés en fonction de la nature de celles-ci. Cette propriété est largement utilisée en télédétection. Nous allons donc étudier les différents spectres électro-magnétiques utilisés dans cette discipline ainsi que les sources d'énergie électromagnétiques. Nous insisterons également sur le comportement des objets dans ces différents spectres.

IV.1.1 Les Spectres électro-magnétiques.

Les ondes électro-magnétiques utilisées en télédétection sont les suivantes :

- **l'ultra-violet** : elle a une longueur d'onde située entre 0,29 et 0,4 μ . Ce domaine spectral n'est pas assez utilisé en télédétection car il est fortement absorbé par l'atmosphère.

- **le visible** : il se situe entre 0,4 et 0,7 μ et correspond aux longueurs d'ondes perceptibles par l'oeil. C'est dans ce domaine que s'effectue les photographies noirs et blanc et aussi couleur.

- **l'infra-rouge** : ce domaine est subdivisé en trois bandes qui sont :

* **le proche infra-rouge** : les longueurs d'ondes varient entre 0,7 et 0,9 μ . Il est utilisé dans l'infra-rouge noir et blanc.

* **l'infra-rouge moyen**, compris entre 3 à 5,5 μ et **l'infra-rouge lointain** compris entre 8 à 14 μ sont utilisés dans les scanners infra-rouges et la thermographie infra-rouge.

- **Les hyperfréquences ou micro-ondes** : Ce sont les longueurs d'ondes situées entre le millimétrique et le métrique. Elles sont de plus en plus utilisées en télédétection car elles ne sont pas absorbées par l'atmosphère. On les utilise généralement dans les scanners, les radars et les radiomètres etc. Ce sont :

- . les rayons K : 0,75 - 2,4 cm.
- . les rayons X : 2,4 - 3,75 cm.
- . les rayons C : 3,75 - 7,5 cm.
- . les rayons S : 7,5 - 15 cm.
- . les rayons L : 15 - 30 cm.
- . les UHF : 30 - 100 cm.
- . les rayons P : 100 - 136 cm.

Domaine spectral	Longueur d'onde μ	Capteurs utilisés
Ultra-violet	0,29 - 0,4	Scanner ultra-violet
Visible	0,4 - 0,7	Photographie noir et blanc. Photographie couleur
Infra-rouge * proche * moyen * lointain	0,7 - 0,9 3 - 5,5 8 - 14	Photo fausse-couleur Scanner infra-rouge Scanner infra-rouge
Micro-ondes ou Hyperfréquences K X C S L UHF P	0,75 - 2,4 cm 2,4 - 3,75 cm 3,75 - 7,5 cm 7,5 - 15 cm 15 - 30 cm 30 - 100 cm 100 - 136 cm	Radar Scanner H.F

Tableau : Les différents domaines spectraux.

IV.1.2 Les sources d'énergie électro-magnétiques

On distingue les sources naturelles et artificielles.

a) Les sources naturelles ou sources thermiques.

Dans cette catégorie se trouve les corps noirs, le soleil, la terre.

- **Les corps noirs** : ils émettent l'énergie absorbée.

- **Le soleil** : il émet un rayonnement qui arrive sur la terre. Ce rayonnement, en traversant l'atmosphère est fortement modifié à cause des phénomènes suivants : l'absorption du milieu, la diffusion ou la diffraction, l'émission du milieu, la réfraction. Les principaux gaz de l'atmosphère qui absorbent le rayonnement solaire sont : l'oxygène, l'ozone, l'eau, le gaz carbonique, l'azote, l'oxygène moléculaire, l'oxyde de carbone, le méthane, l'oxyde d'azote etc. C'est donc une partie du rayonnement solaire qui va en définitive arriver sur la terre.

- **La terre** : elle émet un rayonnement qui se trouve dans les longueurs d'onde de l'infra-rouge lointain pour la plupart.

b) Les sources d'énergies électriques ou radio-électriques.

Les sources d'énergies électriques sont celles émises par les systèmes d'enregistrement ou les capteurs.

IV.1.3 Le comportement des objets dans le spectre électro-magnétique.

Lorsque les ondes électro-magnétiques arrivent sur la surface d'un objet, une partie de celles-ci est réfléchi. D'autre part, les objets émettent des rayonnements. Les capteurs enregistrent donc des rayonnements qui peuvent être de 2 natures :

- les rayonnements incidents
- les rayonnements émis par l'objet.

Etudions les comportements des objets dans les divers domaines spectraux utilisés.

a) Le visible et le proche infra-rouge.

*** Les végétaux**

Dans le visible, la réflectance des végétaux présente un maximum vers $0,55 \mu$ et un minimum vers $0,65 \mu$. Ceci est dû au fait qu'ils sont constitués de chlorophylles qui n'absorbent pas les longueurs d'onde voisines de $0,55 \mu$. Par contre, elles ont une bonne absorption dans bleu et le rouge; d'où le minimum de réflectance vers $0,65 \mu$. La forte réflectance des ondes voisines de $0,55 \mu$ explique la perception de la coloration verte des végétaux ou des feuilles des arbres. Cette réflectance varie en fonction des espèces car la structure cellulaire des unes et des autres varie également. Il est aussi à noter que, pour des végétaux malades, la réponse diminue considérablement et permet de les distinguer sur photographies aériennes.

Dans le proche infra-rouge entre $0,7$ et $1,5 \mu$, c'est la structure interne des feuilles qui influence sur la réflectance. En effet, les cellules du parenchyme palissadique absorbent une bonne part de l'infra-rouge tandis que celles du mésophylle réfléchissent beaucoup les ondes dans ce domaine spectral. Cependant, dès qu'un végétal se dessèche, le mésophylle perd sa structure et sa

réflectance est perturbée. De même, il y a variation du mésophylle dans les feuilles d'une espèce à l'autre, ce qui explique les différentes variations de réflectance dans le proche infra-rouge; ceci permet d'obtenir des contrastes différentes sur la photo. Au delà de $1,5 \mu$, la réflectance des végétaux est fonction de la teneur en eau des feuilles.

*** Les sols.**

La réflectance des sols dépend surtout de deux facteurs :

- la teneur en eau
- la présence des éléments chimiques.

Quel que soit le domaine spectral utilisé, plus le sol est mouillé, plus la réflectance sera faible. De façon générale, il y a un minimum de réflectance entre $1,4$ et 2μ ; elles correspondent aux bandes d'absorption de l'eau.

Des éléments chimiques tels que la teneur en calcaire, en matière organique etc modifient également cette réflectance.

b) L'infra-rouge moyen et lointain

On caractérise les ondes émises dans ce domaine spectral d'ondes thermiques. On étudie dans cette bande l'énergie émise par les objets car c'est dans cet intervalle que l'énergie est émise.

*** Les végétaux**

Une partie de l'énergie reçue par les végétaux provenant de l'énergie solaire et du milieu ambiant sera perdue grâce à la transpiration. Cette perte d'énergie varie selon qu'il s'agit des héliophytes ou des sciaphytes. Elle est plus grande le jour que la nuit. De plus, des phénomènes atmosphériques tels que le vent, la pluie peuvent réduire la température des feuilles et par conséquent influencer la réponse enregistrée. Il est aussi à noter que lorsqu'une plante souffre d'une carence en eau, la température interne du feuillage augmente de même que l'énergie libérée.

D'une façon générale, il y a augmentation de l'énergie libérée par les malades par rapport aux arbres sains.

*** Les sols**

L'énergie libérée par les sols dépend surtout de leur conductivité thermique. Des facteurs tels que l'humidité, la porosité influencent cette activité. Plus le sol est sec, plus cette conductivité thermique est faible. Il en est de même lorsque la porosité d'un sol est élevé. D'autre part, l'énergie libérée par le sol est plus élevée le jour que la nuit. Pendant le jour, il reçoit essentiellement l'énergie provenant du soleil, de l'atmosphère et des objets voisins; pendant la nuit, comme il n'y a plus cet apport, il y a perte énorme.

L'infrarouge thermique permet surtout dans les zones où les feux de brousse sont accentués, de détecter les différents points chauds. Il suffit d'installer dans un vecteur un scanner qui enregistre les signaux appartenant à cette bande. Lorsqu'un point chaud est signalé, on peut détecter ses coordonnées et l'analyser.

c) Les hyperfréquences ou micro-ondes.

Nous avons déjà vu que tous les objets émettent un rayonnement qui leur est propre. Dans cette bande, on étudie surtout l'émissivité et la température de brillance des objets.

«Il est intéressant de savoir jusqu'à quelle profondeur les objets peuvent être traversés par les ondes, ou jusqu'à quelle profondeur les caractéristiques du milieu influent sur la température de brillance observée» (Girard, Télédétection, 1975)

*** Les végétaux**

La température de brillance des végétaux est presque égale à la température physique. Ce sont de bons émetteurs. Signalons que la rugosité de la surface des feuilles influence cette émissivité.

*** Les sols**

Leur émissivité dépend surtout de deux facteurs :

- les propriétés diélectriques de ses éléments
- l'humidité du sol.

L'émissivité d'un sol sec est toujours plus élevée que celle d'un sol humide.

*** L'eau**

L'émissivité de l'eau dépend de sa température, de sa salinité et de la rugosité de sa surface.

En conclusion, nous pouvons dire que les micro-ondes peuvent avoir une bonne application en forêt tropicale car elles sont moins perturbées par l'atmosphère (brouillard, nuage, gouttelettes d'eau etc) et la pluie; ils pénètrent donc plus facilement que les autres bandes spectrales.

IV.2 LES SUPPORTS DES DONNEES EN TELEDETECTION

IV.2.1 Les capteurs

Ce sont les appareils qui reçoivent les ondes électro-magnétiques émises ou réfléchies par les objets. On distingue:

- les capteurs photographiques

- les capteurs non photographiques.

a) Les capteurs photographiques.

On utilise les capteurs photographiques dans le visible et le proche infra-rouge c'est-à-dire pour des rayonnements compris entre 0,4 et 0,9 μ . L'utilisation de ces capteurs permet de distinguer plusieurs types d'émulsion. Nous allons les étudier et présenter en même temps leurs avantages et inconvénients en foresterie.

Les émulsions panchromatiques noir et blanc.

Cette émulsion est utilisée dans la bande comprise entre 0,4 et 0,7 μ c'est-à-dire dans le visible. C'est l'émulsion la plus courante, la plus utilisée et la moins chère jusqu'aujourd'hui. On observe sur les photographies diverses catégories de grisés allant du blanc pour les objets très réfléchissants au noir pour les objets les moins réfléchissants, en passant par plusieurs nuances pour des objets de réflectance moyenne. On peut placer devant l'objectif des filtres jaune ou orangé qui éliminent les radiations dans le bleu et améliorent les contrastes résultants.

Cette émulsion présente de nombreux avantages :

- bonne sensibilité
- bon pouvoir de résolution
- les détails apparaissent très nettement ce qui permet de prendre des photos à petite échelle.
- conservation facile, ce qui justifie sa grande utilisation dans les régions tropicales.

Les émulsions couleurs.

Cette émulsion est aussi utilisée dans le visible. On peut percevoir plus nettement le paysage dans sa couleur naturelle, surtout si les photos sont à grande échelle. Elles sont constituées de 3 couches sensibles au bleu, au vert et au rouge. Après exposition et traitement, ces couches donneront des couleurs naturelles correspondant à celles réfléchies par les objets. C'est pour cela qu'on les appelle aussi émulsion couleur naturelle. Il faut éviter de prendre des photos à de très haute altitude car elles sont sensibles au brouillard.

Elles donnent de bons résultats surtout si le temps de prise de vue est ensoleillé. Cependant, il est à noter que le tirage sur papier ne donne pas un résultat fidèle, ce qui fait qu'on conseille de travailler sur films. Ces films doivent être conservés à des températures basses (moins de 10°C). De plus, le prix de revient est élevé comparé aux émulsions panchromatiques. C'est pour ces raisons qu'elles sont moins utilisées.

Les émulsions infra-rouge noir et blanc

Elles se trouvent dans le domaine du proche infra-rouge c'est-à-dire entre 0,7 et 0,9 μ . On utilise des filtres jaunes pour éliminer les radiations bleues. Ces émulsions donnent des gris comme sur des panchromatiques noir et blanc. Elles peuvent avoir de bonnes applications en foresterie et en particulier en Afrique tropicale. En effet :

- on peut y distinguer facilement les sols humides des sols secs, les forêts sur sols fermes des forêts sur sols hydromorphes.
- il est possible de distinguer les parties saines d'une forêt de celles attaquées par les maladies. De plus, les arbres y apparaissent plus nettement que sur panchromatiques noir et blanc.
- l'atmosphère absorbe peu l'infra-rouge, ce qui fait que les détails apparaissent plus contrastés.

Cependant, elles ne manquent pas d'inconvénients :

- conservation délicate car les films doivent être gardés à des températures de moins de 10°C.
- apparition de nombreux contrastes, ce qui rend difficile l'interprétation.
- prix de revient supérieur à celui du panchromatique.

Les émulsion infra-rouge couleur ou fausse-couleur.

Ces émulsions se trouvent entre le visible et le proche infra-rouge c'est-à-dire entre 0,5 et 0,9 μ . On les appelle fausse couleur car le coloré obtenu ne correspond pas à la réalité. En effet, on y trouve trois couches sensibles au vert, rouge et l'infra-rouge. Après exposition et traitement, le vert donnera le bleu, le rouge le vert et l'infra-rouge le rouge. Les couleurs des objets ne correspondent donc pas à la réalité. Cependant, les couleurs obtenues et les contrastes qu'on y trouvent permettent de faire de nombreuses interprétations. En foresterie, elles peuvent donner un bon résultat de stratification.

A cause de son prix de revient très élevé, mais aussi du problème de conservation (température inférieure à 12°C), son emploi n'est pas systématique.

Remarque : Les photographies multispectrales.

Nous venons d'étudier les techniques de prise de vue avec une seule caméra. Cependant, un capteur peut être constitué par plusieurs caméras dont les émulsions sont combinées de telle sorte qu'à chaque prise de vue, les différentes caméras déclenchent automatiquement et on obtient des bandes spectrales différentes. Il en résulte plusieurs photographies différentes

d'un même paysage, qu'on pourra superposer pour faire des interprétations.

b) Les capteurs non photographiques.

A ce niveau, il faut distinguer les capteurs passifs (uniquement des récepteurs c'est-à-dire qui enregistrent les rayonnements réfléchis par les objets) des capteurs actifs. Ces derniers sont à la fois émetteurs et récepteurs c'est-à-dire qu'ils envoient des sources de radiations à des longueurs d'onde déterminées en direction des objets à filmer. Ces objets réfléchissent une partie de ce rayonnement qui sera enregistrée par le récepteur. Il convient pour nous d'étudier quelques capteurs :

- Les scanners multispectraux.

C'est un type de capteur muni souvent d'un miroir rotatif qui dirige les rayonnements réfléchis par les objets vers un spectromètre qui comprend plusieurs détecteurs correspondant aux différentes bandes spectrales utilisées. Chaque détecteur transforme les signaux reçus en énergies électriques qui peuvent être directement analysées au sol ou stockées sur bandes magnétiques.

On peut aussi y détecter des bandes spectrales susceptibles d'être enregistrées par les caméras photographiques, mais avec pour inconvénient que la qualité sera moins bonne.

- Les scanners infra-rouge.

Ce type de capteur enregistre les rayonnements émis ou réfléchis par les objets dans le domaine de l'infra-rouge moyen et lointain. Un miroir rotatif dirige ces rayonnements vers une cellule qui à son tour, envoie un signal vidéo enregistré sur bande magnétique. Celle-ci, enregistrée en plein vol peut être lue directement au sol.

Les radars ou Radio Détection par Télémétrie.

Les radars enregistrent les rayonnements réfléchis par les objets dans le domaine des micro-ondes c'est-à-dire entre 7,5 mm et 1 m. Un émetteur des micro-ondes envoie en direction du sol un faisceau lumineux dont une partie sera réfléchi. Une antenne réceptrice reçoit ces ondes et les transmet à un modulateur qui module l'intensité du point lumineux se déplaçant sur un écran cathodique. Un système de lentille focalise ce point sur un film sensible et on obtient donc des images à mesure que l'appareil se déplace.

IV.2.2 Les appareils utilisés (vecteurs)

Les capteurs peuvent être transportés par plusieurs types d'engins :

a) Les camions ou les grues.

Ils sont utilisés lorsque les prises de vue doivent être effectuées au sol.

b) Les avions.

C'est le moyen de transport le plus utilisé pour les photographies aériennes. Selon les missions réalisées, on utilise plusieurs types d'avions permettant de prendre des photos des grandes échelles jusqu'aux petites échelles.

c) Les ballons stratosphériques.

Ce sont des engins dont l'enveloppe est faite souvent de plastique et qui sont gonflés à l'aide d'un gaz, par exemple l'hydrogène. Il porte des équipements tels que les radars et 2 ou trois caméras photographiques. Les radars permettent de suivre le ballon et de prévenir les avions susceptibles de les rencontrer. Les caméras prennent les photos en 3 phases :

- phase ascensionnelle
- phase de plafond
- phase de descente.

L'avantage de cet engin est qu'il permet de prendre des photos à très petite échelle, et ce avec une bonne résolution. Ces photos peuvent être agrandies pour permettre des études à l'échelle régionale.

d) Les satellites.

Les satellites terrestres sont des engins spatiaux qui tournent autour de la terre et l'accompagne dans sa révolution, ce, en suivant les mêmes lois que celle-ci dans sa gravitation autour du soleil. Ils constituent un immense progrès en télédétection. En effet, avec ces engins, on peut obtenir des informations répétitives de la même région, à des intervalles plus ou moins réguliers. Ainsi, on peut analyser l'évolution de la végétation des cultures, des peuplements forestiers, bref d'un milieu. Il est donc possible d'effectuer facilement des inventaires à des intervalles réguliers. On distingue 2 types de satellites :

- les satellites à défilement : ce sont des satellites qui tournent autour de la terre de telle sorte qu'on observe le globe en quelques jours.
- les satellites géostationnaires : ce sont des satellites placés de telle sorte que leur mouvement soit compensé par la rotation de la terre et qu'ils apparaissent immobiles.

Depuis 1972, plusieurs satellites ont été placés sur orbite et ont permis de faire des observations du globe. On peut citer:

* **Le programme LANDSAT** dont le premier satellite E.R.T.S.A a été lancé le 25 juillet 1972. Ce satellite est à 920 km d'altitude et passe tous les 18 jours au dessus d'une même zone. Le capteur MSS (Scanner Multispectral) a été embarqué à bord et a enregistré des données d'une résolution de 57 x 79 m.

* **Le programme SKYLAB** : 1er vol effectué en 1973. La résolution au sol est de 40 à 80 m.

* **Le programme OSTA**. Il est lancé en 1981, ayant à son bord un radar dans la bande L. La résolution au sol est de 40 m.

* **Le programme SPACELAB**. Il est lancé pour la première fois en 1983. La résolution au sol est de 25 à 30 m.

* **Le programme SPOT**. Il est lancé en 1986. La résolution au sol est de 10 à 20 m.

IV.2.3 Les documents de visualisation

Les données obtenues en télédétection sont enregistrées sous 2 formes : photographiques ou numériques.

a) Visualisation sous forme photographique.

A ce niveau, il convient de distinguer les photographies aériennes des images photographiques.

Les photographies aériennes.

Ce sont les types de document obtenus à partir des caméras. Les domaines spectraux d'utilisation de la photographie sont le visible et le proche infra-rouge. On obtient des films ou des photos qui sont des tirages sur papier (brillant, mat, mi-mat). Les photos sont en noir et blanc ou en couleur et correspondent aux émulsions panchromatiques, infra-rouge couleur et fausse couleur.

Les images photographiques.

Lorsqu'on utilise les capteurs non photographiques, les signaux enregistrés peuvent être modulés sur un tube cathodique. Un système de lentilles peut focaliser l'intensité du point lumineux se trouvant sur l'écran cathodique sur un film sensible. On pourra donc convertir ce film pour obtenir des images photographiques. Celles-ci se distinguent des photos conventionnelles car ce sont les impulsions électriques et non les impulsions lumineuses qui permettent d'obtenir ces images; les méthodes d'interprétation sont différentes. Selon les capteurs utilisés, on distingue :

- les images multispectrales.
- les images thermiques.
- les images radars.

Ces images couvrent au sol de très vastes régions et permettent de faire rapidement des études sur de larges superficies. On obtient parfois des images qui couvrent jusqu'à 2 à 3 millions hectares.

b) Autres formes de visualisation.

écrans cathodiques

Les données des capteurs non photographiques (scanners multispectraux ou infra-rouge, radars) peuvent être converties sur un tube cathodique directement sous forme d'images visibles sur un écran. On applique ainsi le principe de la télévision en télédétection.

Les ordinateurs.

Les données des capteurs non photographiques sont habituellement stockées sur des bandes magnétiques ou des disques. Ces données peuvent être analysées par un ordinateur. Les résultats sont obtenus sous plusieurs formes:

- des dessins en noir et blanc ou en couleur.
- les courbes de niveau.
- des vues cavalières pour éviter d'avoir des parties cachées.

S'il est vrai que le traitement des données donnent par ordinateur très souvent des résultats précis, il reste que les coûts financiers sont encore très élevés.

IV.3 LES PHOTOGRAPHIES AERIENNES ET LA PHOTO-INTERPRETATION

Les photographies aériennes permettent d'effectuer des études fines et précises. C'est pour cela qu'elles sont jusqu'aujourd'hui largement utilisées en foresterie et dans les autres sciences, au contraire des images photographiques qui ont en général une mauvaise résolution. Nous allons donc étudier les caractéristiques de ces photos et les méthodologies d'interprétation.

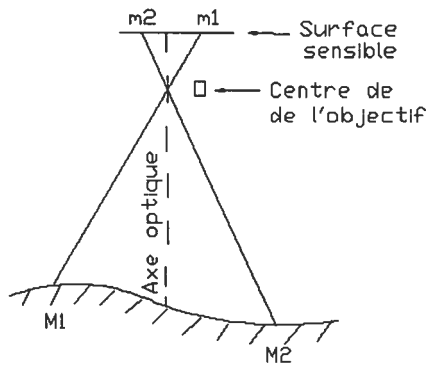
IV.3.1 La photographie aérienne.

a) Définitions et caractéristiques.

* **La photo aérienne** : elle peut se définir comme étant une image d'une partie de la terre obtenue par enregistrement sur la surface sensible d'une caméra, ceci dans les domaines spectraux du visible ou du proche infra-rouge.

* **Type de projection** : L'image d'une photographie aérienne est une projection conique c'est-à-dire que les faisceaux lumineux réfléchis par le terrain s'entrecroisent au centre O de

l'objectif.



Ceci veut dire que l'image (ex m1 et m2) des points sur le terrain (ex M1 et M2) s'entrecroisent au centre de l'objectif. Ainsi, pour passer de la photo à la carte, on doit faire une restitution car cette dernière est une projection cylindrique du terrain; ceci veut dire que l'image d'un point se trouve sur sa verticale.

* **Axe optique** : une photographie aérienne doit être verticale, ceci veut dire que l'angle que fait l'axe optique avec la verticale ne doit pas dépasser 5°. Lorsque cet angle n'est pas zéro degré, il y a une distorsion qui est négligeable s'il est inférieur à 5°.

* **Les lignes de vol** : Les lignes de vol doivent être parallèles et le plus long possible. Elles sont généralement orientées Est-Ouest ou Ouest-Est. Exceptionnellement, elles sont orientées Nord-Sud. Elles doivent être à une équidistance raisonnable pour permettre un recouvrement entre les photos des lignes de vols consécutives.

* **Les recouvrements** : Sur la même ligne de vol, le recouvrement entre les photos consécutives (recouvrement longitudinal) doit être d'environ 60 % sur terrain plat. En terrain accidenté il peut aller jusqu'à 80%. Sur les photos consécutives se trouvant sur des lignes de vol différents, ce recouvrement (recouvrement latéral) est d'environ 30%. Cependant, à cause de la dérive de l'avion, il peut varier de 10 à 50 %.

* **Le format** : Le format des photos utilisées est variable d'une échelle à l'autre. Au Cameroun, entre 1949 et 1970, tout le pays a été photographié au 1:50.000. Une grande partie du Sud du pays a été photographiée au 1:20.000 dans les années 1980. Pour les photos au 1:50.000, le format est de 18 cm x 18 cm correspondant à une surface totale de 81 km². Pour les photos au 1:20.000, ce format est de 23 cm x 23 cm, soit 21,16 km².

* **Les annotations photographiques** : Les photos aériennes portent habituellement des renseignements qui aident l'utilisateur. La nature et le positionnement des informations peuvent varier d'un type de photo à l'autre. Généralement, on trouve :

- le nom du pays (ex: CAM)
- l'année et le numéro du rouleau (ex: 86030)
- le numéro de mission (ex: 62)
- le numéro de la ligne de vol (ex: L-12)
- l'échelle photographique (ex: 1:20.000)
- l'altitude de l'avion
- l'heure de prise de vue

* **Index photographique** : La compagnie qui a réalisé les prises de vue doit présenter sur une carte topographique la localisation des lignes de vol numérotées du Sud au Nord et si possible les numéros de rouleau et des photos.

* **Mosaïque de photos** : C'est un assemblage de toutes les photos de la zone d'étude pour former un seul document. Pour cela, on découpe les photos suivant les contours de la zone utile et on rapproche les photos consécutives et adjacentes jusqu'à obtenir toute la zone.

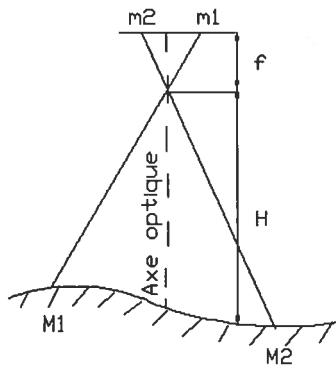
* **Orthophotoplan** : C'est l'assemblage des documents obtenus par orthophotographie dans une zone donnée. L'orthophotographie consiste à reproduire photographiquement, sans distorsions géographiques (sur les photos aériennes, l'échelle des hauteurs est plus exagérée que celle des distances) la partie du territoire commune au couple de photos d'un stéréogramme.

b) L' échelle photographique.

L'échelle d'une photo est théoriquement définie comme étant le rapport d'une distance entre deux objets mesurés sur la photo à la distance entre ces mêmes objets mesurés sur le terrain.

Pratiquement, cette échelle est le rapport de la distance focale de la caméra à la hauteur au dessus du sol. Elle est

donc exprimée grâce à la formule $e = \frac{f}{H}$



La distance focale f est fixe; cependant, la hauteur H au dessus du sol peut varier d'un point à l'autre d'une même photo lorsque le sol n'est pas plat. Ainsi l'échelle n'est pas toujours constante sur toute la superficie d'une photo. En plus de cette source de variation, on peut avoir d'autres dues à des défauts de l'optique de

l'appareil, et aussi à l'inclinaison de l'axe optique.

On définit alors une échelle moyenne de la photo à l'aide de

la relation $e = \frac{1}{E}$ (E : dénominateur de l'échelle)

Lorsque l'échelle d'une photo n'est pas précisée, on peut la déterminer en utilisant une carte de la zone correspondante à celle-ci. Pour cela, on détermine la distance d_p entre 2 points sur la photo et la distance d_c entre ces mêmes points sur la carte. Soit e_c l'échelle de la carte, on a :

$$e = \frac{dp}{dc} \times ec$$

N.B L'échelle est généralement exprimée par le rapport $e = \frac{1}{E}$.

Il ne faut pas confondre les termes grande et petite échelle. Plus le dénominateur est grand, plus l'échelle est petite. Inversement, plus le dénominateur est petit, plus l'échelle est grande.

Classification des échelles.

* Jusqu'à 1:5.000 : très grande échelle. Ces types de photos permettent d'effectuer directement des inventaires. On peut y effectuer de nombreuses mesures dendrométriques (diamètre des couronnes, hauteur, volume, densité du couvert, surface terrière etc). On n'effectue des descentes sur le terrain que pour faire des vérifications, ce qui peut permettre de réduire les coûts des inventaires.

* De 1:5.000 à 1:10.000 : grande échelle. Dans cette classe, on peut aussi faire des calculs dendrométriques. L'individualisation et l'identification des espèces sont encore possible, mais ne sont pas aussi aisées que dans le cas des photos à très grande échelle.

* De 1:10.000 à 1:30.000 : les photos sont à moyenne échelle. L'individualisation des couronnes est possible et on peut déterminer la densité du couvert. Dans cette classe, on peut effectuer une stratification fine.

* De 1:30.000 à 1:70.000 : les photos sont à petite échelle. Elles sont utilisées pour la stratification lorsque le travail s'effectue sur une grande surface car à cette échelle, on réduit considérablement le nombre de photos à utiliser.

* De 1:70.000 à 1:200.000 : les photos sont à très petite échelle. Ce type de photos, doublées d'autres plus grandes peuvent permettre de faire des reconnaissances à l'échelle régionale.

* Au dessus de 1:200.000 : l'échelle est beaucoup plus petite. Ce sont généralement des photos prises à partir des ballons sondes. Ce type de photos permettent d'effectuer des reconnaissances et d'établir des cartes de base à l'échelle continentale et mondiale. Elles permettent en particulier d'établir les relations entre les différents éléments du milieu.

Echelles	Types	Applications
> 1:5.000	très grande échelle	.mesures dendrométriques aisées (diamètre des couronnes, hauteur, densité etc) .possibilité d'effectuer directement les inventaires.
1:5000-1:10000	grande échelle	.mesures dendrométriques possibles mais moins aisées. .identification et calcul de densité possible
1:10000-1:30000	moyenne échelle	stratification raffinée
1:30000-1:70000	petite échelle	stratification effectuée sur de grande superficie
1:70000-1:200000	très petite échelle	reconnaissance à l'échelle régionale.
< 1:200000	échelle beaucoup plus petite	reconnaissance et établissement des cartes de base à l'échelle continental et mondial

Remarque : La résolution au sol

La résolution au sol d'une photo est la dimension sur le terrain du plus petit élément qu'on peut y percevoir. Ainsi, à chaque échelle, correspond une résolution au sol donnée.

Cette notion est très utilisée pour les images photographiques car les nombreuses distorsions font que l'échelle varie beaucoup le long d'une même ligne de balayage. Elle est moins utilisée pour les photographies aériennes car les variations sont globalement négligeables et l'échelle s'y prête bien.

c) La vision stéréoscopique.

L'un des avantages de la photographie aérienne est qu'elle permet de percevoir le relief du terrain. Ceci veut dire qu'on peut y apprécier la pente du terrain, la hauteur d'un arbre etc. Cependant, la vision stéréoscopique n'est possible que si au cours des prises de vues on prend la précaution de faire les recouvrements comme mentionné ci-haut. En effet, le recouvrement permet que chaque point du terrain apparait sur deux photos successives.

Deux photos consécutives convenablement placées sous un appareil

appelé STEREOSCOPE permettent de percevoir le relief. On doit au préalable s'entraîner pour se doter de cette vision inhabituelle qui n'est pas évidente pour un débutant. Pour accélérer cet entraînement, on doit disposer des stéréogrammes qui sont des couples de photos déjà montées et accompagnées des descriptions sur les caractéristiques de celles-ci. Le lecteur intéressé pourra consulter, Gilles Gauthier **Manuel de photo-interprétation forestière**, 1988, ACDI-CENADEFOR où sont illustrés de nombreux stéréogrammes réalisés avec le panchromatique noir et blanc.

d) Nombre de photos nécessaires pour la couverture d'une zone donnée.

Il existe une relation directe entre l'échelle photographique et le nombre de photos à utiliser dans une zone donnée. Si l'échelle est grande ce nombre sera grand et inversement, s'il est petit le nombre de photo sera petit.

Soient S : la surface de la zone en ha.
 e : l'échelle moyenne de la photo.
 l : le format de la photo en hm.
 R1 : le recouvrement longitudinal moyen.
 R2 : le recouvrement latéral moyen.

La formule utilisée est donc :

$$N = \frac{S \times l^2}{l^2 (1 - R1) (1 - R2)}$$

Application :

Nous voulons qu'une compagnie spécialisée de prises de vues prennent les photos pour effectuer les stratifications forestières sur une surface de 120.000 ha. L'échelle sollicitée est de 1:20.000. Le format de la photo est l = 23 cm; le recouvrement longitudinal souhaité est de 60 % et le recouvrement latéral 30 %. Déterminons le nombre de photos à utiliser.

S = 120.000 ha l = 23 cm = 0,0023 hm
 e = 1:20.000 R1 = 0,6 R2 = 0,3

$$N = \frac{120.000}{(20.000)^2 (0,0023)^2 (1-0,6) (1-0,3)} = 203 \text{ photos}$$

Que serait ce nombre si on utilisait une photo au 1:50.000; format = 18 cm

$$N = \frac{120.000}{(50.000)^2 (0,0018)^2 (1-0,6) (1-0,3)} = 53 \text{ photos}$$

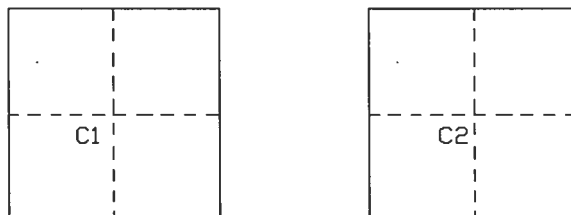
IV.3.2 L'interprétation

a) Préparation des couples stéréoscopiques.

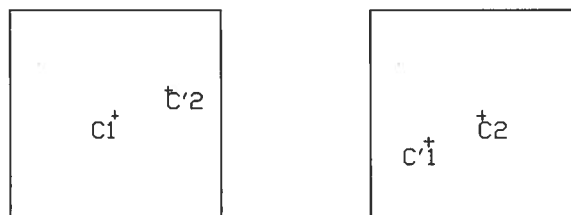
* Lors de la préparation des photos, on doit prendre soin de repérer sur la photo le Nord. Ceci permet de déterminer le sens Est-Ouest ou Ouest-Est de prise de vues; Les photos doivent être positionnées Ouest-Est pour faciliter la manipulation.

Si le Nord est orienté à l'envers, lors du transfert, l'opérateur lira le nom des strates à l'envers.

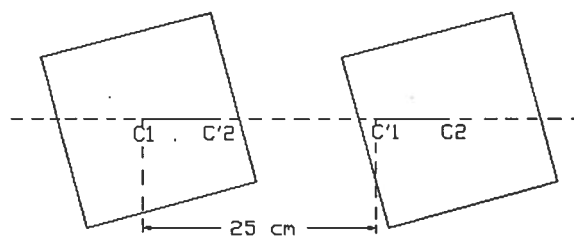
* A l'aide des encoches marginales se trouvant sur les bords des photos, on repère le centre des 2 photos C1 et C2.



* Repérer sur la photo 1, l'homologue (point correspondant) C'2 du centre C2 de la deuxième photo. De même, repérer sur la photo 2 l'homologue C'1 du centre C1 de la première photo.



* A l'aide d'une règle, aligner les points C1, C'2, C'1 et C2. S'assurer que la distance approximative entre C1 et C'1 soit de 25 cm.



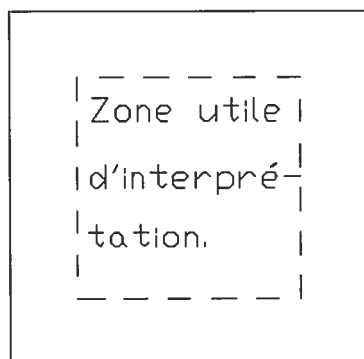
* Placer le stéréoscope au dessus des deux photos.

Remarque :

Il est parfois utile de limiter sur la photo la zone utile d'interprétation, ceci à cause des recouvrements.

On détermine les limites longitudinales en traçant une ligne perpendiculaire à la ligne de vol à mi-distance entre le centre et l'homologue de l'autre photo. On trace l'autre limite en respectant cette distance.

Les limites latérales se tracent en se basant sur le recouvrement et aussi sur la qualité de la photo. Parfois, on est obligé d'interpréter la photo sans tenir compte des recouvrements latéraux c'est-à-dire jusqu'en bas ou en haut de celle-ci.



b) Les critères d'interprétation

Les critères d'interprétation sont nombreuses et doivent être groupés en deux catégories :

- les critères photographiques
- les critères environnementaux.

b-1) Les critères photographiques.

Ce sont ceux qui sont liés à la qualité des photos et qui permettent de faire des interprétations. On distingue :

* **La forme** : la forme des éléments permet de les distinguer sur des photos. Ainsi, on pourra identifier à partir de leur forme : les routes, les parcelles agricoles, les maisons d'habitation, les camps, les cours d'eau, les couronnes des arbres etc.

* **La dimension** : La dimension des objets sur photos varie en fonction de l'échelle. On peut, par comparaison déterminer la dimension d'un objet à partir d'un autre de dimension connue. Par exemple, on peut comparer la longueur d'un édifice à la largeur d'une nappe d'eau, la largeur d'une route ou d'un carrefour à celle d'une cime d'arbre etc.

* **La réflectance** : Elle se caractérise par la teinte ou la tonalité.

Sur les photos en couleur ou fausse couleur, les différentes teintes permettent d'effectuer l'identification des objets, d'en juger de l'état sanitaire des peuplements, de réaliser la stratification.

Sur les photos en noir et blanc, on parle plutôt de la tonalité car ce sont les différents niveaux de gris (en passant par le blanc jusqu'au noir) qui vont permettre d'effectuer l'identification, la stratification etc.

Il convient de noter qu'en fonction des conditions de prises de vues (heure, saison, atmosphère), de la surface sensible utilisée et de l'altitude de vol, des nuances peuvent apparaître dans la teinte et la tonalité.

* **La texture** : La texture d'une photo se définit par des éléments de texture c'est-à-dire les plus petites tâches dans lesquelles on ne peut déceler aucune variation (teinte ou tonalité, forme, dimension) avec les moyens dont on dispose. On peut distinguer : les textures lisses, douces, grossières, fines, rugueuses etc.

* **La structure** : L'organisation ou la relation entre les éléments de texture donne la structure. Elle se caractérise donc par cette relation et la densité. Elle peut prendre plusieurs formes: régulière irrégulière, parallèle, circulaire, maille carrée, quadrillée etc.

b-2) Les critères environnementaux.

Ce sont les éléments liés à l'aspect du milieu, des objets et qui permettent l'identification, la stratification. On distingue :

* **La nature du sol** : ceci permet de distinguer les cours d'eau des sols fermes, les peuplements forestiers sur sols fermes des peuplements forestiers sur sols hydromorphes.

* **L'altitude** : elle permet de distinguer les forêts de basse et moyenne altitude des forêts de montagnes.

* **Le comportement du feuillage** : c'est un critère important de photo-interprétation surtout en zone tropicale. On distingue :

- les forêts sempervirentes qui conservent leur feuillage par remplacement régulier des feuilles tout au long de l'année.

- les forêts caducifoliées qui perdent complètement leur feuillage pendant une période de l'année.

- les forêts semi-caducifoliées qui sont sempervirentes pour une partie et caducifoliées pour une autre.

* **Le tempérament** : Selon les différents tempérament de la végétation ou des peuplements forestiers, on va observer des différences de teinte ou de tonalité. On distingue :

- le tempérament ombrophile : il caractérise les forêts denses humides.

- le tempérament mésophile : caractérise les forêts se développant dans les conditions de chaleur et d'humidité moyenne.

- le tempérament tropophile : caractérise les forêts claires adaptées à l'alternance des saisons sèches et humides.

- le tempérament sclérophylle : caractérise les forêts denses sèches adaptées à une faible pluviométrie.

* L'influence de l'homme : elle se traduit facilement par des voies de communication, des zones de cultures, des maisons, les trouées marquant les coupes d'arbres etc.

c) L'interprétation.

La photographie aérienne donne une représentation exacte du milieu, ceci, à une échelle donnée. Pour interpréter cette représentation, on passe par plusieurs étapes logiques et synthétiques qui vont conduire à l'identification et la délimitation des zones homogènes.

- Dans un premier temps, l'observateur aperçoit une vue générale de la zone délimitée sur photos. Son regard est attiré par un ensemble de contrastes fait de plusieurs couleurs ou de niveaux de gris.

- Ensuite, il commence à reconnaître certains éléments du milieu. Pour effectuer des identifications, il établit des relations entre ces différents éléments.

- Les identifications effectuées, il faut tirer les conséquences de celles-ci. C'est à ce niveau que peuvent commencer les erreurs; En effet, l'interpréteur est obligé de faire correspondre par raisonnement à des images vues, des objets non directement perceptibles. Par exemple, l'observation des cimes jointives, conduit à la déduction de l'existence des sous-étages, ce qui peut être faux s'il y a eu des éclaircies.

- L'observateur structure ensuite les objets. Il les regroupe dans les zones homogènes. Pour cela, il établit un réseau de points qui lui permettent de confirmer ou d'infirmer les hypothèses; ce sont les points de contrôle.

- Le contrôle consiste à ouvrir sur le terrain des layons de 500 à 1000 m au niveau des points identifiés sur photos. Le photo-interpréteur note sur le terrain tous les détails qui doivent l'aider à confirmer ou à infirmer son hypothèse (diamètre, hauteur, densité du couvert).

- Ayant en main toutes les fiches de contrôle, il procède à une interprétation finale. Il faut s'assurer à la fin du travail qu'il y a continuité des contours homogènes entre les lignes de vol adjacentes. Si le travail est effectué par plusieurs interpréteurs, le plus qualifié doit procéder à des vérifications pour uniformiser le plus possible les résultats.

IV.3.3 Les mesures dendrométriques sur photographies aériennes (photogrammétrie).

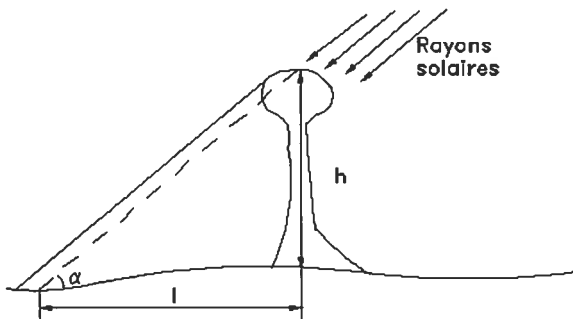
Les mesures dendrométriques sur photographies aériennes peuvent être d'un grand intérêt. En effet, elles peuvent permettre de réduire les coûts des inventaires. Toutefois, il est à noter que ces mesures sont possibles lorsque les photos sont à grande ou à très grande échelle. Notons que beaucoup de recherches ou de travaux n'ont pas encore été effectués dans ce sens dans la plupart des pays tropicaux. Cependant, aux USA, au Canada, en Europe, beaucoup de travaux dignes d'intérêt ont été effectués et ont conduit à des résultats satisfaisants.

a) Mesure de hauteur.

La mesure des hauteurs sur photos n'est possible que lorsqu'on peut percevoir le pays de l'arbre. Ceci veut dire que lorsque les cimes sont jointives, il sera difficile d'effectuer cette mesure. De plus, la précision des résultats diminue considérablement lorsque les photos sont à petite échelle. Il existe plusieurs méthodes de calcul de hauteur sur photos :

1) Calcul de la hauteur en fonction de la longueur de son ombre.

Il est possible de connaître l'angle d'incidence du rayon solaire à partir du jour et l'heure de prise de vue. A partir de cette donnée et de la longueur d'ombre, on peut déterminer approximativement la hauteur d'un arbre ou d'un édifice.



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{l} \Rightarrow \boxed{h = l \times \operatorname{tg} \alpha}$$

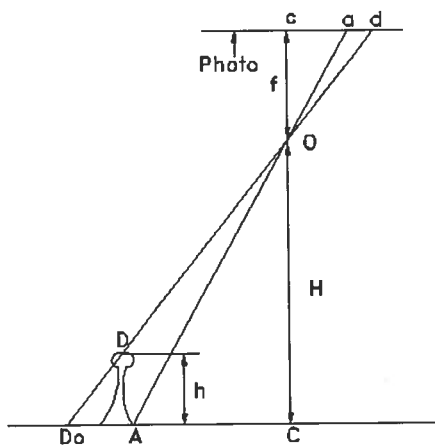
Ex : Si la longueur d'ombre sur photos au 1:10.000 est de 3 mm et l'angle d'incidence de 27°, déterminons la hauteur.

$$l = 3 \times 10000 = 30000 \text{ mm} = 30 \text{ m.}$$
$$h = 30 \times \operatorname{tg} 27^\circ = 15,29 \text{ m.}$$

L'utilisation de cette méthode n'est pas toujours évidente. De plus, les résultats sont assez approximatifs. Cette méthode est rarement utilisée.

2) Calcul de la hauteur à partir d'une seule photo.

Chaque point d'un objet réfléchit le rayon lumineux qui arrive sur la surface sensible. Analysons particulièrement deux rayons: celui du sommet et du pied d'un arbre.



D'après les triangles semblables (aOd) et (AODo),

$$\frac{ADo}{ad} = \frac{H}{f} \quad (1)$$

De même, d'après les triangles semblables (dOc) et (DoOA),

$$\frac{CDo}{cd} = \frac{H}{f} \quad (2)$$

les triangles

semblables (DoOA) et (DoOC),

$$\frac{CDo}{ADo} = \frac{H}{f} \quad (3)$$

D'après

$$\Rightarrow h = \frac{ADo}{CDo} \times H = \frac{ADo}{CDo} \times \frac{CDo}{cd} \times f \quad (2)$$

$$= \frac{ADo}{cd} \times f = \frac{ADo}{cd} \times \frac{ad}{ADo} \times H \quad (1)$$

$$\Rightarrow h = \frac{ad}{cd} \times H \quad \text{avec :}$$

ab : distance sur photo entre le sommet et la base. On appelle cette distance «déplacement» dû au relief.

cb : distance sur photo entre le centre et le sommet.

H : on assimile cette hauteur à celle de vol. En réalité,
 $H = H_t - f$.

Remarque :

Le déplacement dû au relief n'est pas toujours facile à mesurer, car l'observation à deux dimensions (une seule photo) ne permet pas de voir facilement le pied de l'arbre. Pour cette raison, cette méthode est moins utilisée.

3) Calcul de la hauteur à partir d'un couple de photos (différence de parallaxe)

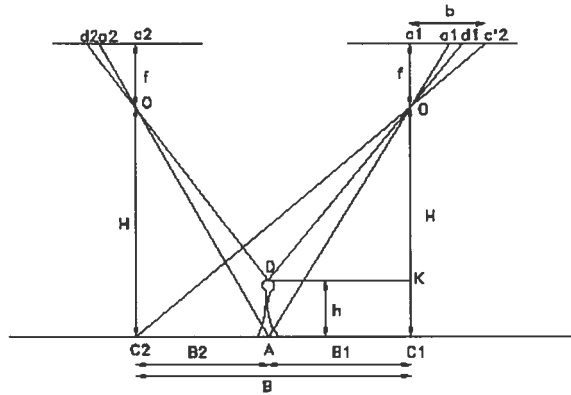
Soient $r_1 = c_1d_1$: distance du centre c_1 à l'image d_1 sur la première photo.

$r_2 = c_2d_2$: distance du centre c_2 à l'image d_2 sur la deuxième photo.

On appelle parallaxe absolue du point D, la somme $r_1 + r_2$.

Posons $e_1 = a_1d_1$ et $e_2 = a_2d_2$; e_1 et e_2 sont les déplacements dus au relief respectivement sur la première photo et sur la deuxième photo.

La parallaxe absolue du point A est la somme $(r_1 - e_1) + (r_2 - e_2)$



La différence entre les parallaxes absolues D et A appelée différence de parallaxe Δp s'obtient par :

$$\Delta p = r_1 + r_2 - [(r_1 - e_1) + (r_2 - e_2)] = e_1 + e_2$$

Déterminons h à partir de cette différence de parallaxe Δp .

D'après la formule $h = \frac{ad}{cd} \times H$, nous avons

$$a_1d_1 = e_1 = \frac{h \times c_1d_1}{H}$$

or, d'après les triangles semblables (DOK) et $(d_1O_1c_1)$, on a :

$$\frac{c_1d_1}{B_1} = \frac{f}{H - h} \Rightarrow c_1d_1 = \frac{B_1f}{H - h}$$

$$\Rightarrow e_1 = \frac{B_1fxh}{(H - h)H}$$

$$\text{De la même manière, on obtient } a_2d_2 = e_2 = \frac{B_2fxh}{(H - h)H}$$

$$\text{Ainsi, } \Delta p = e_1 + e_2 = (B_1 + B_2) \frac{fxh}{(H - h)H} = \frac{Bfxh}{(H - h)H}$$

D'après les triangles semblables (C_1OC_2) et $(c_1Oc'_2)$, on a :

$$\frac{B}{b} = \frac{H}{f} \Rightarrow B = \frac{bH}{f}$$

$$b = \frac{8,7 + 8,2}{2} = 8,45 \text{ cm.}$$

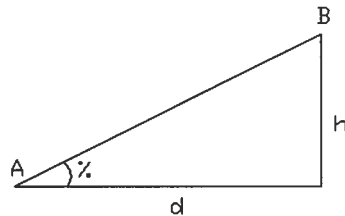
$$e = \frac{1}{E} = \frac{f}{H} \Rightarrow H = E \times f = 10.000 \times 12 = 1200 \text{ m}$$

$$h = \frac{H \times \Delta p}{b} = \frac{1200 \times 208 \times 10^{-5}}{0,0845} = 29,5 \text{ m}$$

b) Mesure de pente

La mesure de la pente entre deux points A et B peut s'effectuer en déterminant la parallaxe absolue de chaque point. Avec la différence de parallaxe obtenue, on calcule la hauteur entre les deux points. La distance horizontale entre ces deux points s'obtient directement par mesure sur photo ou mieux sur carte topographique. On détermine alors la pente à l'aide de la formule :

$$\% = \frac{h}{d} \times 100$$



Exemple :

Sur la photo précédente, on désire connaître la pente entre 2 points A et B. Parallaxe absolue PA = 125; PB = 087.
distance horizontale d = 3 mm.

Déterminons cette pente.

Solution

$$\Delta p = 125 - 087 = 38$$

$$h = \frac{1200 \times 38 \cdot 10^{-5}}{0,0845} = 5,4 \text{ m.} \quad d = 3 \times 10.000 = 30 \text{ m.}$$

$$\Rightarrow \% = \frac{5,4}{30} \times 100 = 18 \%$$

On peut aussi utiliser le stéréoclisimètre pour déterminer la pente sur photos aériennes.

c) Mesures des cimes ou des couronnes des arbres.

La mesure du diamètre des cimes s'effectue grâce à la construction sur papier transparent de deux lignes convergentes formant un angle aigu dont l'une porte les graduations en

millimètre.



Pour déterminer le diamètre d'une cime, on fait coïncider deux extrémités de celle-ci sur les deux lignes. On lit sur la partie graduée la valeur correspondante en millimètre. On utilise l'échelle de la photo pour avoir la valeur réelle de ce

diamètre grâce à la formule $D = l \times E$

Exemple :

Si à l'aide de cet instrument, on lit une distance $l = 2 \text{ mm}$, sur photo au 1:10.000, le diamètre de la cime est de

$$D = 2 \times 10.000 = 20.000 \text{ mm} = 20 \text{ m.}$$

On peut aussi utiliser cet instrument pour déterminer des petites longueurs sur la photo; par exemple le déplacement dû au relief.

d) Mesure du nombre de tiges à l'ha.

La mesure du nombre de tiges à l'ha s'effectue facilement sur des photos à grande ou à très grande échelle car à cette échelle, les tiges sont bien individualisées.

On détermine des places échantillons dans lesquelles on compte le nombre n de toutes les couronnes rencontrées. Connaissant la surface S des places échantillons, on détermine facilement

ce nombre grâce à la formule

$$N = \frac{n}{S}$$

On doit être prudent lors de l'interprétation de ces résultats. En effet, on ne peut voir sur photos aériennes que les couronnes des arbres dominants et co-dominants.

e) Mesure de la surface.

La mesure de la surface des zones homogènes (strates forestières) ou des places échantillons s'effectue facilement sur photos. On utilise au choix les différents instruments suivants (voir Djomo Adrien Notions de Cartographies) :

- planimètre polaire
- planimètre électronique
- planimètre roulant

- grille des points cotés.

En utilisant la grille des points cotés, l'erreur de mesure à craindre avec une probabilité de 95 % se calcule à l'aide de la formule :

$$e(\%) = 52,15 \frac{\sqrt{k}}{n^{3/4}} \quad \text{avec :}$$

n : nombre de points comptés.

k : facteur qui dépend de la forme de la surface et qui augmente avec l'irrégularité de la surface. Il est compris entre 5 et 7 pour des surfaces régulières.

Exemple :

On compte sur une surface donnée n = 600 points. L'échelle utilisée est e = 1:10.000. La valeur de chaque point à cette échelle sur la grille utilisée est de 0,16 ha. On prend k = 7.

Déterminons cette surface et l'erreur de mesure au niveau de probabilité 95 %.

Solution :

$$e = 52,15 \frac{\sqrt{7}}{(600)^{3/4}} = 1,14 \%$$

$$S = 600 \times 0,16 = 96 \text{ ha} \quad e = 96 \times 1,14/100 = 1,09 \text{ ha}$$

d'où $S = 96 \pm 1,09$ ha au niveau de probabilité 95 %.

f) Mesure de la densité du couvert.

La densité est la proportion de couverture des cimes par rapport à la surface totale.

La mesure de la densité est facile à déterminer si on dispose d'une échelle des densités. Ce sont des carrés dans lesquels sont dispersées des structures représentant schématiquement des cimes et qui correspondent chacune à un niveau de densité déterminé. On peut retrouver par exemple les niveaux de densité suivants : 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, etc.

g) Volume des arbres et des peuplements forestiers.

La détermination du DHP et des diamètres à différents niveaux de la tige n'étant pas possible sur photos, pour déterminer les volumes des arbres et des peuplements forestiers, on construit des tarifs de cubage. Le principe de construction est le suivant:

- le tarif peut être à une ou à deux entrées.
- s'il est à une entrée, on évalue le diamètre des couronnes sur photos et on repère les arbres mesurés.
- s'il est à deux entrées, on évalue le diamètre des cimes et la hauteur, puis on repère les arbres mesurés.
- sur le terrain, on localise tous les arbres mesurés sur la photo, puis on détermine avec précision le volume. (voir Tome1 pp 72-87)
- on construit le barème de cubage en utilisant comme entrées les mesures obtenues sur photos. Il s'agit des diamètres des couronnes pour les tarifs à une entrée, des diamètres et des hauteurs pour les tarifs à deux entrées. La sortie correspond aux volumes mesurés sur le terrain. (voir Tome1 pp 120-124)

Remarques :

- Les tarifs ainsi construits sont moins précis que les tarifs conventionnels.
- Ils donnent le volume d'un arbre ou d'un groupe d'arbre. Comme tout tarif ils ne sont pas recommandés pour cuber un arbre isolé.
- Lorsqu'il s'agit d'un peuplement mélangé, on construit un tarif général car il est assez difficile d'identifier avec précision tous les arbres sur photos.
- On peut aussi déterminer les tables de peuplements à partir des photos. Dans ce cas, on doit se servir des données suivantes :
 - . hauteur moyenne du peuplement
 - . densité du couvert
 - . diamètre moyen des couronnes.

En conclusion, nous dirons que les mesures dendrométriques sont possibles sur photos, à condition qu'un certain nombre de précautions déjà énumérées soient prises. D'une façon générale, les résultats seront moins précis que ceux obtenus sur le terrain. Enfin, signalons que les peuplements forestiers étant des entités dynamiques, il est important de connaître l'année de prise de vues pour interpréter les résultats obtenus.

IV.4 CARTOGRAPHIE

La cartographie consiste à transférer les images de terrain visibles sur les documents de télédétection sur un autre type de document : la carte. La carte a l'avantage qu'elle présente sur un seul document, facilement manipulable (ce n'est pas toujours le cas avec une mosaïque de photos ou un orthophotoplan) toute la zone d'étude. En particulier, lors de l'évaluation des ressources forestières, on est presque toujours amené à monter

une carte forestière qui présente selon les objectifs : les différentes strates, les différents types végétaux, les résultats d'inventaire etc. Le montage de ce type de cartes appelées cartes thématiques passe par plusieurs phases :

1er phase : Recherche des documents existants.

- les ouvrages décrivant la région quel que soit la nature.
- les photographies aériennes et/ou les images (satellites, radars) et/ou les bandes magnétiques existants sur la zone d'étude.
- les fonds de carte.

Lorsqu'une carte de la région existe, on doit s'assurer que l'échelle correspondante est celle voulue. Sinon, on doit la ramener à cette échelle par tirage photographique agrandi ou réduit. Il est nécessaire de compléter les informations à partir des documents récents si la carte date de plusieurs années. Si de plus, elle est surchargée d'informations, on doit la simplifier à partir des planches ayant servi à son établissement (voir Djomo Notions de Cartographie). On a surtout besoin du réseau hydrographique et les éléments du relief car les cartes de base servent surtout d'appui au report (transfert); ainsi, la précision et la localisation des éléments qui s'y trouvent doivent être bonnes.

Lorsque le fond de carte n'existe pas, on doit la réaliser soit à partir d'une mosaïque de photos, soit à partir d'un orthophotoplan.

2eme phase : La photo interprétation (voir IV.3.2)

3eme phase : Le report ou le transfert.

Cette phase consiste à transférer sur le fond de carte les images interprétées sur les documents utilisés. Ceci doit toujours s'effectuer après le contrôle sur le terrain et la finition du travail de photo interprétation.

Le report s'effectue à partir des points communs visibles sur la photo et sur la carte. On distingue plusieurs procédés de transfert. Le choix dépend du fond de carte, de la densité des détails et de la précision recherchée. Ce sont :

- Les procédés graphiques.

Lorsque l'échelle de la carte de base est semblable ou très proche de celle des photos, on peut effectuer un report direct à vue e.n apposant la carte sur les photos.

- Les procédés optiques.

Il existe plusieurs appareils optiques de transfert. On peut citer :

- la Chambre Optique

- l'Aero Sketchmaster
- le vertical Sketchmaster
- le Stéréo Sketchmaster
- le Stéréoflex
- le Zoom transfer Scope

Le principe de tous ces appareils est le même : On peut voir en même temps l'image photographique et la carte de base. La photo est placée sur un porte cliché et son mouvement en X,Y,Z permet la mise en correspondance des points communs à la photo et la carte.

- Les procédés photographiques.

Il existe des appareils photographiques tels que le Plan-Variographe ou l'Optigraph qui projettent l'image photographique sur une table transparente, sur lequel se trouve le fond de carte. La mise en correspondance de la photo et de la carte s'effectue à l'aide d'un objectif qui peut faire des agrandissements ou des réductions.

- Les procédés numériques.

Ceci est possible lorsque l'interprétation s'est effectuée sur des bandes magnétiques à l'aide de l'ordinateur. Dans ce cas, on peut effectuer automatiquement la restitution en introduisant tout simplement les codes pour déterminer la nature des détails.

5eme phase : la rédaction cartographique.

La rédaction cartographique est très souvent manuelle. Cependant, elle peut être assistée par ordinateur si les données ont été enregistrées sur bandes magnétiques. Cette étape qui est la dernière, doit donner une bonne qualité à la carte. Ainsi, on doit savoir au préalable le maximum d'informations qui doivent y figurer, afin de faire les choix nécessaires (symboles, tramage, différents traits d'épaisseur, type d'organisation, classification etc). Les informations sur la carte ne doivent pas être trop denses; elles doivent être parfaitement lisible. Enfin, on doit mentionner sur les bords de la carte, ceci de façon équilibrée et esthétique, toutes les informations susceptibles de faciliter la lecture.

- titre et identification de l'organisme réalisateur.
- la légende forestière.
- le numéro du feuillet
- la source de la carte de base
- la date de révision
- l'échelle
- la légende cartographique.
- etc.

CHAPITRE V
LES INVENTAIRES
FORESTIERS

CHAPITRE V : LES INVENTAIRES FORESTIERS

V.1 INTRODUCTION

Les inventaires forestiers sont un ensemble d'opérations qui permettent d'obtenir des informations quantitatives et qualitatives sur une superficie forestière à un moment donné. La nature des informations est variée et dépend des objectifs. On a généralement besoin de connaître la quantité et la localisation des ressources ligneuses. Très souvent, les opérations s'effectuent sur de grandes superficies et on est donc amené à sélectionner une partie de la zone d'étude pour effectuer les analyses, et d'utiliser les résultats obtenus pour caractériser la population totale. C'est pour cette raison que nous avons consacré un chapitre sur les techniques d'échantillonnage. Aussi, la planification des inventaires nécessite l'utilisation des outils de télédétection (photographies aériennes, images satellites, images radars, etc.), ainsi que des cartes sur lesquelles se planifie cette opération. Ainsi, recommandons nous au lecteur de bien vouloir s'en référer au chapitre IV où un paragraphe est consacré à la cartographie. Le lecteur intéressé pourra consulter le manuel NOTIONS DE CARTOGRAPHIE par Djomo qui est un document de base pour la planification et la réalisation des travaux cartographiques.

Le traitement des données d'inventaire nécessite l'utilisation des éléments de statistique; il est toujours important de savoir avec quelle précision et dans quelle intervalle de confiance les résultats sont obtenus. Nous recommandons au lecteur de bien vouloir se familiariser avec ces notions avant d'aborder les analyses de résultats d'inventaires. C'est donc pour cette raison entre autres que nous y avons consacré un chapitre assez élaboré.

Dans le Tome 1, nous avons présenté les objectifs des différents types d'inventaire, ainsi que les grandes lignes à suivre lors de la réalisation. Dans ce chapitre, nous détaillons les méthodes de réalisation des différents types d'inventaire. Ainsi, distinguons nous deux types d'inventaire:

- Les inventaires complets
- Les inventaires par échantillonnage qui regroupent les inventaires nationaux, de pré-investissement et d'aménagement.

Les inventaires régionaux sont également un type d'inventaire par échantillonnage; la différence se situe au niveau du taux d'échantillonnage et aussi des outils de télédétection utilisés. Il est plus indiqué à cette échelle d'utiliser des images satellites, radars ou des photographies aériennes prises à partir des ballons sondes, qui couvrent de larges surfaces, contrairement aux photographies aériennes classiques. Les notions développées ci-dessous pourront servir de base à tous

ceux qui veulent effectuer des inventaires à cette échelle et donc les objectifs sont très proches des inventaires de reconnaissance national.

V.2 LES INVENTAIRES COMPLETS (Prospection).

Les inventaires complets, encore appelés inventaires pied par pied ou à 100 % sont couramment utilisés en zone tropicale avant les exploitations forestières. C'est pour cette raison qu'on les dénomme aussi inventaire d'exploitation ou prospection. Bien qu'il s'agisse d'une couverture du territoire à 100 %, il est difficile en réalité dans le contexte tropical d'effectuer un inventaire complet pied par pied, car d'une part, beaucoup d'essences ne sont pas commercialisables et ne font pas l'objet du comptage. D'autre part, pendant cette opération, on s'intéresse aux essences d'avenir et celles qui ont atteint le DME; Les semis et les gaulis ne sont pas en général inventoriés.

Le but de l'inventaire d'exploitation est de :

- localiser toutes les essences commercialisables potentiellement exploitable.
- établir une carte de prospection où sont répertoriées toutes ces essences. Celle-ci doit servir de base de travail pour les abatteurs et aussi pour la planification des routes et des pistes forestières.
- estimer le volume de bois disponible.

V.2.1 Opérations préliminaires

Comme préalable à tout inventaire, on doit commencer par chercher les documents existants : cartes, photographies aériennes, résultats d'inventaires existants etc. Très souvent, les cartes existantes sont des cartes topographiques ou forestières au 1:200.000 ou au 1:50.000.

- Lorsque les photos sont disponibles, on doit les utiliser pour faire une reconnaissance de la forêt. Sinon, on peut l'effectuer rapidement à l'aide d'un avion qui vole à basse altitude. Si on ne peut disposer d'aucun de ces moyens, on doit faire une reconnaissance au sol en ouvrant au hasard quelques layons à des endroits différents, ceci, sans aucun soucis statistique. Cette opération doit s'effectuer avant l'octroi du permis, de la licence ou de la concession forestière, afin de s'assurer de la richesse effective de celui-ci.

- On délimite ensuite sur la carte topographique existante les contours de la zone forestière sollicitée et on calcule la surface correspondante.

- Puis, on agrandit la carte au 1:5.000 ou au 1:10.000. En terrain facile, on peut accepter un agrandissement au 1:20.000.

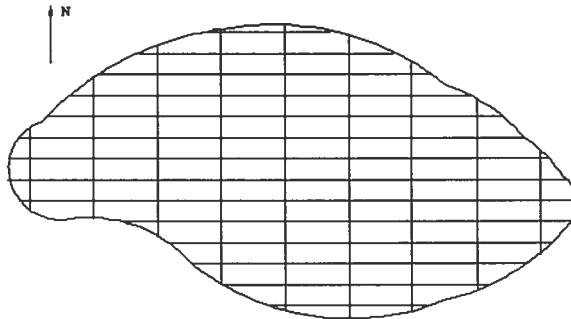
- Enfin, on planifie sur la carte, le réseau de layons à ouvrir sur le terrain. Ceci s'effectue en plusieurs étapes :

* tracer d'abord deux droites perpendiculaires. Le premier est le plus long layon Nord-Sud et le second le plus long Est-Ouest. Ce sont des layons de base ou principaux.

* Ensuite, tracer à une équidistance de 1000 m, à partir du layon principal Nord-Sud les layons secondaires Nord-Sud.

* Enfin, tracer à une équidistance de 200, 250 ou 500 m, à partir du layon principal Ouest-Est, les layons secondaires Est-Ouest.

* On obtient ainsi des parcelles de 20, 25, 50 ha. Il est recommandé d'utiliser des parcelles de 25 ha qui permettent d'effectuer facilement le comptage dans chacune d'elles en deux virées.



V.2.2 Le layonnage

Au cours de cette opération, on peut utiliser plusieurs équipes selon la superficie et le temps imparti pour la réaliser. Une équipe de layonnage est constituée de :

- Un chef d'équipe qui établit le rapport journalier ou hebdomadaire.
- un boussolier qui donne l'orientation.
- un machetteur de tête qui ouvre sommairement.
- 4 à 6 machetteurs qui ouvrent et aident à faire le chaînage.
- un chaîneur.

Dans beaucoup d'inventaires d'exploitation, comme il s'agit d'un quadrillage Ouest-Est et Sud-Nord, on n'utilise pas le clinomètre pour effectuer la correction de pente en terrain accidenté. Nous pensons qu'on devrait encourager l'utilisation de cet instrument pour 2 principales raisons :

- a) Les layons de base doivent être ouvertes avec précision pour permettre de bien positionner le début des layons

secondaires.

b) Même si on dispose d'une carte topographique, lorsqu'on l'agrandit, le relief n'est plus bien représenté. On a donc toujours besoin de relever soit pendant le layonnage ou le comptage, les éléments du relief pour compléter la carte du point de vue topographique. Ceci s'avérera très utile lors de la planification routière.

* Sur le terrain, on ouvre d'abord les layons de base Ouest-Est et Sud-Nord, en se servant d'un clinomètre lorsque le terrain est accidenté. Il doivent avoir une largeur de 1 à 2 m et servent d'accès et même d'axe topographique.

* Les layons secondaires ont leur point de départ sur les layons de base. Ils ont une largeur de 1 m. Il est à remarquer que lorsque l'azimut est bien sélectionné (0 ou 180° pour les layons Sud-Nord ou Nord-Sud et 90 ou 270° pour les layons Ouest-Est ou Est-Ouest), et les points de départ bien localisés, il n'est pas indispensable (on gagne en plus du temps) d'utiliser le clinomètre pour ouvrir ces layons. En effet, les layons Ouest-Est sont perpendiculaires systématiquement aux layons Sud-Nord; on devra donc ouvrir d'abord tous les layons Ouest-Est puis Sud-Nord ou vice-versa. Cependant, sur le terrain, particulièrement lorsque le terrain est accidenté, on parcourt très souvent plus de 100 ou plus de 50 m sans connaître exactement cette distance pour passer de 900 à 1000 m ou de 200 à 250 m; ceci peut créer des difficultés à positionner les éléments du relief lors de la cartographie finale. On conseille donc d'utiliser le clinomètre sur sol accidenté.

* Le chaînage s'effectue à l'aide d'un topofil de 10, 20 ou 50 mètres. On fait un marquage sommaire sur des piquets blanchis à tous les 100 mètres et aux 50 m. On fait un marquage récapitulatif à tous les milliers de mètre pour les layons Ouest-Est et aux 250 m pour les layons Sud-Nord.

V.2.3 Le comptage

L'équipe de comptage est constituée de :

- un chef d'équipe qui organise le travail. C'est lui qui détermine les parcelles à ouvrir dans la journée ainsi que les orientations du travail. Il rédige également le rapport de prospection.

- un pointeur qui se déplace sur les layons Ouest-Est et remplit la fiche de comptage.

- 6 prospecteurs qui se déplacent de front avec le pointeur. Ils identifient tous les arbres exploitables dans leur carré, déterminent le diamètre et la qualité. Ils signalent aussi les différentes variations du relief.

Le travail de prospection s'effectue toujours dans le sens Ouest-

Est ou Est-Ouest en deux virées. Le pointeur se déplace sur le layon et les prospecteurs se situent en ligne horizontale à des distances approximatives de 25 mètres, ceci jusqu'à 100, 125 ou 250 mètres dépendant des parcelles. Ils évoluent ainsi de front jusqu'à la fin de la parcelle. Lorsqu'un prospecteur découvre un arbre, il crie "arrête" pour stopper les autres. Il précise son numéro, donne le nom de l'essence et le diamètre. Les autres indications que les prospecteurs peuvent donner sont :

- strate forestière
- nature du relief (pente, cours d'eau, pont, relief)
- limite

Le pointeur relève les notes suivant le numéro et la position du prospecteur sur le terrain. Pour contrôler les prospecteurs, il émet un cri auquel ils répondent. Il est à noter que le pointeur doit être expérimenté pour permettre à ses hommes de toujours se situer dans leur rayon d'action.

Figure : Description d'une fiche de comptage (cf normes)

Il doit enregistrer dans sa fiche les arbres comptés tels qu'ils sont situés sur le terrain pour que celle-ci apparaisse comme un croquis de la parcelle. Lorsque le nombre rencontré dans un carré est élevé, il peut juste indiquer les codes des noms et les nombres.

V.2.4 Cadence de travail

Que ce soit pour le layonnage et le comptage, il est hasardeux de donner une vitesse exacte de l'évolution d'une équipe. Elle est fonction de plusieurs paramètres variables :

- la composition de l'équipe : il est évident qu'une équipe nouvellement constituée n'avancera pas à la même cadence qu'une équipe constituée de membres expérimentés qui travaillent ensemble depuis longtemps. De plus, la qualification et l'homogénéité de l'équipe seront des facteurs contributifs à l'évolution de cette cadence.

- le relief : En terrain accidenté, la vitesse d'évolution d'une équipe sera en général plus lente qu'en terrain facile.

- la densité du peuplement : Une équipe avancera beaucoup plus vite sur un terrain faiblement peuplé et moins jonché d'obstacles que sur un autre qui est plutôt dense.

D'une façon générale, on peut estimer le temps à mettre pour effectuer un travail de la façon suivante :

Soit t le temps mis pour parcourir la surface s .

T le temps à mettre pour parcourir la surface S .

$$T = \frac{t \times S}{s}$$

N.B Pour déterminer objectivement le temps t , on doit après avoir fait la reconnaissance du terrain :

- faire travailler l'équipe dans des parcelles différentes de surface égale s , les premiers jours.
- Noter ensuite les temps t_i obtenus dans chaque parcelle.
- Faire la moyenne des temps t_i pour obtenir le temps t .

V.2.5 Estimation du volume.

Dans de nombreuses exploitations, il est courant que pour estimer le volume, on multiplie le nombre d'arbres obtenu dans chaque classe de diamètre par un volume commercial obtenu soit par expérience, soit à partir des cubages effectués dans d'autres exploitations.

Notons cependant qu'il est toujours possible de confectionner un tarif de cubage en sélectionnant un échantillon très faible des arbres représentatifs ou en utilisant les résultats du cubage des arbres abattus effectués dans les chantiers déjà exploités de la zone.

V.2.6 Cartographie

- Dans un premier temps, on modifie le réseau de layons pour les faire apparaître sur la carte définitive tels qu'ils se présentent effectivement sur le terrain, à l'aide des renseignements de l'équipe de layonnage.

- Ensuite, à l'aide de la fiche de comptage, on complète parcelle par parcelle la description du relief et on positionne les essences dans celle-ci.

- Si les renseignements topographiques ne sont pas touffus, on ajoute sur la même planche la position des arbres dans les différentes parcelles; sinon, on monte une autre planche où seront décrits uniquement la localisation des arbres sans aucune description topographique.

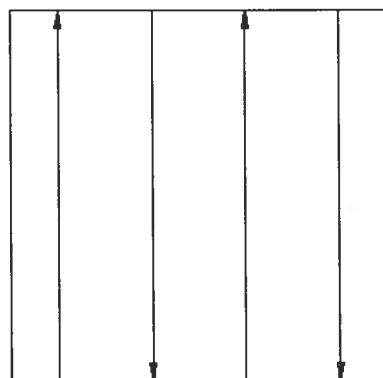
V.3 LES INVENTAIRES PAR ECHANTILLONNAGE

V.3.1 Inventaire de reconnaissance national

Pour ce type d'inventaire, on opte très souvent pour un sondage à deux degrés car on a affaire à de très vastes superficies et le taux d'échantillonnage est faible. Ce type de sondage permet de réduire les déplacements en concentrant plusieurs unités de sondage dans une unité primaire.

Au Cameroun, les unités primaires sont des carrés de 2 x 2 km dans lesquels se trouvent quatre lignes parallèles qui

représentent des layons de comptage qui seront ouverts sur le terrain. Sur chacun de ces layons, on retrouve 10 parcelles de 25 x 200 m.



Zone de comptage

Lorsque le travail s'effectue sur une grande superficie comme c'est souvent le cas, on découpe le territoire en blocs homogènes appelés unités de compilation où la compilation statistique des données s'effectue indépendamment les unes des autres. Le choix du nombre d'unités primaires (UP) à positionner dans une unité de compilation est fonction de la précision recherchée et de l'hétérogénéité de la forêt. Toutefois, ce nombre ne doit pas être en dessous d'un minimum déterminé (20 à 25). On peut déterminer ce nombre à l'aide de la formule suivante :

$$n = \left(\frac{t\alpha/2 \times C_v}{p} \right) \quad (\text{cf II.3.2})$$

Ce nombre déterminé, on doit procéder à la planimétrie de l'UC pour connaître sa surface. Si la stratification a déjà été effectuée, on s'en sert pour délimiter les zones inaccessibles, sinon on peut l'effectuer sur des photos et le transférer à l'aide d'un instrument de restitution. On obtient ainsi la surface échantillonnable :

$$S_a = S - S_i \quad \text{avec}$$

- Se : Surface totale
- Si : Surface inaccessible
- Sa : Surface accessible.

L'équidistance entre les UP se calcule à l'aide de la formule

$$\text{suyvante : } E = \sqrt{\frac{S}{n}}$$

En principe, la théorie de sondage s'applique à l'ensemble de la population. Cependant, compte tenu d'énormes difficultés d'accès

souvent rencontrées en zone tropicale, on est souvent obligé d'éliminer certaines UP se trouvant dans les zones inaccessibles.

On peut déterminer théoriquement le nombre d'unités accessibles d'une UC de la façon suivante :

$$\frac{na}{n} = \frac{Sa}{S} \Rightarrow na = \frac{n \times Sa}{S}$$

Le positionnement des UP s'effectue généralement de façon systématique, compte tenu des avantages de ce type de sondage. Plusieurs possibilités sont offertes. On peut par exemple opter pour la procédure suivante :

* localiser d'abord les points les plus éloignés au Nord et à l'Ouest.

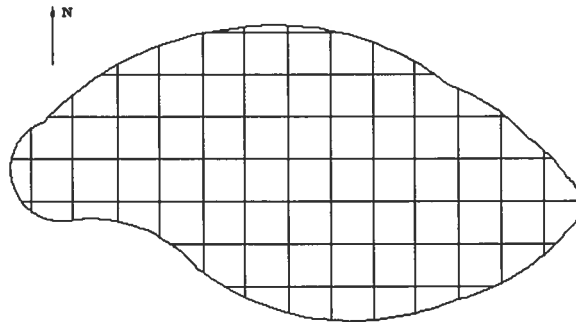
* A la demi-équidistance du point le plus éloigné Nord, on trace une ligne horizontale. On trace ensuite les autres lignes parallèles à la première, à des distances égales de valeur donnée par l'équidistance calculée.

* A la demi-équidistance du point le plus éloigné Ouest, on trace une ligne verticale. On trace ensuite les autres lignes verticales, à des distances égales de valeur donnée par l'équidistance calculée.

* Les points de rencontre des lignes verticales et horizontales constituent les centres des UP.

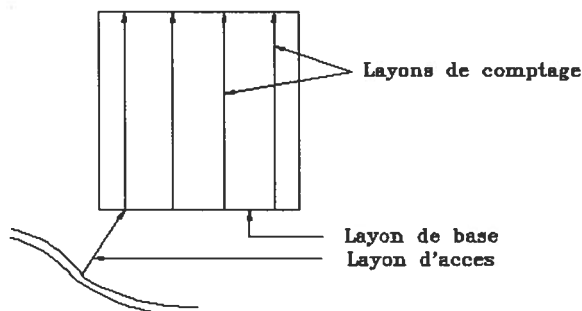
* On élimine toutes les UP qui se trouvent dans une zone inaccessible. Celles dont les contours se trouvent sur la limite ou en dehors de l'UC doivent être déplacées jusqu'à ce qu'elles se retrouvent totalement à l'intérieur de l'UC.

* On positionne ensuite les UP accessibles sur les photos et on vérifie qu'elles le sont effectivement. Lorsqu'on s'aperçoit qu'il y a des difficultés quelconques liées au sondage, on peut soit déplacer l'UP, soit l'éliminer si elle se trouve complètement dans une zone inaccessible. L'observation stéréoscopique des photos peut aussi permettre de prévoir le rendement théorique des équipes.



* On numérote les UP dans un ordre déterminé.

* On trace les contours des UP sur la carte topographique et sur photos. Dans chaque UP, on détermine les layons de comptage en fonction des normes en vigueur. A l'aide de la carte topographique et des photos, on localise le point de départ et le layon d'accès. Le point de départ doit être facilement repérable sur le terrain. Il doit être situé sur une route ou une piste, près d'un cours d'eau ou d'un édifice etc. Au point d'arrivée du layon d'accès, on trace un layon de base qui sert à ouvrir les layons de comptage.



Remarque :

- 1) On reprend la même procédure pour chaque UC délimité.
- 2) La précision et l'homogénéité des peuplements varient souvent d'une UC à l'autre et par conséquent le nombre d'unités-échantillons.
- 3) La subdivision du territoire en UC rentre en principe dans le processus de stratification c'est-à-dire qu'on doit regrouper dans une UC les peuplements appartenant de façon globale à un sous type végétal.

Réalisation des inventaires Nationaux dans quelques pays.

* Au Cameroun, 7 phases d'inventaires ont été prévues, devant couvrir la partie Sud du pays qui représente la zone de production. L'ONADEF est le service en charge de cette réalisation. Jusqu'en 1996, seules 4 phases ont été achevées. Les autres ont été arrêtées pour des raisons financières. Le déroulement de ces inventaires ont conduit à la publication des cartes forestières au 1:200.000 ainsi qu'à la rédaction des "NORMES D'INVENTAIRES DE RECONNAISSANCE".

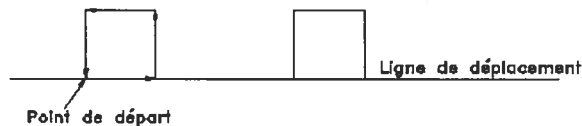
* En France, les unités de compilation sont les départements. On utilise les placettes de mesure, circulaires concentriques:

- . 6 m de rayon pour les petits arbres.
- . 9 m de rayon pour les arbres moyens.

. 12 m de rayon pour les gros arbres.

Ces placettes sont sélectionnées au hasard. La réalisation de cet inventaire a conduit à des cartes au 1:500.000 par département et aussi à des mailles au 1:250.000. «En 1987, deux passages complets de la France sont terminés, le troisième est en cours de réalisation». (Pardé, 1988)

* En suède, les inventaires forestiers Nationaux sont permanents et basés sur un système d'échantillonnage stratifié et systématique. Les unités sont des carrés à dimension variable en fonction de la difficulté de pénétration (1,2 à 2 km). Les «layons de comptage» sont situés sur les côtés de carré et on prévoit que l'équipe de comptage doit se retrouver au point de départ le soir dans chaque unité. Le comptage s'effectue dans des placettes circulaires situées à intervalles réguliers le long de ces layons.



Après chaque période de 10 ans, on reprend un nouveau inventaire. Cependant, chaque année, on parcourt tout le pays avec un taux d'échantillonnage faible, le dixième de la valeur prévue. De cette façon, il est possible d'avoir les résultats provisoires chaque année sur l'ensemble du pays, et le résultat définitif périodique après chaque 10 ans.

* Au Québec, la partie Sud du pays regroupe toutes les forêts productives, soit 47 % de la surface totale. On distingue 9 régions administratives qui sont subdivisées en 44 unités de gestion. En plus de cette subdivision administrative, le Ministère de l'Énergie et des Ressources (M.E.R) a subdivisé le territoire en 4 zones :

- . zone de banlieue.
- . zone de sciage et pâte.
- . zone de pâte.
- . zone non exploitable.

Les inventaires sont effectués dans les différentes unités de gestion dans chaque région. On obtient donc les résultats dans les 9 régions administratives. Le M.E.R collecte les données obtenues à l'échelon national par région dans un premier niveau et par zone au second niveau.

V.3.2 Les inventaires d'aménagement et de pré-investissement (inventaire de gestion).

Les inventaires forestiers nationaux ont pour but de parcourir

le territoire global et de définir quantitativement et qualitativement les zones productives et improductives. Il faut effectuer un autre inventaire pour définir la politique de gestion forestière. De même, lorsqu'on veut investir dans une concession forestière donnée, on doit effectuer des inventaires pour s'assurer de la rentabilité de l'industrie forestière.

Bien que les objectifs des deux types d'inventaires soient un peu différents, ils conduisent tous à la gestion des forêts. On utilise donc les mêmes méthodes pour la conduite des opérations.

Comme la zone de travail est réduite, on utilise des cartes à échelle moyenne, par exemple 1:50.000. Décrivons la procédure de confection d'un plan de gestion.

* On localise d'abord sur une carte à échelle plus petite 1:200.000 ou 1:500.000 la zone à inventorier, puis on subdivise les différentes unités de compilation (de gestion) en fonction des critères définis. Ensuite, on reporte les UC sur des cartes à plus grande échelle (1:50.000 par exemple).

* Lorsque la stratification a déjà été effectuée, elle permet de délimiter à l'aide des photos les zones inaccessibles. On effectue ensuite la planimétrie pour connaître la surface totale S et éventuellement la surface accessible Sa. D'une façon générale, l'élimination d'un secteur obéit à deux critères majeurs :

- l'inaccessibilité réelle (pente forte, zone marécageuse, eau, etc).

- zone dépourvue d'arbres.

* En fonction de la précision recherchée et de la variabilité des peuplements, on détermine le taux d'échantillonnage. Cette valeur va nous permettre de déterminer l'équidistance.

* Dans le contexte tropical à accès difficile, les parcelles sont juxtaposées les unes aux autres. Elles sont situées sur des layons qui traversent l'UC suivant une direction déterminée. L'équidistance entre les layons se calcule de la manière suivante :

$$\text{Equidistance} = \frac{\text{Surface accessible}}{\text{longueur totale des layons}}$$

Soit Sp : la proportion de la surface totale à échantillonner.

l : la largeur de la parcelle.

L : la longueur totale des layons.

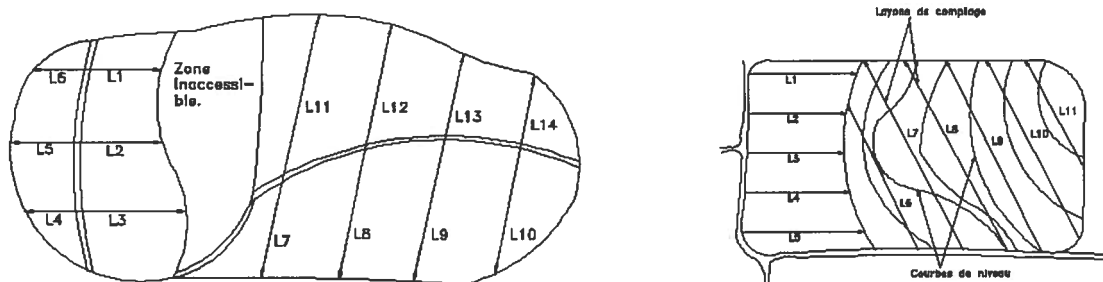
$$L = \frac{Sp}{l} \quad \text{d'où}$$

$$\text{Equidistance} = \frac{\text{Surface accessible}}{S_p} \times l$$

Au Cameroun, la précision de 10 % au niveau de probabilité de 95 % a permis de déterminer la proportion de la surface à sonder S_p à 250 ha. Puisque la largeur de la parcelle ici est de 20 m, on a :

$$\text{Equidistance} = \frac{\text{Surface échantillonnable} \times 20}{250}$$

* Une fois l'équidistance calculée, il reste à faire la mise en plan des layons. Les layons doivent avoir la même orientation dans une UC, ceci, de façon à pouvoir bénéficier des avantages des inventaires systématiques (voir II.3). Ils doivent être perpendiculaires à l'orientation générale des cours d'eau et des courbes de niveau. Cependant, en terrain très accidenté, ils doivent être parallèles aux courbes de niveau pour accroître le rendement des équipes. Il peut arriver que le terrain présente des configurations orographiques ou hydrographiques différentes, ou que la zone



inaccessible divise le territoire en plusieurs parties. Dans ce cas les layons peuvent avoir des orientations différentes dans les différentes zones. Dans tous les cas, le premier layon doit passer par un point précis et les autres à partir de celui-ci à l'équidistance calculée. En général, il passe par le point de rencontre de la plus longue distance Nord-Sud et Est-Ouest.

* Une exigence que l'on doit avoir à l'esprit lors de la mise en plan est qu'il faut obtenir le nombre total des parcelles ou la longueur totale des layons pré-déterminée. On procède le plus souvent par plusieurs essais pour se rapprocher de cette valeur, en tolérant une marge de $\pm 5\%$.

* Le positionnement terminé, on utilise les photos pour apprécier l'accessibilité des layons.

* Enfin, on procède à la numérotation des layons.

Remarque :

Dans la pratique courante des inventaires d'aménagement des zones tempérées, on trace sur papier calque par exemple des carrés de 1 ou 2 ha à l'échelle de la carte utilisée. On l'appose ensuite sur le fond de carte et on pivote plusieurs fois jusqu'à obtenir la meilleure orientation possible en fonction des conditions du milieu. On transcrit enfin le réseau maillé sur celle-ci. Dans chaque carré représenté, on établira une parcelle qui est en général de forme circulaire.

V.3.3 Sondage en forêt

Dans les zones à accès facile où on trouve souvent une ou deux essences dans une région, le sondage en forêt est aisé. C'est souvent le cas dans les zones tempérées. On suit alors deux étapes :

- recherche des points de sondage
- mesure directe des arbres dans les placettes (diamètre, hauteur, âge, volume).

Cependant, en zone tropicale, l'accès est beaucoup plus difficile et le sondage en forêt requiert d'importants moyens matériels et financiers. Il s'effectue en plusieurs étapes successives :

- la mission préparatoire.
- la préparation des brigades.
- le layonnage.
- le comptage.
- la vérification.
- les études d'arbres.

V.3.3.1 La mission préparatoire

Cette étape consiste à envoyer des spécialistes de photo-interprétations et de cartographie sur le terrain pour implanter tous les points de départ.

Au terme de cette mission, on complète les descriptions des layons sur les cartes et sur les tableaux conçus à cet effet et le chef de mission remet tous ces documents au chef de brigade.

V.3.3.2 Préparation des travaux de terrain

Les inventaires s'opèrent généralement sur de grandes superficies et son déroulement sur le terrain requiert l'utilisation de plusieurs équipes. Dans ces conditions, on est en général obligé d'installer une base de travail où logent les opérateurs et à partir de laquelle se commande les opérations en forêt.

La base doit être installée approximativement au centre de l'unité de compilation, dans une zone bien desservie par les moyens de communication telle qu'on puisse se rendre facilement au centre de santé et au marché le plus proche. On doit y trouver tous les moyens logistiques (livres de dendrologie, normes, différentes fiches, matériel d'intendance, cartes, photos, etc) dont on aura besoin pendant toute la durée du travail en forêt. Elle doit être équipée d'une radio et d'un bureau où seront effectués les premiers dépouillements. Elle est dirigée par un chef de base qui est l'assistant de l'ingénieur du projet. Il est responsable de tous les travaux déroulés en forêt et doit avoir un véhicule pour effectuer les contrôles.

Avant le démarrage des travaux, il définit les modalités d'évolution des différentes équipes.

La formation du personnel doit être préalable aux opérations. Sa durée peut aller jusqu'à 3 semaines si les coéquipiers sont inexpérimentés. L'efficacité et le sérieux de cette phase conditionnera la qualité des résultats. On ne doit donc pas la négliger, ne fut ce que pour vérifier si les automatismes sont encore présents.

* Les chefs d'équipes doivent connaître les normes d'inventaire et les différentes façons de remplir les fiches qui sont à leur disposition.

* Les utilisateurs d'instruments de mesure doivent parfaitement en être à la hauteur. Les procédures de correction de pente et de chaînage doivent être bien maîtrisées par les layonneurs.

* Les prospecteurs doivent savoir utiliser le manuel de dendrologie.

Une fois la formation achevée, le chef de base répartit les équipes et définit les rôles des membres en fonction des qualifications. Puis il détermine la cédule des opérations. Les différentes équipes sont les suivantes :

. équipe de layonnage

- 1 chef d'équipe : tient la boussole et remplit la fiche de "description des layons".

- 1 machetteur de tête ou traceur : ouvre sommairement suivant la direction donnée par le boussolier.

- 2 jalonneurs : cherchent et alignent les jalons sur l'axe du layon.

- 4 machetteurs : enlèvent tous les herbes, arbustes et racines qui jonchent le layon.

- 1 chaîneur : lit le clinomètre et fait les corrections de pente.

- 2 aides chaîneurs : tiennent le topofil et font le marquage du chaînage sur des perches, à l'aide de la peinture.

. équipe de comptage

- 1 chef prospecteur : responsable de l'identification et de la classification des arbres.

- 1 pointeur : remplit la fiche de comptage.

- 2 prospecteurs : situés de part et d'autre du layon.

- 1 porteur de planchette : pour la mesure des arbres à contreforts.

- 1 porteur de câble de 10 m : pour les arbres litigieux (limites).

. équipe de vérification

- 1 chef d'équipe : vérifie la description du layon, la direction magnétique, le chaînage, le comptage des gaulis et des essences.

- 1 aide chaîneur

- 2 prospecteurs bien expérimentés.

- 1 pointeur : remplit les fiches de vérification.

- 1 porteur de planchette.

. équipe d'études d'arbres

- 1 prospecteur + 1 aide : recherchent les arbres à mesurer et y inscrivent une marque.

- 1 chef d'équipe : s'assure que les essences marquées sont acceptables pour l'étude. Il utilise le Relascope et supervise l'équipe.

- 1 pointeur : remplit les fiches d'études d'arbres.

- 1 mesureur : prend les distances horizontales et le DHP. Il marque sur chaque arbre son numéro.

. équipe d'intendance

- 1 cuisinier

- 1 aide cuisinier.

- 1 chasseur.

- 2 porteurs.
- 2 chauffeurs.

Le nombre d'équipes par opération dépend du temps qu'on désire mettre pour achever les travaux. Lorsqu'il y a plusieurs équipes qui effectuent la même opération, elles doivent être dirigées par un chef de brigade.

V.3.3.3 Etape de layonnage

Le layonnage, comme nous l'avons déjà vu, consiste à ouvrir en forêt des layons c'est à-dire des couloirs rectilignes ayant une direction précise. On distingue plusieurs types de layon:

*** le layon d'accès**

Ce layon doit avoir son point de départ sur un endroit facilement repérable sur cartes et sur photos. Il permet d'accéder à un layon de comptage. Il doit être bien dégagé (largeur 2m).

*** le layon de base**

C'est un layon qu'on ouvre en forêt, et à partir duquel sont positionnés les points de départ des layons de comptage. Ils doivent avoir une largeur de 1,5 m. On les trouve habituellement dans les inventaires de reconnaissance et d'exploitation.

*** les layons de comptage**

Ce sont des layons le long desquels les prospecteurs doivent compter toutes les tiges rencontrées sur une longueur donnée à droite et à gauche du layon. Sa largeur est de 1,5 m. Il est important lors de l'ouverture de ce layon de marquer à la peinture les distances ainsi que le début et la fin des parcelles. Ceci va aider lors du comptage des arbres.

*** les layons de rattachement**

Ce sont des layons qu'on ouvre soit pour rattacher un layon de comptage à un autre, soit pour rattacher un point de départ ou d'arrivée à un objet facilement repérable et permettant de le décrire schématiquement. Il doit être sommairement ouvert.

Lors de la description des layons, lorsqu'on rencontre un obstacle majeur, on doit le dévier. La procédure de déviation est décrite dans le Tome 1 (voir PP 161 à 165). Le chaîneur porte une fiche appelée fiche de "description du layon" qu'il remplit au fur et à mesure que les opérations avancent.

V.3.3.4 Le comptage

Le comptage s'effectue à l'intérieur des parcelles. La procédure

dépend de la forme de la parcelle. En zone tropicale de forêt dense, on utilise généralement les parcelles rectangulaires situées le long des layons de comptage. Bien que cette forme présente le désavantage d'avoir beaucoup d'arbres périphériques sur son périmètre, ce qui oblige à faire régulièrement les vérifications, elle permet néanmoins d'avancer plus rapidement dans ces conditions.

Dans les zones tempérées, les parcelles ont généralement la forme circulaire; ce choix est dû au fait que le cercle est la forme géométrique qui, pour une surface donnée, a le plus petit périmètre. D'autre part, le cercle n'impose pas à priori une direction de déplacement. On peut choisir n'importe quelle direction, ce qui n'est pas le cas pour le carré, le rectangle ou le triangle. De plus, la facilité de pénétration dans ces conditions facilite le balayage circulaire.

Au Cameroun, en inventaire de reconnaissance, la parcelle a une forme de 25 x 200 m et de 20 x 250 m en inventaire d'aménagement et de pré-investissement, ce qui représente une surface de 0,5 ha. Le périmètre de vérification pour l'inventaire de reconnaissance est de 450 m; il est de 540 m pour l'inventaire d'aménagement et de pré-investissement. Il apparaîtra plus d'arbres-limites dans les parcelles d'inventaire de gestion que dans celles de reconnaissance. Si on avait utilisé un cercle, le périmètre aurait été seulement de 250 m pour cette surface de 0,5 ha, ce qui réduirait de près de moitié les arbres limites à rencontrer.

Ceci dit, il est admis par plusieurs auteurs que la forme des parcelles ne donne pas une précision supplémentaire à l'inventaire. On doit donc opter pour une forme qui facilite les opérations. La forme rectangulaire est appropriée en milieu d'accès difficile et la forme circulaire en zone à accès facile où on peut facilement faire le balayage circulaire.

Lors du comptage, un prospecteur se trouve de part et d'autre de l'axe du layon et un pointeur sur le layon. L'équipe évolue de front. Lorsqu'un prospecteur rencontre un arbre, il émet un cri "codé" qui arrête l'équipe. Il donne le nom de l'essence, la classe de diamètre et de qualité pour les essences soumises à la cotation des arbres sur pied. Notons que sur les 340 (source : Normes d'inventaires de reconnaissance) essences forestières répertoriées par l'ONADEF, seuls 89 sont soumises à la cotation des arbres sur pied soit 26%; ceci représente les essences principales ou commercialisables. Lorsqu'un arbre semble être à la limite, on utilise un câble de 10 m ou de 12,5 m pour effectuer la vérification. On peut aussi utiliser un clinomètre, par exemple le Suunto pour vérifier les arbres périphériques (voir Tome 1 p55). Il suffit de se munir d'une perche de hauteur connue que l'on place sur l'axe du layon. Si la perche est de 3 m, un arbre sera tangent pour une parcelle de 20 m si la pente lue est de 15 % et sera de 12 % pour une parcelle de 25m. Au delà de ces valeurs, les arbres sont à l'extérieur de la parcelle.

Lorsqu'on a affaire à des parcelles circulaires, on plante un piquet ou une mire au centre de la parcelle. Le premier arbre compté sert de point de départ; le sens de rotation peut être celui des aiguilles d'une montre ou le sens contraire. On pivote donc de 360 ° jusqu'à revenir au point de départ. Pour la vérification des arbres tangents (moins nombreux), on utilise soit un câble, soit un clinomètre.

On doit distinguer au cours de cette opération les gaulis, de diamètre compris entre 10 et 20 cm et les tiges de diamètre supérieur à 20 cm. Les gaulis sont comptés sur les premiers 100 m² (soit 2 % de la parcelle) de chaque parcelle, soit les 4 premiers mètres pour les inventaires de reconnaissance et 5 premiers mètres pour les inventaires d'aménagement et de pré-investissement. Les autres tiges (> 20 cm) par contre, sont comptés sur toute la parcelle.

Pour effectuer le comptage des petits arbres, on peut aussi utiliser des parcelles circulaires concentriques. Par exemple, en France, pour l'Inventaire Forestier National, on utilise 3 parcelles circulaires concentriques pour les forêts de production :

- rayon de 6 m pour les petits arbres.
- rayon de 9 m pour les arbres moyens.
- rayon de 12 m pour les gros arbres.

V.3.3.5 Procédures de vérification

Lors de la réalisation des inventaires sur le terrain, plusieurs erreurs de nature diverses sont commises. Il faut effectuer un contrôle pour pouvoir maintenir ces erreurs à un taux acceptable. La vérification consiste donc à effectuer des tests d'hypothèses (voir I.9) pour savoir avec quelle probabilité une opération peut être acceptée alors qu'elle aurait dû être refusée ou alors la probabilité de refus lorsqu'elle aurait dû être acceptée.

Le refus d'un travail entraîne des conséquences graves qui peut être la reprise partielle ou totale des travaux, conduisant à des incidences financières considérables. En cas d'acceptation, on doit souvent faire des recommandations lorsque c'est nécessaire aux équipes pour fins d'améliorations.

Cette opération qui est assez délicate nécessite les préalables suivants :

* l'équipe de vérification doit être constituée d'opérateurs compétents, ayant une expérience certaine.

* on doit concevoir la fiche de vérification de sorte qu'il soit possible de comparer directement sur le terrain, le travail précédent et celui de vérification. Celle-ci doit donc présenter deux colonnes. Dans la première, on transcrit les données provenant des fiches de terrain; l'équipe de vérification complètera au fur et à mesure les données de vérification dans la deuxième colonne.

* on doit définir les normes de vérification pour permettre d'avoir des critères de décision objectifs. Ainsi, doit-on déterminer pour chaque travail considéré (layonnage, comptage) les limites d'acceptation requises. Il est important de préciser dans les normes ce qu'on doit faire en cas d'indécision. Parfois, on recommande de prendre un échantillon supplémentaire dans lequel on poursuit les travaux jusqu'à ce que le refus ou l'acceptation soit évident. On pourrait aussi, compte tenu des coûts importants qu'entraînerait la prolongation des travaux, trancher en faveur de l'acceptation en cas de doute. Cela augmenterait significativement la probabilité de 2^{ième} espèce d'accepter en cas de refus. Cependant, cette deuxième méthode est tout à fait recommandable en forêt dense tropicale à accès difficile.

Intensité de la vérification

Il faut déterminer à l'avance le taux de vérification et la procédure de sélection des parcelles à vérifier. Ce taux est déterminé par rapport à la superficie effectivement sondée et non par rapport à la surface totale. Il est situé entre 5 et 15 %.

Il est recommandable qu'au début de la vérification, le taux soit plus élevé afin de corriger rapidement certaines erreurs. On réduira progressivement cette valeur pour arriver en fin d'opération à un taux moyen acceptable. Par exemple, on peut fixer au début des opérations 15 %, vers le milieu 10 % et vers la fin 5 %. Ainsi, on pourra avoir une valeur moyenne en fin d'opération proche de 10 %.

La vérification des travaux de layonnage et de comptage peut être effectuée simultanément dans les mêmes parcelles. On peut aussi l'effectuer de façon successive. Par exemple, le layonnage à toutes les parcelles paires et le comptage à toutes les parcelles impaires jusqu'à atteindre le taux considéré.

Les travaux de layonnage

On doit vérifier sur chaque layon choisi, l'exactitude des données suivantes :

- direction magnétique du layon.
- schéma et description des points de départ et d'arrivée.
- orientation des pentes le long du layon.
- chaînage.
- description des strates.
- renseignements cartographiques.

Les données à vérifier sont beaucoup plus qualitatives. On pourra utiliser les termes suivants : "exact", "inexact", "manquant", "biais", "long", etc, pour effectuer le résumé de la vérification et décider si le travail est accepté ou pas. Ceci pourra aussi permettre de faire facilement des recommandations sur certains aspects du travail où on constate des lacunes.

Les travaux de comptage

La vérification des travaux de comptage doit s'effectuer de façon indépendante. On doit distinguer :

* Les gaulis

- . nombre de tiges.
- . identification des essences.

* Les tiges de plus de 20 cm de DHP.

- . Nombre de tiges
- . identification des essences.
- . classes de diamètre.
- . classes de qualité.

Le relevé des données s'effectue dans les parcelles et la compilation par UP ou layons choisis. Pour chaque paramètre, on doit déterminer le nombre d'erreurs commises dans la parcelle et ensuite dans l'UP ou le layon. Ensuite, en fonction de la limite fixée, on verra si le paramètre peut être accepté ou pas. Finalement, le pourcentage de paramètres acceptés ou refusés permettra de prendre la décision finale.

V.3.3.6 Etudes d'arbres

La principale finalité des inventaires étant l'appréciation du volume du peuplement, on doit sélectionner des arbres à partir desquels on doit évaluer cette quantité.

L'ingénieur du projet ou le chef de base doit bien préciser à l'équipe d'étude d'arbres le type de volume recherché. On doit distinguer entre autres :

- le volume fût.
- le volume tige.
- le volume total.
- le volume biomasse forestière.
- le volume brut.
- le volume sous écorce.
- le volume marchand.
- etc.

L'étape d'étude d'arbres est particulièrement indispensable en zone tropicale car la pénétration difficile ne permet pas d'effectuer directement les mesures dendrométriques lors du comptage.

Compte tenu de la faible densité des essences à l'hectare, la distribution géographiques des arbres-échantillons doit être assez objective. Un prospecteur, accompagné d'un aide qui dégage le chemin, sélectionne les arbres. Le choix doit obéir aux critères suivants :

- appartenir à une classe de DHP retenue.
- éliminer les arbres mal conformés, étranglés par un ficus ou assaillis de lianes.

Les tarifs de cubage doivent être construits par essence. Cependant, lorsqu'on rencontre de nombreuses essences différentes dans la zone d'étude, on doit distinguer les essences principales pour lesquelles on construit les tarifs individuels et les essences secondaires pour lesquelles on construit un tarif unique. Il est accepté que 100 arbres par essence ou groupe d'essences, bien reparti peuvent être suffisant. Nous pouvons répartir ces arbres de la façon suivante :

- 8 à 10 arbres par classe de diamètre pour chaque essence principale.
- 10 à 15 arbres par classe de grosseur pour les essences secondaires.
- 4 arbres au maximum par classe de grosseur et par unité primaire, grappe ou layon.
- s'assurer enfin que les arbres sélectionnés couvrent bien l'ensemble du massif forestier.

Il existe plusieurs méthodes d'études d'arbres (voir Tome 1 pp 75 à 88) :

- méthodes à mesures multiples.
- méthodes à cinq mesures (ONADEF).
- méthodes IFN (France).
- méthodes de cubage graphique.
- etc.

V.3.4 TRAITEMENT DES DONNEES

V.3.4.1 Prise des données de terrain

La prise et l'enregistrement des données sur le terrain doit être fait avec beaucoup d'attention, car c'est cette étape qui détermine particulièrement la qualité des résultats d'inventaire. Il doit être exécuté avec beaucoup d'objectivité et on doit éviter au maximum que le personnel en charge de ce travail fasse des interprétations. Pour y parvenir, on doit :

- enregistrer des paramètres mesurables c'est-à-dire les variables continues.
- utiliser des méthodes de classification lorsqu'il s'agit des variables discrètes. Cela suppose qu'on doit définir des normes de classification permettant d'obtenir de façon objective les différentes classes retenues.
- confectionner des fiches d'enregistrement des données en tenant

compte des types de données à enregistrer et de la méthode de traitement des données.

- Au cours de l'enregistrement des données, aucun traitement ne doit être effectué. Par exemple, si on utilise un gallon circonférentiel, on inscrit dans la fiche exactement le diamètre lu. Le regroupement en classe de diamètre s'effectuera au bureau.

- Simplifier l'enregistrement des données pour faciliter son traitement.

- Présenter les fiches de la façon suivante :

a) Informations générales : organisme de réalisation, date, lieu de travail, unités de compilation, unités primaires, layons, nom du chef d'équipe, remarques, etc.

b) Description du travail : pente, cartographie, strates, essences mesurées, etc.

c) Prévoir lorsque c'est possible les lignes et les colonnes des totaux. Ceci est très utile lors de l'apurement des données.

Ces informations doivent être bien réparties sur les fiches de façon à permettre l'identification et un contrôle rapide au bureau.

En général, lors de l'enregistrement des données, on utilise des fiches manuelles. Cependant, dans des systèmes d'inventaire où on dispose assez de moyen, plusieurs autres méthodes sont utilisées pour faciliter le transfert sur disque dur ou sur disquette. Ce sont :

*** Les fiches spéciales.**

Ce sont des fiches conçues telles que les données soient remplies dans des cases spéciales permettant une lecture directe par l'ordinateur. Elles pourront donc être stockées sur disque dur ou sur disquette.

*** Les fiches manuelles pour lecture optique**

Ce sont des fiches lisibles directement par un système optique incorporé sur ordinateur. Celui-ci stocke les informations sur disque dur ou sur disquette. Ceci signifie que les caractères doivent être enregistrés en suivant des normes.

V.3.4.2 Le traitement des données

Il s'effectue en plusieurs étapes :

*** vérification des fiches de terrain**

Au niveau de la base, les fiches doivent être classées dans un

ordre logique. On regroupe :

- les fiches de layonnage, de comptage, de vérification etc.
- toutes les fiches appartenant à un même layon ou une même unité primaire.
- toutes les fiches appartenant à une même unité de compilation ou toute autre unité de stratification.

On contrôle ensuite que toutes les fiches sont remplies, que tous les totaux sont calculés, qu'aucune case n'a été sautée...

En cas d'erreurs ou de fautes constatées, on associe directement le chef d'équipe en cause pour une correction éventuelle.

*** Saisie des données**

Elle consiste à reproduire les données de terrain sur des supports utilisables par l'ordinateur tels que : les cartes perforées, les disques durs, les disquettes. La saisie peut s'effectuer directement sur le terrain (dans ce cas, on dispose d'un micro-ordinateur portable). ou au bureau sur ordinateur.

Elle s'effectue ligne par ligne ou colonne par colonne et chaque donnée correspond à une cellule.

On doit éviter de saisir les totaux présents sur les fiches car ils sont calculés automatiquement par l'ordinateur et comparés avec ceux-ci.

Le transfert des données des fiches de terrain aux fiches de saisie est fortement déconseillé car ceci constitue une source d'erreur supplémentaire. On ne doit donc le faire que quand c'est absolument nécessaire.

*** apurement des données**

Cette étape consiste à :

- imprimer sur listing les données saisies.
- procéder à un contrôle pour éliminer toutes les erreurs commises lors de la saisie. Ainsi, on doit vérifier que :
 - . toutes les fiches de chaque unité primaire ou layon ont été saisies.
 - . toutes les fiches de chaque unité de compilation ou toute autre unité de stratification ont été saisies. Ces deux premières vérifications peuvent s'effectuer en comparant les totaux donnés automatiquement par l'ordinateur et ceux inscrits sur les fiches.

. chaque donnée a été bien introduite. Ceci permet d'effectuer plusieurs contrôles : données numériques et alpha-numériques, ordre de grandeur des variables continues (on détermine un maximum et un minimum par variable), ordre de grandeur des variables discrètes groupées en classes, comparaison des données sur la même ligne, sur les lignes et colonnes différentes.

- imprimer les données qui vont servir de base à toutes les opérations de génération des résultats. Ceci doit être conservé comme un document de référence.

*** génération des données**

Cette étape consiste à organiser les données de base et en traiter pour générer les résultats utilisables. Ainsi, dans chaque unité de stratification déterminée (unité de compilation, administrative, type de végétation, strates, etc), on doit organiser les données de la façon suivante :

- les tables de superficie : elles peuvent être présentées de plusieurs façons :

. table de superficie selon les classes d'utilisation des terres (terre ferme, eau) et les classes de forêts (différentes strates retenues).

. table de superficie selon les unités de compilation.

. si cela est nécessaire, on présente également les tables de superficie selon les zones écologiques, classes de propriétés (forêt publique, privée ou des particuliers).

- les tables de peuplement : ce sont des tables qui présentent le nombre moyen de tiges à l'hectare, par unité de stratification et par strate.

- les tables de volume (tarif de cubage) : ce sont des tables qui donnent le volume en fonction de la classe de diamètre et ou de hauteur, par essence ou groupe d'essences et par unité de stratification.

- les tables de stock : ce sont des tables qui donnent le volume moyen à l'hectare par unité de compilation et par strate.

- les autres tables de volume :

. Récapitulatif du volume selon les classes d'utilisation par unité de stratification (unité de compilation, administrative etc). On peut considérer à titre indicatif les classes d'utilisation suivantes :

- . volume commercialisable.
- . volume potentiellement commercialisable.
- . volume non commercialisable ou de valeur inconnue.

. possibilité annuelle par unité de compilation et par unité administrative.

(on pourra consulter le Manuel d'Inventaire Forestier FAO où sont dressés les tableaux standards recommandés par les experts d'inventaires forestiers en 1967).

A la suite de ces tableaux, on doit calculer pour chaque strate et par unité de compilation ou toute autre unité de stratification :

- la moyenne par unité de surface.
- le volume total.
- l'erreur d'échantillonnage au niveau de probabilité retenu.

Remarque :

Pendant qu'on détermine les tables de peuplement, on devrait construire sur un autre micro-ordinateur les tarifs de cubage car ceci est issu d'une régression statistique et demande donc des essais sur le terrain pour confirmer la fiabilité de la régression.

*** présentation des résultats**

Les résultats d'inventaire doivent être regroupés dans un document intitulé "Rapport d'inventaire". C'est un document qui doit contenir les grandes lignes suivantes :

- carte topographique et ou forestière de la zone inventoriée.
- objectifs de l'inventaire.
- différentes étapes de la planification.
- coût des opérations.
- constitution des différentes équipes.
- description sommaire des différentes phases des travaux de terrain.
- présentation des résultats. On ressort ici tous les tableaux créés lors de la phase de génération. Les tableaux de base doivent être renvoyés en annexe pour alléger les résultats. Ils doivent être tel qu'on puisse facilement et rapidement prendre une décision. Le résultat de l'analyse des variances des strates doit être présenté pour permettre d'avoir une idée globale sur la variabilité de la forêt.

CHAPITRE VI

INVENTAIRE PAR

ECHANTILLONNAGE

SOUS ANGLE CONSTANT

CHAPITRE VI INVENTAIRE PAR ECHANTILLONNAGE SOUS ANGLE CONSTANT

Ce type d'inventaire a été inventé dans les années 1947-1948 par le célèbre forestier autrichien WALTER BITTERLICH. La pertinence de ses travaux et ses instruments : Spiegel Relaskop, Tele Relaskop ont depuis lors conquis le monde.

VI.1 NOTIONS DE SURFACE TERRIERE.

La surface de section d'une tige est obtenue grâce à la

relation : $g = \frac{\pi D^2}{4}$ avec D : diamètre de la tige.
g : surface de section.

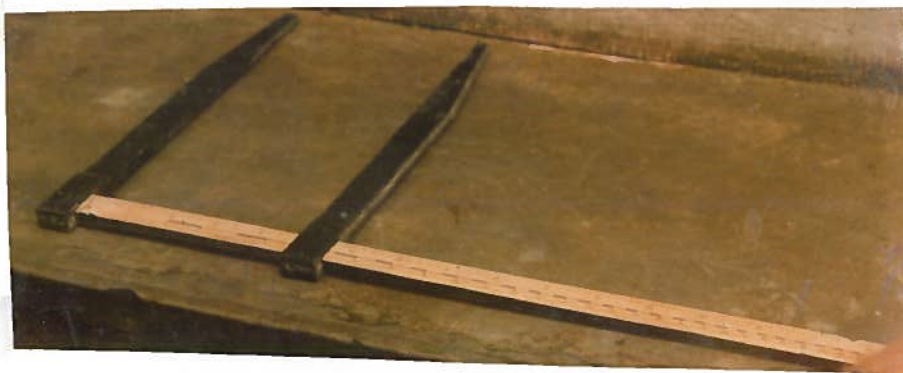
La surface terrière d'un peuplement forestier est le rapport entre la somme des surfaces de section rencontrées dans un peuplement forestier et la surface totale. Elle permet de connaître la densité du peuplement. Elle est généralement exprimée en mètre carré à l'hectare (m²/ha).

$G = \frac{\sum g_i}{S}$ avec G : surface terrière.
g_i : surface de section de l'arbre i.
S : surface totale du peuplement.

On utilise le Gallon circonférentiel ou tout autre instrument de mesure de diamètre pour calculer la surface de section d'une tige. Il existe d'autres instruments tels que le compas forestier de Hellrigl qui permet de lire directement la surface de section d'une tige. Ce compas enregistre sur un compteur les surfaces de section des tiges mesurées en valeur relative. On multiplie la valeur obtenue par une constante (0,02) pour avoir la surface en m².

Djomo a mis au point un compas forestier qui mesure les surfaces de section. C'est un instrument fait de bois (contre-plaqué), donc à moindre coût.

* Sur la première face, on retrouve deux graduations :



- la première graduation exprimée en centimètres permet de lire directement le diamètre en centimètres.

- la deuxième en bandes graduées permet de lire la surface de section. On multiplie par 0,01 pour obtenir le résultat en m². Par exemple, lorsqu'on lit 58, la surface de section est de 0,58 m².

* Sur l'autre face, on a fait des graduations pondérées noir et blanc en classe 5. On peut aussi y faire les graduations en classe de 10 (voir photo).

Exemple :

Déterminer la surface terrière d'une plantation de 3500 m² qui contient 12 arbres ayant les diamètres suivants :

D1 = 90 cm	D5 = 66 cm	D9 = 87 cm
D2 = 86 cm	D6 = 78 cm	D10 = 38 cm
D3 = 76 cm	D7 = 52 cm	D11 = 94 cm
D4 = 80 cm	D8 = 49 cm	D12 = 29 cm

Numéro	Diamètre (m)	Lecture Surface	Surface de section gi (m ²)
1	0,90	64	0,64
2	0,86	58	0,58
3	0,76	45	0,45
4	0,80	50	0,50
5	0,66	34	0,34
6	0,78	48	0,48
7	0,52	21	0,21
8	0,49	19	0,19
9	0,87	59	0,59
10	0,38	11	0,11
11	0,94	69	0,69
12	0,29	7	0,07
Total	8,25	485	4,85

La surface terrière est donc :

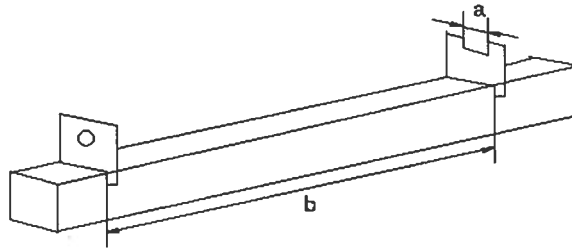
$$G = \frac{4,85 \times 10.000}{3500} = 13,86 \text{ m}^2/\text{ha}$$

VI.2 METHODE DE BITTERLICH

Bitterlich a découvert qu'à partir d'un point quelconque (point de sondage), si on vise avec un angle constant de valeur faible, tous les arbres qui nous entourent, en faisant un balayage circulaire, on arrivera à déterminer la surface terrière du

peuplement. Comment est-il parvenu à cette conclusion surprenante et inattendue?

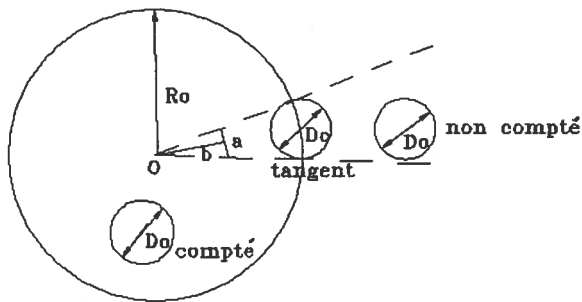
Constituons comme Bitterlich un système qui nous permette de viser à angle constant. Par exemple une baguette sur laquelle on fixe un viseur et une mire. La largeur d'ouverture de la mire est de a et la longueur entre la mire et le viseur est de b .



Visons à l'aide de ce système tous les arbres de même diamètre D_0 . La projection de la mire sur les autres permet de distinguer 3 cas :

- 1) Les arbres dont le diamètre est plus grand que cette projection.
- 2) Les arbres qui sont tangents à cette projection.
- 3) Les arbres dont le diamètre est à l'intérieur de cette projection.

Tous les arbres du groupe 1 sont comptés et ceux du groupe 3 ne le sont pas. Ceux du groupe 2 permettent de déterminer le rayon R de comptage.



D'après cette figure :

$$\frac{a}{b} = \frac{D_0}{R_0} \Rightarrow R_0 = D_0 \times \frac{b}{a}$$

La surface terrière des N_0 arbres de diamètre D_0 comptés dans le rayon R se calcule ainsi :

$$G_0 = \frac{\sum g_i}{S_0} = \frac{N_0 \times \frac{\pi D_0^2}{4}}{\pi R_0^2} \times 10.000 = 2500 \times \frac{N_0 \times D_0^2}{R^2}$$

$$= 2500 \times \frac{N_0 \times D_0^2 \times a^2}{D_0^2 \times b^2} = 2500 \times \frac{a^2 \times N_0}{b^2}$$

$$\Rightarrow G_0 = 2500 \times \frac{a^2}{b^2} \times N_0. \quad \text{Posons } K = 2500 \times \frac{a^2}{b^2}$$

et appelons cette valeur qui dépend des caractéristiques du système, CONSTANCE SURFACE TERRIERE. On obtient $G_0 = K.N_0$.

De cette position, si on vise également tous les arbres de même diamètre :

D1 : on obtient $G_1 = K.N_1$

D2 : on obtient $G_2 = K.N_2$

D3 : on obtient $G_3 = K.N_3$

.

.

.

Dp : on obtient $G_p = K.N_p$

$N_1, N_2, N_3, \dots, N_p$ sont les nombres de tiges comptées.

La surface terrière à ce point est donc :

$$\begin{aligned} G &= G_0 + G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_p = K.N_0 + K.N_1 + K.N_2 + \dots + K.N_p \\ &= K(N_0 + N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_p) = K.N \end{aligned}$$

N : ensemble des tiges comptées.

Il suffit donc de compter lors du balayage tous les arbres de diamètre supérieur ou égal à la projection de la mire et de multiplier le nombre obtenu par la valeur de la constante surface terrière K pour obtenir la surface terrière G .

Evidemment, il faut bien comprendre la méthode de Bitterlich. Il ne suffit pas de rester en un point du peuplement forestier et de compter tous les arbres pour obtenir sa surface terrière. Pour un inventaire forestier, l'on peut suivre la procédure suivante :

- A partir d'une carte et des photographies aériennes, effectuer la stratification du peuplement forestier.

- Calculer la surface totale et celle des strates à l'aide d'un instrument de mesure de surface.

- Localiser sur la carte les différents points de sondage. Une sélection systématique serait appropriée. Pour des peuplements homogènes, on recommande les intensités suivantes pour le facteur $k = 4$:

jusqu'à 4 ha, prendre 4 points par ha.

entre 4 et 8 ha, prendre 3,8 points par ha.

8 et 16 ha, prendre 3,5 points par ha.

16 et 32 ha, prendre 3,1 points par ha.

32 et 64 ha, prendre 2,6 points par ha.

plus de 64 ha, prendre 2,0 points par ha.

En utilisant le facteur K=2, on réduit cette intensité de 40%; K=1 on le réduit de 60%. Il est recommandé d'augmenter l'intensité pour des peuplements hétérogènes, pour les jeunes peuplements ou lorsqu'on veut obtenir une grande précision.

Soient E1, E2, E4 l'équidistance entre les points de sondage lorsqu'on utilise les facteurs 1, 2, ou 4 et S la surface totale du peuplement. Pardé recommande d'utiliser les relations suivantes :

$$\begin{aligned} E1 &= 68 + 2\sqrt{S} \\ E2 &= 58 + 2\sqrt{S} \\ E4 &= 48 + 2\sqrt{S} \end{aligned}$$

On peut aussi utiliser la procédure décrite au V.3.1 pour localiser les points de sondage. Que ce soit cette méthode ou celle de Pardé, on doit arriver à un quadrillage qui permette de localiser les points de sondage.

- Les points de sondage localisés sur carte doivent être repérés sur le terrain en ouvrant des layons et en se servant des photos.
- A chaque point de sondage, faire un balayage circulaire pour compter les arbres. Multiplier le nombre obtenu par le facteur K pour obtenir la surface terrière à chaque point.
- Faire la moyenne de toutes les surfaces terrières pour obtenir la surface terrière moyenne du peuplement.

VI.3 DETERMINATION DU NOMBRE DE TIGES A L'HA.

Le nombre de tiges à l'ha se détermine à l'aide du calcul suivant:

$$P = \frac{N}{S} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} P : \text{Nombre de tiges à l'ha.} \\ N : \text{Nombre de tiges comptées} \\ S : \text{Surface couverte.} \end{array}$$

Déterminons Po le nombre de tiges à l'ha des arbres de diamètre Do, comptés dans la surface de rayon Ro.

$$\begin{aligned} P_o &= \frac{N_o}{S_o} = \frac{N_o}{\pi R_o^2} \times 10.000 = \frac{N_o \times a^2}{\pi \times D_o^2 \times b^2} \times 10.000 \\ &= 2500 \times \frac{a^2}{b^2} \times \frac{4 \cdot N_o}{\pi D_o^2} = 2500 \times \frac{a^2}{b^2} \times \frac{N_o}{\pi D_o^2} \\ &= 2500 \times \frac{a^2}{b^2} \times \frac{N_o}{g_o} = K \times \frac{N_o}{g_o} \end{aligned}$$

(go : surface terrière de la tige de diamètre Do).

Il suffit donc de multiplier le nombre obtenu par K/go pour obtenir le nombre de tiges à l'ha des arbres de diamètre Do.

Dans la pratique, puisqu'il est fastidieux de déterminer le nombre de tiges à l'ha pour chaque diamètre, on regroupe les diamètres en classe et on utilise pour chaque classe la valeur de la surface de section de la classe centrale. L'erreur commise du fait de la distribution des diamètres à l'intérieur de chaque classe est négligeable si on utilise la classe 5.

On peut à cet effet utiliser le compas forestier de Djomo qui porte sur une face les diamètres gradués en classe de 5 et sur l'autre les graduations des surfaces terrières.

On additionne le nombre de tiges à l'ha par classe de diamètre pour obtenir le nombre total de tiges à l'ha. Puis, on répète le même processus dans chaque point de sondage et on effectue la moyenne pour obtenir soit le nombre de tiges à l'ha par classe de diamètre ou le nombre total de tiges à l'ha.

VI.4 LE RELASCOPE DE BITTERLICH

Bitterlich, ayant constaté que le système de baguette n'effectue pas la correction de pente, a tenté et réussi à mettre sur pied un système optique qui effectue directement cette correction de pente. Il appela cet instrument SPIEGEL RELASKOP plus connu sous le nom de RELASCOPE de BITTERLICH. Le Spiegel Relaskop se présente sous trois modèles :

- Le modèle à bandes étroites utilisé généralement pour les arbres de petit diamètre. Pour plus de détail pour ce modèle, le lecteur pourra consulter DENDROMETRIE, Pardé 1988 ou alors les études bibliographiques consacrées au Relascope telles que celles de William Finlayson, Walter Bitterlich ...

- Le modèle à échelle américaine. Les lecteurs intéressés pourront consulter à cet effet l'étude bibliographique consacrée au Spiegel Relaskop de John F. Bell.

- Le modèle à bandes larges (voir Tome 1 pp 31-34 et 59)

VI.4.1 Calcul de la surface terrière

Pour calculer la surface terrière à l'aide du modèle à bandes larges, on effectue le balayage à partir d'un nombre constant de bandes. Théoriquement, on peut choisir le nombre de bandes à sa convenance pour effectuer le balayage. Cependant, il n'est pas très recommandé d'utiliser un nombre important de bandes (supérieur à 4), car l'angle de balayage serait grand et réduirait le nombre total d'arbres comptés. Or, il faut compter par balayage entre 20 et 30 arbres pour obtenir un résultat satisfaisant. Il faut donc choisir le nombre de bandes en conséquence. Le facteur de multiplication s'obtient en élevant le nombre de bandes utilisé au carré. Par exemple:

- pour 4 bandes larges il est de 16
- pour 2,5 bandes soit 2 bandes larges et 2 bandes étroites, il est de 6,25.
- pour 1,5 bande soit 1 bande large et 2 bandes étroites, il est de 2,25.
- pour 1 bande large il est de 1.

VI.4.2 Calcul de la hauteur

Le modèle à bandes larges permet de lire la pente en pourcentage et en degrés à l'aide des graduations situées à l'extrême droite. Connaissant donc la distance horizontale entre l'arbre et le mesureur, on peut donc calculer la hauteur.

Ce type de Relascope permet également de lire directement la hauteur lorsqu'on se place à des distances paires entre 4 et 20 m. On lit sur la bande correspondant à la distance la valeur de la hauteur.

Il est possible d'utiliser les bandes larges et étroites pour déterminer la hauteur d'un arbre lorsqu'on est situé à distance quelconque. Plaçons nous à la distance D et lisons sur une bande correspondant à la distance D' entre 4 et 20 la hauteur h'. La vraie hauteur h s'obtient en calculant :

$$h = h' \times \frac{D}{D'}$$

Exemple :

A la distance réelle de 13 m, lisons sur la bande (10) la hauteur apparente h' = 9 m.

$$\text{La hauteur réelle est } h = 9 \times \frac{13}{10} = 11,7 \text{ m}$$

Cet exemple nous montre qu'on peut se situer à distance quelconque et multiplier la hauteur lue sur la bande (10) par le dixième de cette distance.

VI.4.3 Calcul du coefficient de forme f, de forme hauteur fh, du volume v.

Nous avons vu Tome 1 p 52 que le volume d'une tige peut se calculer à l'aide de la formule : $v = fgh = g \times fh$

avec f : coefficient de forme.
 g : surface de section de la tige.
 h : hauteur totale.
 fh : coefficient de forme hauteur.

De même, aux pages 85 et 86 Tome 1, nous avons vu qu'on peut cuber l'arbre avec la formule de PRESSLER

$v = g \times \frac{1}{2}h_1$. avec h_1 : hauteur au niveau duquel le diamètre correspond à la moitié de celui de la base.

$$v = g \times \frac{1}{2}h_1 = g \times fh \Rightarrow fh = \frac{1}{2}h_1$$

On voit donc que la détermination de h_1 permet d'obtenir directement la valeur du coefficient de forme hauteur de la tige. Enfin, connaissant la hauteur totale, on peut calculer le coefficient de forme f en posant :

$$f = \frac{fh}{h} = \frac{\frac{1}{2}h_1}{h}$$

Le calcul de h_1 à l'aide du modèle à bandes larges s'effectue de la façon suivante :

* avancer et reculer jusqu'à ce que 2 bandes larges couvrent exactement le diamètre de l'arbre à mesurer.

* sur cette position, viser le niveau de l'arbre couvert par une seule bande.

* Lire à l'aide de l'échelle en pourcentage, la pente p correspondant à cette hauteur.

$$h_1 = \frac{p \times D}{100}; \text{ soit } d : \text{ le diamètre de l'arbre.}$$

$$d = \frac{2 \times 2D}{100} \Rightarrow D = \frac{100 \times d}{4}$$

$$\text{d'où } h_1 = \frac{p \times 100d}{4 \times 100} = \frac{p \times d}{4}$$

$$\Rightarrow fh = \frac{1}{2}h_1 = \frac{1}{2} \times \frac{p \times d}{4} = \frac{p}{6} \times d$$

* Multiplier le sixième de la pente lue par le diamètre à hauteur de poitrine pour obtenir le coefficient de forme hauteur.

Exemple :

Nous voulons déterminer le coefficient de forme hauteur d'un arbre. Situé à une position où 2 bandes larges couvrent le diamètre à hauteur de poitrine, on vise la hauteur h_1 et on lit : $p_1 = -3 \%$ et $p_2 = +54 \%$. Le diamètre de l'arbre est de 69 cm.

$$p = p_1 + p_2 = 54 + 3 = 57 \%$$

$$fh = \frac{57}{6} \times 0,69 = 6,56 \text{ m.}$$

* Pour obtenir le coefficient de forme de cette tige, on vise, en étant sur la même position, la hauteur totale.

$$f = \frac{\frac{2}{3}h_1}{h_t} = \frac{p}{p_t} \Rightarrow f = \frac{p}{p_t}$$

Exemple :

Déterminons le coefficient de forme si on lit la pente totale $p_t = 75 \%$.

$$p_t = 75 + 3 = 78 \%$$

$$f = \frac{2}{3} \times \frac{57}{78} = 0,49$$

* Le calcul du volume de l'arbre peut s'effectuer de plusieurs façons, dépendant des paramètres connus :

1) $v = f \times g \times h$ (coefficient de forme)

2) $v = g \times fh$ (coefficient de forme hauteur)

$$3) v = g \times \frac{2}{3}h_1 = g \times \frac{2}{3} \times \frac{p \times d}{4} = \frac{\pi d^2}{4} \times \frac{2}{3} \times \frac{p \times d}{4}$$

$$\Rightarrow v = p \times \frac{\pi}{24} \times d^3$$

On peut donc construire une table qui donne la valeur de $d^3 \times \pi / 24$ en fonction du diamètre. Dans ce cas, on multiplie la pente par la valeur lue dans la table pour obtenir le volume (voir annexe 2).

Remarque :

On peut utiliser d'autres bandes pour calculer ces paramètres. Dans ce cas, on recalcule les valeurs de h_1 et par conséquent fh , f ou v . Toutefois, William Finlayson recommande dans son étude bibliographique de ne pas utiliser les grands angles. Par exemple, 4 et 2 bandes ne sont pas pour lui praticables.

VI.4.4 Calcul du volume d'un peuplement

Le calcul du volume d'un peuplement forestier lors d'un inventaire sous angle constant peut s'effectuer de 2 façons :

* Par construction des barèmes de cubage. On utilise à cet effet les volumes individuels des tiges calculées. Dans ce cas, on obtient le volume par essence ou groupe d'essence et par addition le volume global.

Cette méthode est pratique pour les peuplements hétérogènes.

* Par estimation directe du volume global du peuplement forestier en procédant ainsi :

$V = G \times FH$ G : surface terrière du peuplement
 FH : coefficient de forme hauteur du peuplement.

G est la moyenne des surfaces terrières de tous les points de sondage.

FH se calcule en prenant dans chaque point échantillon une proportion donnée d'arbres. Ainsi, on calcule d'abord le coefficient de forme hauteur pour chaque tige. Ensuite, on additionne puis on effectue la moyenne de toutes ces valeurs par point échantillon, et enfin la moyenne générale de tous les points échantillon.

Cette façon est beaucoup plus pratique pour les peuplements homogènes.

VI.4.5 Autres mesures possibles du Relascope

1- Mesure des parcelles circulaires

On peut utiliser le Relascope pour implanter les parcelles circulaires sur le terrain. On doit pour cela se munir d'une mire circulaire de diamètre connu correspondant à un nombre de bandes déterminé lorsqu'on se place à une distance correspondant au rayon de ce cercle.

Par exemple, pour implanter une parcelle de 12 m, on peut utiliser un tube plastique circulaire, facile à transporter de 120 mm de diamètre, que l'on plante au centre de la parcelle.

* Lorsque la projection de 2 bandes étroites est tangent à la mire, on sait qu'on se situe sur le périmètre.

* Lorsque cette projection découpe la mire, on sait qu'on se situe à l'intérieur de la parcelle.

* Lorsqu'elle est plus grande, on est à l'extérieur de la parcelle.

On peut aussi utiliser ce procédé pour vérifier les arbres tangents, même pour les parcelles rectangulaires ou carrées.

2- Mesure des angles horizontaux

Le Relascope de Bitterlich, modèle à bandes larges permet de mesurer les angles verticaux en pourcentages ou en degrés. Il

peut aussi être utilisé pour mesurer des angles horizontaux; par exemple, pour localiser un point de départ ou d'arrivée, pour le rattachement de deux layons, etc lorsqu'on ne dispose pas de la boussole ou d'un théodolite.

Pour estimer cet angle, on libère le pendule et on incline le Relascope jusqu'à $\pm 56\%$ et on le bloque. A ce niveau,

- . 1 bande large = 1° .
- . 1 bande étroite = $0,25^\circ$.

Pour les 12 bandes larges, on a donc 12° .

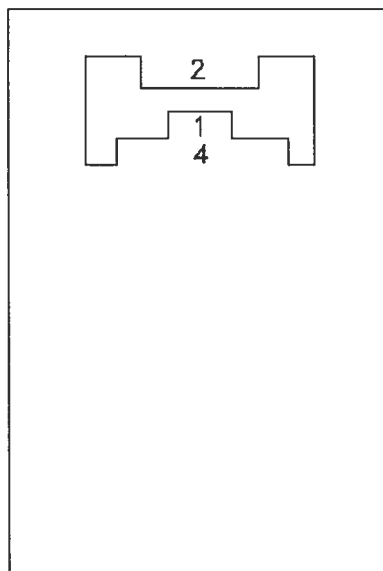
Pour les angles de plus de 13° , on peut faire des mesures successives.

VI.5 LES AUTRES APPAREILS.

L'originalité de la méthode de Bitterlich a amené plusieurs personnes à y réfléchir. C'est ainsi que de nombreux instruments ont été perfectionnés. Nous présentons pour nos lecteurs quelques uns d'entre-eux.

VI.5.1 Le dendromètre de Kramer

C'est une plaquette métallique perforée d'une façon spéciale vers la partie supérieure telle qu'on puisse y faire des visées avec des facteurs de multiplication 1, 2, ou 4, si on le tient à 50 cm des yeux de l'observateur. Sur la partie inférieure de la plaque, sont gravées des valeurs de coefficient de forme hauteur fh de quelques essences.



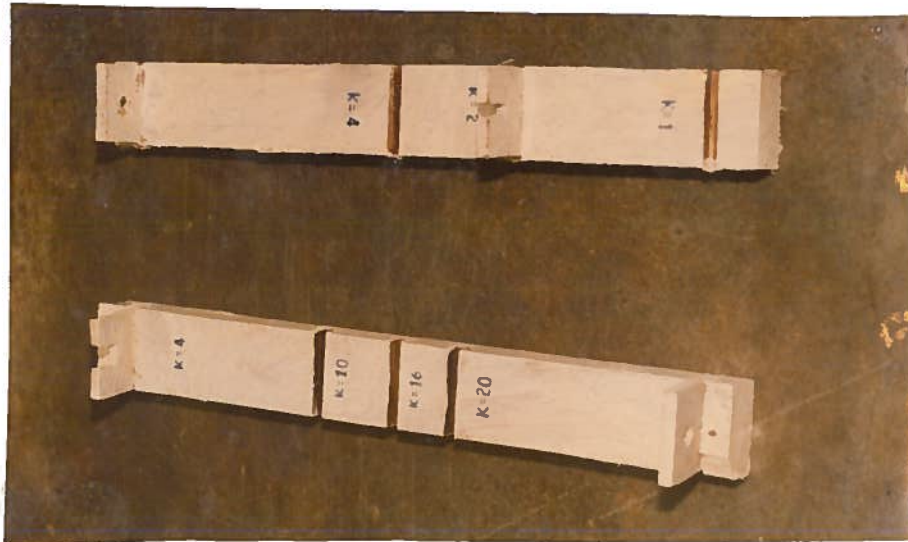
VI.5.2 Les mires de Djomo

Ce sont des systèmes constitués d'une baguette de bois sur laquelle est fixée un viseur. En face du viseur, sur la

baguette, se trouve des rainures :

- 3 rainures correspondant aux niveaux des constantes surfaces terrières 4, 2, 1 pour le premier type.

- 4 rainures correspondant aux niveaux des constantes surfaces terrières 20, 16, 10, 4 pour l'autre type.



Pour chaque système, on dispose d'une plaquette perforée qu'on vient fixer sur les rainures exactement à la position correspondant au facteur de multiplication désiré.

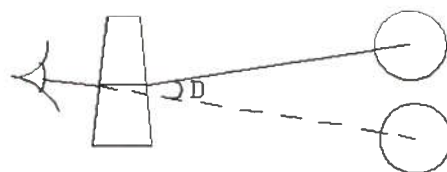
Ces mires, tout comme le dendromètre de Kramer n'effectuent pas directement les corrections de pente comme le Relascope. Pour les terrains en pente, on utilise le facteur de correction de pente $\cos\alpha$ lorsque la pente α est supérieure à 7° .

VI.5.3 Les prismes Relascopiques

C'est un milieu transparent en verre qui a pour caractéristique de dévier tout rayon lumineux qui le traverse. L'angle de déviation est :

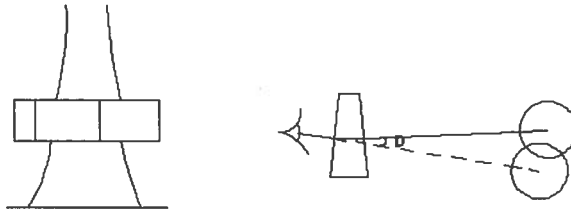
$D = (n-1) \times A$ avec D : Angle de déviation.
 n : indice de réfraction du prisme.
 A : angle entre les deux faces du prisme.

Pour les prismes Relascopiques, la déviation est faite de sorte qu'on puisse sélectionner des tiges correspondant à une surface terrière déterminée. On indique donc toujours le facteur de multiplication du prisme.

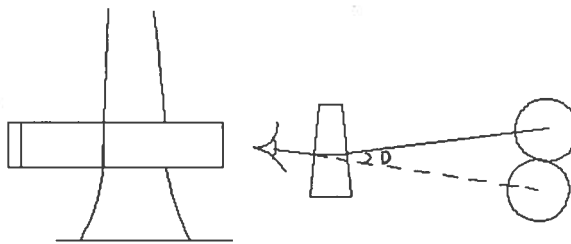


En regardant à travers le prisme, 3 cas peuvent se présenter :

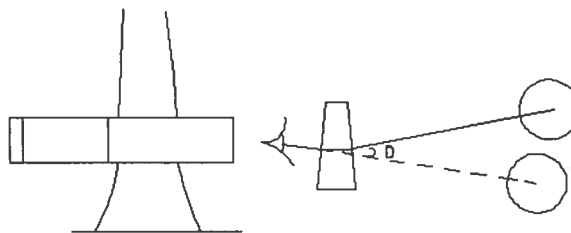
* arbres comptés.



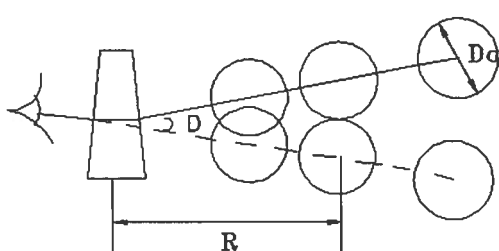
* arbres tangents.



* arbres non comptés.



Au regard des schémas précédents, il apparaît que le prisme, tout comme le système de Bitterlich permet de compter tous les arbres d'un même diamètre D_o jusqu'à un rayon R correspondant à l'arbre tangent.



$$\operatorname{tg}(D/2) = \frac{D_o}{2R}$$

$$\Rightarrow R = \frac{D_o}{2\operatorname{tg}(D/2)}$$

La surface terrière des N_o arbres comptés de même diamètre D_o se

calcule comme suit :

$$G_o = \frac{N_o \times \frac{\pi D_o^2}{4}}{\pi R^2} \times 10.000 = \frac{N_o \times \frac{\pi D_o^2}{4} \times 4\operatorname{tg}(D/2)^2}{\pi D_o^2} \times 10.000$$

= $No \times \text{tg}(D/2)^2 \times 10.000$. En posant $K = \text{tg}(D/2)^2 \times 10.000$ on obtient $Go = K.No$ avec K : constante surface terrière du prisme.

La valeur de K dépend de l'angle de déviation D du prisme.

Ainsi, comme l'a pensé Bitterlich, on obtient donc la surface terrière en faisant le balayage circulaire et en comptant tous arbres N qui sont interceptés par les rayons du prismes.

$G = K.N$.

Le prisme ne fait pas lui aussi automatiquement la correction de pente. Cependant, on peut faire une inclinaison correspondant à la pente α pour effectuer cette correction.

VI.5.4 Le télérélascope

Le télérélascope qui est le plus récent des instruments mis au point par Bitterlich donne avec une plus grande précision les dimensions des arbres sur pied (diamètre, hauteur, volume, forme). Lors de l'utilisation, il est monté sur un trépied. C'est pourquoi on l'utilise beaucoup plus pour la recherche que pour les inventaires.

Pour l'inventaire à angle constant, Bitterlich dit lui même, que bien que l'instrument peut jouer ce rôle, il est préférable d'utiliser le Spiegel Relaskop.

Remarque générale : cas des arbres tangents.

Comme dans les autres inventaires, les arbres tangents sont ceux qui posent toujours les problèmes lors du balayage.

Comment faire pour savoir si un arbre qui apparait tangent se trouve dans la parcelle ou non? On a deux possibilités :

- 1) Compter un arbre tangent sur deux lors du balayage.
- 2) Construire une table qui donne le rayon de comptage pour chaque diamètre considéré en fonction de la constante utilisée.

Dans ce cas, pour chaque arbre tangent, on mesure la distance horizontale D entre l'arbre et la position de mesure.

- . Si $D \leq R$, l'arbre sera compté.
- . Si $D > R$, l'arbre n'est pas compté.

EXERCICES PROPOSES

QUELQUES EXERCICES PROPOSES

Exercice 1

Nous avons recueilli les données suivantes sur le terrain. Elles représentent le diamètre en centimètre des arbres.

42, 50, 63, 80, 71, 105, 93, 53, 47, 65, 75, 97, 82,
97, 59, 66, 66, 73, 83, 78, 95, 67, 77, 76, 87.

- 1- Grouper ces données en classe de diamètre de largeur 10 cm.
- 2- Déterminer pour chaque classe considérée la fréquence absolue.
- 3- Construire un tableau récapitulatif où est représenté la classe de diamètre, la fréquence absolue, la fréquence relative, la fréquence relative cumulée.
- 4- Construire l'histogramme.

Exercice 2

Les résultats suivants ont été obtenus au cours d'une étude d'arbres.

classe de \varnothing cm	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115
Fréquence absolue	2	4	7	10	15	22	42	40	20	17	11	6	3	1

- 1- Compléter ce tableau en indiquant pour chaque classe de diamètre la fréquence relative et la fréquence relative cumulée.
- 2- Construire le polygone de fréquence.
- 3- Déterminer la classe modale et la classe médiane.
- 4- Calculer avec précision le mode à l'intérieur de la classe modale.
- 5- Calculer avec précision le médiane à l'intérieur de la classe médiane.

Exercice 3

Dans notre concession forestière, le travail consiste à déterminer le volume de tous les arbres qui s'y trouvent. Nous avons obtenu

les résultats suivants :

Arbre n°	1	2	3	4	5	6	7	8
Volume m ³	3,483	7,816	0,937	13,410	2,530	3,620	5,619	1,919

Arbre n°	9	10	11	12
Volume m ³	2,718	7,922	6,159	8,222

- 1- Déterminer le volume moyen des arbres dans cette concession.
- 2- Calculer la variance de ces volumes.
- 3- Calculer l'écart type.
- 4- Calculer le coefficient de variations.

Exercice 4

La compilation des données d'une étude d'arbre nous a fourni le tableau suivant :

Classe de Ø	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Fréquence	6	3	7	10	17	19	6	3	1	1

- 1- Calculer le diamètre moyen de ce peuplement.
- 2- Calculer l'étendue, l'écart absolu par rapport à la moyenne et par rapport à la médiane.
- 3- Calculer la variance.
- 4- Déduire l'écart type. Comparer les écarts absolus calculés au 2) et l'écart type.
- 5- Calculer le coefficient de variations.

Exercice 5

Nous avons recueilli les données suivantes dans une concession peuplée d'arbres.

Diamètre cm	43	55	63	66	78	77	82	92
Volume m ³	3,733	5,830	6,720	6,230	8,340	7,318	8,557	8,999

Diamètre cm	101	105	112
Volume m ³	9,237	10,547	12,830

Soient X : le diamètre d'un arbre dans cette concession.
 Y : le volume du même arbre dans la concession.

- 1- Calculer la moyenne des variables aléatoires X et Y.
- 2- Calculer la variance de X et de Y.
- 3- Calculer l'écart type de X et de Y.
- 4- Déterminer le coefficient de variations.
- 5- Déduire la corrélation entre X et Y. Est-elle croissante ou décroissante ?
- 6- Construire un graphique illustrant les nuages de points.

Exercice 6

Soit $Z \rightarrow N(0, 1)$. Calculer les probabilités suivantes :

- | | |
|------------------------|-------------------------|
| a) $P(0 < Z < 2,9)$ | d) $P(-2,11 < Z < 0,5)$ |
| b) $P(-1,12 < Z < 0)$ | e) $P(Z > 3)$ |
| c) $P(0,86 < Z < 3,1)$ | f) $P(-2,8 < Z)$. |

Exercice 7

Soit X : une variable aléatoire qui suit une loi normale
 $X \rightarrow N(12,7; 7)$. Calculer les probabilités suivantes :

- | | |
|---------------------|----------------------|
| a) $P(0 < X < 12)$ | d) $P(4,7 < X < 17)$ |
| b) $P(-13 < X < 0)$ | e) $P(X \geq 9)$. |
| c) $P(-3 < X < 15)$ | |

Exercice 8

On considère un peuplement forestier comportant des arbres dont le volume suit une loi normale de moyenne 7,418 m³ et d'écart type 2,815 m³.

Si on choisit un arbre au hasard, dans ce peuplement, déterminer la probabilité pour que le volume soit compris entre $6,720 \text{ m}^3$ et $9,530 \text{ m}^3$.

Exercice 9

Nous effectuons des études dans un peuplement forestier constitué de 230 arbres. on sait que le volume moyen est de $9,340 \text{ m}^3$ et l'écart type est de $2,180 \text{ m}^3$.

Si on prélève sans remise un échantillon de 35 arbres dans ce peuplement, quelle est la probabilité que le volume moyen soit compris entre $10,000 \text{ m}^3$ et $12,550 \text{ m}^3$?

Exercice 10

Le volume des arbres d'un peuplement obéit à une loi normale d'écart type $3,412 \text{ m}^3$. On y prélève un échantillon de 27 arbres et on trouve que le volume moyen est de $9,633 \text{ m}^3$.

Construire un intervalle de confiance au niveau 95% pour estimer le volume moyen des arbres de ce peuplement.

Exercice 11

Dans un peuplement forestier, nous savons que la hauteur est une variable aléatoire d'écart type $4,25 \text{ m}$. Pour estimer la hauteur moyenne de peuplement, on prélève un échantillon de 45 arbres et on trouve une hauteur moyenne de $27,12 \text{ m}$.

Construire un intervalle de confiance au niveau 90%.

Exercice 12

Nous disposons d'une population contenant 198 arbres. Pour estimer le diamètre moyen, on prélève un échantillon de 12 arbres et on obtient les résultats suivants :

42, 37, 67, 48, 67, 75, 82, 83, 93, 49, 69, 97.

En supposant que le diamètre de l'arbre de cette population obéit à une loi normale, construire un intervalle de confiance au niveau de signification 90%.

Exercice 13

Nous disposons dans notre scierie des planches découpées à l'aide de la scie circulaire. Pour estimer la longueur moyenne de ces planches, on prélève un échantillon de 78 planches et on trouve une longueur moyenne de $5,24 \text{ m}$ et un écart type $s = 0,12 \text{ m}$.

Construire un intervalle de confiance au niveau 98%.

Exercice 14

Nous voulons estimer la variance du volume des arbres d'un peuplement forestier. Pour cela, on prélève un échantillon de 12 arbres et on calcule $s^2 = 9,223 \text{ m}^3$.

En supposant que le volume des arbres de ce peuplement suit une loi normale, construire un intervalle de confiance au niveau de confiance 95%.

Exercice 15

Nous voulons estimer l'écart type du diamètre des arbres d'un peuplement. Pour ce faire, on y prélève un échantillon de 49 arbres et on trouve $s = 7 \text{ cm}$.

Construire un intervalle de confiance au niveau de confiance 99%.

Exercice 16

Au niveau du quai d'embarcation des grumes, un forestier affirme que le volume moyen de ses grumes est de $18,720 \text{ m}^3$. Les contrôleurs pensent qu'il sur-estime cette valeur.

Pour le démontrer, ils prélèvent au hasard un échantillon de 23 grumes et trouvent que ce volume moyen est de $17,830 \text{ m}^3$.

Sachant que le volume des grumes obéit à une loi normale d'écart type $1,425 \text{ m}^3$, peut-on accepter cette déclaration au niveau de signification 0,05 ?

Exercice 17

Dans une scierie, un machiniste prétend que sa scie débite les planches avec une précision moyenne de 95%. Pour s'assurer que cette déclaration est exacte, le patron prélève un échantillon de 12 planches et trouve une précision moyenne de 92% avec un écart type $s = 4\%$. En supposant que la précision de ces planches obéit à une loi normale, peut-on accepter, au niveau de signification 0,05, cette affirmation ?

Exercice 18

Nous voulons constituer une équipe de layonnage pouvant ouvrir en moyenne 2,4 km par jour. Nous devons choisir les membres dans une des équipes d'une entreprise de la place en arrêt d'activité. Le chef d'une de ces équipes nous affirme qu'il remplit les conditions exigées.

Pour le vérifier, on sélectionne dans ses travaux antérieurs un

échantillon de 33 jours de travail. On trouve une distance moyenne de 2,7 km et un écart type de 0,8 km.

Peut-on considérer cette affirmation au niveau de signification 0,05 ?

Exercice 19

Une équipe d'étude d'arbres pensent que le volume des arbres trouvés dans un peuplement forestier est une variable aléatoire obéissant à une loi normale d'écart type 1,340 m³.

Pour vérifier cette affirmation, on y prélève un échantillon de 40 arbres et on trouve un écart type de 0,997 m³.

Peut-on considérer cette déclaration au niveau de signification 0,05 ?

Exercice 20

La lecture des pentes sur le terrain grâce à 2 instruments différents de mesure de pente : le Suunto et le clinomètre Djomo nous a permis d'obtenir les résultats ci-dessous. Comparer les deux instruments.

Lecture n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Suunto (%)	+16,5	+36,5	-14	+18	+70	-14	-20	+24	+13
Clinomètre Djomo (%)	+17,5	+36,5	-14,2	+18	+69	-13,5	19,9	+25	+13,5

Lecture	10	11	12	13	14	15
Suunto (%)	+43,5	-15	-11	+31,7	+23,5	+2,2
Clinomètre Djomo (%)	+43,2	-14,8	-11,1	+32	+23,4	+2,3

Exercice 21

Sur un territoire de 37.000 ha, nous avons effectué des inventaires sur 15 parcelles. Après 10 ans, nous avons effectué à nouveau les inventaires sur 18 parcelles, dont 3 temporaires. 10 ans après les inventaires ont été effectués à nouveau sur 20 parcelles dont 2 temporaires. Nous avons obtenu les résultats suivants :

Parcelle no	Inventaire1 (m ³)	Inventaire2 (m ³)	Inventaire3 (m ³)
1	145,675	150,565	153,135
2	172,930	170,349	175,628
3	153,821	160,331	160,527
4	200,240	189,738	220,227
5	137,847	143,130	150,127
6	199,441	203,324	189,421
7	157,100	150,203	164,296
8	169,835	180,135	186,227
9	218,200	218,405	240,511
10	197,204	147,831	153,932
11	188,935	200,409	220,302
12	167,534	180,437	190,007
13	128,435	135,729	130,999
14	150,000	159,300	169,009
15	321,211	318,421	340,259
16		161,169	171,210
17		175,148	170,129
18		220,114	200,224
19			189,704
20			175,122

Comparer les résultats de ces inventaires.

Exercice 22

Quatre insecticides différents ont été testés pour la destruction des *Godasa Sidae*, chenille défoliatrice de *Mansonia Altissima*. Chaque insecticide a été répété sur 4 arbres différents. Voici le pourcentage de destruction obtenu.

Insecticides utilisés			
1	2	3	4
39	50	87	49
33	62	79	53
42	78	69	72
55	82	93	47
66	55	77	60

- 1) Effectuer une analyse des variances.
- 2) Faire un test de Fisher pour vérifier l'effet des insecticides.
- 3) Comparer à l'aide de la P.P.D.S les effets 2 à 2 de ces insecticides sur la destruction des *Godasa Sidae*.

Exercice 23

Nous avons une plantation de 110.000 ha. Nous voulons déterminer le volume moyen des tiges avec une erreur d'estimation maximale de 2,500 m³ au niveau de probabilité de 90%. Après un prélèvement de 10 parcelles, on a obtenu un volume moyen de 12,324 m³ et un écart type de 5m³. Déterminer le nombre minimum de parcelles à utiliser pour obtenir cette précision.

Exercice 24

Nous avons une plantation forestière de 2975 m² contenant 30 arbres dont les diamètres sont les suivants :

N°	Diamètre (cm)	N°	Diamètre (cm)	N°	Diamètre (cm)
1	87	11	90	21	22
2	109	12	103	22	39
3	58	13	75	23	42
4	97	14	80	24	59
5	67	15	66	25	77
6	59	16	78	26	89
7	75	17	32	27	67
8	89	18	45	28	63
9	100	19	93	29	57
10	49	20	105	30	49

- 1) Regrouper ces tiges en classe de 5.
- 2) Construire un histogramme de fréquence.
- 3) Déterminer le diamètre moyen, la variance, l'écart type et le coefficient de variation.
- 4) Construire un intervalle de confiance au niveau de probabilité de 95 %.
- 5) Calculer la surface de section de toutes les tiges.
- 6) Calculer la surface terrière de cette plantation.

ANNEXES

ANNEXE 1

TABLES STATISTIQUES

TABLE1 : ORDONNEES DE LA DISTRIBUTION NORMALE

Z	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0	0,3989	0,3989	0,3989	0,3988	0,3986	0,3984	0,3982	0,398	0,3977	0,3973
0,1	0,397	0,3965	0,3961	0,3956	0,3951	0,3945	0,3939	0,3932	0,3925	0,3918
0,2	0,391	0,3902	0,3894	0,3885	0,3876	0,3867	0,3857	0,3847	0,3836	0,3825
0,3	0,3814	0,3802	0,379	0,3778	0,3765	0,3752	0,3739	0,3725	0,3712	0,3697
0,4	0,3683	0,3668	0,3653	0,3637	0,3621	0,3605	0,3589	0,3572	0,3555	0,3538
0,5	0,3521	0,3503	0,3485	0,3467	0,3448	0,3429	0,341	0,3391	0,3372	0,3352
0,6	0,3332	0,3312	0,3292	0,3271	0,3251	0,323	0,3209	0,3187	0,3166	0,3144
0,7	0,3123	0,3101	0,3079	0,3056	0,3034	0,3011	0,2989	0,2966	0,2943	0,292
0,8	0,2897	0,2874	0,285	0,2827	0,2803	0,278	0,2756	0,2732	0,2709	0,2685
0,9	0,2661	0,2637	0,2613	0,2589	0,2565	0,2541	0,2516	0,2492	0,2468	0,2444
1	0,242	0,2396	0,2371	0,2347	0,2323	0,2299	0,2275	0,2251	0,2227	0,2203
1,1	0,2179	0,2155	0,2131	0,2107	0,2083	0,2059	0,2036	0,2012	0,1989	0,1965
1,2	0,1942	0,1919	0,1895	0,1872	0,1849	0,1826	0,1804	0,1781	0,1758	0,1736
1,3	0,1714	0,1691	0,1669	0,1647	0,1626	0,1604	0,1582	0,1561	0,1539	0,1518
1,4	0,1497	0,1476	0,1456	0,1435	0,1415	0,1394	0,1374	0,1354	0,1334	0,1315
1,5	0,1295	0,1276	0,1257	0,1238	0,1219	0,12	0,1182	0,1163	0,1145	0,1127
1,6	0,1109	0,1092	0,1074	0,1057	0,104	0,1023	0,1006	0,0989	0,0973	0,0957
1,7	0,094	0,0925	0,0909	0,0893	0,0878	0,0863	0,0848	0,0833	0,0818	0,0804
1,8	0,079	0,0775	0,0761	0,0748	0,0734	0,0721	0,0707	0,0694	0,0681	0,0669
1,9	0,0656	0,0644	0,0632	0,062	0,0608	0,0596	0,0584	0,0573	0,0562	0,0551
2	0,054	0,0529	0,0519	0,0508	0,0498	0,0488	0,0478	0,0468	0,0459	0,0449
2,1	0,044	0,0431	0,0431	0,0413	0,0404	0,0396	0,0387	0,0379	0,0371	0,0363
2,2	0,0355	0,0347	0,0339	0,0332	0,0325	0,0317	0,031	0,0303	0,0297	0,029
2,3	0,0283	0,0277	0,027	0,0264	0,0258	0,0252	0,0246	0,0241	0,0235	0,0229
2,4	0,0224	0,0219	0,0213	0,0208	0,0203	0,0198	0,0194	0,0189	0,0184	0,018
2,5	0,0175	0,0171	0,0167	0,0163	0,0158	0,0154	0,0151	0,0147	0,0143	0,0139
2,6	0,0136	0,0132	0,0129	0,0126	0,0122	0,0119	0,0116	0,0113	0,011	0,0107
2,7	0,0104	0,0101	0,0099	0,0096	0,0093	0,0091	0,0088	0,0086	0,0084	0,0081
2,8	0,0079	0,0077	0,0075	0,0073	0,0071	0,0069	0,0067	0,0065	0,0063	0,0061
2,9	0,006	0,0058	0,0056	0,0055	0,0053	0,0051	0,005	0,0048	0,0047	0,0046
3	0,0044	0,0043	0,0042	0,004	0,0039	0,0038	0,0037	0,0036	0,0035	0,0034
3,1	0,0033	0,0032	0,0031	0,003	0,0029	0,0028	0,0027	0,0026	0,0025	0,0025
3,2	0,0024	0,0023	0,0022	0,0022	0,0021	0,002	0,002	0,0019	0,0018	0,0018
3,3	0,0017	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014	0,0014	0,0013	0,0013
3,4	0,0012	0,0012	0,0012	0,0011	0,0011	0,001	0,001	0,001	0,0009	0,0009
3,5	0,0009	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0006
3,6	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004
3,7	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
3,8	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
3,9	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001

**TABLE2 : AIRE SOUS UNE COURBE NORMALE CENTREE ET REDUITE
(Probabilité d'avoir une valeur de Z comprise entre 0 et zi)**

zi	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,0000	0,0040	0,0080	0,0120	0,0160	0,0199	0,0239	0,0279	0,0319	0,0359
0,1	0,0398	0,0438	0,0478	0,0517	0,0557	0,0596	0,0636	0,0675	0,0714	0,0754
0,2	0,0793	0,0832	0,0871	0,0910	0,0948	0,0987	0,1026	0,1064	0,1103	0,1141
0,3	0,1179	0,1217	0,1255	0,1293	0,1331	0,1368	0,1406	0,1443	0,1480	0,1517
0,4	0,1554	0,1591	0,1628	0,1664	0,1700	0,1736	0,1772	0,1808	0,1844	0,1879
0,5	0,1915	0,1950	0,1985	0,2019	0,2054	0,2088	0,2123	0,2157	0,2190	0,2224
0,6	0,2257	0,2291	0,2324	0,2357	0,2389	0,2422	0,2454	0,2486	0,2518	0,2549
0,7	0,2580	0,2612	0,2642	0,2673	0,2704	0,2734	0,2764	0,2794	0,2823	0,2852
0,8	0,2881	0,2910	0,2939	0,2967	0,2996	0,3023	0,3051	0,3078	0,3106	0,3133
0,9	0,3159	0,3186	0,3212	0,3238	0,3264	0,3289	0,3315	0,3340	0,3365	0,3389
1,0	0,3413	0,3438	0,3461	0,3485	0,3508	0,3531	0,3554	0,3577	0,3599	0,3621
1,1	0,3643	0,3665	0,3686	0,3708	0,3729	0,3749	0,3770	0,3790	0,3810	0,3830
1,2	0,3849	0,3869	0,3888	0,3907	0,3925	0,3944	0,3962	0,3980	0,3997	0,4015
1,3	0,4032	0,4049	0,4066	0,4082	0,4099	0,4115	0,4131	0,4147	0,4162	0,4177
1,4	0,4192	0,4207	0,4222	0,4236	0,4251	0,4265	0,4279	0,4292	0,4306	0,4319
1,5	0,4332	0,4345	0,4357	0,4370	0,4382	0,4394	0,4406	0,4418	0,4429	0,4441
1,6	0,4452	0,4463	0,4474	0,4484	0,4495	0,4505	0,4515	0,4525	0,4535	0,4545
1,7	0,4554	0,4564	0,4573	0,4582	0,4591	0,4599	0,4608	0,4616	0,4625	0,4633
1,8	0,4641	0,4649	0,4656	0,4664	0,4671	0,4678	0,4686	0,4693	0,4699	0,4706
1,9	0,4713	0,4719	0,4726	0,4732	0,4738	0,4744	0,4750	0,4756	0,4761	0,4767
2,0	0,4772	0,4777	0,4783	0,4788	0,4793	0,4798	0,4803	0,4808	0,4812	0,4817
2,1	0,4821	0,4826	0,4830	0,4834	0,4838	0,4842	0,4846	0,4850	0,4854	0,4857
2,2	0,4861	0,4864	0,4868	0,4871	0,4875	0,4878	0,4881	0,4884	0,4887	0,4890
2,3	0,4893	0,4896	0,4898	0,4901	0,4904	0,4906	0,4909	0,4911	0,4913	0,4916
2,4	0,4918	0,4920	0,4922	0,4925	0,4927	0,4929	0,4931	0,4932	0,4934	0,4936
2,5	0,4938	0,4940	0,4941	0,4943	0,4945	0,4946	0,4948	0,4949	0,4951	0,4952
2,6	0,4953	0,4955	0,4956	0,4957	0,4959	0,4960	0,4961	0,4962	0,4963	0,4964
2,7	0,4965	0,4966	0,4967	0,4968	0,4969	0,4970	0,4971	0,4972	0,4973	0,4974
2,8	0,4974	0,4975	0,4976	0,4977	0,4977	0,4978	0,4979	0,4979	0,4980	0,4981
2,9	0,4981	0,4982	0,4982	0,4983	0,4984	0,4984	0,4985	0,4985	0,4986	0,4986
3,0	0,4987	0,4987	0,4987	0,4988	0,4988	0,4989	0,4989	0,4989	0,4990	0,4990
3,1	0,4990	0,4991	0,4991	0,4991	0,4992	0,4992	0,4992	0,4992	0,4993	0,4993
3,2	0,4993	0,4993	0,4994	0,4994	0,4994	0,4994	0,4994	0,4995	0,4995	0,4995
3,3	0,4995	0,4995	0,4995	0,4996	0,4996	0,4996	0,4996	0,4996	0,4996	0,4997
3,4	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4998
3,5	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998
3,6	0,4998	0,4998	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999
3,7	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999
3,8	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999
3,9	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000

TABLE3 : TEST DE STUDENT

Degrés de libertés n-1	Probabilité d'avoir une valeur supérieure					
	Test Bilatéral					
	10%	5%	2,5%	1%	0,5%	0,01%
1	6,314	12,706	25,452	63,657		
2	2,920	4,303	6,205	9,925	14,089	31,598
3	2,353	3,182	4,176	5,841	7,453	12,941
4	2,132	2,776	3,495	4,604	5,598	8,610
5	2,015	2,571	3,163	4,032	4,773	6,859
6	1,943	2,447	2,969	3,707	4,317	5,959
7	1,895	2,365	2,841	3,499	4,029	5,405
8	1,860	2,306	2,752	3,355	3,832	5,041
9	1,833	2,262	2,685	3,250	3,690	4,781
10	1,812	2,228	2,634	3,169	3,581	4,587
11	1,796	2,201	2,593	3,106	3,497	4,437
12	1,782	2,179	2,560	3,055	3,428	4,318
13	1,771	2,160	2,533	3,012	3,372	4,221
14	1,761	2,145	2,510	2,977	3,326	4,140
15	1,753	2,131	2,490	2,947	3,286	4,073
16	1,746	2,120	2,473	2,921	3,252	4,015
17	1,740	2,110	2,458	2,898	3,222	3,965
18	1,734	2,101	2,445	2,878	3,197	3,922
19	1,729	2,093	2,433	2,861	3,174	3,883
20	1,725	2,086	2,423	2,845	3,153	3,850
21	1,721	2,080	2,414	2,831	3,135	3,819
22	1,717	2,074	2,406	2,819	3,119	3,792
23	1,714	2,069	2,398	2,807	3,104	3,767
24	1,711	2,064	2,391	2,797	3,090	3,745
25	1,708	2,060	2,385	2,787	3,078	3,725
26	1,706	2,056	2,379	2,779	3,067	3,707
27	1,703	2,052	2,373	2,771	3,056	3,690
28	1,701	2,048	2,368	2,763	3,047	3,674
29	1,699	2,045	2,364	2,756	3,038	3,659
30	1,697	2,042	2,360	2,750	3,030	3,646
40	1,684	2,021	2,329	2,704	2,971	3,551
50	1,676	2,008	2,310	2,678	2,937	3,496
60	1,671	2,000	2,299	2,660	2,915	3,460
80	1,665	1,989	2,284	2,638	2,887	3,416
100	1,661	1,982	2,276	2,625	2,871	3,390
120	1,658	1,980	2,270	2,617	2,860	3,373
∞	1,645	1,960	2,241	2,576	2,807	3,291
Degrés de liberté n-1	5%	2,5%	1,25%	0,5%	0,25%	0,005%
	Test unilatéral					

Table 4 : BORNES POUR X² A n-1 DEGRES DE LIBERTE

Degrés de liberté	Probabilité d'avoir une valeur supérieure												
	n-1	99,5%	99%	97,5%	95%	90%	75%	50%	25%	10%	5%	2,5%	1%
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,10	0,45	1,32	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88
2	0,01	0,02	0,05	0,10	0,21	0,58	1,39	2,77	4,61	5,99	7,38	9,21	10,60
3	0,07	0,11	0,22	0,35	0,58	1,21	2,37	4,11	6,25	7,81	9,35	11,34	12,84
4	0,21	0,30	0,48	0,71	1,06	1,92	3,36	5,39	7,78	9,49	11,14	13,28	14,86
5	0,41	0,55	0,83	1,15	1,61	2,67	4,35	6,63	9,24	11,07	12,83	15,09	16,75
6	0,68	0,87	1,24	1,64	2,20	3,45	5,35	7,84	10,64	12,59	14,45	16,81	18,55
7	0,99	1,24	1,69	2,17	2,83	4,25	6,35	9,04	12,02	14,07	16,01	18,48	20,28
8	1,34	1,65	2,18	2,73	3,49	5,07	7,34	10,22	13,36	15,51	17,53	20,09	21,96
9	1,73	2,09	2,70	3,33	4,17	5,90	8,34	11,39	14,68	16,92	19,02	21,67	23,59
10	2,16	2,56	3,25	3,94	4,87	6,74	9,34	12,55	15,99	18,31	20,48	23,21	25,19
11	2,60	3,05	3,82	4,57	5,58	7,58	10,34	13,70	17,28	19,68	21,92	24,72	26,76
12	3,07	3,57	4,40	5,23	6,30	8,44	11,34	14,85	18,55	21,03	23,34	26,22	28,30
13	3,57	4,11	5,01	5,89	7,04	9,30	12,34	15,98	19,81	22,36	24,74	27,69	29,82
14	4,07	4,66	5,63	6,57	7,79	10,17	13,34	17,12	21,06	23,68	26,12	29,14	31,32
15	4,60	5,23	6,27	7,26	8,55	11,04	14,34	18,25	22,31	25,00	27,49	30,58	32,80
16	5,14	5,81	6,91	7,96	9,31	11,91	15,34	19,37	23,54	26,30	28,85	32,00	34,27
17	5,70	6,41	7,56	8,67	10,09	12,79	16,34	20,49	24,77	27,59	30,19	33,41	35,72
18	6,26	7,01	8,23	9,39	10,86	13,68	17,34	21,60	25,99	28,87	31,53	34,81	37,16
19	6,84	7,63	8,91	10,12	11,65	14,56	18,34	22,72	27,20	30,14	32,85	36,19	38,58
20	7,43	8,26	9,59	10,85	12,44	15,45	19,34	23,83	28,41	31,41	34,17	37,57	40,00
21	8,03	8,90	10,28	11,59	13,24	16,34	20,34	24,93	29,62	32,67	35,48	38,93	41,40
22	8,64	9,54	10,98	12,34	14,04	17,24	21,34	26,04	30,81	33,92	36,78	40,29	42,80
23	9,26	10,20	11,69	13,09	14,85	18,14	22,34	27,14	32,01	35,17	38,08	41,64	44,18
24	9,89	10,86	12,40	13,85	15,66	19,04	23,34	28,24	33,20	36,42	39,36	42,98	45,56
25	10,52	11,52	13,12	14,61	16,47	19,94	24,34	29,34	34,38	37,65	40,65	44,31	46,93
26	11,16	12,20	13,84	15,38	17,29	20,84	25,34	30,43	35,56	38,89	41,92	45,64	48,29
27	11,81	12,88	14,57	16,15	18,11	21,75	26,34	31,53	36,74	40,11	43,19	46,96	49,64
28	12,46	13,56	15,31	16,93	18,94	22,66	27,34	32,62	37,92	41,34	44,46	48,28	50,99
29	13,12	14,26	16,05	17,71	19,77	23,57	28,34	33,71	39,09	42,56	45,72	49,59	52,34
30	13,79	14,95	16,79	18,49	20,60	24,48	29,34	34,80	40,26	43,77	46,98	50,89	53,67

TABLES : BORNE DE F AU NIVEAU 5%.
f1 : degrés de libertés du numérateur
f2 : degrés de libertés du dénominateur

f2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	30	40	50	60	80	100	200	500	∞
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	245	246	248	250	251	252	252	252	253	254	254	254
2	18,5	19,0	19,2	19,2	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
3	10,1	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,76	8,74	8,73	8,74	8,70	8,66	8,62	8,59	8,58	8,57	8,56	8,55	8,54	8,53	8,53
4	7,1	6,94	6,59	6,19	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,94	5,91	5,89	5,87	5,86	5,80	5,75	5,72	5,70	5,69	5,67	5,66	5,65	5,64	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,70	4,68	4,66	4,64	4,62	4,56	4,50	4,46	4,44	4,43	4,41	4,41	4,38	4,37	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,03	4,00	3,98	3,96	3,94	3,87	3,81	3,77	3,75	3,74	3,72	3,71	3,69	3,68	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,60	3,57	3,55	3,53	3,51	3,44	3,38	3,34	3,32	3,30	3,29	3,27	3,25	3,24	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,31	3,28	3,26	3,24	3,22	3,15	3,08	3,04	3,02	3,01	2,99	2,97	2,96	2,94	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,10	3,07	3,05	3,03	3,01	2,94	2,86	2,83	2,80	2,79	2,77	2,76	2,73	2,72	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,94	2,91	2,89	2,86	2,85	2,77	2,70	2,66	2,64	2,62	2,60	2,59	2,56	2,54	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,82	2,79	2,76	2,74	2,72	2,65	2,57	2,53	2,51	2,49	2,47	2,46	2,42	2,41	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,72	2,69	2,66	2,64	2,62	2,54	2,47	2,43	2,40	2,38	2,36	2,35	2,32	2,31	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,63	2,60	2,58	2,55	2,53	2,46	2,38	2,34	2,31	2,30	2,27	2,26	2,22	2,21	2,20
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,57	2,53	2,51	2,48	2,46	2,39	2,31	2,27	2,24	2,22	2,20	2,19	2,16	2,14	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,51	2,48	2,45	2,42	2,40	2,33	2,25	2,20	2,18	2,16	2,14	2,12	2,10	2,08	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,46	2,42	2,40	2,37	2,35	2,28	2,20	2,15	2,13	2,11	2,09	2,07	2,05	2,03	2,02
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,41	2,37	2,34	2,31	2,28	2,21	2,13	2,08	2,06	2,04	2,02	2,00	1,98	1,97	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,42	2,38	2,34	2,31	2,28	2,25	2,18	2,10	2,05	2,03	2,01	1,99	1,97	1,95	1,94	1,93
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,34	2,31	2,28	2,25	2,22	2,15	2,07	2,02	2,00	1,98	1,96	1,94	1,92	1,91	1,90
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,31	2,28	2,25	2,22	2,20	2,12	2,04	1,99	1,97	1,95	1,92	1,91	1,87	1,85	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,28	2,25	2,22	2,20	2,18	2,10	2,01	1,96	1,94	1,92	1,90	1,88	1,86	1,84	1,83
22	4,30	3,44	3,03	2,82	2,66	2,55	2,47	2,40	2,34	2,30	2,26	2,23	2,20	2,17	2,15	2,07	1,98	1,94	1,91	1,89	1,87	1,85	1,81	1,80	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,23	2,20	2,18	2,15	2,13	2,05	1,96	1,91	1,88	1,86	1,84	1,82	1,79	1,77	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,21	2,18	2,15	2,11	2,09	2,01	1,92	1,87	1,84	1,82	1,80	1,78	1,74	1,72	1,71
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,20	2,16	2,14	2,11	2,07	1,99	1,90	1,85	1,82	1,80	1,78	1,74	1,72	1,70	1,69
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,18	2,15	2,12	2,09	2,06	1,97	1,88	1,84	1,81	1,79	1,76	1,74	1,71	1,68	1,67
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,17	2,13	2,10	2,08	2,06	1,97	1,88	1,84	1,81	1,79	1,76	1,74	1,71	1,68	1,65
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,15	2,12	2,09	2,06	2,04	1,96	1,87	1,82	1,79	1,77	1,74	1,73	1,69	1,67	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,14	2,10	2,08	2,05	2,03	1,94	1,85	1,81	1,77	1,75	1,73	1,71	1,68	1,65	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,13	2,09	2,06	2,04	2,01	1,93	1,84	1,79	1,76	1,74	1,71	1,70	1,66	1,64	1,62
32	4,15	3,29	2,90	2,67	2,51	2,40	2,31	2,24	2,19	2,14	2,10	2,07	2,04	2,01	1,99	1,91	1,82	1,77	1,74	1,71	1,69	1,67	1,64	1,61	1,59
34	4,13	3,28	2,88	2,65	2,49	2,38	2,29	2,23	2,17	2,12	2,08	2,05	2,02	1,99	1,97	1,89	1,80	1,75	1,71	1,69	1,66	1,65	1,61	1,59	1,57
36	4,11	3,26	2,87	2,63	2,48	2,36	2,28	2,21	2,15	2,11	2,07	2,03	2,00	1,98	1,95	1,87	1,78	1,73	1,69	1,67	1,64	1,62	1,59	1,56	1,55
38	4,10	3,24	2,85	2,62	2,46	2,35	2,26	2,19	2,14	2,09	2,05	2,02	1,99	1,96	1,94	1,85	1,76	1,71	1,68	1,65	1,62	1,61	1,57	1,54	1,53
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,04	2,00	1,97	1,95	1,92	1,84	1,74	1,69	1,66	1,64	1,61	1,59	1,55	1,53	1,51
50	4,03	3,18	2,79	2,56	2,40	2,29	2,20	2,13	2,07	2,03	1,99	1,95	1,92	1,89	1,87	1,78	1,69	1,63	1,60	1,58	1,54	1,52	1,48	1,44	1,44
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,95	1,92	1,89	1,86	1,84	1,75	1,65	1,59	1,56	1,53	1,50	1,48	1,44	1,41	1,39
70	3,98	3,13	2,74	2,50	2,35	2,23	2,14	2,07	2,02	1,97	1,93	1,89	1,86	1,84	1,81	1,72	1,62	1,57	1,53	1,50	1,48	1,44	1,41	1,37	1,35
80	3,96	3,11	2,72	2,49	2,33	2,21	2,13	2,06	2,00	1,95	1,91	1,88	1,84	1,82	1,79	1,70	1,60	1,54	1,51	1,48	1,45	1,43	1,38	1,35	1,32
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,31	2,19	2,10	2,03	1,97	1,93	1,89	1,85	1,82	1,79	1,77	1,68	1,57	1,52	1,48	1,45	1,41	1,39	1,34	1,30	1,28
200	3,89	3,04	2,65	2,42	2,26	2,14	2,06	1,98	1,93	1,88	1,84	1,80	1,77	1,74	1,72	1,62	1,52	1,46	1,41	1,38	1,35	1,32	1,28	1,22	1,19
500	3,85	3,00	2,61	2,38	2,22	2,10	2,02	1,95	1,89	1,84	1,80	1,76	1,73	1,70	1,68	1,58	1,47	1,41	1,36	1,33	1,29	1,26	1,22	1,13	1,08
1000	3,84	2,99	2,60	2,37	2,21	2,09	2,01	1,94	1,88	1,83	1,79	1,75	1,72	1,69	1,67	1,57	1,46	1,40	1,35	1,32	1,28	1,25	1,21	1,11	1,00

TABLE6 : BORNE DE F AU NIVEAU 1%.
f1 : degrés de libertés du numérateur
f2 : degrés de liberté du dénominateur

	f1 : degrés de liberté du numérateur																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	30	40	50	60	80	100	200	500	∞
2	98,50	99,00	99,20	99,20	99,30	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40	99,40
3	34,10	30,80	29,50	29,70	28,20	27,90	27,70	27,50	27,30	27,20	27,10	27,10	27,00	26,90	26,90	26,70	26,50	26,40	26,40	26,30	26,30	26,20	26,20	26,20	26,10
4	21,20	18,00	16,70	16,00	15,50	15,20	15,00	14,80	14,70	14,50	14,40	14,40	14,30	14,20	14,20	14,00	13,80	13,70	13,70	13,70	13,60	13,60	13,50	13,50	13,50
5	16,30	13,30	12,10	11,40	11,00	10,70	10,50	10,30	10,20	10,10	9,96	9,89	9,82	9,77	9,72	9,55	9,38	9,29	9,24	9,20	9,16	9,13	9,10	9,02	9,02
6	13,70	10,90	9,78	9,15	8,75	8,47	8,26	8,10	7,98	7,87	7,79	7,72	7,66	7,60	7,56	7,40	7,23	7,14	7,09	7,06	7,01	6,99	6,94	6,88	6,88
7	12,20	9,55	8,45	7,85	7,46	7,19	6,99	6,84	6,72	6,62	6,54	6,47	6,41	6,36	6,31	6,16	5,99	5,91	5,86	5,82	5,78	5,75	5,70	5,65	5,65
8	11,30	8,65	7,59	7,01	6,63	6,37	6,18	6,03	5,91	5,81	5,73	5,67	5,61	5,56	5,52	5,36	5,20	5,12	5,07	5,03	4,99	4,96	4,91	4,88	4,86
9	10,60	8,02	6,99	6,42	6,06	5,80	5,61	5,47	5,35	5,26	5,18	5,11	5,05	5,00	4,96	4,81	4,65	4,57	4,52	4,48	4,44	4,42	4,36	4,33	4,31
10	10,00	7,56	6,55	5,99	5,64	5,39	5,20	5,06	4,94	4,85	4,77	4,71	4,65	4,60	4,56	4,41	4,25	4,17	4,12	4,08	4,04	4,01	3,96	3,93	3,91
11	9,65	7,21	6,22	5,67	5,32	5,07	4,89	4,74	4,63	4,54	4,46	4,40	4,34	4,29	4,25	4,10	3,94	3,86	3,81	3,78	3,73	3,71	3,66	3,62	3,60
12	9,33	6,93	5,95	5,41	5,06	4,82	4,64	4,50	4,39	4,30	4,22	4,16	4,10	4,05	4,01	3,86	3,70	3,62	3,57	3,54	3,50	3,47	3,41	3,38	3,36
13	9,07	6,70	5,74	5,21	4,86	4,62	4,44	4,30	4,19	4,10	4,02	3,96	3,91	3,86	3,82	3,66	3,51	3,43	3,38	3,34	3,30	3,27	3,21	3,18	3,16
14	8,86	6,51	5,56	5,04	4,69	4,46	4,28	4,14	4,03	3,94	3,86	3,80	3,75	3,70	3,66	3,51	3,35	3,27	3,22	3,18	3,14	3,11	3,06	3,02	2,98
15	8,68	6,36	5,42	4,89	4,56	4,32	4,14	4,00	3,89	3,80	3,73	3,67	3,61	3,56	3,52	3,37	3,21	3,13	3,08	3,05	3,00	2,97	2,92	2,89	2,87
16	8,53	6,23	5,29	4,77	4,44	4,20	4,03	3,89	3,78	3,69	3,62	3,55	3,50	3,45	3,41	3,26	3,10	3,02	2,97	2,93	2,88	2,84	2,78	2,76	2,75
17	8,40	6,11	5,18	4,67	4,34	4,10	3,93	3,79	3,68	3,59	3,52	3,46	3,40	3,35	3,31	3,16	3,00	2,92	2,87	2,83	2,79	2,74	2,68	2,66	2,65
18	8,29	6,01	5,09	4,58	4,25	4,01	3,84	3,71	3,60	3,51	3,43	3,37	3,32	3,27	3,23	3,08	2,92	2,84	2,79	2,75	2,70	2,66	2,60	2,54	2,51
19	8,18	5,93	5,01	4,50	4,17	3,94	3,77	3,63	3,52	3,43	3,36	3,30	3,24	3,19	3,15	3,00	2,84	2,76	2,71	2,67	2,61	2,56	2,54	2,47	2,42
20	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,70	3,56	3,46	3,37	3,29	3,23	3,18	3,13	3,09	2,94	2,78	2,69	2,64	2,61	2,55	2,54	2,48	2,42	2,36
21	8,02	5,78	4,87	4,37	4,04	3,81	3,64	3,51	3,40	3,31	3,24	3,17	3,12	3,07	3,03	2,88	2,72	2,64	2,58	2,53	2,50	2,48	2,42	2,33	2,31
22	7,95	5,72	4,82	4,31	3,99	3,76	3,59	3,45	3,35	3,26	3,18	3,12	3,07	3,02	2,98	2,83	2,67	2,58	2,54	2,48	2,45	2,40	2,37	2,32	2,26
23	7,88	5,66	4,76	4,26	3,94	3,71	3,54	3,41	3,30	3,21	3,14	3,07	3,02	2,97	2,93	2,78	2,62	2,54	2,48	2,45	2,40	2,36	2,33	2,27	2,23
24	7,82	5,61	4,72	4,22	3,90	3,67	3,50	3,36	3,26	3,17	3,09	3,03	2,98	2,93	2,89	2,74	2,58	2,49	2,44	2,40	2,36	2,32	2,29	2,23	2,19
25	7,77	5,57	4,68	4,18	3,86	3,63	3,46	3,32	3,22	3,13	3,06	2,99	2,94	2,89	2,85	2,70	2,54	2,45	2,40	2,36	2,32	2,29	2,23	2,17	2,13
26	7,72	5,53	4,64	4,14	3,82	3,59	3,42	3,28	3,18	3,09	3,02	2,96	2,90	2,86	2,82	2,66	2,50	2,42	2,36	2,33	2,28	2,25	2,19	2,12	2,10
27	7,68	5,49	4,60	4,11	3,78	3,56	3,39	3,25	3,15	3,06	2,99	2,93	2,87	2,82	2,78	2,63	2,47	2,38	2,33	2,29	2,25	2,22	2,16	2,12	2,10
28	7,64	5,45	4,57	4,07	3,75	3,53	3,36	3,23	3,12	3,03	2,96	2,90	2,84	2,79	2,75	2,60	2,44	2,35	2,30	2,26	2,22	2,19	2,13	2,09	2,06
29	7,60	5,42	4,54	4,04	3,73	3,50	3,33	3,20	3,09	3,00	2,93	2,87	2,81	2,77	2,73	2,57	2,41	2,33	2,27	2,23	2,19	2,16	2,10	2,06	2,03
30	7,56	5,39	4,51	4,02	3,70	3,47	3,30	3,17	3,07	2,98	2,91	2,84	2,79	2,74	2,70	2,55	2,39	2,30	2,25	2,21	2,17	2,13	2,07	2,03	2,01
32	7,50	5,34	4,46	3,97	3,65	3,43	3,26	3,13	3,02	2,93	2,86	2,80	2,74	2,70	2,66	2,50	2,34	2,25	2,20	2,16	2,12	2,08	2,02	1,98	1,96
34	7,44	5,29	4,42	3,93	3,61	3,39	3,22	3,09	2,98	2,89	2,82	2,76	2,70	2,66	2,62	2,46	2,30	2,21	2,16	2,12	2,08	2,04	1,98	1,94	1,91
36	7,40	5,25	4,38	3,89	3,57	3,35	3,18	3,05	2,95	2,86	2,79	2,72	2,67	2,62	2,58	2,43	2,26	2,17	2,12	2,08	2,03	2,00	1,94	1,87	1,87
38	7,35	5,21	4,34	3,86	3,54	3,32	3,15	3,02	2,92	2,83	2,75	2,69	2,64	2,60	2,56	2,40	2,23	2,14	2,09	2,05	2,00	1,97	1,90	1,84	1,84
40	7,31	5,18	4,31	3,83	3,51	3,29	3,12	2,99	2,89	2,80	2,73	2,66	2,61	2,56	2,52	2,37	2,20	2,11	2,06	2,02	1,97	1,94	1,88	1,81	1,81
48	7,21	5,06	4,19	3,72	3,41	3,19	3,02	2,89	2,79	2,70	2,63	2,56	2,51	2,46	2,42	2,27	2,10	2,01	1,95	1,91	1,84	1,82	1,76	1,71	1,68
60	7,08	4,98	4,11	3,65	3,34	3,12	2,95	2,82	2,72	2,63	2,56	2,49	2,44	2,39	2,35	2,20	2,03	1,94	1,88	1,84	1,78	1,75	1,68	1,63	1,60
70	7,01	4,92	4,08	3,60	3,29	3,07	2,91	2,78	2,67	2,59	2,51	2,45	2,40	2,35	2,31	2,15	1,98	1,89	1,83	1,78	1,73	1,70	1,62	1,56	1,53
80	6,96	4,88	4,04	3,56	3,26	3,04	2,87	2,74	2,64	2,55	2,48	2,42	2,36	2,31	2,27	2,12	1,94	1,85	1,79	1,75	1,69	1,66	1,57	1,51	1,49
100	6,76	4,82	3,98	3,51	3,21	2,99	2,82	2,74	2,64	2,55	2,48	2,42	2,36	2,31	2,26	2,10	1,92	1,80	1,73	1,69	1,63	1,60	1,51	1,45	1,43
200	6,66	4,71	3,88	3,41	3,11	2,89	2,73	2,65	2,55	2,44	2,36	2,27	2,22	2,17	2,13	1,97	1,79	1,69	1,63	1,59	1,52	1,48	1,39	1,33	1,31
500	6,63	4,60	3,78	3,34	3,04	2,80	2,66	2,53	2,43	2,34	2,26	2,20	2,15	2,10	2,06	1,89	1,71	1,61	1,54	1,50	1,43	1,38	1,29	1,23	1,11
∞	6,63	4,60	3,78	3,32	3,02	2,80	2,64	2,51	2,41	2,32	2,24	2,18	2,13	2,07	2,04	1,87	1,69	1,59	1,52	1,48	1,41	1,36	1,25	1,15	1,00

TABLE7 : BORNE DE F AU NIVEAU 10%.

f1 : degrés de libertés du numérateur

f2 : degrés de liberté du dénominateur

		f1 : degrés de liberté du numérateur															
f2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	40	60	120	∞
2	8,53	9,00	9,16	9,24	9,29	9,33	9,35	9,37	9,38	9,39	9,42	9,44	9,46	9,47	9,47	9,48	9,49
3	5,54	5,46	5,39	5,34	5,31	5,28	5,27	5,25	5,24	5,23	5,20	5,18	5,17	5,16	5,15	5,14	5,13
4	4,54	4,32	4,19	4,11	4,05	4,01	3,98	3,95	3,94	3,92	3,87	3,84	3,82	3,80	3,79	3,78	3,76
5	4,06	3,78	3,62	3,52	3,45	3,40	3,37	3,34	3,32	3,30	3,24	3,21	3,17	3,16	3,14	3,12	3,10
6	3,78	3,46	3,29	3,18	3,11	3,05	3,01	2,98	2,96	2,94	2,87	2,84	2,80	2,78	2,76	2,74	2,72
7	3,59	3,26	3,07	2,96	2,88	2,83	2,78	2,75	2,72	2,70	2,63	2,59	2,56	2,54	2,51	2,49	2,47
8	3,46	3,11	2,92	2,81	2,73	2,67	2,62	2,59	2,56	2,54	2,46	2,42	2,38	2,36	2,34	2,32	2,29
9	3,36	3,01	2,81	2,69	2,61	2,55	2,51	2,47	2,44	2,42	2,34	2,30	2,25	2,23	2,21	2,18	2,16
10	3,28	2,92	2,73	2,61	2,52	2,46	2,41	2,38	2,35	2,32	2,24	2,20	2,16	2,13	2,11	2,08	2,06
11	3,23	2,86	2,66	2,54	2,45	2,39	2,34	2,30	2,27	2,25	2,17	2,12	2,08	2,05	2,03	2,00	1,97
12	3,18	2,81	2,61	2,48	2,39	2,33	2,28	2,24	2,21	2,19	2,10	2,06	2,01	1,99	1,96	1,93	1,90
13	3,14	2,76	2,56	2,43	2,35	2,28	2,23	2,20	2,16	2,14	2,05	2,01	1,96	1,93	1,90	1,88	1,85
14	3,10	2,73	2,52	2,39	2,31	2,24	2,19	2,15	2,12	2,10	2,01	1,96	1,91	1,89	1,86	1,83	1,80
15	3,07	2,70	2,49	2,36	2,27	2,21	2,16	2,12	2,09	2,06	1,97	1,92	1,87	1,85	1,82	1,79	1,76
16	3,05	2,67	2,46	2,33	2,24	2,18	2,13	2,09	2,06	2,03	1,94	1,89	1,84	1,81	1,78	1,75	1,72
17	3,03	2,64	2,44	2,31	2,22	2,15	2,10	2,06	2,03	2,00	1,91	1,86	1,81	1,78	1,75	1,72	1,69
18	3,01	2,62	2,42	2,29	2,20	2,13	2,08	2,04	2,00	1,98	1,89	1,84	1,78	1,75	1,72	1,69	1,66
19	2,99	2,61	2,40	2,27	2,18	2,11	2,06	2,02	1,98	1,96	1,86	1,81	1,76	1,73	1,70	1,67	1,63
20	2,97	2,59	2,38	2,25	2,16	2,09	2,04	2,00	1,96	1,94	1,84	1,79	1,74	1,71	1,68	1,64	1,61
21	2,96	2,57	2,36	2,23	2,14	2,08	2,02	1,98	1,95	1,92	1,83	1,78	1,72	1,69	1,66	1,62	1,59
22	2,95	2,56	2,35	2,22	2,13	2,06	2,01	1,97	1,93	1,90	1,81	1,76	1,70	1,67	1,64	1,60	1,57
23	2,94	2,55	2,34	2,21	2,11	2,05	1,99	1,95	1,92	1,89	1,80	1,74	1,69	1,66	1,62	1,59	1,55
24	2,93	2,54	2,33	2,19	2,10	2,04	1,98	1,94	1,91	1,88	1,78	1,73	1,67	1,64	1,61	1,57	1,53
25	2,92	2,53	2,32	2,18	2,09	2,02	1,97	1,93	1,89	1,87	1,77	1,72	1,66	1,63	1,59	1,56	1,52
26	2,91	2,52	2,31	2,17	2,08	2,01	1,96	1,92	1,88	1,86	1,76	1,71	1,65	1,61	1,58	1,54	1,50
27	2,90	2,51	2,30	2,17	2,07	2,00	1,95	1,91	1,87	1,85	1,75	1,70	1,64	1,60	1,57	1,53	1,49
28	2,89	2,50	2,29	2,16	2,06	2,00	1,94	1,90	1,87	1,84	1,74	1,69	1,63	1,59	1,56	1,52	1,48
29	2,89	2,50	2,28	2,15	2,06	1,99	1,93	1,89	1,86	1,83	1,73	1,68	1,62	1,58	1,55	1,51	1,47
30	2,88	2,49	2,28	2,14	2,05	1,98	1,93	1,88	1,85	1,82	1,72	1,67	1,61	1,57	1,54	1,50	1,46
40	2,84	2,44	2,23	2,09	2,00	1,93	1,87	1,83	1,79	1,76	1,66	1,61	1,54	1,51	1,47	1,42	1,38
60	2,79	2,39	2,18	2,04	1,95	1,87	1,82	1,77	1,74	1,71	1,60	1,54	1,48	1,44	1,40	1,35	1,29
120	2,75	2,35	2,13	1,99	1,90	1,82	1,77	1,72	1,68	1,65	1,54	1,48	1,41	1,37	1,32	1,26	1,19
∞	2,71	2,30	2,08	1,94	1,85	1,77	1,72	1,67	1,63	1,60	1,49	1,42	1,34	1,30	1,24	1,17	1,00

Annexe 2 : Détermination du nombre de tiges à l'hectare et du volume.

Largeur classe	Largeur classe 10	d (cm)	g	1/g	2/g	4/g	10/g	16/g	20/g	$d^3 \times \pi / 24$
0		0	0,0000							0,0000
1		5	0,0020	509,3	1019	2037	5093	8149	10186	0,0000
2		10	0,0079	127,3	254,6	509,3	1273	2037	2546	0,0001
3		15	0,0177	56,59	113,2	226,4	565,9	905,4	1132	0,0004
4		20	0,0314	31,83	63,66	127,3	318,3	509,3	636,6	0,0010
5	1	25	0,0491	20,37	40,74	81,49	203,7	325,9	407,4	0,0020
6		30	0,0707	14,15	28,29	56,59	141,5	226,4	282,9	0,0035
7	2	35	0,0962	10,39	20,79	41,58	103,9	166,3	207,9	0,0056
8		40	0,1257	7,96	15,92	31,83	79,58	127,3	159,2	0,0084
9	3	45	0,1590	6,29	12,58	25,15	62,88	100,6	125,8	0,0119
10		50	0,1963	5,09	10,19	20,37	50,93	81,49	101,9	0,0164
11	4	55	0,2376	4,21	8,42	16,84	42,09	67,34	84,18	0,0218
12		60	0,2827	3,54	7,07	14,15	35,37	56,59	70,74	0,0283
13	5	65	0,3318	3,01	6,03	12,05	30,14	48,22	60,27	0,0359
14		70	0,3848	2,60	5,20	10,39	25,98	41,58	51,97	0,0449
15	6	75	0,4418	2,26	4,53	9,05	22,64	36,22	45,27	0,0552
16		80	0,5027	1,99	3,98	7,96	19,89	31,83	39,79	0,0670
17	7	85	0,5675	1,76	3,52	7,05	17,62	28,20	35,25	0,0804
18		90	0,6362	1,57	3,14	6,29	15,72	25,15	31,44	0,0954
19	8	95	0,7088	1,41	2,82	5,64	14,11	22,57	28,22	0,1122
20		100	0,7854	1,27	2,55	5,09	12,73	20,37	25,46	0,1309
21	9	105	0,8659	1,15	2,31	4,62	11,55	18,48	23,10	0,1515
22		110	0,9503	1,05	2,10	4,21	10,52	16,84	21,05	0,1742
23	10	115	1,0387	0,96	1,93	3,85	9,63	15,40	19,26	0,1991
24		120	1,1310	0,88	1,77	3,54	8,84	14,15	17,68	0,2262
25	11	125	1,2272	0,81	1,63	3,26	8,15	13,04	16,30	0,2557
26		130	1,3273	0,75	1,51	3,01	7,53	12,05	15,07	0,2876
27	12	135	1,4314	0,70	1,40	2,79	6,99	11,18	13,97	0,3221
28		140	1,5394	0,65	1,30	2,60	6,50	10,39	12,99	0,3592
29	13	145	1,6513	0,61	1,21	2,42	6,06	9,69	12,11	0,3991
30	14	150+	1,7671	0,57	1,13	2,26	5,66	9,05	11,32	0,4418

colonne 1 : Donne les numéros de classe lorsque la largeur est de 5.

Exemple : 1 = classe 5 comprise entre 2,5 et 7,5 cm;

5 = classe 25 comprise entre 22,5 et 27,5cm.

colonne 2 : Donne les numéros de classe lorsque la largeur est de 10.

Exemple : 1 = classe comprise entre 20 et 30 ; 2 = classe comprise entre 30 et 40 ;

6 classe comprise entre 70 et 90 cm.

colonne3 : donne le diamètre à tous les 5 cm.

colonne 4 : donne la surface de section à intervalle de 5 cm. Il permet de déterminer la surface terrière d'un peuplement et aussi le volume connaissant le coefficient de forme hauteur fh.

colonnes 5, 6, 7, 8, 9, 10 : donnent les facteurs requis pour obtenir le nombre de tiges à l'ha connaissant le nombre de tiges et la surface de section g. La colonne 5 s'utilise lorsque la valeur de k est de 1; la colonne 6 lorsque cette valeur est de 2; la colonne 7 lorsqu'elle est de 4. Les colonnes 8, 9 et 10 s'utilisent exclusivement avec la Mire Djomo donnant les valeurs respectives de k qui sont 10, 16 et 20.

colonne 11 : donne en fonction du diamètre le facteur requis pour déterminer le volume individuel des tiges connaissant la pente p du niveau de hauteur où le diamètre est la moitié du diamètre à hauteur de poitrine.

**Annexe 3 : Comparaison barème1 (formule du diamètre moyen) et
barème2 (formule de SMALIAN)**

Données : extraites carnet de chantier (DF10) SOFIBEL (21/02/91)

Nom commercial	DGB cm	DPB cm	Longueur m	Moyenne cm	Volume1 m ³	Volume2 m ³	Différence m ³
Ayous	97	69	21,20	83	11,470	11,797	0,326
Ayous	87	71	14,50	79	7,107	7,180	0,073
Ayous	98	77	18,40	87	10,938	11,224	0,285
Ayous	82	68	14,40	75	6,362	6,417	0,055
Ayous	80	65	13,30	72	5,415	5,549	0,134
Ayous	83	65	17,50	74	7,526	7,638	0,111
Ayous	93	73	17,30	83	9,360	9,496	0,136
Ayous	91	78	15,80	84	8,756	8,913	0,157
Ayous	90	66	23,40	78	11,181	11,446	0,265
Ayous	87	68	17,30	77	8,056	8,284	0,228
Ayous	87	68	17,30	77	8,056	8,284	0,228
Ayous	80	68	11,70	74	5,032	5,065	0,033
Ayous	92	77	14,90	84	8,257	8,422	0,164
Ayous	92	67	14,70	79	7,205	7,477	0,272
Ayous	97	71	25,40	84	14,076	14,413	0,337
Sapelli	104	67	18,40	85	10,441	11,059	0,618
Sapelli	100	65	15,70	82	8,291	8,770	0,479
Sapelli	106	65	18,30	85	10,384	11,111	0,727
Acajou	142	108	17,40	125	21,353	21,748	0,395
Acajou	113	110	13,40	111	12,967	13,086	0,119
Bété	76	66	14,10	71	5,582	5,610	0,028
Bété	74	46	21,10	60	5,966	6,291	0,325
Bété	65	45	18,40	55	4,372	4,516	0,145
Bété	64	46	15,60	55	3,708	3,806	0,099
Acajou	148	119	20,60	133	28,619	29,175	0,556
Sipo	116	73	29,00	94	20,125	21,393	1,268
Bété	60	49	17,50	54	4,008	4,124	0,116
Bété	61	52	16,80	56	4,138	4,239	0,101
Sapelli	110	80	22,80	95	16,161	16,564	0,403
Acajou	115	102	16,40	108	15,024	15,218	0,194
Total					299,938	308,314	8,376

La construction de 2 barèmes basés sur les formules : du diamètre moyen et de SMALIAN nous a amené à faire des comparaisons. Les données sont extraites d'un carnet de chantier DF10 de SOFIBEL BELABO. Cette comparaison nous a conduit aux conclusions suivantes :

Le premier sous-estime systématiquement tandis que le second améliore à la hausse la valeur obtenue.

Les pertes engendrées par le premier type de barème deviennent importantes lorsqu'on a affaire à de nombreuses grumes. Elles s'accroissent davantage lorsque les dimensions des arbres deviennent importantes et que la forme s'éloigne du cylindre pour tendre vers le néloïde.

Nous recommandons donc d'utiliser le second barème qui améliore les résultats et qui offre les mêmes facilités de lecture que le premier.

ANNEXE 4 : Clinomètre Djomo.

C'est un instrument fait de contre-plaqué, sous forme d'un arc de cercle gradué. IL se présente suivant deux modèles :

* Le premier modèle permet de lire la pente. On l'utilise pour déterminer la pente d'un terrain. On peut aussi l'utiliser pour déterminer la hauteur d'un arbre. Ainsi, on effectue une visée vers le haut, puis vers le bas et on lit les pentes correspondantes. On obtient la hauteur en posant :

$$h = \frac{(\%1 - \%2) \times D}{100} \quad \text{avec } \%1 : \text{pente vers le haut.}$$

$\%2 : \text{pente vers le bas.}$

* Le deuxième modèle permet de lire directement la hauteur d'un arbre, lorsqu'on se place aux distances 10, 20 ou 30 m. Ainsi, se tenant à la distance horizontale appropriée, on lit vers le haut et vers le bas. On additionne ou soustrait les hauteurs lues en tenant compte des signes. Par exemple, si la hauteur au niveau du sommet est de 12 m et celle de base de -2m, la hauteur totale de l'arbre est donc $12 + 2 = 14$ m. De même, si la hauteur du sommet est de 16m, et celle du sol de +3m, la hauteur totale est de $16 - 3 = 13$ m.

Pour déterminer la hauteur à distance quelconque, on multiplie le dixième de la distance horizontale par la lecture effectuée sur la graduation correspondant à $D = 10$ m.



TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I NOTIONS DE STATISTIQUES NECESSAIRES EN DENDROMETRIE	2
I.1 Introduction	2
I.2 Description des données recueillies sur le terrain.	2
I.3 Caractéristiques de position ou mesure de la tendance centrale	6
I.3.1 Le mode.	6
I.3.2 La médiane.	8
I.3.3 La moyenne	9
I.4 Paramètres de dispersion	10
I.4.1 L'étendue	10
I.4.2 Ecart moyen	11
I.4.3 La variance	12
I.4.4 L'écart type	12
I.4.5 Le coefficient de variations	13
I.5 Données bidimensionnelles	14
I.5.1 La covariance	14
I.5.2 La corrélation	14
I.5.3 Equation de régression	16
I.6 Etude d'une loi statistique usuelle : la loi de gauss ou loi normale	17
I.7 Echantillonnage	21
I.8 Estimation	22
I.8.1 Généralités	22
I.8.2 construction d'un intervalle de confiance pour la moyenne	23
I.8.2.1 Cas où σ est connu et $X \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$.	23
I.8.2.2 Cas où σ est connu et $n \geq 30$.	24
I.8.2.3 Cas où σ est inconnu et $X \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$; ($n < 30$).	24
I.8.2.4 Cas où σ est inconnu et $n \geq 30$	26
I.8.3 EXEMPLES	27

I.8.4 Construction d'un intervalle de confiance pour la variance	28
I.9 Les tests d'hypothese.	31
I.9.1 Généralités	31
I.9.2 Applications	34
I.10 Comparaison des moyennes de 2 échantillons	37
I.11 Analyse des variances	42
CHAPITRE II TECHNIQUES DE BASE D'ECHANTILLONNAGE	54
II.1 Importance de l'échantillonnage	54
II.2 Eléments caractéristiques	54
II.2.1 Population	54
II.2.2 Unités d'échantillonnage	54
II.2.3 Variable étudiée	55
II.2.4 Stratification	55
II.2.5 Précision	55
II.2.6 Erreur d'estimation maximale	56
II.2.7 Taille n de l'échantillon	56
II.3 Les différents modes de sélection des unités- échantillons	60
II.3.1 Probabilité de sélection des unités- échantillons.	60
II.3.2 Sélection avec ou sans remise.	61
II.3.3 Sélection au hasard - sélection systématique	61
II.3.4 Sondage stratifié	63
II.3.5 Sondage à 2 degrés	64
II.3.6 Sondage en grappes	64
II.4 Les différentes formes d'erreur qu'on peut avoir lors d'un échantillonnage	65
II.5 Principe de calcul de l'erreur à craindre dans un échantillonnage aléatoire simple	67
II.6 Quelques propriétés usuelles.	68
II.7 Estimation de la moyenne et de la variance pour quelques modes d'échantillonnage	70
II.7.1 Unités de même taille	70
II.7.2 Unités de tailles différentes	72

CHAPITRE III	STRATIFICATION FORESTIERE DU TERRITOIRE	75
III.1	Description des différents types forestiers. . . .	75
III.1.1	Les forêts artificielles.	75
III.1.2	Les forêts naturelles.	76
III.1.2.1	Les terrains forestiers.	76
III.1.2.2	Les terrains boisés.	79
III.1.2.3	Les terrains non boisés.	80
III.2	Les critères de stratification	83
III.2.1	Les critères de répartition de la végétation	83
III.2.2	Les critères d'aménagement.	83
III.2.3	Les critères de stratification forestière.	85
CHAPITRE IV	TELEDETECTION ET APPLICATIONS	89
IV.1	Notions physiques nécessaires a la compréhension de la télédétection.	89
IV.1.1	Les Spectres électro-magnétiques.	89
IV.1.2	Les sources d'énergie électro-magnétiques	90
IV.1.3	Le comportement des objets dans le spectre électro-magnétique.	91
IV.2	Les supports des données en télédétection	93
IV.2.1	Les capteurs	93
IV.2.2	Les appareils utilisés (vecteurs)	96
IV.2.3	Les documents de visualisation	98
IV.3	Les photographies aériennes et la photo- interprétation	99
IV.3.1	La photographie aérienne.	99
IV.3.2	L'interprétation	105
IV.3.3	Les mesures dendrométriques sur photographies aériennes (photogrammétrie).	109
IV.4	CARTOGRAPHIE	116
CHAPITRE V	: LES INVENTAIRES FORESTIERS	120
V.1	Introduction	120
V.2	Les inventaires complets (Prospection).	121
V.2.1	Opérations préliminaires	121

V.2.2	Le layonnage	122
V.2.3	Le comptage	123
V.2.4	Cadence de travail	124
V.2.5	Estimation du volume.	125
V.2.6	Cartographie	125
V.3	Les inventaires par échantillonnage	125
V.3.1	Inventaire de reconnaissance national	125
V.3.2	Les inventaires d'aménagement et de pré investissement (inventaire de gestion)	129
V.3.3	Sondage en forêt	132
V.3.3.1	La mission préparatoire	132
V.3.3.2	Préparation des travaux de terrain	132
V.3.3.3	Etape de layonnage	135
V.3.3.4	Le comptage	135
V.3.3.5	Procédures de vérification	137
V.3.3.6	Etudes d'arbres	139
V.3.4	Traitement des données	140
V.3.4.1	Prise des données de terrain	140
V.3.4.2	Le traitement des données	141
CHAPITRE VI INVENTAIRE PAR ECHANTILLONNAGE SOUS ANGLE CONSTANT		146
VI.1	Notions de surface terrière.	146
VI.2	Méthode de bitterlich	147
VI.3	Détermination du nombre de tiges a l'ha.	150
VI.4	Le relascope de bitterlich	151
VI.4.1	Calcul de la surface terrière	151
VI.4.2	Calcul de la hauteur	152
VI.4.3	Calcul du coefficient de forme f, de forme hauteur fh, du volume v	152
VI.4.4	Calcul du volume d'un peuplement	154
VI.4.5	Autres mesures possibles du Relascope	155
VI.5	Les autres appareils.	156
VI.5.1	Le dendromètre de Kramer	156
VI.5.2	Les mires de Djomo	156
VI.5.3	Les prismes Relascopiques	157
VI.5.4	Le télérelascope	159
Exercices	161

Annexes	169
Annexe1 : Tables statistiques170
Annexe2 : Détermination du nombre de tiges à l'hectare. .179	
Annexe3 : Comparaison Barème1 et Barème2.180
Annexe4 : Clinomètre Djomo.181
Table des matières182
Bibliographie.187
Index.193

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alder D. **Estimation des volumes et accroissement des peuplements forestiers. Etude et prévision de la production.** 1980 FAO.
- Alfred A.H. **Application of large photos to a forest inventory in Alberta.** Forest Management Institute, Ottawa, Information Report FMR-X-107, 57p, 1978.
- Allison G.W. **Timber volume estimates from aerial photographs.** British Columbia Forest Service, Forest Survey note n° 5, 25p, 1960.
- Altherr E. **Forest mensuration.** Traduction de la 2e édition, Jérusalem, 454p, 1970.
- Andrien A. **Barème forestier** dernière édition 1976.
- Avery C. **Conversion des unités de mesures forestières américaines en unités métriques.** Revue forestière française, vol. XIV, no 10, pp. 817-834, 1962.
- Avery T. E. **Forest measurements.** 3e édition, Mc Graw
Burkhart H.E Hill Book Company 332p, 1983
- Brenac L. **L'utilisation des photographies aériennes pour l'inventaire des forêts françaises.** Bulletin de la société française de photogrammétrie. n° 8 pp3-21, 1962.
- Bazire P. **L'inventaire forestier national.** Revue forestière française, no spécial «Le fonds forestier national a 40ans», vol. xxxix.
- Bell J.F. **Spiegel-Relaskop, American scale, metric scale and wide scale.** FOB.
- Bernard F. **Etablissement d'un tarif de cubage : étude statistique; quelques résultats pour le Gabon.** Nogent-sur-Marne, CTFT 36p, 1956.
- Bitterlich W. **Tele-relaskop, description 1st and 2nd part.** FOB.
- Bouchon J. **Tarifs de cubage.** C.N.R.F-ENGREF 1974.

- Bouchon J. **Comparaison de cinq dendromètres pour les mesures de hauteurs d'arbres.** Revue forestière française, vol. XIX no 4, pp 256-278, 1967.
- Bouchon J. **Les tarifs de cubage.** Nancy : ENGREF; Champenoux : INRA. 128p; 1974.
- Cailliez F. **Estimation des volumes et accroissement des peuplements forestiers. Estimation des volumes.** 1980 FAO.
- Chatelain F. **Temps de passage et accroissement.** Revue forestière française, vol III no 3 1951.
- Chaudé P. **Tarifs de cubage des taillis sur pied en mètres cubes réels, en stères pour l'évaluation sur pied des taillis en volume, Paris.** 72p, 1942.
- Chaudé P. **Tarif de cubage à décroissance variable pour les arbres sur pied.** Cachan-Sopedi Imp., 72p, 1982.
- Chaudé P. Decesse E. **Barème de cubage des bois en grumes d'après leur circonférence médiane : grumes d'oeuvres, bois d'industrie, bois de mine.** La Varenne Saint Hilaire : Jean Chaudé. 285p 1983.
- CNRF, INRA **Tables de production pour les forêts françaises.** 2ème édition, réunie par ONF, ENGREF B. Vannièrre, ENGREF, 1984.
- Cochran W.G. **Experimental designs.** 2e édition Wiley, Cox G.M. New-York, 1957.
- Cochran W.G. **Sampling techniques.** 2e édition, Wiley, New-York, 1963.
- CTFT **Mémento du Forestier.** 3eme édition 1989 Ministère de la coopération et de développement 1266p.
- C.L. **Statistiques - Exercices corrigés.** Imprimerie Jouve, Paris 374p, 1975.
- Dagnélie P. **Théorie et méthodes statistiques, Applications agronomiques.**
Volumel : la statistique descriptive et les fondements de l'inférence statistique.
 2ème édition, Gembloux, les presses agronomiques, 378p, 1973.

- Dagnélie P. **Théorie et méthodes statistiques, Applications agronomiques.**
Volume2 : Les méthodes de l'inférence statistique. 2ème édition, Gembloux, les presses agronomiques, 463p, 1973.
- Dagnélie P., Paml R. **Tables de cubage des arbres et des peuplements forestiers.** Gembloux: Les Presses Agronomiques. 148p, 1985.
- Rondeux J., Thill A.
- Dauvergne E. **Les inventaires et l'informatique.** Arborescences, no 10 pp. 13-14, 1987.
- Décourt N. **Méthode utilisée pour la construction rapide des tables de production provisoires en France.** Annales des sciences forestières, vol. 29, no 1 pp. 35-48, 1972.
- Djomo A. **Techniques de mesures des arbres et des peuplements forestiers.** CEDEF, 193p, 1996.
- Djomo A. **Notions de cartographie.** CEDEF, 138p, 1996.
- Domou F. **Techniques diverses d'évaluation des d'arbres.** Mémoire de fin d'étude, 1992.
- Duplat P. et al. **Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers.** Fontainebleau : Section technique de l'Office National des Forêts. 432p, 1981.
- ENGREF **Barème de cubage.** 5eme édition 1988.
- ERNERST P. LAUZON **Topométrie générale.** 2eme édition 1980.
R. DUQUETTE
- Finlayson W. **The Relascope with standard metric scale and wide scale.** FOB.
- Fisher R.A. **The design of experiments.** 7th edition, Oliver and Boyd, Edingurgh, 1960.
- Fisher R.A. **Statistical Method for Research Workers.** Oliver and Boyd, Edingurgh, 1925.
- Freeman H. **Introduction to Statistical inference.** Addison-Wesley, Reading Mass, 1963.
- Frochot A. **Guide théorique et pratique de cubage et d'estimation des bois.** 3e édition. Paris: J. Hetzel XXIII-313p. 1980.

- Gilles Gauthier **Normes de stratification forestières pour les plantations.**
- Goupil Ph. **Construction de gammes de tarifs de cubage à une entrée pour l'estimation sur pied du volume commercial bois fort du pin sylvestre dans l'orne.** Fontainebleau: Section technique de l'office national des forêts. 67p, 1981.
- Hamilton G.J. **Forest mensuration handbook.** Forestry Commission Booklet, no 39, 274p, 1975.
- Hansen M.H. **Sample Survey Method and Theory.** Wiley, New-York, 1953.
- Hurwitz W.N.
Madow W.G.
- Hoel P.G. **Introduction to Mathematical Statistics.** 2e édition, Wiley, New-York, 1954.
- Huguet L. **L'usage des photographies aériennes en matière forestière.** Bois Français de papeterie, 33p, 1957.
- Husch B. Miller Ch.I. **Forest mensuration.** 3e édition. New York: John Wiley and sons. 402p, 1982.
- Beers Th.W.
- Inventaire Forestier **Buts et méthodes de l'inventaire forestier national.** Paris : Direction des forêts. 67p, 1985.
National
- Kempthorne O. **Design and analysis of experiments.** Wiley, New-York, 1952.
- Kish L. **Survey sampling.** Wiley, New-York, 1965.
- Lanhy J.P. **Manuel d'inventaire forestier.** 1981 FAO 200p Références Particulières aux forêts tropicales hétérogènes.
- Loetsch F. **A Forest Inventory in Thailand.** Unalysa (version anglaise) vol. II no 4, pp. 174-180, 1954.
- Loetsch F., **Forest Inventory.** München: B.L.V.
Haller K.E., Zöhrer F Verlagsgesellschaft. 1964 et 1973.
- Maître H.F. **Dynamique et production des peuplements naturels de forêt dense humide en Afrique.** B.F.T n°213 p3-12, 1986.
- Mood A.M. **Introduction to the theory of statistics.**
Graybill F.A. 2e édition, Mc Graw-Hill, New-York, 1963.

- M. Colette **Application de la télédétection à**
M. C. Girard **l'étude de la Biosphère.** Masson et Cie
1975.
- Nielsen U. **Tree and stand measurement from aerial**
photographs. Forest Management Insti-
tute, Information Report FMR-X-29, 11p,
1997.
- Nielsen U. **A forest inventory in the Yukon using**
Aldred A.H. **large scale photos sampling techniques.**
MacLeod D.A. Forest Management Institute, Informa-
tion Report FMR-X-121, 40p, 1979.
- Office National des **Barème de cubage de l'administration.**
Forêts Paris : Office national des forêts.
20p, 1980.
- ONADEF **Technique d'études d'arbres.** 27p
ONADEF.
- ONADEF **Normes d'inventaire d'aménagement et**
de pré-investissement.
- ONADEF **Normes de vérification des travaux**
d'inventaire de reconnaissance.
- Ouellet G. **Statistiques : Théorie, Exemples,**
Problèmes. Le Griffon d'argiles, 1985.
- Pardé J. **Une méthode rapide de cubage approché**
des peuplements forestiers équiennes.
Revue forestière française, vol. xv,
fascicule 2.
- Pardé J. et Bouchon J. **Dendrométrie.** 2eme édition 328 pages
ENGREF.
- Scheffe H. **The analysis of variance.**
Wiley, New-York, 1959.
- Snedecor G.W. **Analysis of Variance and Covariance.**
Collegiate Press, Inc., Ames, Iowa, 1934.
- Snedecor G. W. **Méthodes statistiques.** 6ème édition,
Cochran W. G. Paris : Association de Coordination
Technique Agricole, 649p, 1957.
(Traduit de l'anglais par Boelle H. et
Camhaji E.).
- Spurr S.H. **Forest inventory.** New-York, The Ronald
Press Company, 340p, 1948.
- Spurr S.H. **Aerial photographs in forestry.**
New-York, The Ronald Press Company,
340p, 1948.

Tonye D. **Relascope de Bitterlich : application comparative à l'inventaire volumique à 5 mesures**. Mémoire de fin d'étude, 1992.

Vessereau A. **La statistique**. 3e édition, Paris : Les presses agronomiques de France, 125p, 1953.

Vessereau A. **Méthodes statistiques en biologie et en agronomie**. 2e édition, Paris : Ballière et Fils, 538p, 1960.

INDEX

- Afforestation 75
Aide
 chaîneur 134
 cuisinier 134
Altitude 85, 86
Analyse
 des variances 42,
 45, 47
Angles
 horizontaux 155
Approximation 25
Apurement
 des données 142
Arbres 75
 rabougris 79
Arbustes 75, 79
Aspect
 du feuillage 85
Azimut 123
Bambousaies 77
Barèmes
 de cubage 155
Blocs 47
Boussolier 122
Brigade 132
Brûlis
 partiel 87
Buissons 79
Carré Moyen 43
Carrières 82
Carte 125
 de prospection 121
 forestière 121, 144
 topographique 121,
 123,
 128, 144
 perforées 142
Cartographie 123, 125,
 132
Chablis
 partiel 87
Chaînage 123, 138
Chaîneur 133
Chasseur 134
Chauffeurs 135
Classe
 de diamètre 3, 4, 8
 136, 139, 143
 médiane 8
 modale 7
 de qualité 136, 139
Clinomètre 123, 136, 137
Classification
 de l'UNESCO 83
 de Yangambi 83
 du Professeur F.
 White 83
 du SPIARF 83
C.M 43
C.M.E 44
C.M.T 44
Coefficient
 de corrélation 39
 de variations 10, 13, 56
 de forme 152, 154
 de forme hauteur
 152, 154
 de volume 152
Corrélation 14, 15
Covariance 14
Complexes industriels 82
Coupe
 partielle 87
Culture
 extensive 82
 industrielle 82
 intensive 82
 itinérante 81
Compas 146
 de Hellrigl 146
 forestier de Djomo
 151
Comptage 123, 124, 132,
 135,
 136, 138, 139
Concession
 forestière 121
constante
 surface terrière
 149
Contreforts 134

Cotation
 des arbres sur pied
 136
 Cuisinier 134
 D.d.l 43
 Degré
 de liberté 37
 Demi-équidistance 127
 Dendrométrie 2, 22
 Densité 85, 87
 Dendromètre
 de Kramer 156
 Densité
 du peuplement 124
 Diamètre 2, 3, 153
 Diagrammes
 en bâtons 4
 Différence
 significative 37
 Dispositif
 c o m p l è t e m e n t
 randomisé 42
 en blocs randomisés
 42, 46
 Distribution 27
 de fréquence 4, 9
 de probabilité 23,
 34
 de STUDENT 25
 forme d'un triangle
 rectangle 59
 normale 59
 uniforme 58
 Disques durs 142
 Disquettes 142
 Écart moyen 10, 11
 Écart type 10, 12, 14,
 27, 35
 Échantillon 21-23, 27,
 30, 37
 Échantillon 54, 55
 d'effectifs inégaux
 41
 indépendants 39
 Échantillonnage 21, 54
 à 2 degrés 71
 aléatoire 70, 72
 stratifié 70, 73
 E.E.M 56
 Effet
 traitement 46
 Émulsions 85
 Équation de régression
 16
 Équidistance 126, 130,
 150
 Équipe 129
 d'études d'arbres
 134
 d'intendance 134
 de comptage 123,
 134
 de layonnage 122,
 133
 de vérification
 134, 137
 Erreur 45, 54
 à craindre 54, 63,
 67
 d'estimation 56, 68
 de mesurage 67
 de 2ième espèce 33
 résiduelle 43, 47
 de première espèce
 32
 Espérance
 mathématique 18
 Essences
 dominantes 85, 86
 commercialisables
 121
 principales 140
 secondaires 140
 Estimateur 34
 Estimation 22, 25, 67,
 72
 ponctuelle 24, 28,
 29
 Étendue 10, 58
 Études
 d'arbres 132, 134,
 139
 Événement 9, 10
 Fiches
 manuelles 141
 spéciales 141
 Forêt 75, 79
 en régénération 78,
 87
 secondaire adulte
 78, 87
 secondaire jeune
 78, 87

Forêt
 artificielles 75,
 76
 caducifoliées 86
 claires 79, 80
 de montagne 77
 denses 76
 i n o n d é e s e n
 permanence 79
 m a r é c a g e u s e s
 inondables 79
 m a r é c a g e u s e s
 i n o n d é e s
 temporairement
 79
 naturelles 75
 secondaires 76, 78
 secondaires à raphia
 79
 semi-caducifoliées
 86
 sempervirentes 86
 sur sol hydromorphe
 76, 78
 Fourrés 81
 Fréquence 3, 6, 18
 absolue 4, 9
 relative 3, 4, 8,
 10
 relative cumulée 4,
 8
 absolues cumulées 3
 Galeries forestières 77
 Gallon
 circonférentiel 146
 Gaulis 78, 121, 139
 Génération
 des données 143
 Graphiques 2
 Groupements
 saxicoles 81
 Hauteur 2, 85, 87, 152
 Héliophytes 78
 Hypothèse
 alternative 31, 35
 nulle 31, 35, 37
 Images
 radars 85
 satellites 85, 120
 Intensité
 de la vérification
 138
 Intervalle 22
 de confiance 22,
 28-30, 56
 de rejet 32
 semi-ouvert 2
 Inventaire 2, 31, 54,
 120, 132
 complets 120, 121
 forestier 63, 75,
 120
 par échantillonnage
 65, 120
 systématique 63
 d'aménagement 120,
 129, 132,
 136, 137
 d'exploitation 121,
 122
 de gestion 129
 d e
 pré-investissement
 120, 129, 136, 137
 de reconnaissance
 136, 137
 de reconnaissance
 national 125
 sous angle constant
 146
 nationaux 120, 128
 pied par pied 121
 régionaux 120
 Itération 59
 Jaloneurs 133
 Largeur
 de la classe 3
 Layons 122, 125, 131
 d'accès 128, 135
 de base 122, 135
 de comptage 128,
 135
 de rattachement 135
 est-ouest 122, 123
 nord-sud 122, 123
 secondaires 122
 Layonnage 122-124, 132,
 135, 138
 Lianes 75
 Licence 121
 Litière 75
 Localités 82

Loi
 binomiale 17
 de Khi 2 36
 de poisson 17
 de Student 26, 42
 hypergéométrique 17
 normale 17, 25, 30
 Machetteur 122, 133
 Mangrove 79
 Marquage 134
 Médiane 6, 8, 9, 19
 Mesureur 134
 Milieu 85
 de la classe 2
 Milieux
 agricoles 81
 agricols 80
 naturels 80
 urbanisés 82
 Mires
 de Djomo 156
 Mission
 préparatoire 132
 Mode 6, 9, 19
 de tirage 61
 de sélection 60
 Moyenne 67, 72
 Moyenne 6, 9, 10, 18, 47
 arithmétique 9
 de 2 échantillons 37
 Niveau
 de confiance 24, 28, 30
 de signification 32
 de probabilité 55
 Normes
 de vérification 138
 Ordinateur 2
 Paramètre 8
 Parcelles
 circulaires 155
 Permis 121
 Perturbation 85, 87
 Peuplements
 forestiers 76
 mêlés 76
 Photo-interprétations 132
 Photographies
 aériennes 85, 120, 121
 Photos 128, 131
 Plan
 de gestion 130
 Planimétrie 130
 Plantation 82
 Pointeur 123, 134
 Points
 de sondage 149
 Population 8, 21, 22, 27, 37, 66
 stratifiée 3
 de référence 54
 Porteur
 de câble 134
 de planchette 134
 Possibilité annuelle 144
 P.P.D 60
 P.P.D.S 44
 Précision 131
 d'une estimation 55
 de l'échantillonnage 63
 des résultats 55
 Prismes
 relascopiques 157
 Probabilité 19
 de sélection 60
 proportionnelle à la dimension 60
 Prospecteur 123, 133, 134, 135, 136, 139
 Radars 120
 Reconnaissance
 au sol 121
 Relascope 152
 de BITTERLICH 151, 155
 Relief 124
 Reforestation 75
 Régénération
 artificielle 76
 naturelle 76
 Saisie
 des données 142
 Savane 79
 Savanes
 arborées 79, 80
 arbustives 81
 boisées 79, 80
 herbeuses 81

S.C.E 43
 Sciaphytes 78
 Sélection
 au hasard 61
 avec remise 61
 sans remise 61
 systématique 62
 Semis 121
 Seuil
 de signification 37, 42
 Sondage 125, 127, 132
 Sondage 54
 à 2 degrés 64
 en grappes 64
 stratifié 63
 systématiques 62
 Sources
 d'erreurs 65
 Spiegel
 Relaskop 151
 Stade
 adulte 86
 de développement 85
 jeune 86
 primaire 86
 régénéré 86
 Statistique 2, 121
 Steppes 79, 81
 arborées 79, 80
 arbustives 81
 buissonnantes 81
 herbacées 81
 Strates 3, 55, 75, 138
 Stratification 55, 75, 83, 126, 128, 130, 149
 Stratification
 forestière 76, 85
 Surface
 de section 146, 151, 152
 terrière 146-148, 150, 151, 158
 totale 146
 Suunto 136
 S.V 43
 Table
 de FISHER 45
 de STUDENT 37, 39, 41
 Table
 de superficie 143
 de peuplement 143
 de stock 143
 de volume 143
 Tableau 2, 4
 Tarif
 de cubage 140, 143
 unique 140
 individuels 140
 Taux
 de sondage 72
 d'échantillonnage 125, 129
 de vérification 138
 Télédétection 85
 Télérélescope 159
 Terrains
 boisés 76, 79, 80
 dénudés 81
 dénudés humides 81
 forestiers 76, 80
 non boisés 76, 80
 semi-dénudés sec 81
 Test
 bilatéral 32, 33
 d'hypothèses 31, 137
 unilatéral 33
 unilatéral à droite 32, 33
 unilatéral à gauche 32, 33
 Tirage
 avec remise 26, 27, 61
 sans remise 26, 61
 Topofil 123, 134
 Total 43, 45, 47
 Traitement 42-47
 Traitement
 des données 141
 Transfert
 des données 142
 Unité
 de compilation (UC) 54, 126, 127, 128, 130, 133, 143
 de relevé 65
 d'échantillonnage 55
 primaires 64

Unité
 secondaires 64
 statistiques 64, 65
 d'aménagement 84
 Unités-échantillons 61,
 62
 UP 127
 Variables
 aléatoires continues
 2
 aléatoires 2, 18,
 19
 aléatoires discrètes
 4
 a l é a t o i r e s
 indépendantes
 29
 Variance 10, 12, 18, 28,
 30, 35
 67, 72
 Vérification 132, 137
 Villes 82
 Volume 125, 154
 biomasse forestière
 139
 brut 139
 commercial 125
 fût 139
 marchand 139
 sous écorce 139
 tige 139
 total 139
 individuels 155
 Zone
 tropicale 136, 139
 tempérées 136