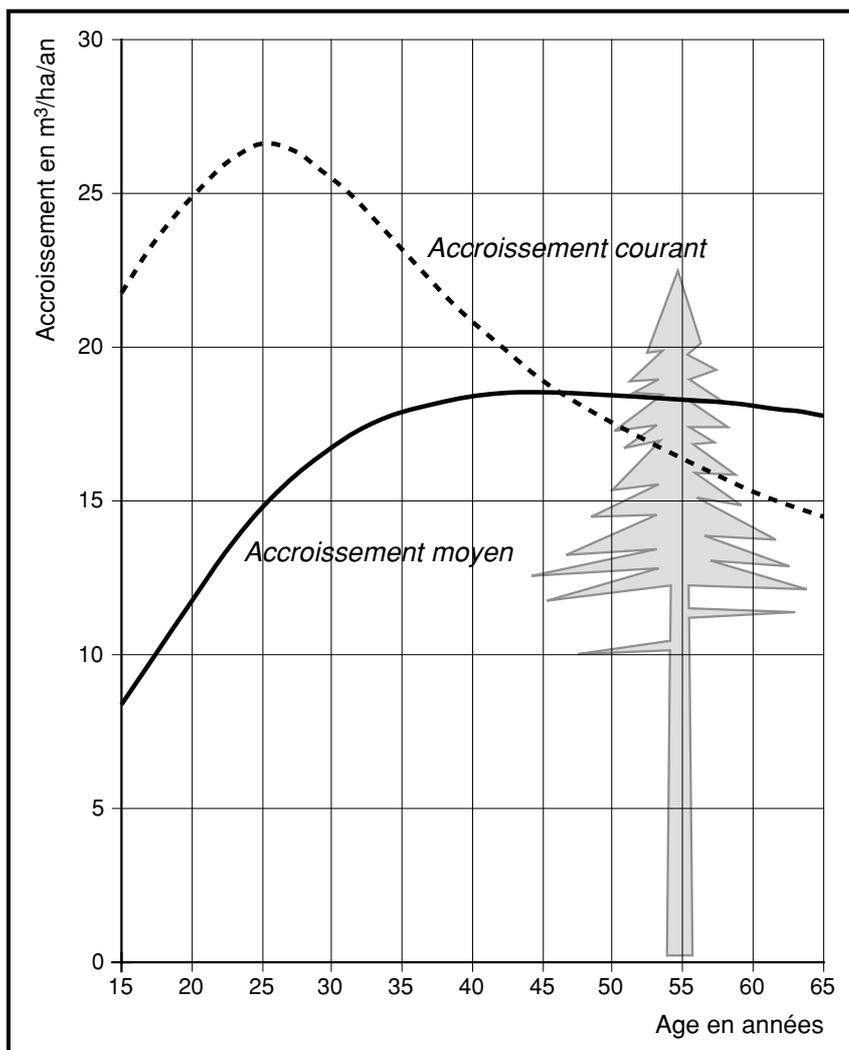


Dendrométrie des peuplements



Evolution de l'accroissement moyen et de l'accroissement courant en fonction de l'âge dans une futaie régulière de Douglas (Ouest du Massif Central, classe de fertilité 2, d'après Decourt, 1972)

Sylvain Gaudin

I. Présentation et intérêt des critères dendrométriques

I.1. Présentation et détermination par la mesure ou le calcul des principaux critères dendrométriques	2
<i>I.1.1. Comment caractériser les peuplements ?</i>	2
<i>I.1.2. Définition et détermination des principaux critères dendrométriques</i>	5
I.2. Quels critères choisir en fonction d'un peuplement donné ?	22
<i>I.2.1. Les utilisateurs et leurs besoins</i>	22
<i>I.2.2. Les besoins de l'aménagiste</i>	22
<i>I.2.3. Les besoins du sylviculteur</i>	22
I.3. Les valeurs usuelles des principaux critères dendrométriques	23
<i>I.3.1. Préambule</i>	23
<i>I.3.2. Valeurs usuelles pour les différents types de peuplements</i>	24
<i>I.3.3. Intérêt du GB/BM et du VAM pour les classements de parcelle</i>	29
<i>I.3.4. Comparaison futaie régulière-futaie jardinée</i>	30

II. Calcul de l'accroissement des peuplements

II.1. Intérêt des calculs d'accroissement	31
II.2. Les différents types d'accroissement	31
<i>II.2.1. Accroissement en surface terrière</i>	31
<i>II.2.2. Accroissement en diamètre ou en circonférence</i>	31
<i>II.2.3. Accroissement en nombre de tiges</i>	32
<i>II.2.4. Accroissement en volume</i>	32
II.3. Calcul des accroissements par comparaison d'inventaire	34
<i>II.3.1. Principe</i>	34
<i>II.3.2. Calcul de l'accroissement en volume</i>	34
<i>II.3.3. Calcul de l'accroissement en nombre : le passage à la futaie</i>	35
<i>II.3.4. Accroissement, cru et passage à la futaie en volume</i>	35
II.4. Calcul de l'accroissement en volume par sondage à la tarière de Pressler	36
<i>II.4.1. Principe de la méthode</i>	36
<i>II.4.2. Quelques rappels mathématiques</i>	36
<i>II.4.3. Principes mathématiques de la méthode</i>	38
<i>II.4.4. Méthodes de calcul</i>	39
II.5. Quelle méthode utiliser pour connaître l'accroissement des peuplements ?	41

III. Le suivi des peuplements

III.1. Cas des peuplements réguliers	42
<i>III.1.1. Une description relativement simple</i>	42
<i>III.1.2. Quelques outils utilisables pour le suivi et la prévision</i>	42
<i>III.1.3. Rôle des inventaires en peuplements réguliers</i>	44
III.2. Cas des peuplements irréguliers	45
<i>III.2.1. Etat d'équilibre et nécessité du contrôle</i>	45
<i>III.2.2. Les différentes méthodes d'inventaire permettant le contrôle</i>	46
<i>III.2.3. Comparaison technico-économique des différentes méthodes de contrôle</i>	57

Conclusion	63
-------------------	-----------

Bibliographie	63
----------------------	-----------

Dendrométrie des peuplements

Objectifs :

- **Etre capable de mesurer, utiliser et interpréter les principaux critères dendrométriques :**

- mesurer ou calculer les principaux critères dendrométriques,
- choisir un lot de critères pertinents pour décrire un peuplement forestier,
- situer les résultats obtenus sur un peuplement et les comparer aux valeurs usuelles.

- **Etre capable de mesurer l'évolution des peuplements :**

- calculer et interpréter le passage à la futaie, la production, l'accroissement moyen périodique par comparaison d'inventaire,
- calculer et interpréter l'accroissement moyen périodique par la méthode des sondages à la tarière de Pressler.

- **Etre capable de choisir une méthode pour suivre l'évolution des peuplements :**

- utiliser dans le cadre de l'aménagement ou la sylviculture les principaux outils de suivi des peuplements réguliers,
- choisir une méthode de contrôle pour les peuplements irréguliers en tenant compte des paramètres techniques et économiques.

La dendrométrie peut correspondre à deux besoins qui bien que proches l'un de l'autre peuvent être différenciés :

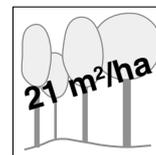
- Elle peut servir à mesurer de la manière la plus juste possible les volumes de bois lors des **transactions commerciales** (achats ou ventes de coupe). C'est là le large domaine de l'exploitation forestière.

- Elle peut également servir à définir et mesurer un certain nombre de critères dendrométriques pour **caractériser les peuplements et suivre leur évolution**. Ce domaine correspond à la sylviculture et à l'aménagement.

Bien entendu, il ne s'agit pas là de domaines cloisonnés et il existe de très nombreuses relations entre ces deux approches de la dendrométrie. Par habitude, on appelle dendrométrie des peuplements le second domaine qui est traité ici. On trouve parfois également l'appellation de biométrie.

I. Présentation et intérêt des critères dendrométriques

Dans le domaine de la sylviculture, si des critères qualitatifs sont très souvent utilisés pour décrire et comparer les peuplements, il est parfois nécessaire de faire appel à des données chiffrées pour affiner la description et mieux comprendre l'évolution d'une parcelle. De même, en aménagement, on doit souvent classer des parcelles, calculer des volumes, des

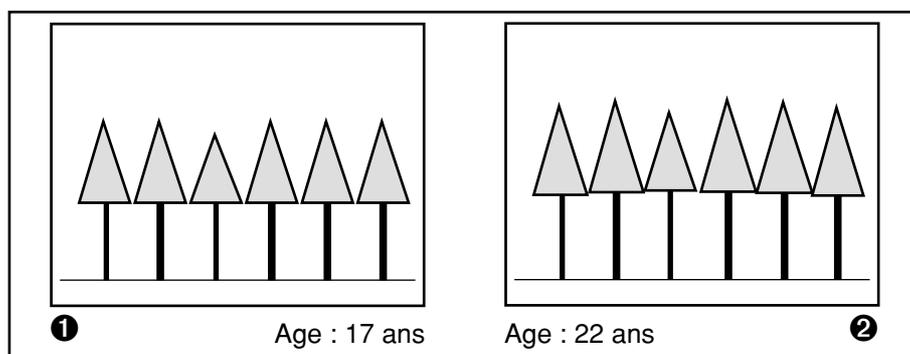


accroissements, des possibilités... et les données chiffrées sont donc aussi primordiales.

I.1. Présentation et détermination par la mesure ou le calcul des principaux critères dendrométriques

I.1.1. Comment caractériser les peuplements ?

- Examinons les deux peuplements ci dessous.

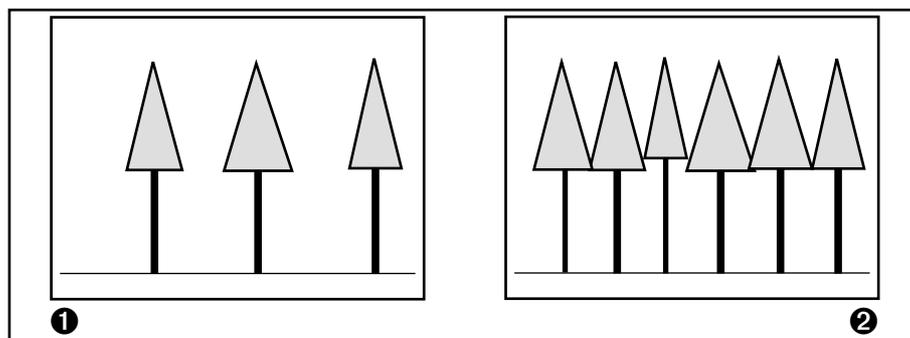


On constate que le premier peuplement a été planté il y a 17 ans et que le second a été planté il y a 22 ans. L'âge peut donc être un critère intéressant pour décrire et différencier les peuplements.

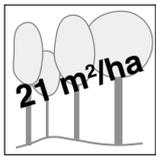
Imaginons cependant que les peuplements qui nous intéressent ne soient pas issus de plantation, mais soient issus d'une régénération naturelle ayant duré longtemps. Il devient alors difficile de donner un âge au peuplement car les arbres de ce peuplement peuvent avoir des âges très différents. On peut certes donner un âge moyen, mais celui-ci n'a que peu de valeur (écart-type de l'âge trop important).

L'âge est un critère intéressant pour décrire les peuplements dont les arbres ont tous sensiblement le même âge (peuplements réguliers), en revanche, il n'est pas intéressant pour les peuplements dont l'âge des arbres varie fortement (peuplements irréguliers).

- Les peuplements ci-dessous ont le même âge. On constate toutefois qu'ils sont différents. Quelle est cette différence ?

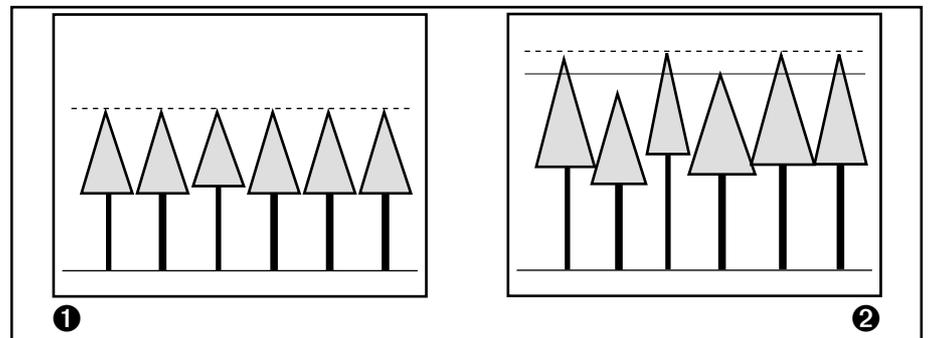


On peut compter 3 arbres sur le peuplement 1 et 6 sur le peuplement 2. Le peuplement 2 possède donc plus d'arbres que le peuplement 1 et cela sur une surface identique.



La **densité** correspond au nombre d'arbres sur une surface donnée. Elle permet de différencier les peuplements et est très souvent utilisée.

- Les deux peuplements présentés ci-après ont le même âge et la même densité. On constate toutefois une différence entre eux.

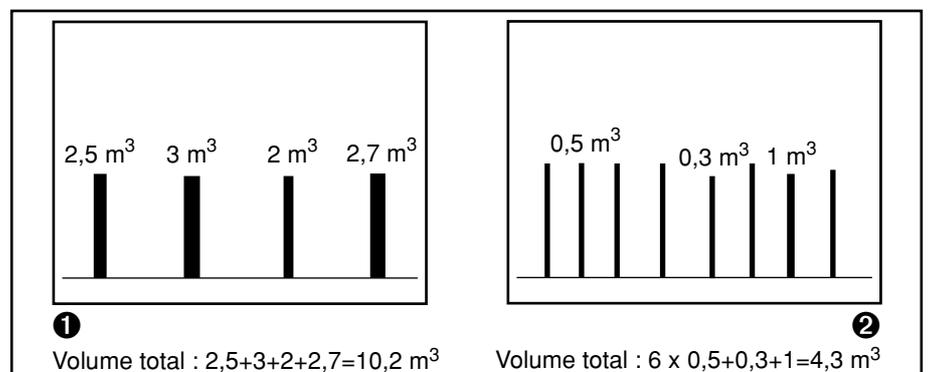


Ces deux peuplements diffèrent par la hauteur. Globalement, le peuplement 2 a une hauteur supérieure à celle du peuplement 1.

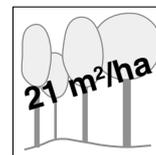
Dans certains peuplements, la hauteur est quasi-homogène (c'est le cas du peuplement 1), mais cela est assez rare (cas des peupleraies, par exemple). Dans la majorité des peuplements, on a donc une certaine hétérogénéité dans la hauteur des arbres comme c'est le cas sur le peuplement 2.

On peut ainsi définir une **hauteur dominante** (en pointillé) qui correspond à la hauteur des arbres les plus gros et les plus hauts, c'est-à-dire les arbres dominants. On peut également définir une **hauteur moyenne** (trait plein) qui correspond à la moyenne de toutes les hauteurs mesurées. La hauteur est aussi un critère quantitatif très utilisé. Elle intervient non seulement pour classer les peuplements réguliers, mais aussi pour estimer les potentialités stationnelles.

- On peut mesurer sur les deux peuplements ci-dessous le volume de chaque tronc.

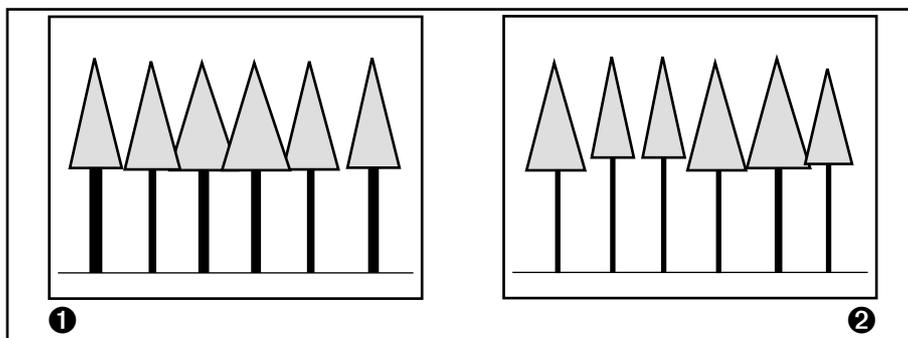


On constate que la somme des volumes est dans un cas supérieure à l'autre. Ainsi, le volume d'un peuplement peut différer notablement de celui d'un autre. Pour que les comparaisons soient possibles d'un peuple-



ment à un autre, on a l'habitude de rapporter ce **volume** à l'hectare. On utilise également parfois la **surface terrière** à la place du volume pour estimer la richesse du peuplement.

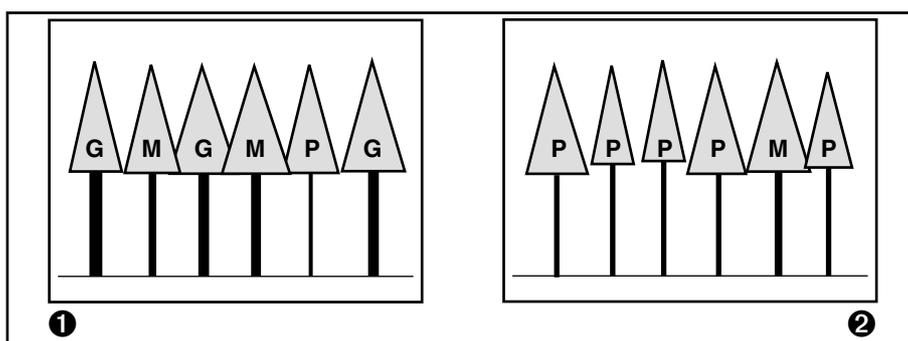
- Les deux peuplements présentés ci-dessous ne sont pas de la même essence, mais ils ont même âge, même densité et même hauteur. Pourtant, ils sont différents.



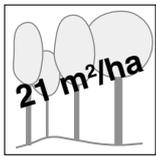
On peut d'emblée supposer que ces deux peuplements n'ont pas le même volume. Mais on remarque également qu'en moyenne, les arbres du peuplement 1 sont plus gros que ceux du peuplement 2.

Ainsi, si l'on mesure leur diamètre, on aura une moyenne plus élevée dans le cas 1 que dans le cas 2. Le **diamètre moyen** est donc un critère qui permet de différencier les peuplements. On se méfiera toutefois du diamètre moyen qui n'est représentatif du peuplement que si les diamètres ne sont pas trop hétérogènes. On retrouve ici le même problème de représentativité que pour l'âge.

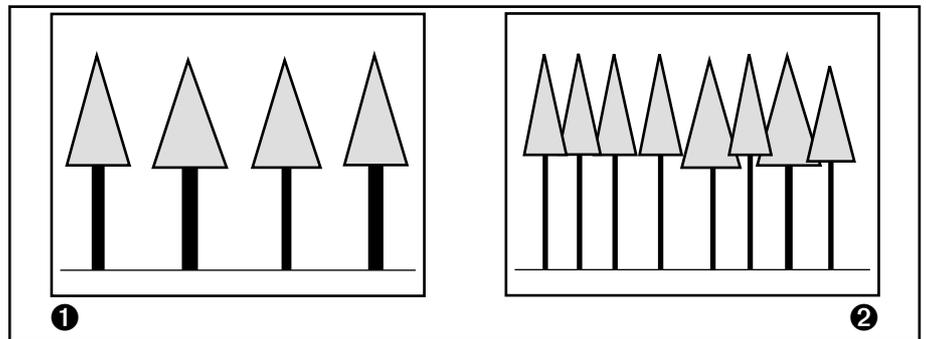
- Les deux peuplements ci-dessous présentent des arbres sur lesquels on a mis les lettres P, M et G qui signifient petit, moyen et gros.



Dans le cas du peuplement 2, on a une certaine homogénéité. Calculer un diamètre moyen aurait donc ici un sens car il donnerait une bonne description du peuplement. En revanche, pour le peuplement 1, on trouve une forte hétérogénéité dans les diamètres. Dans ce cas, donner **répartition en petits bois, bois moyens et gros bois** est intéressant car le diamètre moyen ne donnerait pas une bonne idée sur la diversité des diamètres.



- Les deux derniers peuplements présentés ci-dessous sont de la même essence. Ils n'ont pas la même densité, mais ils ont le même âge, la même hauteur, le même volume à l'hectare et la même surface terrière à l'hectare.



On peut dire que ces arbres ont un diamètre moyen différent, mais on peut également dire que le volume moyen des arbres dans le peuplement 1 est bien plus important que dans le peuplement 2. Ainsi, on constate qu'avec un même volume à l'hectare, ces deux peuplements ont un volume moyen (ou **volume de l'arbre moyen**) différent. Tout comme le diamètre moyen, le volume de l'arbre moyen n'est représentatif que lorsque les arbres ont des volumes assez peu différents.

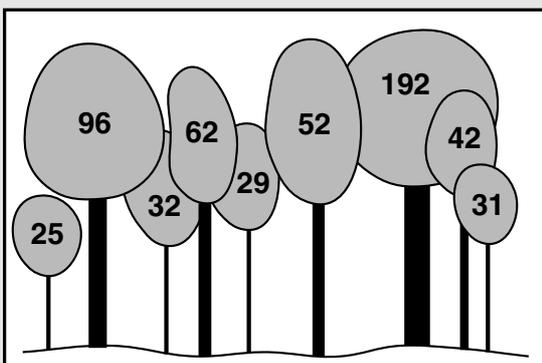
Pour conclure, on peut dire qu'il existe un certain nombre de critères courants qui permettent de décrire et différencier les peuplements. On cherchera donc ici à les appréhender, les mesurer, les calculer et à les interpréter.

1.1.2. Définition et détermination des principaux critères dendrométriques

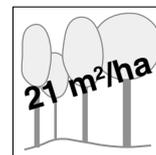
1.1.2.1. Age

L'âge est un critère descriptif et de classement pour de nombreux peuplements. Il peut cependant être très représentatif ou peu représentatif selon la nature des peuplements (voir encadré).

L'âge et sa validité



Le schéma suivant montre un peuplement sur lequel on a représenté l'âge des arbres. On peut calculer un âge moyen pour ce peuplement, il vaut environ 62 ans. Toutefois lorsqu'on calcule l'écart-type, on constate qu'il est proche de 50 ans ce qui nous donne un coefficient de variation de plus de 80 % ! On peut donc dans ce cas dire que l'âge moyen est peu représentatif de la diversité du peuplement. En règle générale, plus la diversité des âges est faible et plus l'âge est représentatif. Ainsi, l'âge ne sera un critère intéressant que pour les peuplements équiennes ou subéquiennes.



Si ce critère est souvent intéressant voire fondamental, il n'est pas toujours facile à déterminer sur le terrain. Ainsi, on peut le déterminer :

- en se référant à des dates connues (année de la coupe rase d'un taillis simple, année de plantation ou de régénération pour une futaie régulière...),
- en comptant le nombre de cernes sur des souches fraîchement coupées,
- en comptant le nombre de verticilles sur de jeunes peuplements résineux, les unités végétatives sur les jeunes feuillus,
- en se référant à une table de production,
- en pratiquant un sondage à cœur à l'aide d'une tarière de Pressler...

Bien souvent, aucune de ces données n'est disponible et on doit estimer l'âge en fonction de ce qu'on connaît concernant la croissance des essences considérées et des potentialités stationnelles. Ce n'est pas toujours très simple...

1.1.2.2. Densité

1.1.2.2.1. Cas général

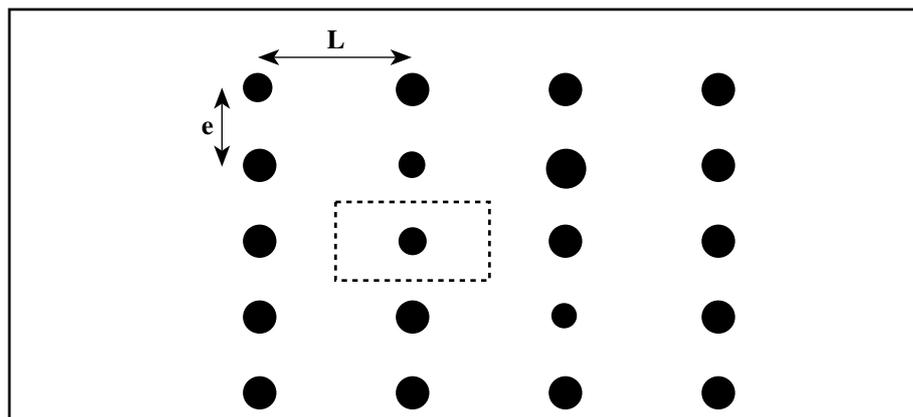
La densité correspond au nombre de tiges qu'on trouve sur une surface donnée. Si parfois la surface de référence est le mètre carré (comptage de semis) ou l'are, la plupart du temps il s'agit de l'hectare.

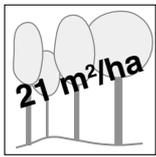
Pour déterminer la densité sur le terrain, on peut :

- inventorier le peuplement, c'est-à-dire procéder à un comptage intégral ou partiel (inventaire statistique) des arbres sur une surface donnée,
- compter localement le nombre d'arbres sur une petite placette quand le peuplement est suffisamment homogène,
- estimer l'écartement moyen entre les tiges et en déduire la densité (voir encadré)...

1.1.2.2.2. Cas particulier des plantations

Lors d'une plantation, les arbres sont dans la plupart des cas répartis sur des lignes selon le schéma suivant :





Sur ce schéma, e désigne l'espacement entre les arbres sur la ligne et L l'espacement entre les lignes.

On peut profiter de cette régularité dans la répartition des arbres pour appréhender la densité sans avoir besoin de connaître la surface couverte par le peuplement. Pour cela, on utilise la relation :

$$N/ha = 10\ 000 / (L \cdot e)$$

Lorsque l'écartement sur la ligne et la distance entre les lignes sont donnés en mètres, cette formule donne la densité du peuplement à l'hectare.

Justification du calcul et cas des arbres plantés en quinconce

Cette formule repose sur la définition de l'espace occupé par chaque arbre. En effet, chaque arbre occupe un rectangle de dimension L et e (en pointillé sur la figure). Ce rectangle a pour surface $L \cdot e$, exprimée en m^2 , si L et e sont donnés en mètres. Sachant qu'un hectare couvre $10\ 000\ m^2$, on peut mettre $10\ 000/L \cdot e$ arbres sur un hectare.

Pour les peuplements plantés en quinconce (c'est-à-dire avec tous les plants situés à des sommets de triangles équilatéraux), on peut mettre plus d'arbres sur une même surface et la densité vaut :

$$N/ha = 20\ 000/a^2 \cdot \sqrt{3},$$

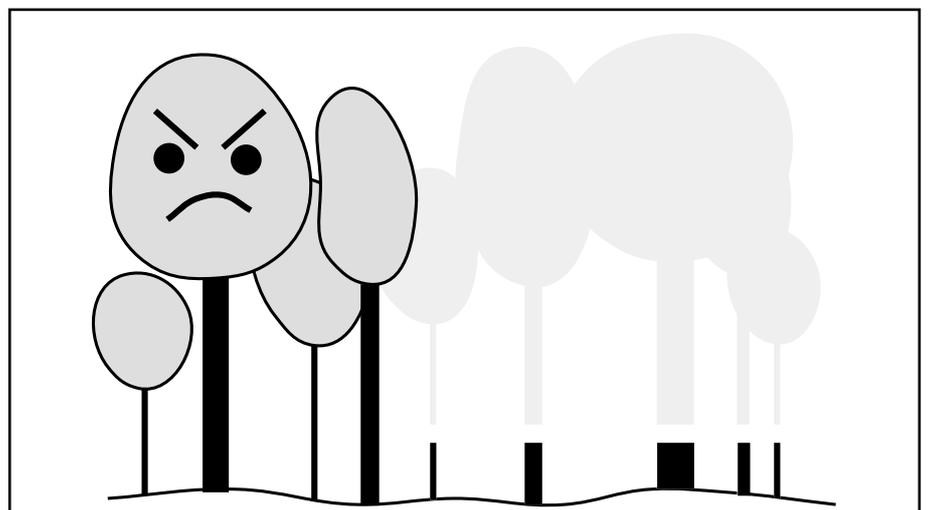
où a est l'espacement moyen entre les tiges.

On retiendra que dans les régénérations naturelles, les peuplements irréguliers (où l'on suppose que les arbres sont en moyenne répartis en quinconce pour une occupation maximale de l'espace), les plantations en quinconce, on augmente la densité d'environ 15 % ($2/\sqrt{3} \approx 1,15$) par rapport à une plantation en carré.

La formule précédente donnant la relation entre densité et espacement en tous sens peut permettre de calculer la densité dans un peuplement en estimant ou mesurant l'écartement moyen entre les arbres.

1.1.2.3. Surface terrière

La surface terrière correspond à la surface de la section horizontale des arbres à 1,30 mètre. Autrement dit, imaginons que l'on coupe tous les arbres d'un peuplement à 1,30 mètre de hauteur !





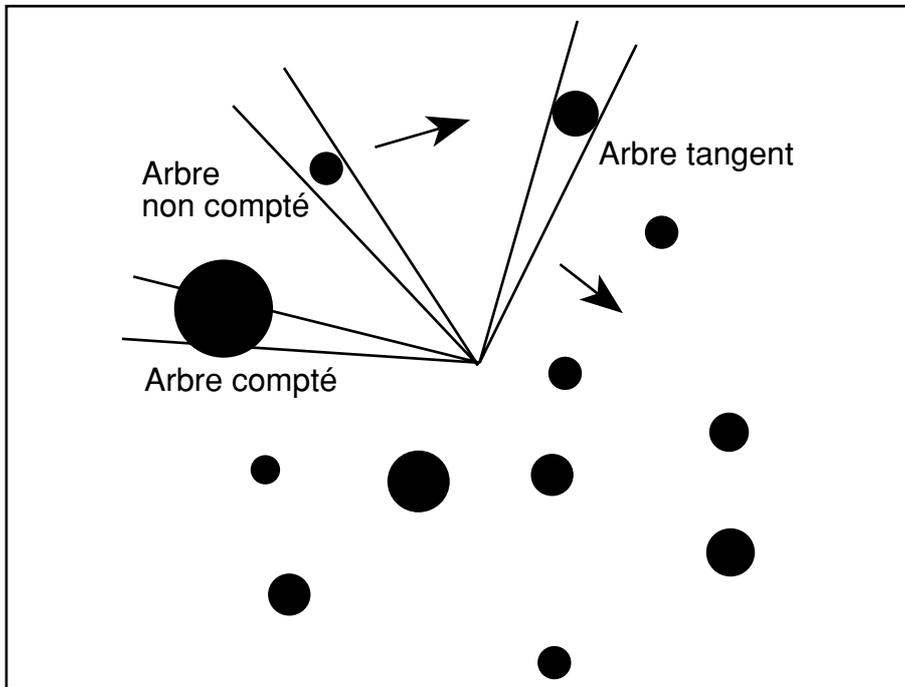
On peut ensuite mesurer pour chaque arbre la surface de la souche. Cette surface s'appelle la surface terrière, on la mesure en mètres carrés (m^2). Généralement, on ramène cette surface à l'hectare (valeur en m^2/ha). Bien entendu, ce n'est pas la méthode couramment employée pour déterminer la surface terrière d'un peuplement...

La surface terrière est un bon indicateur de la *richesse d'un peuplement*. Plus elle est élevée, plus le peuplement est riche.

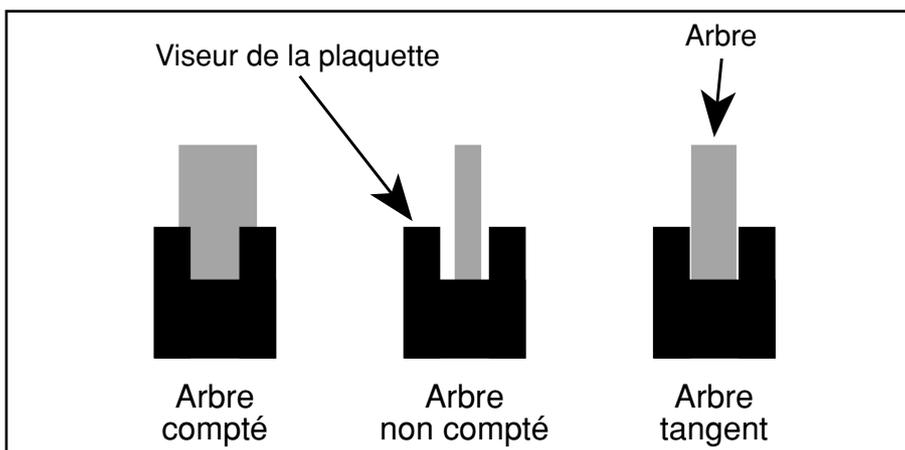
1.1.2.3.1. Mesure de la surface terrière à l'aide du principe relascopique

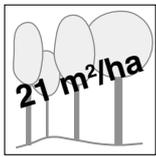
La mesure de la surface terrière peut facilement être réalisée sur le terrain à l'aide d'appareils simples d'emploi. La mesure repose sur les principes suivants :

- on vise en un tour d'horizon complet, sous un angle constant, les arbres à hauteur de poitrine.



Chaque arbre peut être compté ou non selon que son diamètre apparent est supérieur ou inférieur au repère utilisé.





• Bitterlich a démontré (on trouvera la démonstration dans divers ouvrages dont Pardé, 1988) qu'il existe une relation simple entre la surface terrière G et le nombre N d'arbres comptés :

$$G = 2\,500 (a/b)^2 N$$

où $2\,500(a/b)^2$ est une constante qui dépend de l'appareil utilisé. Un appareil de mesure peut tout simplement être une encoche d'une largeur déterminée a tenu à une distance b de l'œil (plaquette relascopique ou terrièromètre de Roustan). On choisit dans ce cas a et b pour que l'on ait une relation simple entre la densité et la surface terrière. Par exemple :

$a = 1 \text{ cm}$	$b = 50 \text{ cm}$	facteur 1
$a = 2 \text{ cm}$	$b = 100 \text{ cm}$	facteur 1
$a = \sqrt{2} \text{ cm}$	$b = 50 \text{ cm}$	facteur 2
$a = \sqrt{2}/2 \text{ cm}$	$b = 50 \text{ cm}$	facteur 1/2

Plusieurs appareils peuvent servir à mesurer la surface terrière :

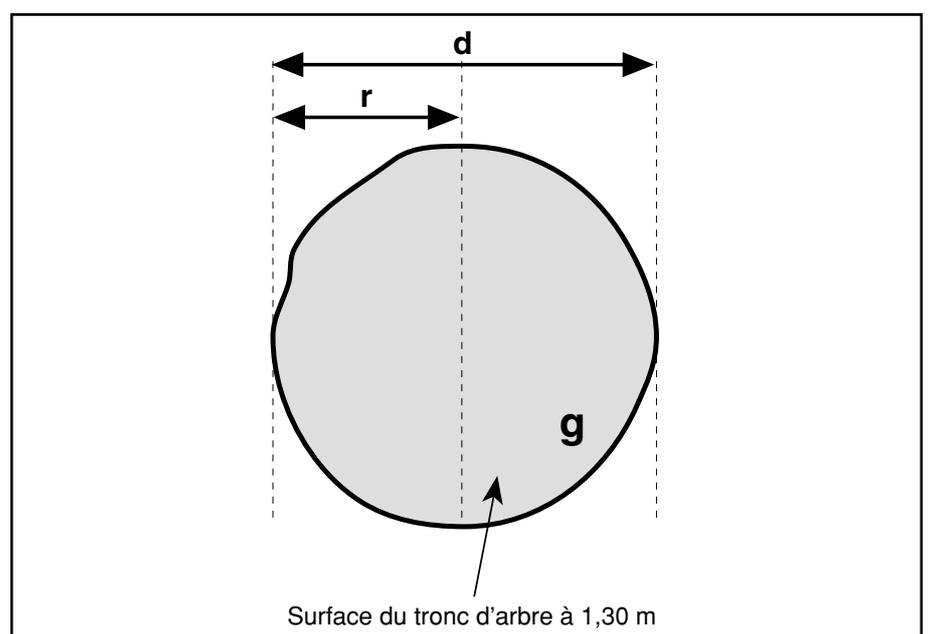
- la plaquette relascopique,
- le prisme relascopique,
- le relascope de Bitterlich...

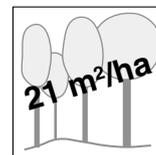
Seul ce dernier permet de faire de manière simple des mesures sur les fortes pentes.

1.1.2.3.2. Calcul de la surface terrière à l'aide d'un inventaire

Lorsqu'on regarde la section horizontale d'un arbre, on l'assimile souvent à un disque. Calculer la surface terrière d'un arbre revient alors à calculer la surface du disque ayant même diamètre que le tronc, c'est-à-dire :

$$g = \pi r^2 = \pi d^2 / 4$$





où r est le rayon, d le diamètre et g la surface terrière.

Si l'on veut la surface terrière du peuplement, il suffit de faire la somme des surfaces terrières individuelles. Ainsi, sachant qu'en inventaire, on mesure pour chaque arbre le diamètre, on peut par la suite calculer la surface terrière.

Comparaison entre la surface terrière calculée et celle mesurée
Selon les données ou les appareils dont on dispose, on choisira de mesurer ou calculer la surface terrière. Il arrive souvent que sur une même parcelle, la mesure de la surface terrière donne des valeurs différentes du calcul. Cela est dû au fait qu'il existe une incertitude sur les mesures effectuées (oubli d'arbres lors d'un inventaire intégral, mauvaise mesure du diamètre, jeu dans le bras mobile du compas, oubli d'arbres lors d'un tour d'horizon...). D'autre part, la mesure relascopique est ponctuelle : on peut trouver une autre valeur de surface terrière sensiblement différente quelques mètres plus loin. On a donc tout intérêt à multiplier les mesures pour obtenir des résultats fiables.

1.1.2.4. Répartition des diamètres

Savoir comment se répartissent les diamètres des arbres d'un peuplement est particulièrement important. On utilisera donc de nombreux paramètres qui permettront de détailler de manière plus ou moins précise cette répartition.

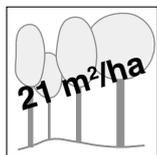
1.1.2.4.1. Le diamètre de l'arbre moyen

On peut d'emblée chercher à caractériser la répartition des diamètres par le *diamètre moyen*. Tout comme l'âge, ce critère a plus ou moins de sens selon le peuplement dans lequel on se trouve. En peuplement irrégulier, il présente très peu d'intérêt alors qu'il peut être intéressant dans les peuplements réguliers, surtout lorsqu'ils sont jeunes. La connaissance de *l'écart-type sur le diamètre* permet de plus d'affiner l'interprétation.

On peut calculer un diamètre moyen d_m qui correspond à la moyenne arithmétique des diamètres, mais on utilise assez souvent (et même principalement dans le monde de la recherche forestière) le diamètre de l'arbre moyen noté d_g . On l'obtient de la manière suivante :

- On peut mesurer ou calculer pour un peuplement donné la valeur de la surface terrière G et celle de la densité N . Le rapport entre ces deux grandeurs donne la valeur g_m : surface terrière moyenne du peuplement.
- On peut alors relier cette surface terrière à un diamètre, que nous noterons d_g , diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne.

$$g_m = \pi d_g^2 / 4 \text{ donc } d_g = (4g_m / \pi)^{1/2}$$



Remarques

L'indice g désigne pour tous les paramètres dendrométriques l'arbre de surface terrière moyenne (par exemple, H_g est la hauteur de l'arbre de surface terrière moyenne du peuplement, ou hauteur moyenne).

On peut se demander dans le cas du diamètre si d_g diffère beaucoup de d_m . On a entre ces deux valeurs la relation :

$$d_g = (d_m^2 + \sigma^2)^{1/2}$$

Ainsi, le diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne d_g est toujours supérieur au diamètre moyen arithmétique d_m . Assez souvent, ils diffèrent assez peu et ce d'autant plus que la dispersion des diamètres est faible.

1.1.2.4.2. La répartition en PB, BM, GB et TGB

Dans bien des peuplements, notamment les peuplements irréguliers, la seule connaissance du diamètre moyen ne suffit pas à bien connaître la distribution des diamètres. Ainsi, on peut avoir pour un diamètre moyen donné, par exemple 35 cm, aussi bien des gros et des petits que des moyens. Ainsi, il est important dans ce cas de connaître la répartition en petits bois (PB), bois moyens (BM) et gros bois (GB), voire très gros bois (TGB). Cette répartition peut aussi bien être donnée en nombre de tiges, en surface terrière ou en volume.

En sylviculture, on utilise le plus souvent les définitions suivantes :

	PB	BM	GB	TGB
Feuillus	20 et 25	30 à 45	50 à 60	65 et plus
Résineux	20 et 25	30 à 40	45 à 60	65 et plus

On désigne sous le terme de *perche* les tiges de 10 et 15 cm de diamètre. Très souvent, on adjoint aux gros bois les très gros bois que l'on regroupe sous le terme de gros bois (par exemple, on dit souvent pour les feuillus que les gros bois correspondent aux 50 et plus).

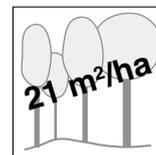
Si en aménagement, on travaille souvent avec les catégories de diamètre indiquées ci-dessus, il arrive aussi que l'on définisse les ruptures entre PB, BM et GB en fonction du diamètre d'exploitabilité. Dans ce cas :

- on définit le diamètre d'exploitabilité,
- on divise ce diamètre par 3 et par 3/2 pour obtenir les valeurs de rupture,
- on arrondit à la demi-classe la plus proche.

Par exemple :

Pour un diamètre d'exploitabilité de 60 cm :

$$- 60/3 = 20$$



$$- 2 \times 60/3 = 40$$

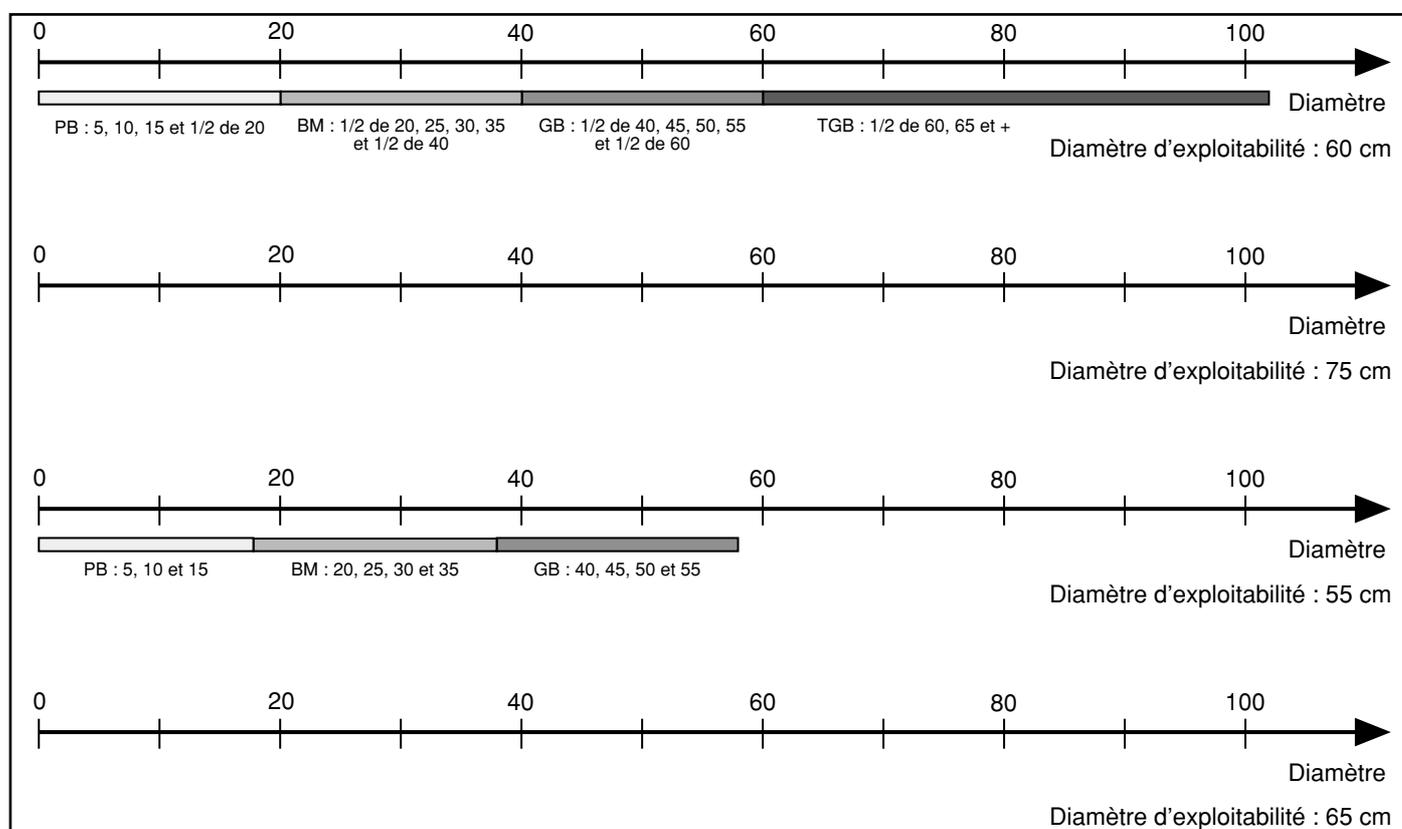
On a donc une rupture au milieu de la classe 20 et une au milieu de la classe 40. On prendra donc la moitié de la classe 20 dans les petits bois et l'autre moitié dans les bois moyens. De même la classe 40 sera partagée pour moitié dans les bois moyens et pour moitié dans les gros bois.

Pour un diamètre d'exploitabilité de 55 cm :

$$- 55/3 = 18,33$$

$$- 2 \times 55/3 = 36,66$$

On doit arrondir à la demi-classe la plus proche. Comme 18,33 est plus proche de 17,5 que de 20, la rupture se fait à 17,5. De même, 36,66 est plus proche de 37,5 que de 35 et la rupture se fait à 37,5. Ainsi les 15 sont en PB et les 20 en BM et les 35 en BM et les 40 en GB.

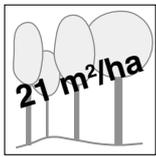


On peut remarquer que certaines catégories, les PB et parfois une partie de BM ne sont pas inventoriées, le diamètre de précomptage étant fixé à 20.

1.1.2.4.3. Le paramètre de synthèse GB/BM

On peut, à la suite de ce qui a été dit précédemment, calculer pour une forêt ou une parcelle la répartition en petits bois, bois moyens et gros bois en volume. On peut ainsi former le rapport *GB/BM* qui correspond au *volume des gros bois* divisé par le *volume des bois moyens*.

Plus ce rapport est élevé, plus la proportion de gros bois est importante par rapport à celle des bois moyens. Ainsi, ce rapport indique si la par-

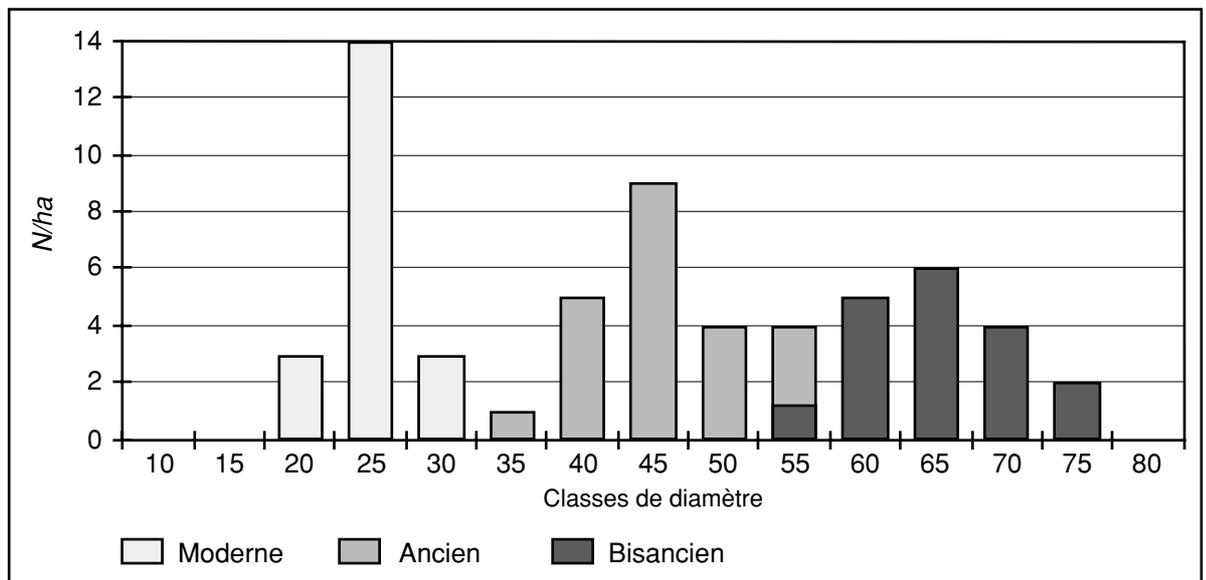


celle ou la série est déséquilibrée ou non dans les gros bois. Il est d'autant plus sensible qu'il est défini avec les proportions en volume. En effet, les gros bois ayant un fort volume unitaire, une petite augmentation de leur importance en nombre induit une forte augmentation en volume.

Le rapport GB/BM est beaucoup utilisé en aménagement, pour classer les parcelles ou pour juger de l'état d'une parcelle ou d'une série.

1.1.2.4.4. Les courbes donnant la densité en fonction des classes de diamètre

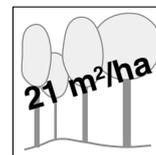
Si la répartition en petits bois, bois moyens et gros bois donne des informations supplémentaires par rapport au seul diamètre de l'arbre moyen, on peut encore chercher à affiner la connaissance de la distribution des diamètres. Pour cela on utilise souvent un résultat d'inventaire qui donne pour chaque classe de diamètre le nombre de tiges. On peut facilement en déduire un graphique qui pourra être utilisé dans le cadre de l'aménagement ou la sylviculture.



1.1.2.5. Le volume

Le volume, comme le montrent déjà certains paramètres calculés avant (GB/BM, notamment), est un critère dendrométrique particulièrement important pour caractériser un peuplement. S'il trouve auprès de nombreux forestiers un écho important, c'est en raison du fait qu'on peut le relier aux transactions commerciales. En effet, connaître le volume présent sur une parcelle peut permettre de déduire la récolte potentielle qu'on pourra y effectuer (lors d'un calcul de possibilité, par exemple).

Si le volume est couramment utilisé comme paramètre dendrométrique, il n'en est pas simple d'utilisation pour autant. D'une part, il faut toujours bien veiller à *définir le volume dont on parle* (volume aménagement comprenant tige et houppier, volume bois fort tige à la découpe 7 cm, volume bois d'œuvre...). D'autre part, si l'on peut connaître la surfa-



ce terrière avec une précision généralement bonne, il n'en est pas toujours de même pour le volume.

1.1.2.5.1. Approche du volume par un tarif à une entrée

- On utilise souvent des **tarifs à une entrée** pour déterminer le volume d'un peuplement. Ils donnent le volume en fonction du diamètre. Ils sont plus simples à utiliser que les tarifs à deux (voire trois) entrées, car ils permettent de cuber sans connaître la hauteur de grume ou d'autres paramètres, mais sont moins précis.

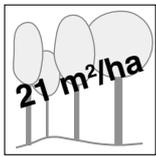
On peut dire de ces tarifs qu'ils offrent un bon compromis entre la qualité de l'estimation du volume et le temps passé à mesurer les arbres.

- En aménagement, on a pour habitude d'utiliser des tarifs à une entrée donnant le volume grume découpe bois fort ainsi que le volume du houppier (« **tarif aménagement** »). Il ne faut donc pas s'étonner lorsqu'on trouve des volumes importants avec ces tarifs car ils tiennent compte à la fois du bois d'œuvre et du bois de feu ou de trituration.

- On peut citer les **tarifs Algan** (du nom de leur inventeur) comme tarifs à une entrée couramment utilisés en aménagement. Ce dernier a remarqué, dans les peuplements résineux de l'Est de la France que :

- le volume décuple quand le diamètre passe de : 20 à 50
25 à 65
30 à 80
- le volume double quand son diamètre passe de : 20 à 25
30 à 40
45 à 60
65 à 90

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
20	0,1	0,1	0,1	0,15	0,15	0,15	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,25	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
25	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
30	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1	1	1	1,1
35	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1	1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6
40	0,7	0,8	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	2	2,1	2,2
45	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8
50	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2,1	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8	3	3,1	3,2	3,3	3,5	3,6
55	1,5	1,6	1,8	2	2,1	2,3	2,4	2,6	2,8	2,9	3,1	3,3	3,4	3,6	3,8	3,9	4	4,2	4,4	4,5
60	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4,2	4,4	4,6	4,8	5	5,2	5,4	5,6
65	2,1	2,4	2,6	2,9	3,1	3,4	3,6	3,8	4,1	4,3	4,5	4,8	5	5,3	5,5	5,8	6	6,2	6,5	6,7
70	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4	4,2	4,5	4,8	5,1	5,3	5,6	5,9	6,2	6,5	6,8	7,1	7,3	7,6	7,9
75	2,9	3,2	3,6	3,9	4,3	4,6	4,9	5,2	5,6	5,9	6,2	6,5	6,9	7,2	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,2
80	3,3	3,7	4,1	4,5	4,9	5,3	5,6	6	6,4	6,7	7,1	7,5	7,9	8,3	8,7	9,1	9,4	9,8	10,1	10,5
85	3,8	4,2	4,7	5,1	5,6	6	6,4	7	7,2	7,6	8,1	8,5	9	9,4	9,9	10,3	10,7	11,1	11,5	12
90	4,3	4,8	5,3	5,8	6,3	6,8	7,2	7,7	8,1	8,6	9,1	9,6	10,1	10,6	11,1	11,6	12,1	12,5	13	13,5
95	4,8	5,4	5,9	6,5	7	7,6	8,1	8,6	9,1	9,7	10,2	10,8	11,3	11,9	12,4	13	13,5	14	14,6	15,1
100	5,4	6	6,6	7,2	7,8	8,4	9	9,6	10,2	10,8	11,4	12	12,6	13,2	13,8	14,4	15	15,6	16,2	16,8



- le volume quintuple quand le diamètre passe de 35 à 70...

Fort de ces constatations, Algan a élaboré 20 tarifs tels que le volume de l'arbre de 45 augmente de 0,1 m³ d'un tarif au suivant. On choisit donc un numéro de tarif en fonction du peuplement et ensuite, on obtient le tarif à une entrée pour cuber tous les arbres.

On a pour les tarifs Algan (tout comme pour les tarifs Schæffer qui seront vus plus loin), la relation suivante, découlant directement de leur construction :

$$10 \cdot V_{45} = n^{\circ} \text{ de tarif} + 8$$

Par construction, les tarifs Algan indiquent les volumes totaux des arbres, mais en choisissant correctement un numéro de tarif plus faible, on peut obtenir avec une précision correcte le volume bois fort.

- Les tarifs Algan n'étant pas exprimés sous forme mathématique, ils ne sont pas « lissés » et présentent quelques irrégularités ou incohérences. Pour remédier à cela, des **tarifs Schæffer** (nom de l'inventeur) rapides ont été créés. Ils ne correspondent qu'à une formulation mathématique des tarifs Algan. On peut les exprimer sous la forme :

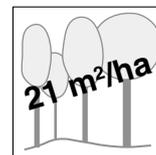
$$V(D) = V_{45}/0,14 \cdot (D-0,05) \cdot (D-0,10)$$

où $V(D)$ est le volume pour la classe de diamètre D , V_{45} le volume de l'arbre de diamètre 45 et D le diamètre *en mètres*.

Tout comme pour les tarifs Algan, on possède 20 tarifs Schæffer rapides dont le numéro est donné comme pour les tarifs Algan en fonction du volume de l'arbre de diamètre 45.

- On a parfois besoin de tarifs pour lesquels *le volume augmente moins vite en fonction du diamètre*. Cela est nécessaire quand on a de petites parcelles aux conditions écologiques homogènes. En effet, les tarifs rapides conviennent bien pour les parcelles hétérogènes ou les grandes forêts. Un sol fertile donnera une plus forte augmentation de volume pour un diamètre donné qu'un sol peu fertile (les arbres étant alors plus hauts). Comme on trouve généralement les arbres les plus gros sur les sols les plus fertiles, il est normal que le tarif choisi donne une augmentation rapide du volume en fonction du diamètre. En revanche, pour les stations homogènes, l'augmentation du volume en fonction du diamètre doit être lente d'où la création des tarifs lents.

Ainsi, on emploie les **tarifs lents** pour les petites parcelles homogènes et les tarifs rapides pour les grandes parcelles et pour cuber toute une forêt. Un tarif lent en un endroit donné peut évoluer au cours du temps, notamment lorsque les arbres d'un peuplement régulier vieillissent.



Les tarifs lents s'expriment de la façon suivante :

$$V(D) = V_{45}/0,18 \cdot D \cdot (D-0,05)$$

où $V(D)$ est le volume pour la classe de diamètre D , V_{45} le volume de l'arbre de diamètre 45 et D le diamètre *en mètres*.

• On a souvent à se poser le choix du numéro de tarif pour un Algan, un Schæffer rapide ou un Schæffer lent. Il existe de nombreuses règles :

- cubage précis et répété d'arbre de diamètre 45 (grume et houppier) et utilisation de la formule $10V_{45} = n^{\circ} \text{ de tarif} + 8$,

- pour le Sapin ou l'Épicéa, on a la relation suivante :

$$V_{50} = H/10$$

où V_{50} est le volume des arbres de diamètre 50 et H leur hauteur totale,

- pour le Hêtre, on a la relation suivante :

$$V_{45} = H/10$$

où V_{45} est le volume des arbres de diamètre 45 et H leur hauteur totale.

On pourra trouver d'autres méthodes pour le choix d'un tarif Algan ou Schæffer dans Pardé (1988).

Les tarifs Algan ou Schæffer peuvent également servir à calculer un volume grume découpe bois fort, voire un volume grume. Bien entendu, on a dans ce cas un numéro de tarif plus faible que dans le cas d'un volume aménagement.

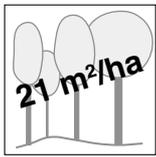
Par exemple, le tableau suivant (Bruciamacchie, 1989) permet de connaître le tarif lent donnant le volume (bois fort ?) dans un peuplement où le chêne domine.

Ho	17	18	19	21	22	24	26	29	30	33
Tarif	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

où H_o est la hauteur totale des chênes de diamètre 50 en mètres.

Pour conclure en ce qui concerne le choix de tarif, on peut constater qu'il dépend souvent plus largement des habitudes que d'un choix raisonné. Par exemple, il suffit de changer de département, voire de centre de gestion pour trouver des numéros sensiblement différents alors que les conditions naturelles et les peuplements varient très peu...

• Très souvent, un volume aménagement ne donne pas le volume réel, mais un volume plus ou moins approché. On dit alors du volume donné qu'il est conventionnel. C'est en partant de cette idée que divers gestion-



naires de futaie jardinée, tant en France qu'en Suisse ont décidé, au début de ce siècle (1892) d'adopter un **tarif unique** dont le but n'est plus de chercher à donner exactement le volume, mais de servir de référence et de permettre des comparaisons (à court terme sur des forêts différentes et à long terme sur la même forêt).

Les peuplements jardinés pour lesquels cette idée est apparue évoluant assez peu dans le temps, le choix d'un tarif conventionnel immuable n'est en rien absurde. Pour différencier ce que donne ce tarif d'un volume réel, les auteurs ont décidé d'utiliser la **sylve (sv)** comme unité. On peut passer des sylves aux m³ en multipliant les volumes trouvés par un coefficient expérimental (1,05 ; 0,97...).

Le tarif en sylves est donné par le tableau suivant :

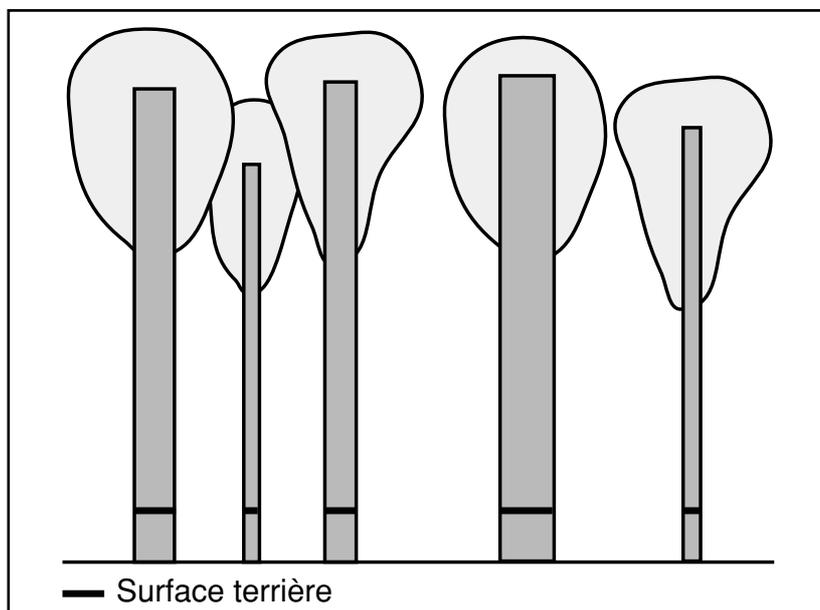
Diamètre	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Volume en sv	0,047	0,136	0,270	0,452	0,686	1,016	1,429	1,898	2,419	2,989	3,603	4,259	4,953	5,681	6,440	7,225	8,033	8,860	9,704

Il donne des volumes (totaux : bois fort et branches) très proches de la réalité (1 m³ = 1 sv) pour des pessières-sapinières jardinées ayant une hauteur dominante de 30 m.

Remarque : utilité du tarif en sylves

Ce tarif étant purement conventionnel, on peut se demander dans quelle mesure il ne fait pas double emploi avec la surface terrière. C'est en grande partie vrai, mais si décrire le capital d'un peuplement en surface terrière est parlant ($G = 27 \text{ m}^2/\text{ha}$ donne autant d'informations à un forestier que $V = 319 \text{ sv}$), les accroissements en $\text{m}^2/\text{ha}/\text{an}$ sont à l'heure actuelle beaucoup moins bien perçus que ceux en $\text{sv}/\text{ha}/\text{an}$ ou en $\text{m}^3/\text{ha}/\text{an}$! Cela changera peut-être...

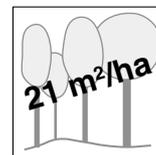
1.1.2.5.2. Approche rapide du volume par la surface terrière



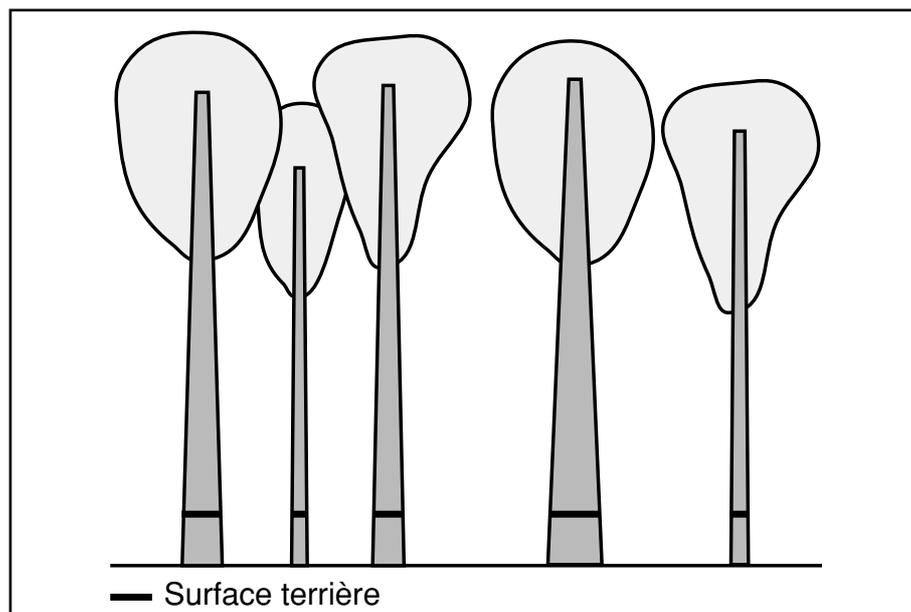
Connaissant la surface terrière d'un peuplement, on pourrait en déduire rapidement le volume en multipliant la surface terrière par la hauteur totale moyenne du peuplement

$$(V = G \times H).$$

Cela serait possible si tous les arbres du peuplement étaient parfaitement cylindriques.



En réalité, les arbres possèdent une certaine décroissance et ne sont pas cylindriques.



Il faut donc définir un coefficient correcteur qui tient compte de la décroissance des arbres. Celui-ci s'appelle F (*coefficient de forme*) et vaut par définition :

$F = \text{volume commercial} / \text{volume du cylindre correspondant}$

c'est à dire :

$$F = (\pi D_m^2 / 4 \cdot L) / (\pi D_{1,30}^2 / 4 \cdot L) = D_m^2 / D_{1,30}^2$$

Ainsi, en utilisant ce coefficient F , on peut écrire :

$$V = F \cdot G \cdot H$$

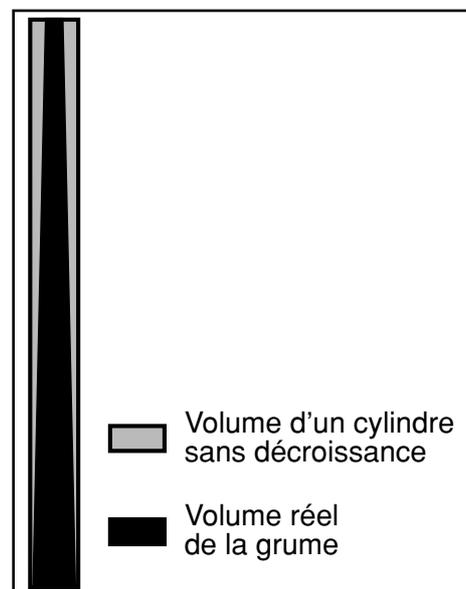
Le coefficient F correspondant au volume bois fort est généralement voisin de **0,5**. Toutefois, on peut trouver des coefficients supérieurs lorsqu'on s'intéresse à une découpe inférieure (par exemple, volume jusqu'à la première couronne en taillis avec réserves).

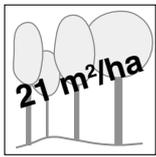
1.1.2.6. Le volume de l'arbre moyen

Le volume d'un peuplement étant à présent défini, on peut définir le volume unitaire moyen des tiges ou volume de l'arbre moyen (VAM) :

$$\text{VAM} = V / N$$

Même si ce volume moyen recouvre parfois une forte hétérogénéité, il est très souvent utilisé dans la plupart des types de peuplement (futaie régulière, futaie jardinée, réserve de taillis-sous-futaie...)

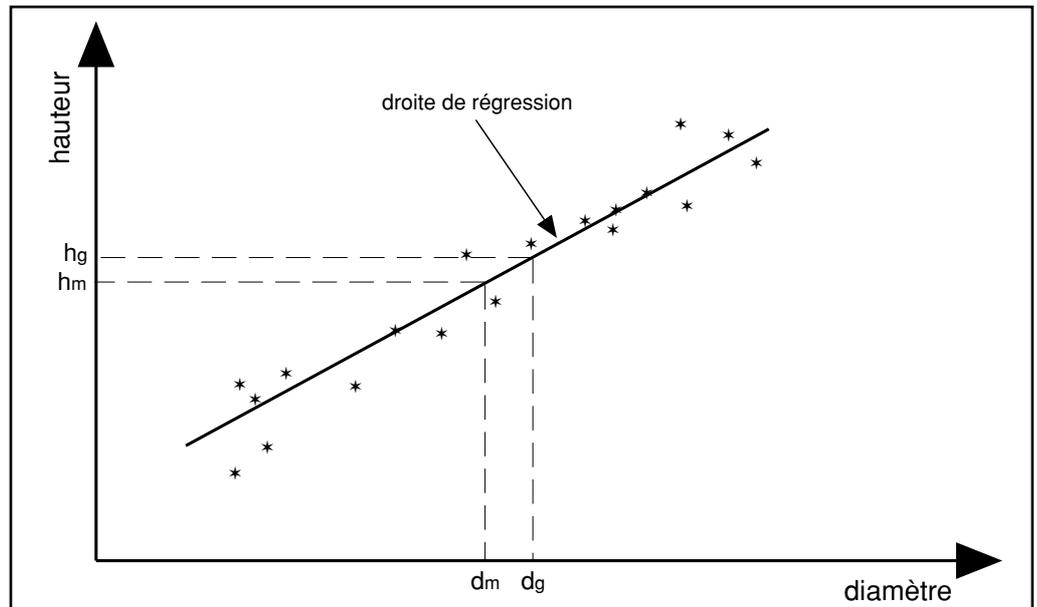




1.1.2.7. Hauteur dominante et hauteur moyenne

1.1.2.7.1. Hauteur moyenne (H_g)

Tout comme on peut définir un diamètre moyen d_g , on peut définir une hauteur moyenne H_g . Toutefois, l'arbre de surface terrière moyenne n'étant pas facilement appréhendable, on ne peut obtenir la hauteur de l'arbre de surface terrière moyenne que d'une manière graphique (voir figure ci-dessous).



Très souvent, on se contentera de faire la moyenne arithmétique des hauteurs pour approcher la hauteur moyenne.

1.1.2.7.2. Hauteur dominante (H_o)

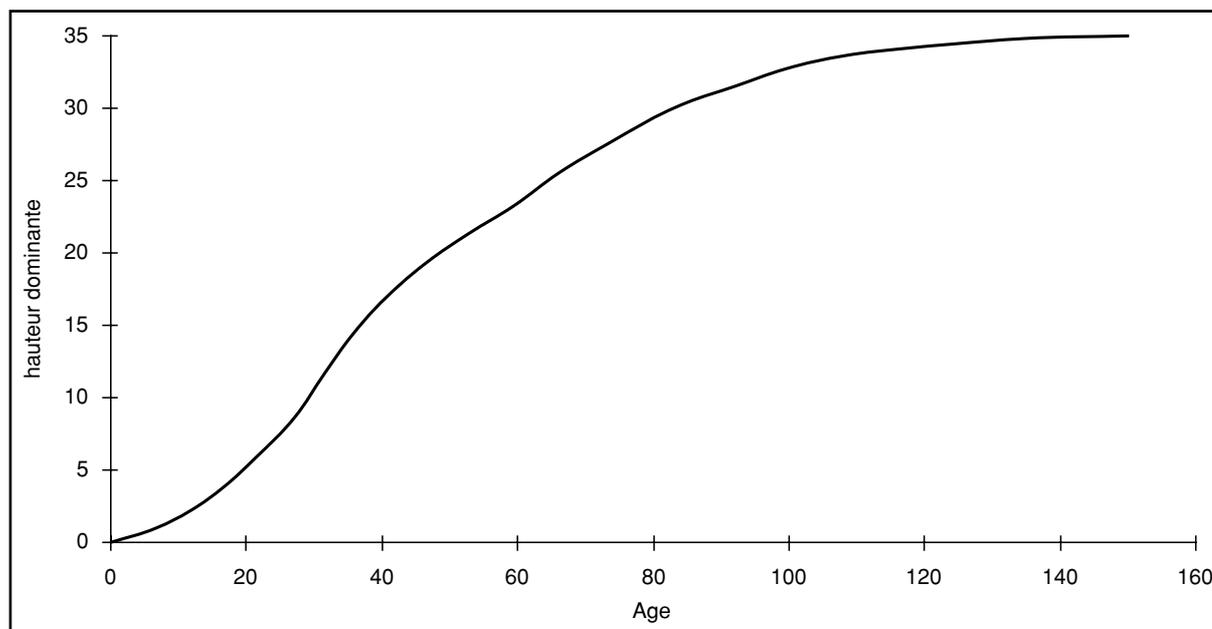
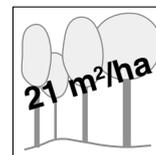
La hauteur moyenne d'un peuplement, si elle est intéressante, n'est pas toujours facile à mesurer ou à appréhender. En effet :

- elle nécessite un **grand nombre de mesures de hauteur**, ce qui peut être fastidieux,
- elle peut **changer rapidement à la suite d'une coupe** (une éclaircie, par exemple).

D'autre part, la hauteur moyenne ne reflète pas toujours bien les potentialités stationnelles car un sous-étage important peut fausser les résultats.

Ainsi, la notion de *hauteur dominante* a été introduite. Intuitivement, elle correspond à la hauteur des arbres ayant le statut social de dominant. On la définit de manière plus précise en disant que c'est la hauteur des 100 plus gros arbres sur un hectare.

Cette hauteur dominante est un bon indicateur des potentialités stationnelles. Elle permet de classer les peuplements réguliers car elle évolue au cours du temps. Par exemple, le graphique suivant donne l'évolution de la hauteur dominante dans une futaie régulière de Hêtre.



1.1.2.8. Le facteur d'élancement

1.1.2.8.1. Définition

On définit le facteur d'élancement, ou de stabilité par le rapport :

$$H_g/D_g$$

Il peut aussi bien être défini à l'échelle d'un arbre qu'à l'échelle d'un peuplement. Plus ce facteur est élevé, plus le peuplement est élancé et instable. Un peuplement instable est sensible aux chablis (arbres renversés par le vent ou la neige) ainsi qu'aux bris de tronc ou de branche.

Le facteur d'élancement peut prendre différentes valeurs. On donne généralement les bornes suivantes :

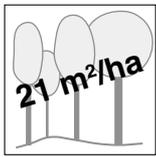
- $H_g/D_g < 80$, pas de risque en général ;
- $80 < H_g/D_g < 100$, ne pas faire d'éclaircie forte ;
- $H_g/D_g > 100$, gros risques.

Ces valeurs dénotent des risques par rapport au vent. Par rapport à la neige et aux bris qu'elle peut occasionner, un coefficient inférieur à 90 est souhaitable.

On utilise parfois d'autres facteurs proches de H_g/D_g , par exemple H_o/D_g ou H_o/D_o . S'ils traduisent globalement l'idée de la stabilité du peuplement, ils ne donnent pas toujours les mêmes domaines de stabilité (c'est-à-dire les bornes précisées ci-dessus).

1.1.2.8.2. Utilisation en futaie régulière

Le facteur d'élancement est souvent utilisé lors des dépressages ou éclaircies en futaie régulière. En effet, les peuplements réguliers (surtout les jeunes, gaulis, perchis, jeune futaie...) sont parfois particulièrement



instables et une intervention doit être raisonnée en tenant compte de cette stabilité.

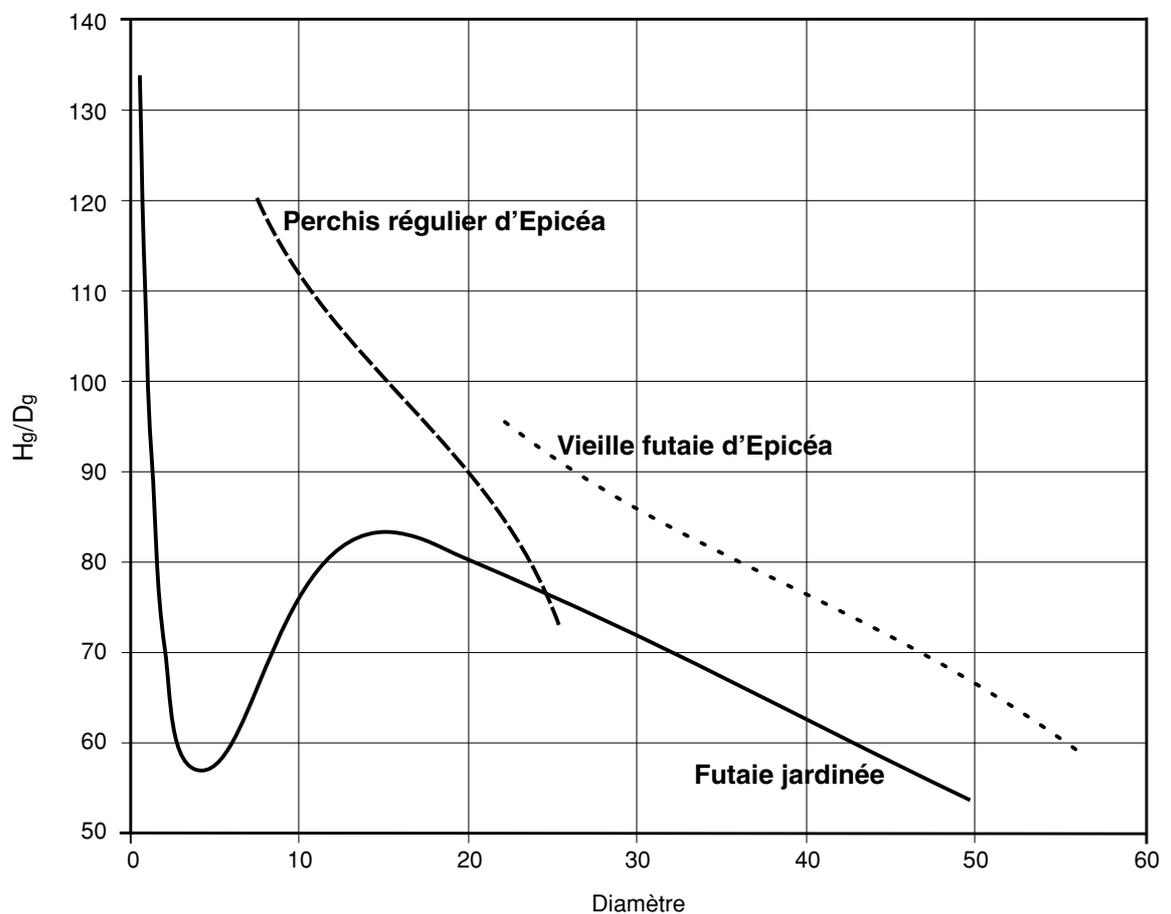
Toutefois, ce n'est pas le facteur d'élanement qui permet de déterminer la date d'intervention. Il permet juste de prévoir les réactions du peuplement à une intervention donnée (dépressage important, éclaircie forte par le haut...) et de modifier éventuellement cette intervention pour l'adapter au peuplement.

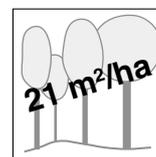
1.1.2.8.3. Evolution en futaie jardinée

Les futaies jardinées - ou du moins les peuplements jardinés proches de l'équilibre - ont la réputation d'être stables. Le graphique suivant propose une comparaison classe de diamètre par classe de diamètre de peuplements jardinés et réguliers (Kern (1966), *in* Schütz (1989)). Il confirme les idées généralement admises.

On constate qu'il existe une période d'instabilité relative pour les arbres de futaie jardinée quand ils ont un diamètre compris entre 10 et 20. Cela correspond à la phase « sprinter », c'est-à-dire à une phase de forte croissance en hauteur et de faible croissance en diamètre. Si les arbres à ce stade sont un peu fragiles, la charpente du peuplement, constituée de gros arbres, est elle en permanence solide.

Pour ce qui est des peuplements réguliers, certains stades sont globalement instables (stade perchis, par exemple), alors que les stades âgés sont assez stables.





1.2. Quels critères choisir en fonction d'un peuplement donné ?

1.2.1. Les utilisateurs et leurs besoins

Généralement, les sylviculteurs, les aménagistes, les chercheurs ne calculent pas des critères dendrométriques pour le seul plaisir, mais pour répondre à des besoins bien particuliers. Par exemple, le sylviculteur devra décrire au mieux les peuplements avant de choisir un mode d'intervention, l'aménagiste devra classer des parcelles, l'exploitant forestier devra estimer au mieux le volume présent...

Ainsi, les paragraphes qui suivent vont tenter de donner les critères les plus utilisés en fonction des peuplements et des différents utilisateurs.

1.2.2. Les besoins de l'aménagiste

Le tableau ci-dessous donne les principaux critères utilisés par l'aménagiste. Il est bien entendu sujet à discussion et interprétation.

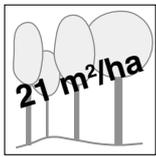
	Futaie régulière	Taillis simple	Futaie jardinée	Taillis-sous-futaie	
				Taillis	Réserve
Age	+++	+++	-	++	++ / -
Hauteur	+	+	-	+	-
Surface terrière	+	+	+++	-	++
Volume	+++	++	+++	-	+++
Volume de l'arbre moyen	+++	-	++	-	+
GB/BM	+++	-	+++	-	+
Répartition en PB, BM et GB	-	-	+++	-	+++

+++ très important, ++ important, + peut parfois être utile, - inutile ou absurde

Le critère âge pour la réserve des taillis-sous-futaie peut être perçu de deux façons. L'âge global n'est en aucun cas intéressant (-) car la réserve est un peuplement irrégulier. En revanche, la connaissance des différentes classes d'âge (baliveaux, modernes, anciens...) est utile (++).

1.2.3. Les besoins du sylviculteur

Le tableau concernant le sylviculteur diffère par certains points de celui de l'aménagiste. Certains critères comme la densité apparaissent, d'autres, comme le volume perdent de leur intérêt. En effet, le volume est important pour l'aménagiste car il sert à calculer les possibilités et à classer les parcelles. De plus, il permet de se faire une idée du volume commercialisable. En revanche, le sylviculteur préfère la surface terrière très rapide à mesurer sur le terrain et qui ne pose pas les problèmes que peut engendrer le volume (choix d'une découpe, incertitudes liées aux tarifs de cubage...).



	Futaie régulière		Taillis simple	Futaie jardinée	Taillis-sous-futaie	
	Jeune	Agée			Taillis	Réserve
Age	+++	++	+++	-	+++	++ / -
Hauteur	+++	++	+++	+	+++	+
Densité	+++	++	+	++	+	++
Diamètre moyen	+++	++	+	-	-	-
Répartition en PB, BM et GB	-	+	-	+++	-	+++
Courbe N=f(D)	++	+++	-	+++	-	+++
H/D	+++	+	-	+	-	+
Surface terrière	-	+++	+	+++	-	+++
Volume	-	+	-	+	-	+
Volume de l'arbre moyen	-	++	-	+	-	+

+++ très important, ++ important, + peut parfois être utile, - inutile ou absurde

Comme pour le tableau précédent, certains classements sont peut-être discutables, mais c'est sur le terrain qu'il faut, au cas par cas, choisir et déterminer les bons critères.

1.3. Les valeurs usuelles des principaux critères dendrométriques

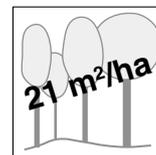
1.3.1. Préambule

Le dialogue suivant transcrit dans les grandes lignes les propos d'un examinateur et d'un candidat à l'examen du BTSA Productions Forestières, session de juin 1996.

- Alors, quelles valeurs me proposez-vous pour ce peuplement ?
- On a une hauteur de 32 mètres, une densité de 3 000 tiges/ha et un VAM de 12-13 m³...
- Donc, si je vous comprends bien, on a environ 3 000 x 13 ≈ 40 000 m³/ha sur cette parcelle...
- (à la calculatrice : 3 000 x 13 ≈ 40 000), Tout-à-fait.
- Ce sera tout.

Bien entendu, ce candidat n'a pas réalisé que le volume de bois qu'il annonçait permettait de « poser » sur la parcelle un cube de bois de 4 mètres de haut la recouvrant entièrement !

On va donc chercher à donner ici des ordres de grandeur des principales données dendrométriques concernant les peuplements. Cela évitera bien entendu de dire des absurdités, mais aussi de permettre des comparaisons avec des valeurs de référence lors de la découverte de nouveaux peuplements.



1.3.2. Valeurs usuelles pour les différents types de peuplements

1.3.2.1. Cas du taillis simple

Dans le cas du taillis simple, les brins ont une croissance d'abord rapide puis ensuite beaucoup plus lente. En règle générale, les taillis simples ont une hauteur dominante relativement faible, même à maturité ($H_0 \leq 20-25$ m).

Les taillis perdant leur faculté de rejeter de souche lorsqu'ils vieillissent trop, on les coupe relativement jeunes. Ils ont donc à maturité 20, 25, voire 30 ou 35 ans.

1.3.2.2. Cas de la futaie régulière

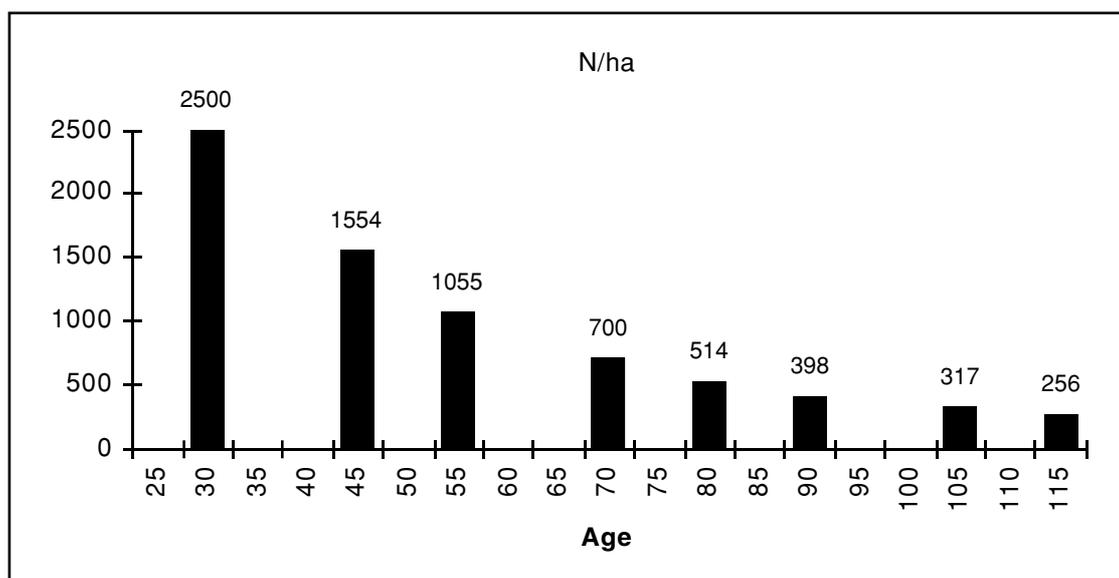
1.3.2.2.1. Age

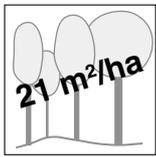
L'âge est bien entendu très variable en futaie régulière. Pour les essences à croissance lente comme le chêne, on a un âge d'exploitabilité pouvant aller jusqu'à 240 ans. Pour le hêtre, il est de l'ordre de 90-120 ans tout comme pour le sapin pectiné ou l'épicéa en montagne. Pour les feuillus précieux comme le merisier, le frêne, l'érable sycomore il est voisin de 50-80 ans. Pour le douglas, il peut être de 45-55 ans.

Dans tout ce qui suit, les données chiffrées de l'évolution d'une futaie régulière d'Épicéa seront prises comme exemple.

1.3.2.2.2. Densité

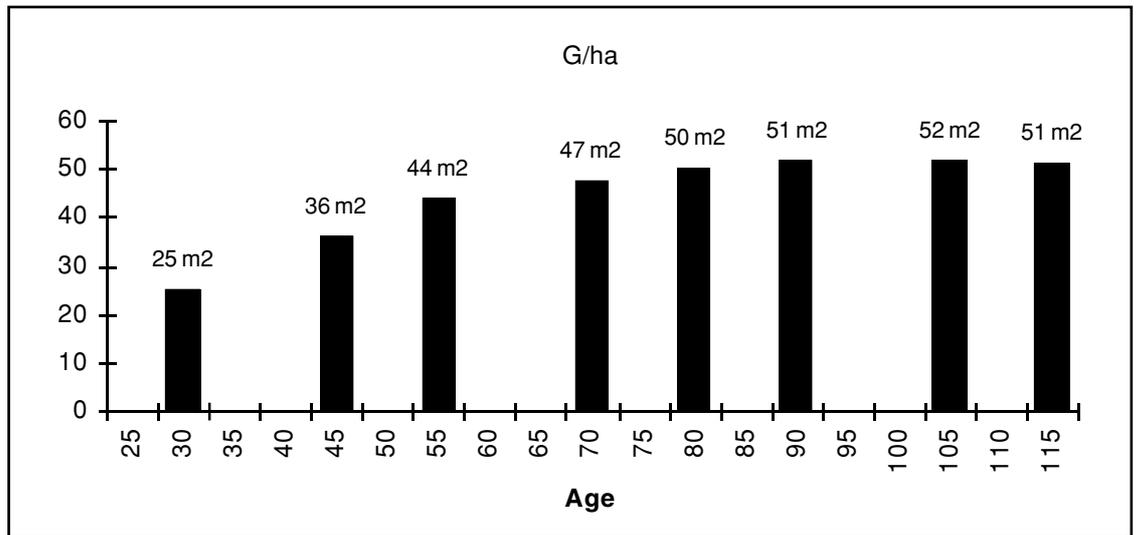
La densité, comme le montre la courbe ci-dessous décroît régulièrement au cours du temps en futaie régulière. Cela est dû à la mortalité naturelle et aux éclaircies qui sont pratiquées. La densité peut être de plusieurs dizaines de milliers de tiges par hectare dans une jeune régénération naturelle et de quelques dizaines de tiges dans un vieux peuplement en cours de régénération.





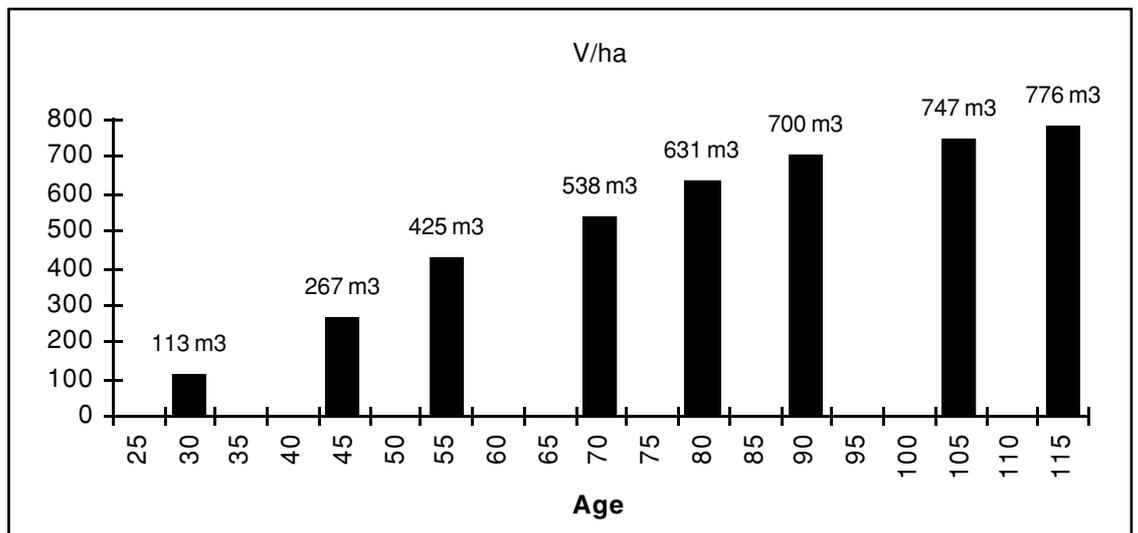
1.3.2.2.3. Surface terrière

La surface terrière évolue aussi au cours du temps en futaie régulière. Elle est quasiment nulle dans les jeunes peuplements et peut atteindre 40, voire 50 ou 60 m² dans les vieux peuplements.



1.3.2.2.4. Volume

Le volume augmente tout comme la surface terrière en fonction du temps. Il est quasiment nul et inintéressant dans les jeunes peuplements et peut atteindre 1 200 m³/ha en futaie régulière résineuse et 600 m³/ha en futaie régulière feuillue.

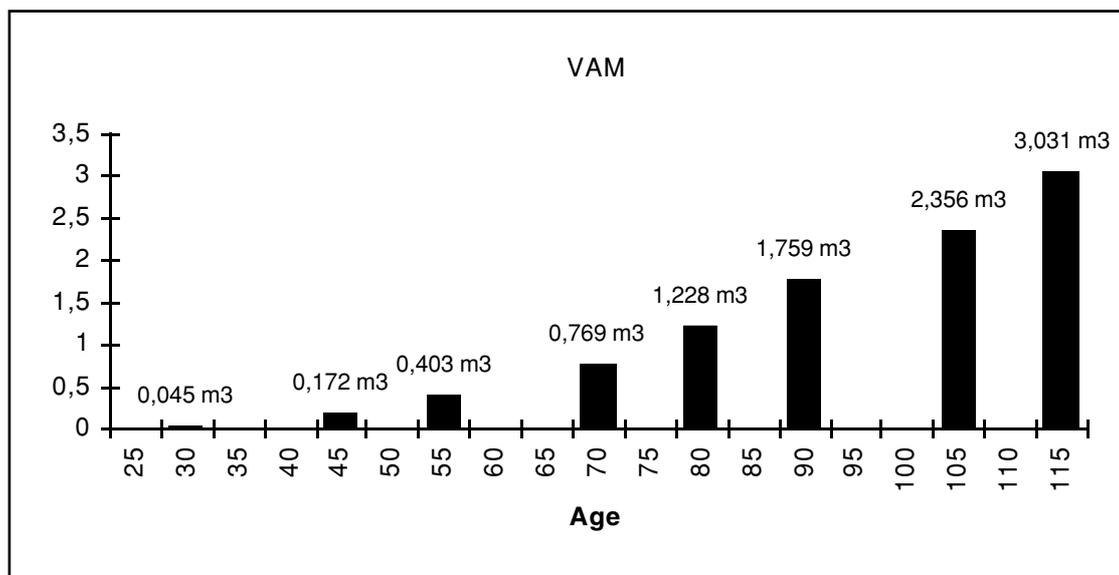
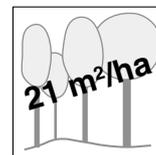


1.3.2.2.5. Volume de l'arbre moyen

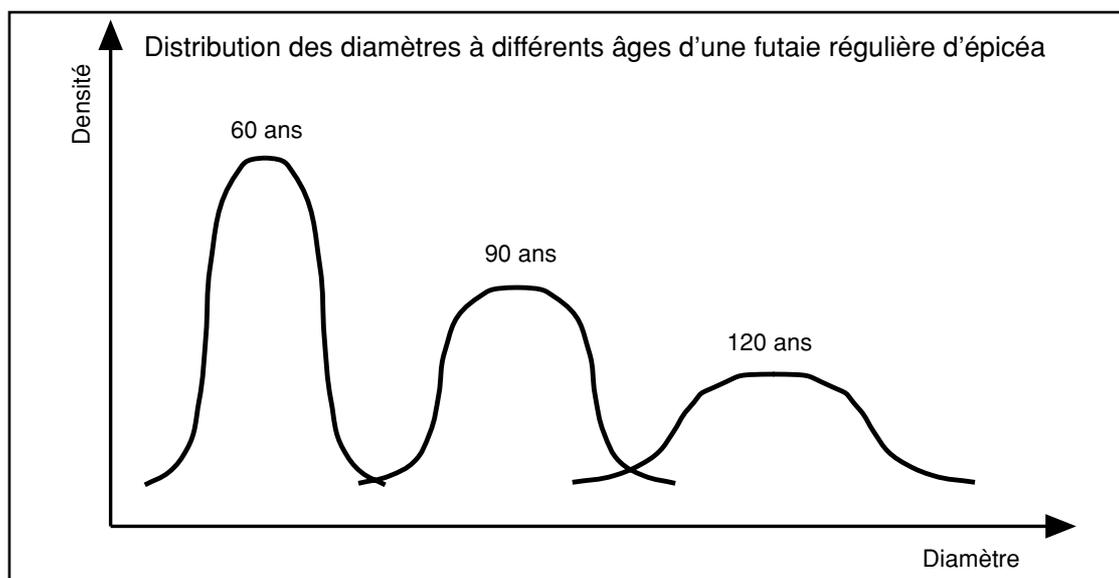
Le volume de l'arbre moyen augmente selon la courbe ci-après. Plus les peuplements sont vieux, plus le volume unitaire moyen est important. Les éclaircies accentuent ce phénomène.

1.3.2.2.6. Courbe de la répartition des diamètres

Bien entendu, plus une futaie régulière vieillit, plus le diamètre moyen augmente. On a de plus une augmentation de l'hétérogénéité des diamètres avec l'âge, augmentation traduite par les courbes page suivante.



Au fur et à mesure que les arbres d'une futaie régulière vieillissent, on a augmentation de la différenciation sociale (des arbres dits « dominants » prennent le dessus sur des arbres dits « dominés ») d'où une augmentation de l'hétérogénéité des diamètres. Ceci dit, quel que soit l'âge d'une futaie régulière, la distribution des diamètres correspond toujours à une courbe « en cloche » (distribution gaussienne) comme ci-dessous.

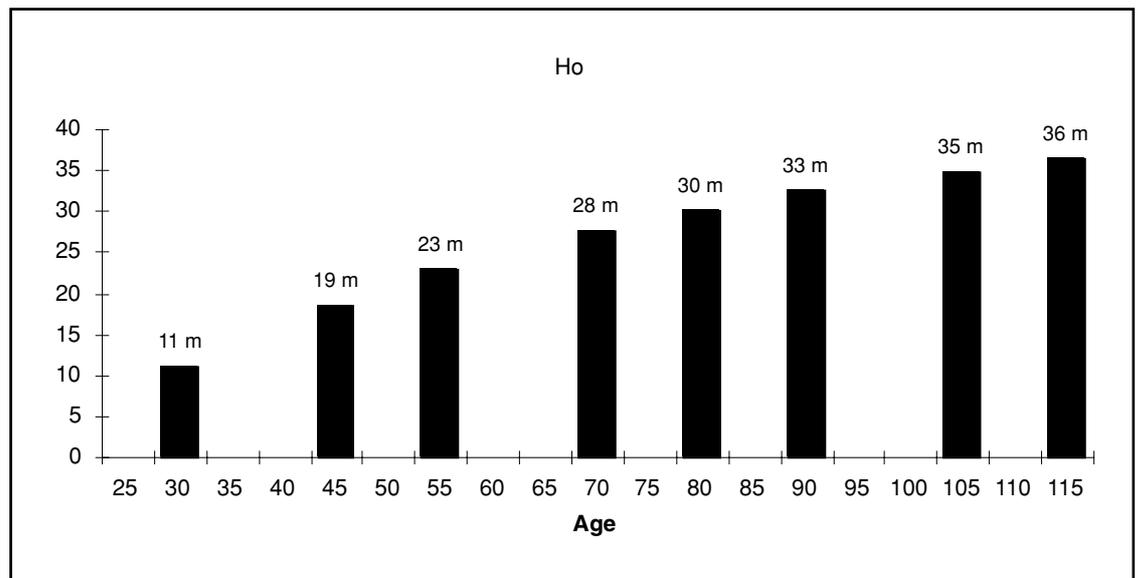
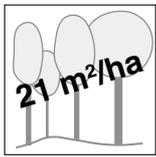


1.3.2.2.7. Hauteur dominante

La hauteur dominante augmente avec l'âge. Cette augmentation est d'abord rapide puis plus lente. La courbe ci-contre traduit ce phénomène.

1.3.2.2.8. Couvert

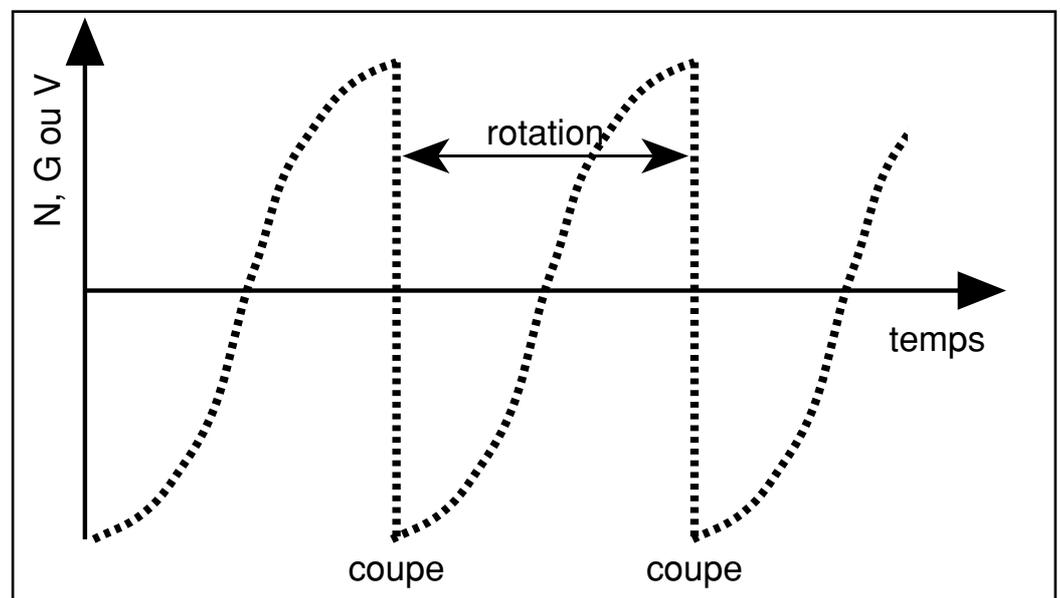
Le couvert peut prendre des valeurs très différentes en futaie régulière, valeurs qui n'évoluent pas forcément en fonction de l'âge des peuplements. En règle générale, le couvert est assez fermé (80 à 100 %), sauf après une éclaircie, ou pendant les phases de régénération.



1.3.2.3. Cas de la futaie jardinée

1.3.2.3.1. Evolution dans le temps des principales caractéristiques d'une futaie jardinée

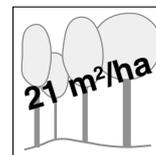
Les principales caractéristiques d'une futaie jardinée (densité, surface terrière, volume, volume de l'arbre moyen...) varient périodiquement autour d'une position d'équilibre. A chaque coupe de jardinage, on prélève une certaine quantité de bois qui correspond à ce qu'a produit la forêt depuis la dernière coupe. La rotation, c'est-à-dire la période séparant deux coupes, varie d'ordinaire entre 6 et 12 ans.



1.3.2.3.2. Cas d'une futaie jardinée sur station pauvre (Haut-Jura)

Les caractéristiques moyennes d'une futaie jardinée équilibrée du Haut-Jura sont données ci-après :

- N/ha : 220 à 270 tiges/ha,
- G/ha : 16 à 20 m²/ha,



- V/ha : 150 à 200 m³/ha,
- VAM : 0,650 à 0,750 m³,
- PB : 45 à 50 % en nombre,
BM : 40 à 50 % en nombre,
GB : 5 à 10 % en nombre.

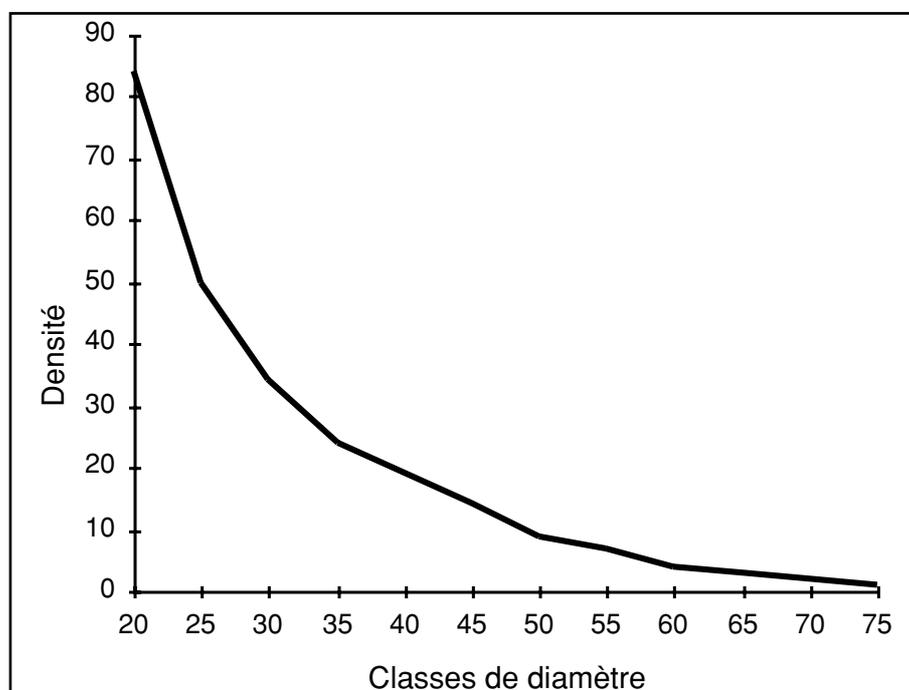
1.3.2.3.3. Cas d'une futaie jardinée sur station fertile (Second Plateau du Jura)

Les caractéristiques moyennes d'une futaie jardinée équilibrée du Second plateau du Jura sont données ci-après :

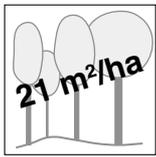
- N/ha : 220 à 280 tiges/ha,
- G/ha : 22 à 30 m²/ha,
- V/ha : 220 à 300 m³/ha,
- VAM : 0,920 à 1,170 m³,
- PB : 36 à 45 % en nombre,
BM : 32 à 40 % en nombre,
GB : 19 à 27 % en nombre.

On constate donc qu'on a des caractéristiques plus fortes sur stations plus fertiles que sur stations pauvres.

L'allure de la courbe donnant le nombre de tiges par classe de diamètre est la même dans les deux cas. Pour le Second plateau, elle est :



On a une décroissance régulière du nombre de tiges quand on passe d'une classe de diamètre à la suivante. On a beaucoup plus de petits bois que de bois moyens, et plus de bois moyens que de gros bois.



1.3.2.4. Cas des taillis-sous-futaie

1.3.2.4.1. Taillis-sous-futaie et taillis avec réserves

Les taillis-sous-futaie sont des taillis avec réserves équilibrés. Ils présentent un équilibre entre taillis et réserves, ils ne sont pas régularisés et ne sont ni trop riches, ni trop pauvres.

Ainsi, si l'on donne ici les principales données dendrométriques concernant le taillis-sous-futaie, on comprend aisément que celles des différents types de taillis avec réserves pourront différer sensiblement. Pour avoir une idée plus précise des valeurs prises par les principales caractéristiques dendrométriques des taillis avec réserves, on pourra consulter les typologies de peuplement les concernant (Wentz, 1986 ; Aubry et Druelle, 1988...).

1.3.2.4.2. Données concernant le taillis

Dans les taillis avec réserves, l'âge du taillis peut aller jusqu'à 35-40 ans. Sa hauteur dominante est le plus souvent inférieure à 15-20 mètres.

1.3.2.4.3. Données concernant une réserve équilibrée

Les caractéristiques quantitatives de la réserve peuvent être très variables en taillis avec réserves. On peut donc avoir des différences assez notables avec les chiffres idéaux donnés ci-dessous :

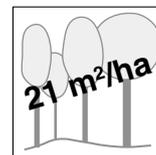
- N/ha : 60 tiges/ha,
- G/ha : 11 m²/ha,
- V/ha : 70 m³/ha,
- VAM : 1,166 m³,
- PB : 28 % en nombre,
BM : 30 % en nombre,
GB : 42 % en nombre,
- Couvert : 60 %.

Ces caractéristiques concernent un peuplement idéal avant coupe. Pour avoir une idée de la répartition des classes de diamètre avant coupe, on pourra se reporter au graphique de la page 13 (§ I.1.2.4.4.).

1.3.3. Intérêt du GB/BM et du VAM pour les classements de parcelle

Si l'intérêt global des paramètres dendrométriques a été précisé pour le sylviculteur et pour l'aménagiste dans ce chapitre, la sensibilité de ces paramètres n'a pas été abordée. On se propose donc ici de l'appréhender sur le cas particulier de deux paramètres très fréquemment utilisés en aménagement.

Le VAM et le GB/BM traduisent tous deux globalement l'idée du *vieillessement* et/ou de la *régularisation* des peuplements. Lorsqu'on regarde les valeurs prises à l'échelle d'une série et à l'échelle d'une parcelle, on trouve :



A l'échelle d'une parcelle :

$$0 \leq \text{GB/BM} \leq 15$$

$$0,3 \leq \text{VAM} \leq 5$$

A l'échelle d'une série :

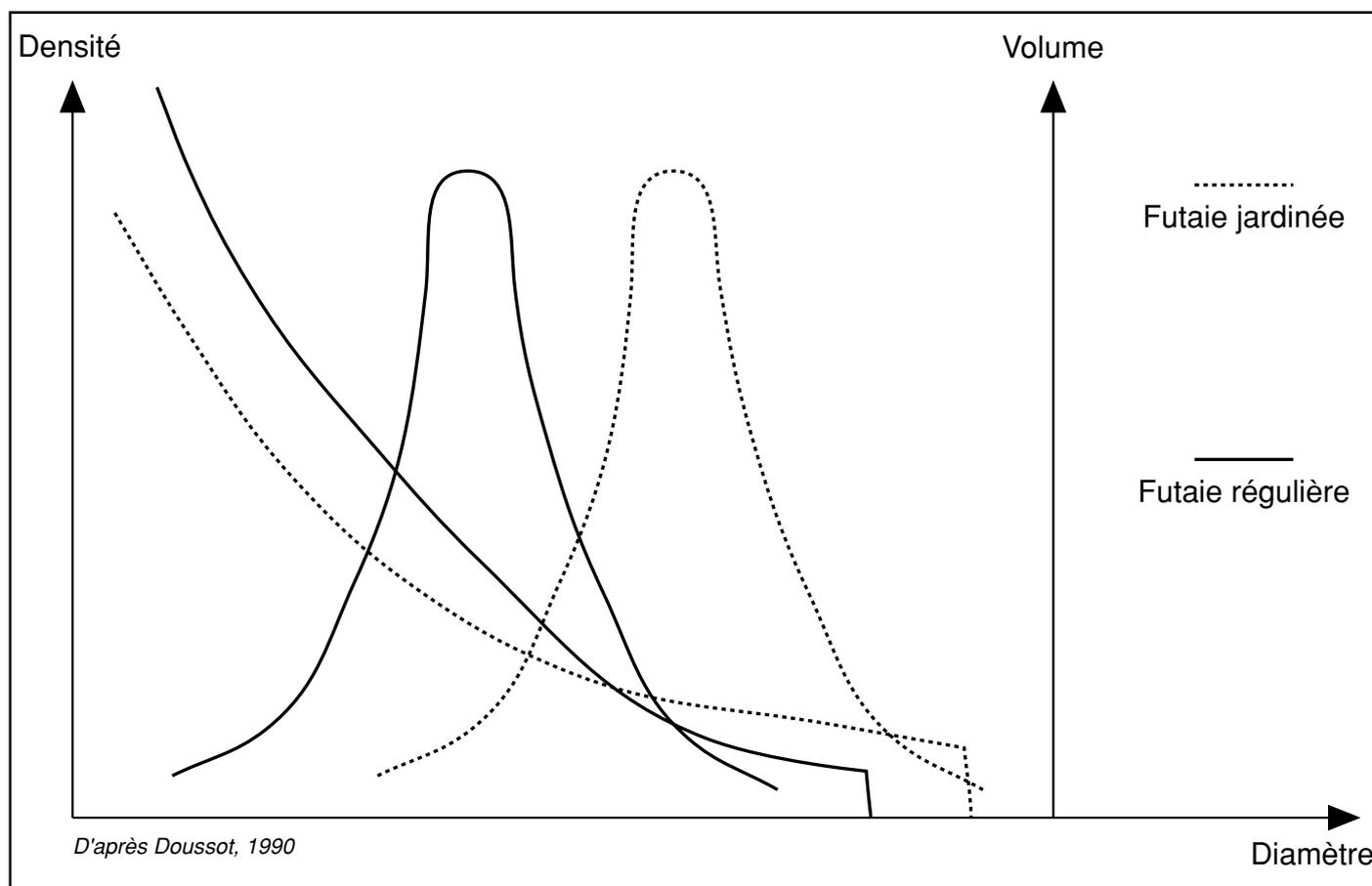
$$1 \leq \text{GB/BM} \leq 4$$

$$1,5 \leq \text{VAM} \leq 3$$

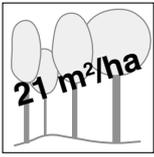
On constate ainsi que le GB/BM prend des valeurs plus variées (plus forte amplitude dans les valeurs prises) que le VAM. C'est donc un critère plus sensible pour détecter le vieillissement d'une série et pour classer des parcelles.

1.3.4. Comparaison futaie régulière-futaie jardinée

Une comparaison des volumes sur pied et de la distribution des diamètres en futaie jardinée et en futaie régulière peut être intéressante. Pour comparer ces deux peuplements, on peut tracer sur un même graphique les courbes représentant ces grandeurs, en fonction des classes de diamètre. Il faut, pour que les résultats soient comparables, collecter les données sur une série équilibrée pour la futaie régulière et les comparer à une série équilibrée de futaie jardinée.



On constate que globalement, la futaie jardinée est plus riche en gros bois. D'autres études (Schütz, 1989) vont dans ce sens.



II. Calcul de l'accroissement des peuplements

II.1. Intérêt des calculs d'accroissement

Tous les ans, à la belle saison, les arbres poussent et forment un cerne de croissance. On peut chercher à quantifier cela, tout comme on peut chercher à quantifier le flux des jeunes arbres qui poussent pour remplacer les vieux qui sont exploités (passage à la futaie).

Savoir comment la forêt pousse peut être utile :

- **au sylviculteur** : cela lui permet de connaître la croissance différentielle des essences sur une station donnée, de mieux raisonner sa sylviculture (par exemple, avoir une sylviculture très dynamique sur les bonnes stations),
- **à l'aménagiste** : connaissant de combien pousse la forêt, il peut analyser le passé et prévoir quelles pourront être les récoltes,
- **à l'écologue** : il peut comparer les stations entre elles et annoncer une productivité par essence et par type stationnel (par exemple, le Hêtre produit 3 m³/ha/an sur la station de type 1, 5 m³/ha/an sur la station de type 2...).

II.2. Les différents types d'accroissement

II.2.1. *Accroissement en surface terrière*

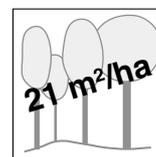
Cette façon de quantifier la pousse des arbres est malheureusement sous-employée car on préfère la plupart du temps l'accroissement en volume, plus difficile à atteindre, mais plus « parlant » pour les forestiers.

L'accroissement en surface terrière présente l'avantage d'être moins difficile à calculer dans certains cas et de ne pas être lié à la définition d'un volume donné (volume aménagement, volume bois fort, volume grume...) ou au choix d'un tarif de cubage.

Il s'agit, pour atteindre cet accroissement, de connaître quelle a été l'évolution de la surface terrière pendant une durée donnée. Ainsi, on peut dire que l'on a eu une augmentation de 5 m²/ha sur un peuplement donné pendant 10 ans, soit 0,5 m²/ha/an.

II.2.2. *Accroissement en diamètre ou en circonférence*

On peut également exprimer l'accroissement d'un peuplement en fonction de l'évolution du diamètre ou de la circonférence. Cela présente l'avantage d'être assez parlant, mais est souvent moins précis que les autres formes d'expression de l'accroissement. En effet, l'accroissement en diamètre ou en circonférence peut varier très fortement entre un gros bois et un petit bois et les moyennes calculées sur un peuplement recouvrent parfois une très forte hétérogénéité.



On veillera donc à le réserver à des peuplements homogènes en ce qui concerne le diamètre (peupleraies, jeunes plantations...), même si son abord est facile dans le cadre de la vulgarisation (dire à un propriétaire que son peuplement a un accroissement moyen annuel en circonférence (AMAC) de 2,7 cm/an est assez parlant).

II.2.3. Accroissement en nombre de tiges

Les arbres ne sont en général inventoriés qu'à partir d'une certaine classe de diamètre (classe 20, voire classe 15). On n'a donc pas d'informations concernant les tiges plus petites.

Il est donc intéressant de connaître le *flux d'arbres devenant précomptables*, c'est-à-dire les arbres qui grâce à leur croissance atteignent ou dépassent le diamètre de précomptage. On nomme ce flux le *passage à la futaie*. Il peut être exprimé en nombre de tiges (passage à la futaie en nombre) ou en volume (passage à la futaie en volume), voire en surface terrière.

Le passage à la futaie est très élevé dans un perchis car de nombreux arbres peuvent y dépasser le diamètre de précomptage. En revanche, il est très faible, voire nul dans une futaie âgée. Il est moyen dans une futaie jardinée.

Ce paramètre est intéressant à analyser à l'échelle d'une parcelle mais surtout à l'échelle d'une série. Il traduit, malheureusement avec un certain retard, la bonne ou mauvaise régénération du peuplement. En effet, plus il est élevé, plus la régénération a été forte.

II.2.4. Accroissement en volume

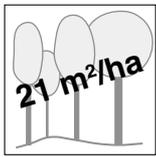
II.2.4.1. L'accroissement le plus utilisé

L'accroissement en volume, noté I_v , est le plus utilisé des accroissements. Il est d'une part bien connu des forestiers (contrairement à celui en surface terrière) et peut donc facilement être analysé et comparé à des valeurs de référence. D'autre part, il permet de connaître facilement les volumes à exploiter et de rapidement donner un accroissement en valeur. Par exemple, si une forêt produit annuellement $7 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ et que le prix moyen du m^3 est de 300 F, on peut espérer, si on récolte l'accroissement un revenu de $7 \times 300 = 2\,100 \text{ F}/\text{ha}/\text{an}$.

II.2.4.2. Accroissement courant, accroissement moyen et production

Les termes suivants, même s'ils sont définis pour les accroissements en volume, sont applicables aux autres types d'accroissement.

- **L'accroissement courant.** Il correspond à un accroissement de volume entre deux dates assez proches (par exemple 5 ans chez des essences à croissance rapide, 10 ans chez des essences à croissance lente). On pour-



rait souhaiter le calculer sur un intervalle de temps plus court, mais on a alors une grande hétérogénéité due aux variations saisonnières.

Définition mathématique de l'accroissement courant

On peut montrer que l'accroissement courant correspond à la dérivée du volume produit en fonction du temps. En effet :

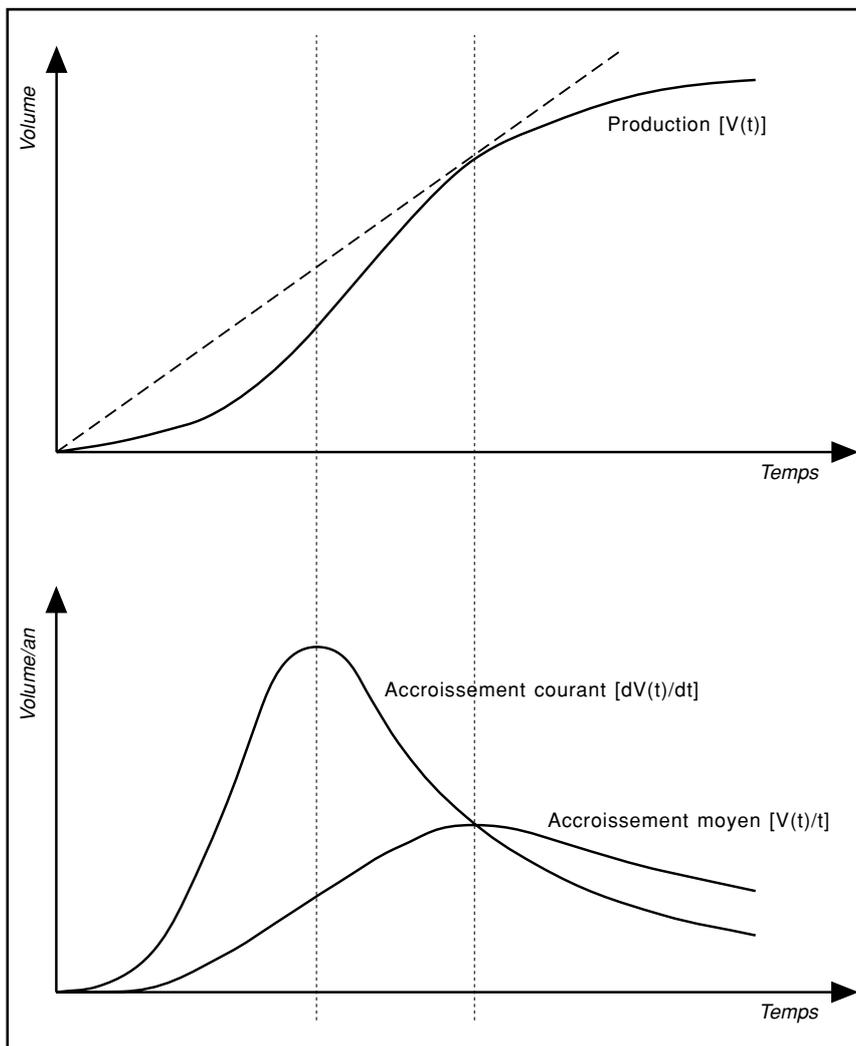
$$I_v = \lim (V(t) - V(t_0)) / (t - t_0) \text{ quand } t \text{ tend vers } t_0$$

où V est la fonction donnant l'évolution du volume en fonction du temps.

$$\text{Ainsi } I_v = dV(t)/dt$$

- **L'accroissement moyen.** Il correspond à un accroissement de volume sur une grande période. Dans les peuplements réguliers, on peut même le définir comme l'accroissement du peuplement depuis l'origine. Ainsi, dans ce cas $I_{v_{0-t}} = V(t)/t$.

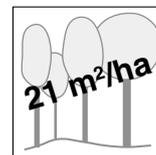
- **La production.** Il s'agit du volume de bois produit depuis une date donnée (souvent l'origine du peuplement dans les peuplements réguliers). Ainsi, la production vaut dans ce cas $V(t)$.



On peut donc dire qu'un accroissement correspond à un volume de bois produit en une durée donnée divisé par cette durée. La production correspond à ce volume de bois, mais non rapporté à la durée de production. Ainsi, dire qu'une parcelle a produit 70 m³/ha en 10 ans consiste à donner une production. Dire qu'elle fournit 7 m³/ha/an consiste à énoncer un accroissement courant.

Dans bien des cas, les forestiers confondent accroissement et production. Il faut donc se référer aux unités employées. Ainsi dans la phrase « on calculera la production en m³/ha/an », il faut comprendre « accroissement » et non « production ».

On peut voir comment évoluent la production, l'accroissement courant et l'accroissement moyen depuis l'origine dans un peuplement de *futaie régulière*. On obtient les graphiques donnés ci-contre.



On constate que la production augmente au cours du temps, mais que l'accroissement courant passe rapidement par un maximum puis retombe assez vite. Les courbes de l'accroissement moyen et de l'accroissement courant se croisent quand l'accroissement moyen est maximum.

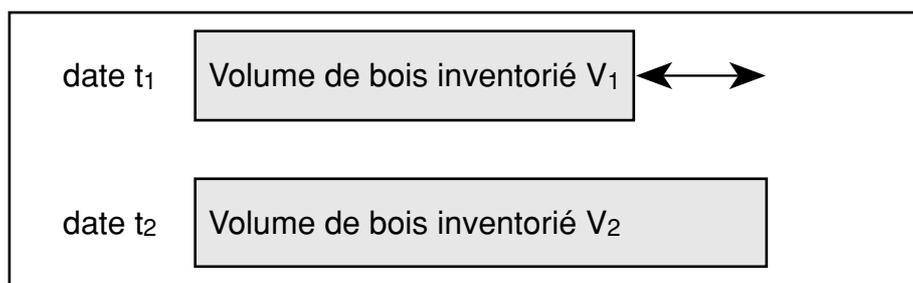
II.3. Calcul des accroissements par comparaison d'inventaire

II.3.1. Principe

On peut procéder sur une forêt à des inventaires successifs. Ils permettent à chaque fois de calculer la densité, le volume, la surface terrière. Un accroissement étant défini par l'évolution d'une donnée (volume, densité...) en fonction du temps, deux inventaires successifs permettent donc de calculer cet accroissement.

II.3.2. Calcul de l'accroissement en volume

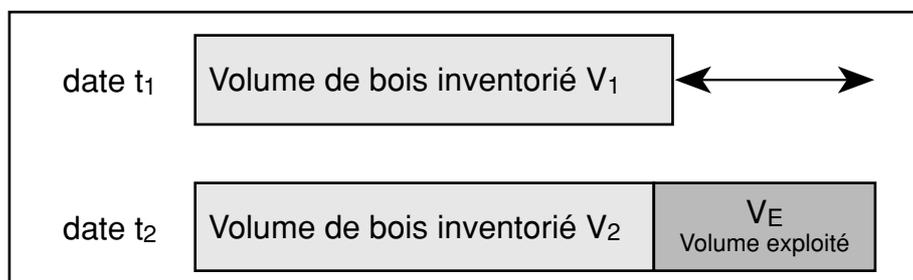
- Le schéma suivant représente le volume V_1 inventorié à une date t_1 et le volume V_2 inventorié à une date t_2 . V_2 est supérieur à V_1 car les arbres ont poussé.



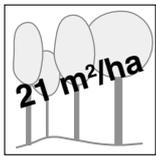
L'accroissement du peuplement est symbolisé par la flèche. On peut facilement le calculer :

$$I_v = (V_2 - V_1) / (t_2 - t_1)$$

- Le schéma suivant présente un autre cas de figure plus général. En effet, entre les deux inventaires, on a exploité un volume V_E .



Le calcul présenté précédemment n'est plus valable car il donne dans ce cas un résultat négatif. On peut difficilement imaginer un accroissement négatif : cela signifierait que les arbres aient un volume qui réduit !



On doit donc tenir compte du volume exploité car même si ce volume a été enlevé et n'est plus présent sur la forêt, il est produit par le peuplement et ne peut être oublié. L'accroissement est donc toujours représenté sur ce schéma par une flèche. Il se calcule de la manière suivante :

$$I_v = (V_2 + V_E - V_1) / (t_2 - t_1)$$

C'est souvent la connaissance imparfaite de V_E qui introduit des incertitudes dans le calcul d'accroissement par cette méthode. En effet, il s'agit non seulement des volumes exploités, mais aussi des chablis, des arbres morts naturellement... et ils ne sont pas toujours bien recensés.

- Les arbres ne poussent pas en continu dans le temps. On définit la saison de végétation comme la période pendant laquelle les arbres poussent. Ainsi, comme on cherche des accroissements annuels, la durée $t_2 - t_1$ doit être exprimée en nombre de saisons de végétation. Ainsi :

$$I_v = (V_2 + V_E - V_1) / w$$

où w est le nombre de saisons de végétation.

II.3.3. Calcul de l'accroissement en nombre : le passage à la futaie

De la même façon que précédemment, on peut calculer le passage à la futaie en nombre f :

$$f = (N_2 + N_E - N_1) / w$$

Ce passage à la futaie correspond aux arbres qui sont devenus pré-comptables entre les deux inventaires.

On peut associer à ce passage à la futaie en nombre un passage à la futaie en volume F , tel que :

$$F = f \cdot V_{17,5}$$

où $V_{17,5}$ est le volume de l'arbre qui passe à la futaie.

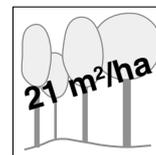
II.3.4. Accroissement, cru et passage à la futaie en volume

On appelle cru, l'augmentation de volume des tiges déjà comptées lors du premier inventaire. Ainsi :

$$I_v = F + C$$

où C désigne le cru.

Le plus souvent, le cru est largement supérieur au passage à la futaie en volume.



II.4. Calcul de l'accroissement en volume par sondage à la tarière de Pressler

II.4.1. Principe de la méthode

La méthode la plus simple pour connaître l'accroissement d'un peuplement forestier est la comparaison d'inventaires. Parfois, on ne peut pas ou on ne souhaite pas utiliser cette méthode (manque d'un premier inventaire, fiabilité des inventaires ou suivi des exploitations mis en cause...) et il faut donc une autre méthode pour calculer l'accroissement d'un peuplement.

Comme son nom l'indique, le calcul des accroissements par sondage à la tarière de Pressler donne l'accroissement en volume des peuplements en fonction de la mesure des cernes annuels prélevés sur un échantillon. La subtilité de la méthode se trouve dans la relation qui existe entre l'accroissement du diamètre à 1,30 mètres et l'accroissement de volume correspondant...

Cette méthode peut également être appliquée dans le cadre de placettes permanentes de contrôle, le sondage des arbres étant remplacé par le suivi de l'évolution des diamètres.

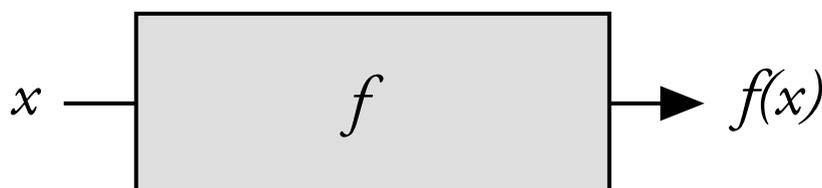
Pour la mesure précise des accroissements et le choix des arbres à sonder, on se reportera à Pardé (1988) et Duplat et Perrote (1981).

II.4.2. Quelques rappels mathématiques

II.4.2.1. Qu'est-ce qu'une fonction ?

Les mathématiciens possèdent des définitions bien strictes de ce qu'est une fonction. Ces définitions, aussi rigoureuses soient-elles, ne permettent que rarement de bien comprendre à quoi ces fonctions peuvent bien servir. Nous aurons ici une approche bien peu rigoureuse des définitions mathématiques en espérant que l'essentiel sera compris...

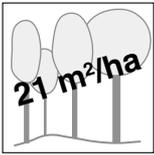
Ainsi, on peut concevoir une fonction comme une machine qui sert à transformer des x .



- x est la variable. C'est le produit de base, la matière première qu'on donne à la machine.

- f est la fonction. C'est le nom de la machine.

- $f(x)$ est le fruit du travail de la fonction. C'est le produit manufacturé sorti des ateliers de la fonction. On le note ainsi car de cette manière, on sait de quelle usine ça sort (f) et quel est le produit d'origine (x).



II.4.2.2. Quelques exemples de fonctions

On peut définir une multitude de fonctions. Certaines sont simples :

$$f(x)=x$$

$$f(x)=x^2$$

$$f(x)=10x^3-4x^2+7x-17$$

$$f(x)=\ln(1/x)$$

D'autres sont un peu plus compliquées...

Tout comme M. Jourdain fait de la prose sans le savoir, le forestier utilise couramment des fonctions à son insu. Par exemple, pour cuber des bois abattus, on utilise la fonction suivante :

$$V(D_m, L) = \pi D_m^2 / 4 \cdot L$$

Ainsi, la fonction V nous donne le volume de la grume quand on lui donne le diamètre médian D_m et la longueur L . V est la fonction, D_m et L les variables. On comprend ainsi mieux le terme de variable. Quand D_m et/ou L varient, le volume varie...

II.4.2.3. La dérivée d'une fonction

Certaines fonctions sont dites dérivables, c'est-à-dire qu'on peut leur associer par le calcul une autre fonction. On dit que cette fonction est la dérivée de la première. Si f est la fonction initiale, sa dérivée se note f' ou bien df/dx .

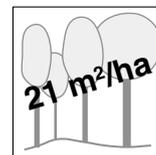
Là encore, on connaît certaines fonctions dérivées sans pour autant connaître leur nature. Imaginons faire la route entre Besançon et Gray. Notre compteur kilométrique indique la distance parcourue depuis le départ. Il existe donc une fonction D dont la variable est le temps t qui donne à tout instant la distance parcourue $D(t)$.

Si l'on dérive cette fonction, on constate que cette dérivée n'est autre que la vitesse instantanée du véhicule, c'est-à-dire :

$$D'(t) = V(t)$$

$D(t)$ est une distance, on peut l'exprimer en km. $V(t)$ est une vitesse, on peut l'exprimer en km/h. On constate ainsi qu'en ce qui concerne les unités, dériver revient à diviser par l'unité dans laquelle est exprimée la variable. Ici la distance est en km, le temps en heures. La vitesse est donc en km/h.

Un exemple forestier de fonction dérivée est l'accroissement courant. On peut en effet définir une fonction V (comme Volume...) dont la variable est le temps t qui donne la quantité de bois produite sur un hectare de forêt (en m^3/ha). Si l'on dérive cette fonction par rapport au temps, on obtient l'accroissement courant qui s'exprime en $m^3/ha/an$.



II.4.2.4. Formules de dérivation et exemples

Des formules permettent de calculer la dérivée d'une fonction donnée. Le tableau suivant donne les formules à connaître pour le calcul des accroissements par sondage à la tarière.

$f(x)$	$f'(x)$
a	0
bx	b
cx^2	$2cx$

D'autre part, on peut écrire :

$$(f+g)' = f' + g'$$

II.4.3. Principes mathématiques de la méthode

Le problème posé consiste à relier un accroissement en diamètre sur un certain nombre d'arbres pendant une période de temps donnée à l'accroissement en volume correspondant. Dans ce qui suit, on adopte les notations suivantes :

dt est le petit intervalle de temps sur lequel on cherche à calculer l'accroissement,

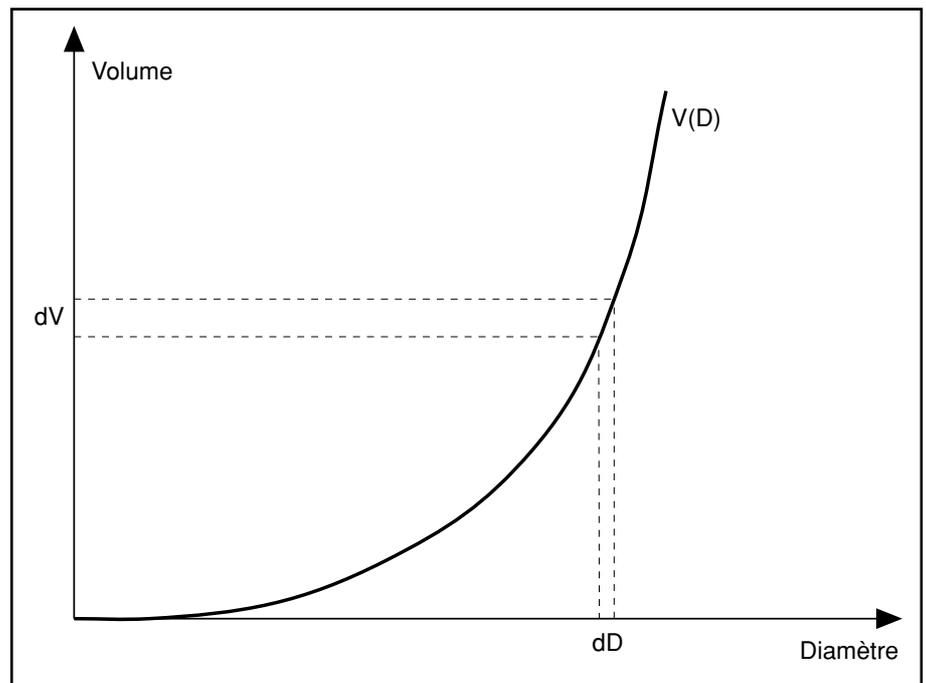
dD est l'accroissement en diamètre observé à l'aide de la tarière de Pressler,

dV est l'accroissement en volume correspondant à l'accroissement en diamètre dD pendant la période dt .

La notation petit d précédant chaque symbole n'est pas innocente. Elle a une signification en mathématiques et en sciences physiques et sa présence devant une variable signifie qu'on a affaire à une petite variation de la variable considérée. Ainsi, dD concerne une petite augmentation de diamètre, dt un petit intervalle de temps... On peut ici employer ces notations car les intervalles de temps considérés (5 ou 10 ans, généralement) sont relativement faibles comparés aux temps de production de la forêt.

Lorsqu'on observe le graphe de la fonction donnant l'évolution du volume en fonction du diamètre, on obtient une courbe (donnée page suivante).

Sur cette courbe, on a matérialisé dD et dV et on voit que c'est la courbe de la fonction V qui permet de faire la relation entre dD et dV . On peut constater par exemple qu'une même augmentation de diamètre dD ne donnera pas la même augmentation de volume si l'arbre est gros ou si l'arbre est petit. Plus précisément, plus un arbre est gros, plus une augmentation de diamètre donnée fera augmenter son volume.



Par exemple, un accroissement de diamètre médian de 1 cm sur une grume de 10 m de long donne :

- 0,032 m³ pour un arbre de 20 cm,
- 0,126 m³ pour un arbre de 80 cm.

Ceci étant dit, les mathématiques nous permettent d'écrire :

$$V'(D) = dV/dD$$

C'est grâce à cela que nous allons pouvoir calculer le cru des arbres précomptables. En effet, on peut écrire :

$$dV/dt = dV/dD \cdot dD/dt$$

(car $dV/dt = dV/dD \cdot dD/dD$)

Or :

- dV/dt correspond à un petit volume de bois dV produit pendant une durée courte dt . C'est l'accroissement que l'on cherche.

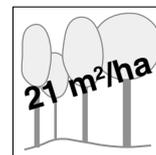
- dD/dt est l'accroissement moyen en diamètre pendant la période dt . On peut facilement le déduire des sondages à la tarière.

- $dV/dD = V'(D)$. On peut calculer cette quantité quand le tarif de cubage utilisé sur la forêt est fourni sous forme de fonction.

II.4.4. Méthodes de calcul

II.4.4.1. Calcul du cru

La formule donnée auparavant permet de relier l'accroissement en volume à l'accroissement en diamètre sur une période donnée. Comme



on l'a vu cependant, ce calcul doit être fait pour chaque classe de diamètre car :

- les arbres d'une classe de diamètre donnée ne poussent pas forcément comme ceux d'une autre,
- la variation de volume associée à un accroissement donné dépend de la classe de diamètre de l'arbre (cf. l'exemple donné au paragraphe précédent).

Ainsi pour chaque classe de diamètre, on doit calculer :

- dV/dD ,

- dD/dt .

dV/dD se calcule facilement. On calcule en effet $V'(20)$, $V'(25)$, $V'(30)$...

dD/dt se déduit des accroissements à la tarière. Si l'on appelle l la longueur moyenne des derniers cernes produits pendant dt années :

l correspond à l'accroissement sur le rayon pendant dt années.

$2l$ correspond donc à l'accroissement sur le diamètre pendant dt années.

$2l/dt$ correspond à l'accroissement moyen annuel sur le diamètre.

Ceci dit, cet accroissement est un accroissement sous écorce et c'est l'accroissement sur écorce que nous cherchons. On applique donc un facteur correctif K (nommé nombre de Loetsch ou facteur d'écorce) qui permet de passer de l'accroissement sous écorce à l'accroissement sur écorce.

On peut citer comme valeurs moyennes de K :

Chêne : 1,107	Epicéa : 1,050
Hêtre : 1,023	Pin sylvestre : 1,120
Sapin : 1,063	Mélèze : 1,154

Ainsi, on peut finalement écrire :

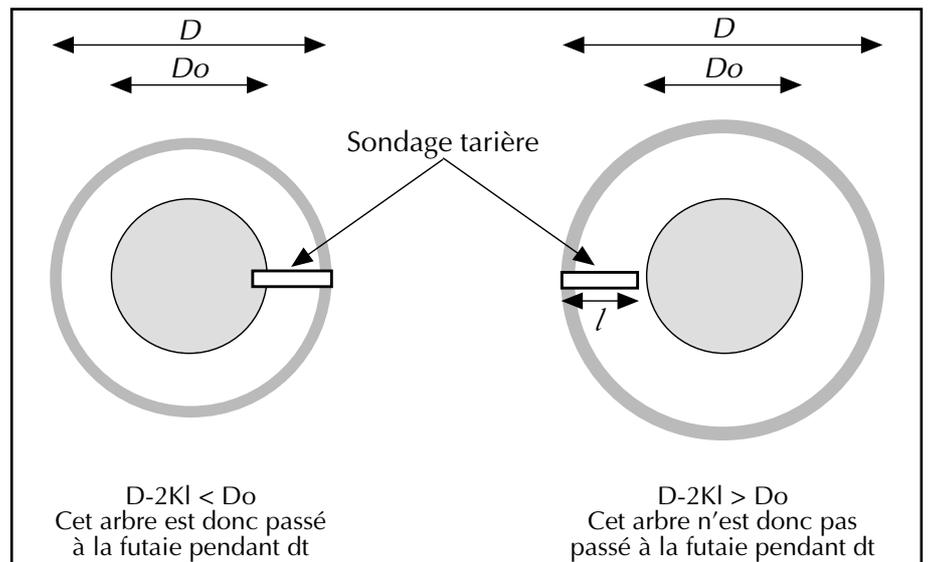
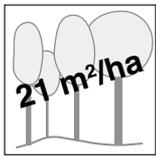
$$dD/dt = 2Kl/dt$$

En répétant cette opération pour chaque catégorie de diamètre, on obtient le cru des arbres précomptables.

II.4.4.2. Calcul du passage à la futaie en volume

Le cru étant connu, il faut ensuite calculer le passage à la futaie en volume pour connaître l'accroissement. Les sondages effectués dans les petits diamètres permettent de savoir quelle est la proportion d'arbres de cette catégorie de diamètre passés à la futaie. En effet, un arbre est passé à la futaie si :

$$D - 2Kl < D_0$$



D_o étant le diamètre de précomptage, K le facteur d'écorce et l la longueur des dt derniers cernes.

On peut ainsi déterminer la proportion d'arbres passés à la futaie. On en déduit le passage à la futaie en volume F .

II.4.4.3. Tableau de synthèse

Le tableau de synthèse suivant permet de résumer quels sont les calculs à effectuer quand on veut calculer l'accroissement à partir de sondages à la tarière.

Diamètre	N/ha	li	pi/ni	dD/dt	v'(D)	dV/dt	Cru sur écorce
20	38,9 t/ha	0,0197 m	0,88	0,004 m/an	3,04 m ³ /m	0,01 m ³ /an	0,49 m ³ /ha/an
25	32,3 t/ha	0,0229 m	0,21	0,005 m/an	4,25 m ³ /m	0,02 m ³ /an	0,67 m ³ /ha/an
				2Kli/dt	V'(Di)	2Kli/dt.V'(Di)	2Kli/dt.V'(Di).N/ha
Total	168,2 t/ha						Somme des crus

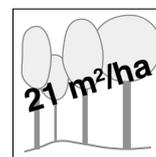
dt	10 ans
K	1,05
V(D)	1,7/0,14 (D-0,05)(D-0,1)

F	somme(pi/ni.N/ha).V17,5
Acc	Somme des crus + F

Les cellules grisées correspondent aux données qui sont fournies. Il faut dériver la fonction $V(D)$ pour calculer ensuite chaque $V'(Di)$. Le cru sur écorce total correspond à la somme des crus pour chaque diamètre.

II.5. Quelle méthode utiliser pour connaître l'accroissement des peuplements ?

Deux méthodes existant pour connaître l'accroissement, on peut se poser la question du choix de l'une par rapport à l'autre.



- La comparaison d'inventaires est plus simple en ce qui concerne les calculs, mais elle nécessite d'avoir un inventaire antérieur et la connaissance précise des volumes exploités entre les deux inventaires. L'erreur théorique à craindre au seuil de 5 % est de 20 à 30 % en moyenne (Duplat et Perrote, 1981). Toutefois, on peut supposer qu'elle est inférieure (Bruciamacchie, communication personnelle). Des comparaisons d'inventaires successives sur certaines séries montrent que les accroissements calculés sont quasi-constants.

- Le calcul par sondage à la tarière ne nécessite pas d'avoir un inventaire antérieur. La méthode est plus lourde en ce qui concerne les calculs et la technicité à mettre en œuvre et peut présenter (surtout sur les petites forêts) une perte financière importante en raison des trous faits dans les arbres. L'erreur à craindre au seuil de 5 % est voisine de 15 % (Duplat et Perrote, 1981). On peut remarquer que cette technique surestime d'environ 10 % l'accroissement par rapport à une comparaison d'inventaires (Doussot, 1990 ; Bastien, communication personnelle).

III. Le suivi des peuplements

Suivre les peuplements consiste à vouloir connaître leur évolution. Cela peut être dans un but d'aménagement, pour donner les directives de gestion et planifier la récolte ou bien dans un but sylvicole pour raisonner une sylviculture dans le temps.

Le suivi des peuplements passe - quel que soit le mode de traitement - par des inventaires. Les différentes modalités d'inventaire seront donc traitées dans ce chapitre.

III.1. Cas des peuplements réguliers

III.1.1. Une description relativement simple

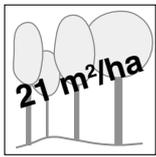
Les peuplements réguliers sont généralement ceux qui posent le moins de problèmes de description. En effet, même si le tableau présenté page 23 donne un certain nombre de paramètres utilisables et intéressants, l'âge et la hauteur d'un peuplement régulier permettent souvent de déduire un ordre de grandeur des autres paramètres (les tables de production utilisent âge et hauteur dominante comme paramètres d'entrée).

III.1.2. Quelques outils utilisables pour le suivi et la prévision

III.1.2.1. Le facteur d'espacement de Hart et Becking

Le facteur d'espacement (étudié en sylviculture) est défini par le quotient entre l'espacement moyen entre les tiges et la hauteur dominante des peuplements.

$$s = 100 \cdot a/H_o$$



Il permet d'estimer la concurrence au sein d'un peuplement de futaie régulière et de raisonner la pratique des éclaircies sur certains peuplements résineux.

III.1.2.2. Les tables de production

III.1.2.2.1. Les principes de construction

Les premières tables de production datent de la fin du XIX^{ème} siècle (Bruciamacchie, 1990). Leur construction repose sur les *lois de Eichhorn* qui précisent :

- *dans une région climatique donnée, sur une station donnée, la croissance en volume d'un peuplement régulier d'une essence donnée est indépendante de la sylviculture appliquée à ce peuplement,*
- *la production totale d'un peuplement équienne monospécifique ne dépend que de sa seule hauteur dominante (loi de Eichhorn élargie).*

La loi de Eichhorn est globalement vérifiée, tant que la sylviculture ne réduit pas trop la densité du peuplement. On a ensuite déduit que la croissance en volume d'un peuplement équienne ne dépend que de l'âge du peuplement et de la fertilité de la station, ce qui a conduit à la loi de Eichhorn élargie, qui n'est pas toujours vérifiée.

La construction des tables se fait grâce à l'inventaire d'une centaine de placettes de surface voisine de 10-30 ares pour avoir toutes les classes d'âge et toutes les stations. Les résultats sont ensuite analysés et mis sous forme de tableaux. On peut retenir (Bruciamacchie, 1990) que les placettes sont trop peu nombreuses, petites et pas choisies au hasard. Il en résulte des risques de surestimation importants.

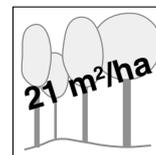
III.1.2.2.2. Les principes d'utilisation (à l'aide d'exemples)

Les tables de production se présentent sous forme de tableaux donnant diverses caractéristiques d'un peuplement régulier monospécifique avant et après éclaircie en fonction de l'âge de ce peuplement. Ainsi, une table peut donner la hauteur dominante, la hauteur moyenne, la densité, la surface terrière, le diamètre moyen, le diamètre dominant, le volume, le volume de l'arbre moyen... du peuplement principal et des arbres enlevés en éclaircie à différents âges, ainsi que l'accroissement moyen et l'accroissement courant.

Pour rentrer dans une table de production, il faut connaître pour le peuplement à traiter *âge* et *hauteur dominante* ce qui permet de choisir une classe de fertilité. Ensuite, en fonction de l'âge du peuplement, on peut connaître les diverses caractéristiques idéales du peuplement ainsi que l'accroissement courant et moyen. Cette table peut également servir au sylviculteur en donnant un modèle de sylviculture.

III.1.2.2.3. Présentation des tables existantes et intérêt

Par rapport à d'autres pays, les tables de production sont assez peu nombreuses en France (Décourt, 1984). Beaucoup ont été construites



dans les années 70, mais on n'en construit quasiment plus depuis 1980 (on peut citer comme exception la construction d'une table concernant l'Epicéa de Sitka en Bretagne).

Ces tables permettent au néophyte de mieux cerner les caractéristiques dendrométriques des peuplements réguliers et de connaître l'accroissement de ces peuplements (pour modéliser des éclaircies, prévoir des récoltes, suivre l'évolution des peuplements...). On doit toutefois être méfiant quant aux données produites par les tables car très souvent, elles exagèrent la réalité.

III.1.2.2.4. Limites

Les tables de production n'ont connu en France qu'un faible engouement. Cela peut être imputé à plusieurs raisons :

- elles ne concernent que les **peuplements purs** alors que le mélange apparait de plus en plus comme une obligation,
- elles ne concernent que des **peuplements parfaitement réguliers et homogènes**,
- elles donnent des **résultats surestimés** par rapport à la réalité, car elles généralisent des résultats obtenus sur de petites surfaces à des peuplements plus vastes, souvent incomplets,
- elles traduisent le plus souvent une **sylviculture passée**, peu dynamique.

Ainsi, elles servent assez peu, en raison de la volonté de gérer désormais des peuplements mélangés et parce qu'elles présentent de nombreuses limites.

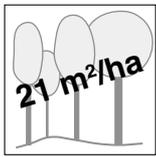
II.1.2.3. Les normes de sylviculture

Les normes de sylviculture sont des guides sylvicoles qui s'appuient sur divers paramètres dendrométriques. Par exemple, il existe des normes pour le Hêtre qui donnent la densité en fonction de la hauteur dominante. D'autres donnent la densité en fonction de l'âge. L'utilisation de ces normes sera vue en sylviculture.

III.1.3. Rôle des inventaires en peuplements réguliers

En peuplements réguliers (c'est-à-dire le plus souvent en futaie régulière), les inventaires ne sont la plupart du temps pratiqués qu'à l'occasion des révisions d'aménagement ou de l'élaboration des plans simples de gestion. En effet, le sylviculteur possède le plus souvent des outils (facteur d'espacement, normes...) qui lui permettent de ne pas avoir besoin d'inventaires. En revanche, l'aménagiste devant faire le bilan des actions passées et planifier l'avenir doit connaître à intervalles réguliers l'état des peuplements.

Les inventaires les plus souvent pratiqués dans les peuplements réguliers sont l'inventaire pied à pied (ou intégral) et l'inventaire statistique

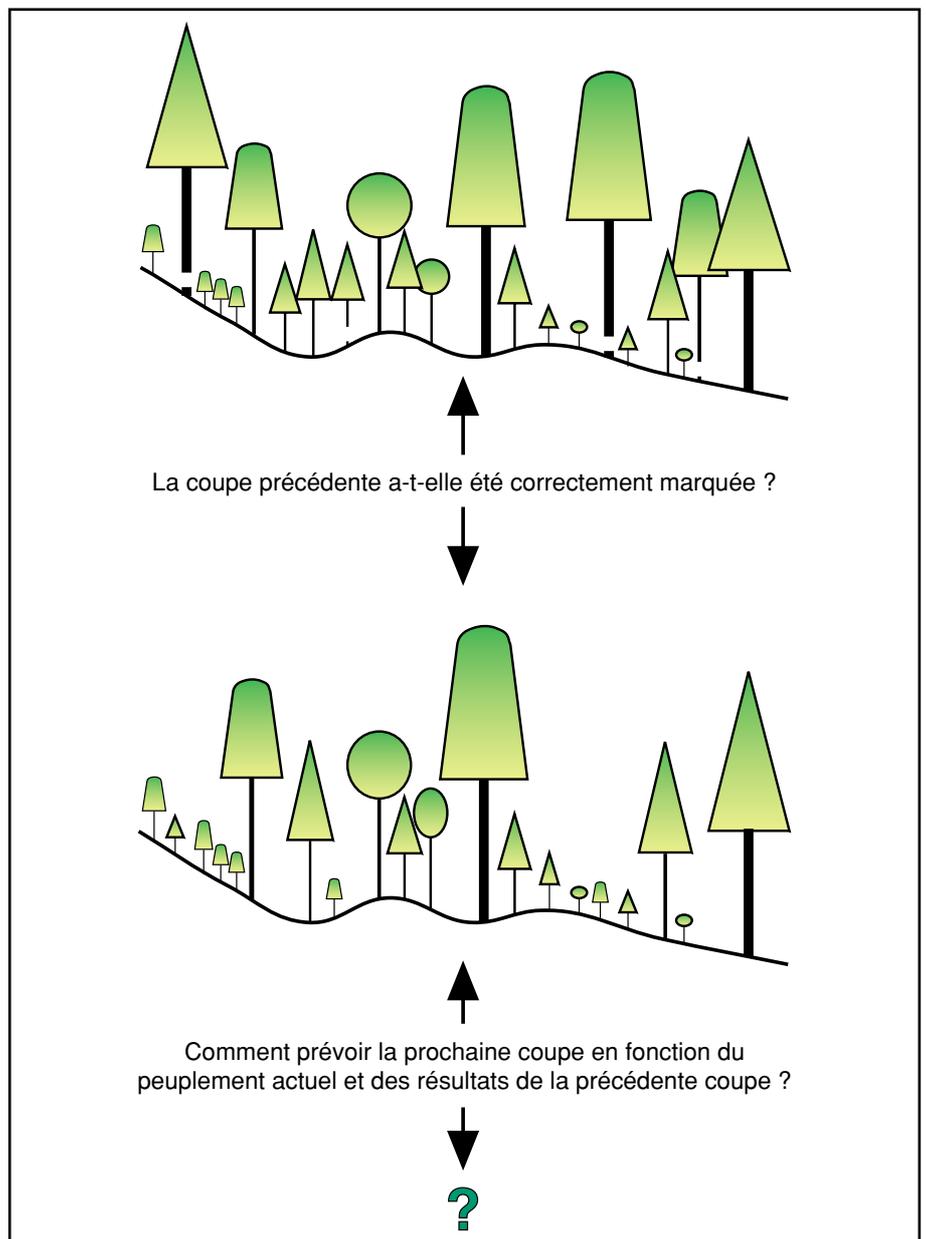


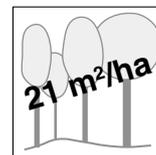
par placettes temporaires. Dans certains peuplements irréguliers, mais aménagés en futaie régulière (par exemple, les taillis-sous-futaie en conversion), on procède parfois à des inventaires typologiques, voire à de simples descriptions de parcelles agrémentées de mesures de la surface terrière.

III.2. Cas des peuplements irréguliers

III.2.1. Etat d'équilibre et nécessité du contrôle

Les inventaires et le suivi des peuplements en futaie régulière servent le plus souvent dans le cadre de l'aménagement. On les utilise pour décrire les peuplements et planifier leur avenir. En revanche, pour les peuplements irréguliers, le suivi est non seulement nécessaire pour l'aménagement, mais également pour des considérations sylvicoles. En effet, la gestion de ces peuplements doit en permanence *maintenir un équilibre instable* et il faut des instruments de contrôle pour leur suivi sylvicole.

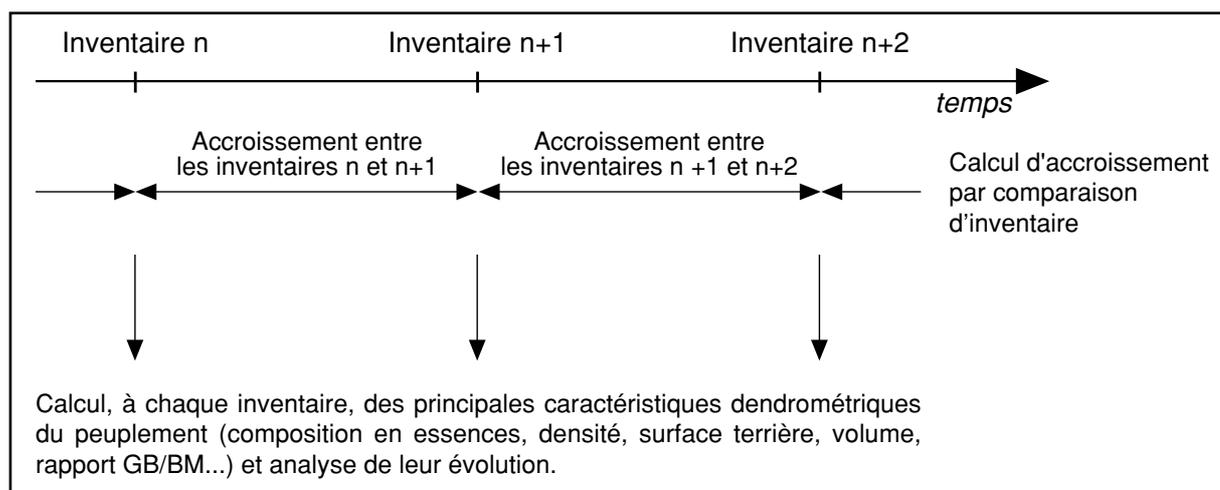




Fort de cette constatation, un mode de gestion portant le nom de *méthode du contrôle* a été préconisé par Gurnaude (en 1879) puis perfectionné et appliqué par Biolley en Suisse par la suite (sur la forêt de Couvet).

Cette méthode s'appuie sur les principes suivants :

- passage en **inventaire pied à pied régulier** (avant chaque coupe),
- **calcul d'accroissement** par comparaison d'inventaire,
- **accroissement** utilisé comme **guide sylvicole**,
- **possibilité** proposée en fonction de l'**accroissement passé** et de l'état des peuplements.



Cette méthode permet de suivre les peuplements. Elle considère l'accroissement comme un guide sylvicole. On cherche à maintenir cet accroissement à un optimum qui garantit la pérennité de la gestion.

De nos jours, la plupart des méthodes de suivi des peuplements irréguliers s'inspirent, de près ou de loin, de cette méthode du contrôle. Elles se réfèrent toujours à une méthode d'inventaire. C'est pour cela que ces différentes méthodes d'inventaire seront détaillées dans ce qui suit.

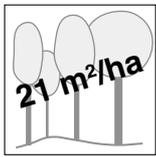
III.2.2. Les différentes méthodes d'inventaire permettant le contrôle

III.2.2.1. L'inventaire pied à pied

III.2.2.1.1. Pratique

L'inventaire pied à pied est le plus classique des inventaires. Il consiste en un dénombrement exhaustif des tiges par essence et par classe de diamètre à partir d'un diamètre de précomptage (le plus souvent la classe 20). Pour pratiquer un inventaire pied par pied, il faut connaître avec précision la surface sur laquelle on travaille.

Pour réaliser cette opération, on progresse en virée, avec une équipe de 3 à 4 appelants et un pointeur. Il serait souhaitable de ne travailler qu'avec 3 appelants dans les cas difficiles (parcelles pentues, sous-étage



important, densité forte...). Les arbres appelés sont griffés horizontalement, à hauteur de poitrine ou bien marqués à la peinture forestière.

III.2.2.1.2. Précision des résultats

Contrairement aux idées reçues, les inventaires pied à pied ne sont pas exempts d'erreurs. En effet, de nombreux paramètres peuvent influencer sur les résultats :

- jeu dans les compas,
- hauteur de la mesure du diamètre,
- arbres oubliés ou comptés deux fois,
- erreurs dans les appels ou le pointage...

On peut de plus dire que la précision dépend du type de peuplement, de la qualité du travail, de la fatigue et de la lassitude de l'équipe.

Sur de grandes surfaces (30 ha), on donne une erreur de 6 à 7 % sur le nombre de tiges (sous-estimation) et de 6 à 10 % sur la surface terrière (Bruciamacchie, 1990). Duplat et Perrotte (1981) annoncent une erreur de - 15 à + 10 % sur la surface terrière !

III.2.2.1.3. Rendement

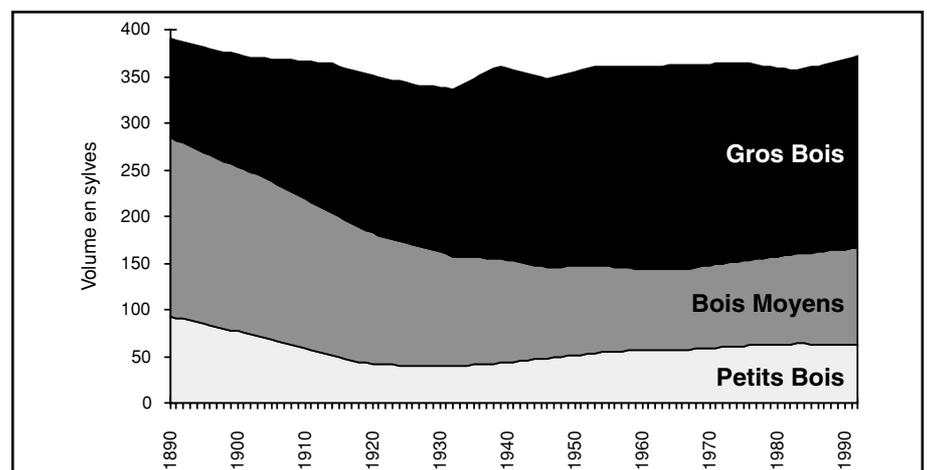
Tout comme la précision, les rendements en inventaire pied à pied sont variables. Plus les peuplements sont denses, moins ils sont pénétrables plus long sera l'inventaire.

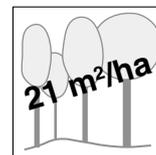
On admet en général, pour une équipe de trois compteurs et un peinteur les rendements suivants :

- en **plaine** 12 à 30 ha/jour, soit **3 à 8 ha/jour/personne**,
- en **montagne** 4 à 15 ha/jour, soit **1 à 4 ha/jour/personne**.

III.2.2.1.4. Exemple de résultat de l'utilisation répétée d'inventaire pied à pied dans le cadre de la méthode du contrôle

La conduite d'inventaires pied par pied répétés dans le cadre de la méthode du contrôle conduit à l'obtention de documents de suivi particulièrement intéressants. Par exemple, ceux de la forêt de Couvet (Suisse) permettent de suivre avec précision l'évolution de peuplements jardinés.





III.2.2.2. L'inventaire typologique (voir exemples de typologies fournis)

III.2.2.2.1. L'approche typologique

L'approche typologique est assez récente à l'échelle des temps forestiers. En effet, les premiers travaux de construction de typologie datent de 1981 (Herbert et Rébeiro, 1981) avec la construction d'une typologie des futaies jardinées de la Haute-Chaîne du Jura. Ce travail d'une excellente qualité reste d'actualité, tant au niveau des résultats obtenus que dans la démarche de réalisation.

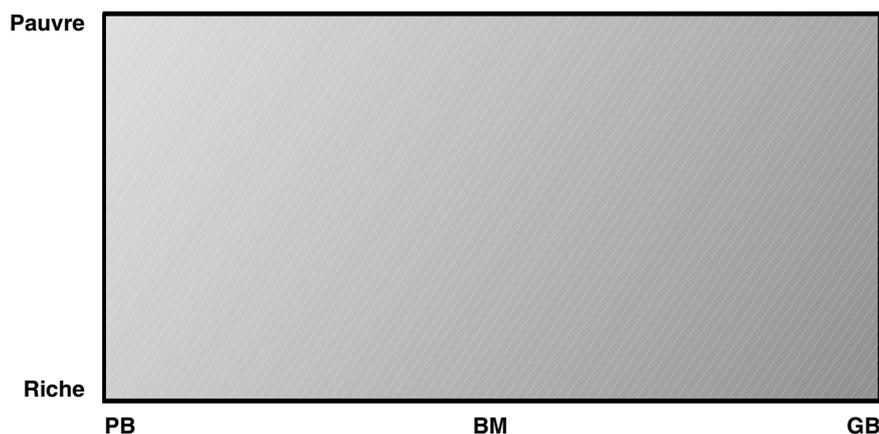
D'autres travaux ont suivi, dans les taillis avec réserves de Haute-Saône (Wentz, 1986), dans les taillis avec réserves du Loiret (Aubry et Druelle, 1988), dans les futaies jardinées du Vercors (Léonard et Porquet, 1987), en futaie jardinée feuillue mélangée (Soulé, 1991), en hêtraie jardinée par bouquets (Prévost, 1991), en taillis avec réserves en conversion (Gaudin, 1992), en taillis avec réserves (Soulé *et al.*, 1994)...

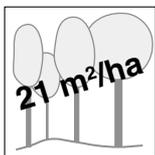
On constate que ce sont essentiellement des peuplements irréguliers ou régularisés qui font l'objet de typologie. Ce sont en effet ces peuplements qui posent des problèmes de description et de gestion d'où leur étude. La plupart du temps, ces études ont été conduites dans le cadre des stages de troisième année de l'ENITEF.

III.2.2.2.2. L'outil typologique : une approche intégrée

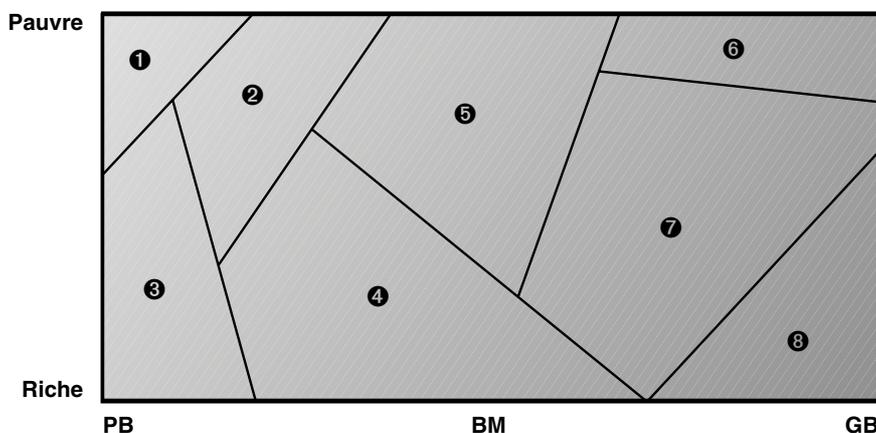
- Construire une typologie, c'est au sens général élaborer des types facilitant l'analyse d'une réalité complexe et permettant une classification. On peut en donner une définition dans le cadre des techniques forestières (Doussot, 1990) « *Créer une typologie de peuplements, c'est réunir dans un effort de synthèse, sous une même appellation, des peuplements ayant en commun certaines caractéristiques jugées déterminantes en ce qui concerne à la fois les objectifs à leur assigner à long terme et les règles sylvicoles à leur appliquer dans le présent* ».

Ainsi, on s'attaque à la réalité complexe de certains peuplements forestiers (taillis avec réserves, futaies irrégulières...).





On cherche avec la typologie à créer des *types homogènes*, à appréhender et simplifier cette réalité complexe, tout en travaillant de façon globale. On essaye ainsi de faire une synthèse des variables les plus intéressantes pour aboutir à la construction de types.



Ainsi, une typologie des peuplements cherche (Bruciamacchie, 1989) :

- à **harmoniser l'appellation des peuplements** par les gestionnaires forestiers d'une région (remplacer des descriptions imprécises comme *c'est une futaie irrégulière pauvre avec beaucoup de petits bois* par *c'est une futaie irrégulière de type D*),

- à **décrire finement les peuplements**, notamment à l'aide de critères dendrométriques fiables (densité, surface terrière ou volume, répartition en PB, BM et GB, densité des semis...),

- à appréhender les **états futurs possibles** à l'aide de certaines hypothèses de croissance et/ou de gestion.

- Une typologie comprend les éléments suivants :

- une délimitation de la région naturelle étudiée,
- une clef de détermination des types de peuplements,
- des fiches présentant les différents types de peuplements.

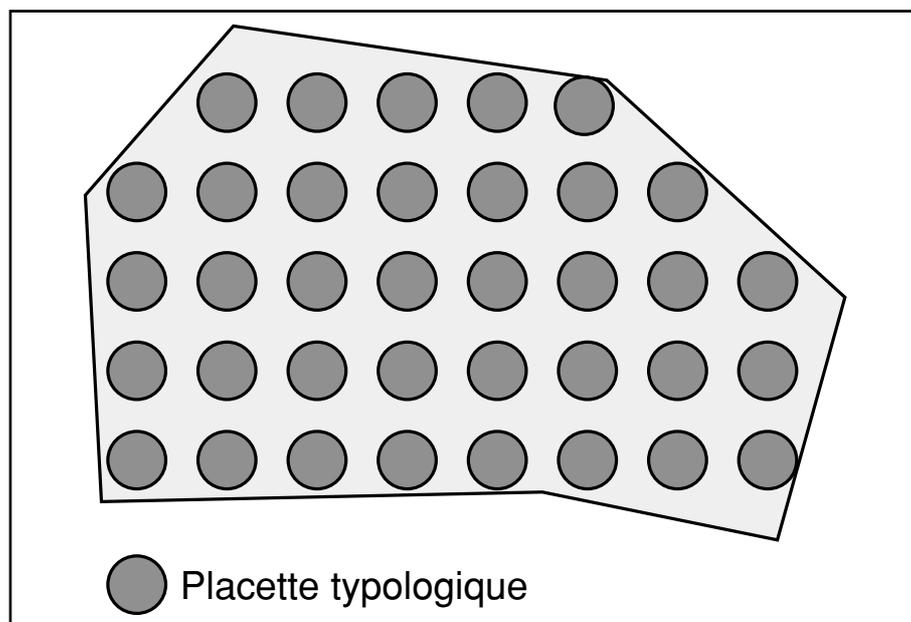
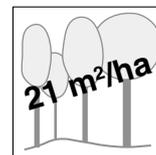
Souvent, on trouve également :

- des schémas d'évolution entre types,
- des recommandations de gestion.

III.2.2.2.3. L'inventaire typologique

- **principe**

On peut utiliser une clef de détermination typologique de manière ponctuelle dans un peuplement donné. On peut également l'utiliser sur un résultat d'inventaire (Herbert et Rébeiot, 1981), mais aussi de manière répétée et systématique sur une parcelle ou une forêt (Aubry, Bruciamacchie et Druelle, 1990). De cette manière, on procède à un inventaire typologique.



L'inventaire typologique se fait le plus souvent à l'hectare (1 placette par hectare, un relevé tous les 100 m) ou au quart d'hectare (4 placettes par hectare, un relevé tous les 50 m).

L'inventaire typologique permet de déduire les *principales caractéristiques dendrométriques du peuplement* (moyenne, sur l'ensemble des relevés de la surface terrière, de la densité, de la répartition en PB, BM et GB...) et aussi de *dresser des cartes thématiques* (Aubry, Bruciamacchie et Druelle, 1990).

- **précision**

La précision des inventaires typologiques est variable et dépend :

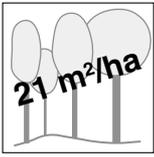
- de la qualité de la typologie utilisée,
- de la densité des relevés (à l'hectare ou au quart d'hectare),
- de la maîtrise de l'outil par les utilisateurs...

Les meilleurs outils typologiques donnent une incertitude sur la surface terrière de l'ordre de 10 à 15 %. Elle est suffisante pour classer des peuplements dans le cadre d'un aménagement ou pour suivre leur évolution.

- **rendement**

Les rendements dépendent de la densité des points de sondage. On peut donner comme valeurs indicatives, dans le cadre d'inventaires n'ayant comme but que la gestion forestière :

- 30 à 50 ha/personne/jour avec 1 point/ha (Aubry, Bruciamacchie et Druelle, 1990),
- 10 à 15 ha/jour/personne avec 4 points/ha (Roustan, communication personnelle).
- 20 à 40 ha/jour/personne avec 4 points/ha (Hachette, 1996).



III.2.2.2.4. Les limites de l'approche typologique

Les outils typologiques nécessitent, pour être utilisés de manière performante, un *minimum de formation* (manipulation des clefs, reconnaissance à l'œil des principales catégories de diamètre...). Même utilisés avec des gestionnaires habitués, il subsiste un certain nombre d'erreurs de classement (confusion entre des types proches l'un de l'autre) qui font que les résultats sont donnés avec une incertitude minimale voisine de 10 à 15 %. Ceci dit, cette incertitude est tout à fait compatible avec les objectifs courants de la gestion (classement de parcelles, suivi de l'évolution des peuplements...).

Un autre problème concerne la *disponibilité des typologies* de peuplements. Si le territoire national est couvert pour environ ses deux tiers par des catalogues de station, il en est tout autrement pour les typologies de peuplements. Elles sont actuellement peu nombreuses (une quinzaine, tout au plus) et couvrent une surface faible.

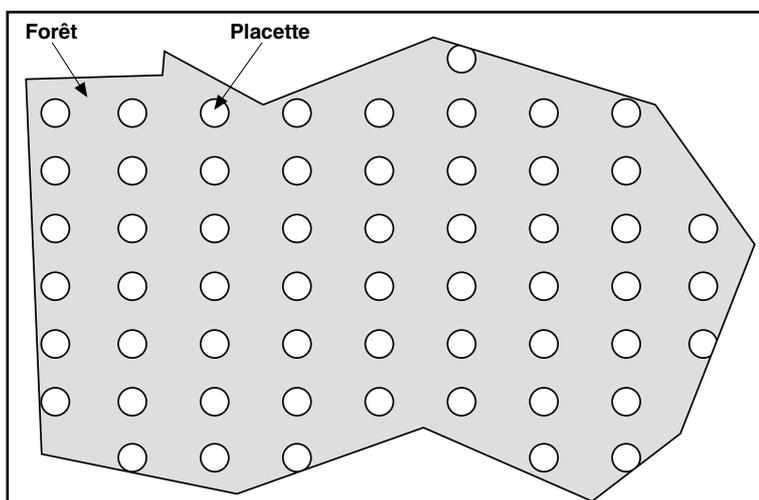
Dans certains cas, des typologies construites pour une région naturelle déterminée peuvent être adaptées avec succès dans des régions voisines. Il faut pour cela que les régions possèdent des caractéristiques stationnelles et climatiques semblables ainsi que des peuplements de même allure et de même composition. Il faut alors tester la typologie dans la nouvelle région pour vérifier que les résultats obtenus sont corrects. Cette méthode, bien qu'elle doive être appliquée avec les plus grandes précautions, peut parfois éviter de construire une nouvelle typologie.

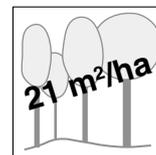
Un dernier point concerne le succès que connaissent les typologies. Si des outils comme la typologie du Haut-Jura (Herbert et Rébeiro, 1981) connaissent un franc et mérité succès tant en forêt soumise qu'en forêt privée, d'autres outils pourtant d'excellente qualité sont largement sous-employés. Le manque de diffusion et de vulgarisation de la part de certains organismes est peut-être à mettre en cause. Il est également vrai que ce type d'outil, quand il n'est pas présenté de manière simple et introduit par un minimum de formation peut rebuter certains.

III.2.2.3. L'inventaire statistique par placettes temporaires

III.2.2.3.1. Principe

Sur de grandes forêts, il devient vite impossible de passer en inventaire pied à pied à cause du coût engendré. Il peut alors paraître intéressant de n'inventorier qu'une partie de la forêt et de généraliser les résultats obtenus à l'ensemble de la forêt. Ainsi, on met en place des placettes et on extrapole les résultats obtenus sur l'ensemble de ces placettes à la forêt.



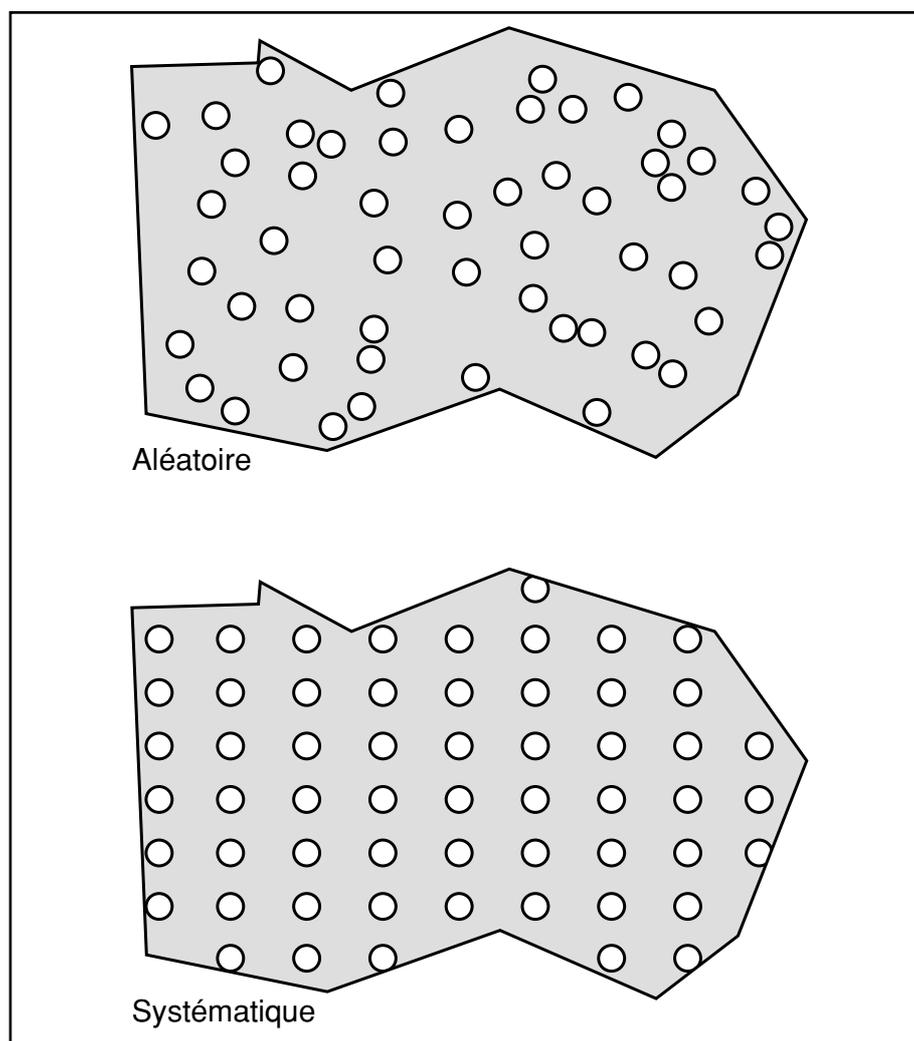


Toute la difficulté consiste à savoir dans quelle mesure les résultats obtenus sont fiables et peuvent décrire convenablement l'ensemble des peuplements. Pour cela, on fait appel aux lois de la statistique d'où le nom d'*inventaire statistique* (ou *inventaire par échantillonnage*).

III.2.2.3.2. Échantillonnage et placettes

• La première question qui se pose concerne la disposition des placettes sur la forêt (*échantillonnage*). Plusieurs possibilités existent :

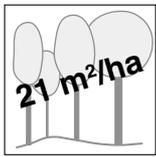
L'**échantillonnage aléatoire**, qui correspond à une détermination purement au hasard de la localisation des placettes, est très rarement utilisé. En revanche, l'**échantillonnage systématique** l'est couramment pour les inventaires statistiques.



Pour mettre en place les placettes, il suffit :

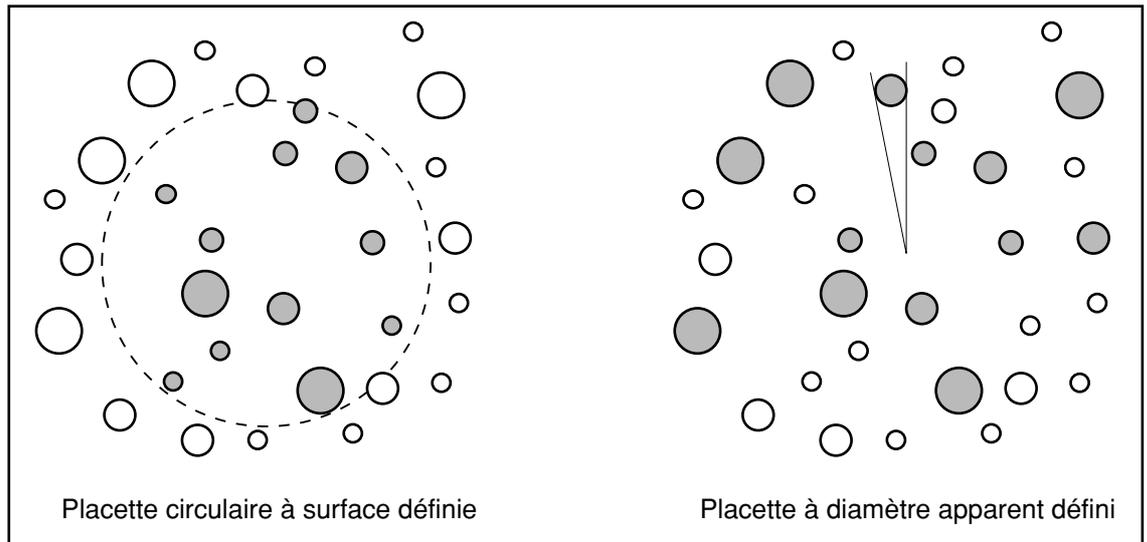
- de calculer la densité des placettes (par exemple 1 placette tous les deux hectares),

- de tracer sur papier calque, à la même échelle que la carte de la forêt un quadrillage correspondant à la répartition en carré des parcelles (pour l'exemple choisi, il faut des carrés ayant 141 m de côté),



- de poser le quadrillage sur la forêt et de l'ajuster au mieux. Chaque intersection du quadrillage détermine l'endroit où sera installée une placette.

• La seconde question concerne les *placettes* mises en place. La plupart du temps, on met en place des placettes (le plus souvent circulaires ou elliptiques) à **surface définie**. On peut également parfois mettre en place des placettes à **diamètre apparent défini** en utilisant un appareil de type relascopique.



Les placettes à surface définie ont tendance à sous-estimer les gros bois et donc à sous-estimer la surface terrière et le volume. Elles donnent en revanche une bonne idée de la densité. Les placettes à diamètre apparent défini donnent une meilleure estimation du volume et de la surface terrière, mais elles sous-estiment la densité et le nombre de petits bois. Elles sont également moins faciles à appréhender.

• Dans le cas des placettes à surface définie, on peut se demander quelle est la surface optimale pour que la placette soit représentative du peuplement. Il apparaît (Duplat et Perrotte, 1981) que leur surface doit être telle qu'on compte *10 à 12 arbres par placette*. Ainsi, en fonction de la densité moyenne du peuplement, on choisira la surface des placettes de façon à ce qu'elles contiennent 10 à 12 arbres.

• La mise en place de ces placettes à surface définie peut être faite de différentes manières. On préférera les placettes circulaires qui sont isotropes et présentent moins d'arbres en limite aux placettes rectangulaires.

Pour les placettes circulaires, on pourra utiliser :

- une cordelette,
- une mire « casserole »,
- une mire Pardé,
- un télémètre électronique...

Les placettes circulaires concentriques

On peut améliorer la précision donnée pour les placettes circulaires (de Turckheim, 1992a) en réalisant des cercles concentriques prenant en compte certaines catégories de diamètres. Ainsi, les petits bois peuvent être inventoriés dans un cercle de 10 m de rayon, les bois moyens dans un cercle de 15 et les gros bois dans un de 20. La mesure des bois moyens et des gros bois devient alors plus fiable.



III.2.2.3.3. Précision des résultats

Lors d'un inventaire statistique, on peut mesurer ou calculer sur chaque placette un certain nombre de variables (densité, volume, surface terrière, densité de semis, pourcentage d'essences, taux de gélivure...). On cherche à savoir en quoi la moyenne obtenue sur l'ensemble des placettes pour chacune de ces variables est représentative de l'ensemble de la forêt. On notera x une des variables qui nous intéresse.

- Pour chaque variable, on peut calculer la moyenne :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

et la variance (carré de l'écart-type, noté s) :

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 \right)$$

On obtient ainsi l'erreur relative Er :

$$Er = \frac{t \cdot s}{\bar{x} \cdot \sqrt{n}} = \frac{t \cdot Cv}{\sqrt{n}}$$

où t est la variable de Student (lu dans une table pour $n-1$ degrés de liberté ; pour les grandes valeurs de n ($n \geq 30$), on prend $t=2$, voire 1,96), n le nombre de placettes et Cv le coefficient de variation (rapport entre l'écart-type et la moyenne).

Cette erreur relative traduit la fiabilité des résultats. Plus elle est faible, plus les moyennes obtenues sont fiables. Elle sert à calculer l'intervalle de confiance dans lequel on a 95 % de chance de se trouver. Autrement dit, si on refait 100 fois le même inventaire statistique, on ne sera hors de l'intervalle de confiance que dans 5 cas. L'intervalle de confiance est donné de la façon suivante :

$$[\bar{x} - Er \cdot \bar{x} ; \bar{x} + Er \cdot \bar{x}]$$

Formulation complète de l'erreur relative

En toute rigueur, l'erreur relative devrait être multipliée par un coefficient valant :

$$(1 - ns/S)^{1/2}$$

où n correspond au nombre de placettes, s à la surface unitaire des placettes et S à la surface totale de la forêt.

Toutefois, la plupart du temps la surface cumulée des placettes est très faible par rapport à la surface totale de la forêt et ce coefficient est donc proche de 1. Il ne faut en tenir compte que lorsqu'on travaille sur de petites forêts.



- On constate que :

- la précision des résultats dépend non pas du nombre de placettes par hectare, mais du *nombre absolu de placettes*. Ainsi, on aura la même précision si on met en place 100 placettes sur 60 ha, 600 ha ou 6 000 ha ! (en toute rigueur, le coefficient présenté dans l'encadré intervient un peu dans ce cas),

- la précision dépendant du nombre de placettes, les résultats sont généralement très fiables à l'échelle d'une forêt, fiables à l'échelle d'une série, acceptables sur un petit groupe de parcelles homogènes et très médiocres sur les petites parcelles.

On obtient parfois avec des inventaires statistiques sur de grandes forêts de meilleurs résultats qu'avec un inventaire pied à pied. On déconseille de passer en inventaire statistique quand le taux d'échantillonnage dépasse 10 %.

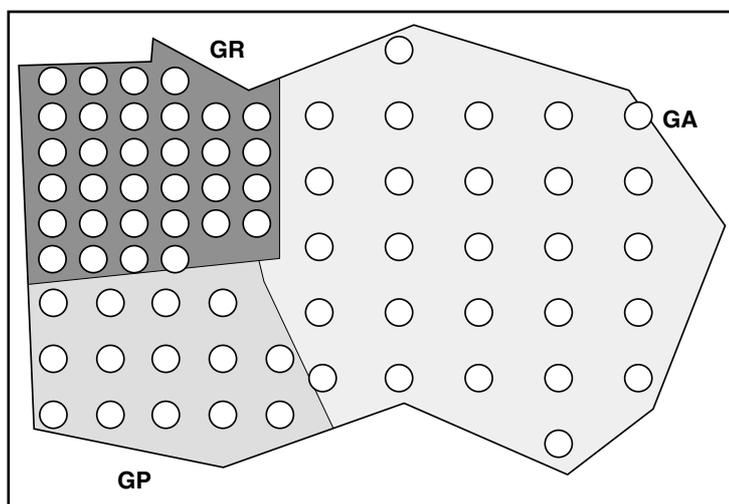
• Lorsqu'on veut mettre en place un inventaire statistique, il faut déterminer à l'avance le nombre de placettes en fonction de l'erreur relative qu'on souhaite ne pas dépasser. Pour cela, on utilise la formule donnant l'erreur relative sous la forme :

$$n = \left(\frac{t \cdot Cv}{Er} \right)^2$$

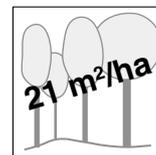
Il faut toutefois connaître le coefficient de variation pour calculer le nombre de placettes. On peut soit mettre en place un certain nombre de placettes sur le terrain et calculer un *Cv* provisoire, soit se référer aux valeurs usuelles suivantes :

	N	G	Ho	V
Structure régulière	30 %	20-30 %	5-10 %	5-10 %
Structure irrégulière	40-50 %	40-50 %	-	40-50 %

III.2.2.3.4. Intérêt de la stratification



• Il arrive souvent que l'on puisse définir a priori des groupes de parcelles ayant des caractéristiques communes et différents les uns des autres (utilisation des classes d'âge, de photographies aériennes, d'objectifs sylvicoles...). On procède alors à une stratification de la forêt pour la diviser en zones homogènes (par exemple, groupe de régénération, groupe de préparation, groupe d'amélioration). On peut faire dans ce cas varier la densité de placettes selon la précision recherchée dans chaque strate.



• La stratification, outre les informations qu'elle peut donner sur chaque strate, permet d'améliorer la précision des résultats. Toutefois, elle nécessite des calculs un peu plus complexes.

On obtient la moyenne de la façon suivante :

$$\bar{x} = \frac{S_1}{S} \bar{x}_1 + \frac{S_2}{S} \bar{x}_2 + \dots$$

Puis ensuite on calcule le carré de l'écart-type de la moyenne :

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \left(\frac{S_1}{S}\right)^2 \frac{\sigma_1^2}{n_1} + \left(\frac{S_2}{S}\right)^2 \frac{\sigma_2^2}{n_2} + \dots$$

S_1 correspond à la surface de la strate 1, S à la surface totale de la forêt, \bar{x}_1 et σ_1 à la moyenne et à l'écart-type de la variable considérée pour la strate 1...

En multipliant l'écart-type de la moyenne par le t de Student, on obtient la demi-largeur de l'intervalle de confiance. Pour plus de précision concernant la stratification, on consultera Pardé et Bouchon (1988) ainsi que Duplat et Perrotte (1981).

Assez souvent, le gain de précision obtenu grâce à la stratification n'est que peu important.

III.2.2.3.5. Rendement

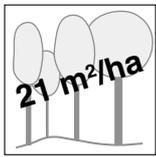
Contrairement à ce que l'on peut faire pour un inventaire pied à pied ou un inventaire typologique, on ne peut pour un inventaire statistique donner un rendement dépendant de la surface. En effet, c'est le nombre absolu de placettes et non le nombre de placettes à l'hectare qui intervient dans la détermination de l'erreur relative.

En revanche, on peut donner un ordre d'idée du nombre de placettes que l'on peut inventorier en une journée. Ainsi, Pardé et Bouchon (1988) annoncent de 25 à 40 placettes/jour/équipe, soit environ **12 à 20 placettes/jour/personne**.

III.2.2.4. L'inventaire statistique par placettes permanentes

III.2.2.4.1. Principe

L'inventaire statistique par placettes permanentes repose exactement sur le même principe que l'inventaire statistique classique. Toutefois, les placettes sont matérialisées de manière discrète sur le terrain (piquet métallique enfoncé dans le sol pouvant être repéré grâce à un détecteur de métaux) et peuvent être réinventoriées selon les besoins. Habituellement, les arbres sont repérés sur la placette grâce à leur azimut et leur distance au centre.



III.2.2.4.2. Points communs et différences avec l'inventaire par placettes temporaires

On peut grâce aux placettes permanentes obtenir les mêmes renseignements qu'avec des placettes temporaires. On peut de plus :

- grâce au repérage individuel des arbres **suivre individuellement leur accroissement** et éventuellement interpréter les **réactions aux coupes**,
- faire des mesures de **surface de houppier** pour suivre leur évolution (réaction à l'éclaircie, sortie de compression...),
- faire des mesures d'**évolution de la régénération**,
- calculer un **accroissement global** par la méthode des sondages à la tarière sans avoir besoin de sonder les arbres (on peut obtenir, grâce aux mesures successives du même arbre une idée de sa croissance en diamètre)... On peut plus simplement passer par une comparaison d'inventaires.

Ainsi, les placettes permanentes sont plus lourdes à mettre en place car on y mesure généralement plus de données, mais elles sont beaucoup plus riches en enseignements que les placettes temporaires. Les gestionnaires de peuplements irréguliers adoptent de plus en plus cet outil de contrôle.

III.2.2.4.3. Rendement

Les données à mesurer étant plus nombreuses dans le cas des placettes permanentes, le rendement de mise en place est moins bon que pour les placettes temporaires. On donne habituellement (Bruciamacchie, communication personnelle) la valeur de **10 à 12 placettes/personne/jour**. Schmid-Haas (1989) *in* Duchiron (1994) précise que le premier inventaire (mise en place des placettes) est celui qui coûte le plus cher (4 placettes/personne/jour), mais les suivants sont beaucoup plus rapides (7 à 9 placettes/personne/jour).

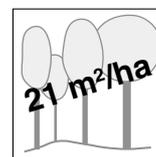
Bien entendu, le rendement varie fortement en fonction du nombre de paramètres relevés. Ainsi, dans le cadre de placettes de recherche (par exemple, les placettes de suivi *Pro Silva* de type 3, Pro Silva France (1992), il faut une à deux journées pour mettre en place une placette !).

III.2.3. Comparaison technico-économique des différentes méthodes de contrôle

III.2.3.1. Pourquoi un choix des méthodes de contrôle ?

Les différentes méthodes d'inventaire présentées ci-dessus peuvent permettre le contrôle des peuplements irréguliers. Elles présentent toutes des *avantages* et des *inconvenients* ainsi que des *rendements* (et donc des coûts) variables.

Un gestionnaire forestier doit donc, sur une forêt donnée choisir une (voire plusieurs) de ces méthodes en privilégiant celle qui correspond le plus à ses attentes et à ses moyens. On cherchera donc ici à comparer les différentes méthodes de contrôle et à donner des éléments de choix pour



privilégier l'une ou l'autre de ces méthodes. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, les discussions à ce propos sont encore nombreuses et aucune méthode n'est systématiquement préférée à une autre (de Turckheim, 1992a et 1992b ; Favre, 1992 ; Mayeux, 1994).

III.2.3.2. Synthèse concernant les différentes méthodes

III.2.3.2.1. Calcul des accroissements

Les différentes méthodes de contrôle permettent de calculer l'accroissement (en volume, en surface terrière...) ou bien le passage à la futaie. Elles ne procèdent toutefois pas toutes de la même façon et elles nécessitent plus ou moins de données.

Le tableau suivant donne une synthèse des données nécessaires et des méthodes applicables pour calculer l'accroissement.

Type d'inventaire	Obligations pour le gestionnaire		Méthode de calcul de l'accroissement		
	Besoin d'au moins deux inventaires	Besoin d'un contrôle rigoureux des exploitations	Par comparaison d'inventaire	Par sondage à la tarière	Autre
Pied à pied	Oui	Oui	Oui	Possible	-
Placettes temporaires	Non	Non	Incertitude trop élevée	Oui	-
Placettes permanentes	Oui	Non	Oui	Possible, en mesurant pour chaque arbre l'évolution du diamètre	-
Typologique	Non	Non	Non (incertitude trop élevée)	Non	Moyenne pondérée de l'accroissement de chaque type de peuplement (quand ces accroissements sont donnés)

III.2.3.2.2. Qualité et pertinence des informations recueillies

On cherche ici à comparer dans un tableau, les différentes méthodes en fonction des informations qu'elles peuvent donner. Ainsi, un gestionnaire pourra choisir une méthode au détriment d'une autre en fonction des informations principales qu'il souhaite obtenir.

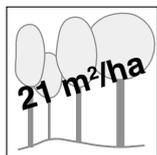
Les critères de rendement et de coût n'interviennent pas ici car ils seront traités plus loin.

- **Niveau de technicité à mettre en œuvre.**

Il s'agit là de comparer les méthodes en fonction des difficultés qu'elles présentent pour récolter les informations sur le terrain (mise en place et choix du type de placette, matériel à utiliser...) et pour les analyser par la suite (travaux statistiques, utilisation de l'informatique, cartographie éventuelle...).

- **Travail de relevé effectué seul.**

Certains inventaires peuvent être réalisés par une personne seule (même si ce n'est pas souhaitable parfois). D'autres le sont très difficilement.



- **Précision à l'échelle de la forêt et de la parcelle.**

Même si certains inventaires ont une précision variable (choisie par l'utilisateur en fonction du nombre de placettes), on peut dégager de grandes lignes en fonction de la surface inventoriée (plusieurs dizaines d'hectares pour une forêt, de moins d'une dizaine à deux dizaines pour une parcelle).

- **Informations précises concernant de petites populations.**

Seul l'inventaire pied à pied permet de dire de manière fiable quel est le nombre de pieds d'une essence rare (par exemple de l'Alisier torminal) à l'échelle de la forêt ou de la parcelle, ou quel est le volume de gros bois de qualité A d'une essence secondaire donnée.

- **Cartographie fine des peuplements.**

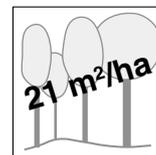
L'inventaire pied à pied ne permet pas de faire de cartographie car il donne les résultats au niveau de la parcelle. En revanche, les inventaires statistiques permettent parfois de faire une cartographie sommaire (précision de l'ordre de deux hectares, voire de l'hectare). Les inventaires typologiques permettent de faire une cartographie souvent précise (quart d'hectare) et d'élaborer des cartes thématiques (Aubry, Bruciamacchie et Druelle, 1990).

- **Informations d'ordre qualitatif.**

L'inventaire pied à pied ne donne que des informations quantitatives (répartition des tiges en classes de diamètre, volume, densité...). D'autres inventaires peuvent de plus apporter des informations qualitatives très importantes pour la gestion.

	Inventaire			
	pied à pied	par placettes temporaires	par placettes permanentes	typologique
Niveau de technicité à mettre en œuvre	+	+++	+++	+++
Travail de relevé effectué seul	-	++	++	+++
Précision à l'échelle de la forêt	++	+++	+++	++
Précision à l'échelle de la parcelle	+++	-	-	++
Informations précises concernant de petites populations	+++	-	-	*
Cartographie fine des peuplements	-	+	+	+++
Informations d'ordre qualitatif	-	++	+++	*
Suivi de la régénération	-	+	+++	*
Informations concernant la dynamique du massif	+	+	+++	+++

+++ convient bien ou donne des résultats très fiables, ++ convient bien ou donne des résultats corrects, + peut à la rigueur convenir, - donne de mauvais résultats et ne convient pas



Ainsi, on peut relever certains paramètres comme la qualité des bois ou l'état sanitaire dans un inventaire par placettes temporaires, mais seul l'inventaire par placettes permanentes permet de suivre dans le temps la qualité, la vitalité, la position sociale... au niveau de chaque arbre.

L'inventaire typologique donne également beaucoup d'informations qui dépendent de la typologie utilisée (par exemple, état sanitaire, forme des arbres, présence de compression...), mais il est moins précis à ce sujet que l'inventaire par placettes permanentes.

- **Suivi de la régénération.**

L'inventaire pied à pied ne s'intéresse pas à la régénération et doit donc obligatoirement être complété de descriptions de parcelles ou des dispositifs de suivi pour celle-ci. Seul le passage à la futaie donne une vision a posteriori du niveau de régénération.

L'inventaire par placettes temporaires donne uniquement une vision statique de la régénération alors que l'inventaire par placettes permanentes permet d'appréhender sa dynamique et de la relier à des seuils dendrométriques (par exemple, régénération facile du Hêtre quand la surface terrière est inférieure ou égale à 18 m²/ha).

L'inventaire typologique, en précisant le niveau de régénération moyen par type, permet de connaître non seulement la dynamique globale de la régénération, mais permet aussi de connaître les parcelles où celle-ci fait défaut.

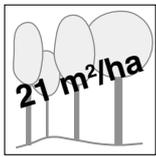
- **Informations concernant la dynamique du massif.**

Si l'inventaire pied à pied et l'inventaire par placettes temporaires permettent de donner quelques lignes de l'évolution globale du massif, ce sont surtout les placettes permanentes et la typologie des peuplements qui renseignent de manière précise sur celle-ci. La typologie, en ayant modélisé l'évolution entre types permet de connaître les évolutions potentielles et les méthodes sylvicoles pour aller dans une direction donnée.

III.2.3.3. Comparaison économique des différentes méthodes

Ce qui précède a permis de montrer ce qu'on peut attendre de chaque méthode de contrôle. Le choix d'une ou plusieurs méthodes doit donc se faire en fonction de cela, mais également en fonction de critères économiques.

On peut donc chercher, en fonction de la surface considérée, quelle méthode est préférable aux autres d'un point de vue purement économique. Pour cela, on utilisera des données concernant une forêt irrégulière de plaine à matériel ligneux assez faible (300 tiges/ha), bien que ce qui suit puisse être adapté, moyennant quelques modifications à toutes les forêts irrégulières.



III.2.3.3.1. Les hypothèses retenues

Pour comparer les différentes méthodes de contrôle, on est obligé de s'appuyer sur certaines hypothèses et de fixer certains paramètres. Ce qui suit s'appuie donc sur des choix voulus réalistes, mais ne peut en rien être valable dans tous les cas. Toutefois, les paramètres étant individualisés, on peut en les réajustant pour un cas précis obtenir pour ce cas une comparaison juste.

Toutes les erreurs relatives données concernent la *surface terrière*.

On a estimé ou choisi les données suivantes :

- **Pour les inventaires statistiques :**

- $C_v = 50 \%$ (C_v sur la surface terrière courant en peuplement irrégulier),

- Erreur relative recherchée : 8 % (comparable à celle d'un inventaire pied à pied de qualité moyenne),

- taille des placettes : 4 ares (12 arbres par placette avec une densité de 300 tiges/ha),

- rendement : 18 placettes/jour/personne en inventaire par placettes temporaires, 10 en inventaire par placettes permanentes (valeurs moyennes pour une équipe composée de deux personnes).

- **Pour l'inventaire pied à pied :**

- rendement : 6 ha/personne/jour (rendement assez fort correspondant à des peuplements de plaine faciles à inventorier comme c'est le cas ici),

- équipe : un pointeur et trois appelants.

- **Pour l'inventaire typologique :**

- rendement : 20 ha/personne/jour (rendement assez faible car il correspond à un point tous les 50 mètres, inventaire au quart d'hectare),

- équipe de 2 personnes.

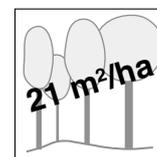
Pour chiffrer les coûts, on a fixé un coût moyen par équipe en tenant compte de sa composition (un technicien (au sens large du terme, c'est à dire un technicien de coopérative, un expert...) coûtant 2 500 F/jour et un garde ou ouvrier coûtant 800 F/jour). Ces chiffres sont à peu près fiables pour la forêt privée.

On a également ajouté, en plus des coûts de terrain, les coûts de dépouillement au bureau.

- Pour les inventaires statistiques, on a ajouté globalement deux journées de technicien correspondant à la mise en place du dispositif et au traitement informatique.

- Pour l'inventaire pied à pied, on a adopté les temps suivants :

- un quart de journée pour moins de 100 ha,



- une demi-journée pour 100 à 200 ha,
- trois-quarts de journée pour 200 ha et plus.

Ces durées correspondent au traitement des données. Elles augmentent avec la surface car le nombre de parcelles augmente et rentrer les données devient plus long.

- Pour l'inventaire typologique, on a adopté la valeur d'une demi-journée de travail au bureau par tranche de 50 ha inventoriée. Cette durée correspond au traitement des données et à la réalisation des cartes typologiques.

III.2.3.3.2. Les résultats économiques

Les hypothèses qui précèdent permettent de dresser le tableau suivant. Chaque cellule grisée présente une variable qui peut être remise à jour pour affiner les résultats en fonction d'un cas particulier donné.

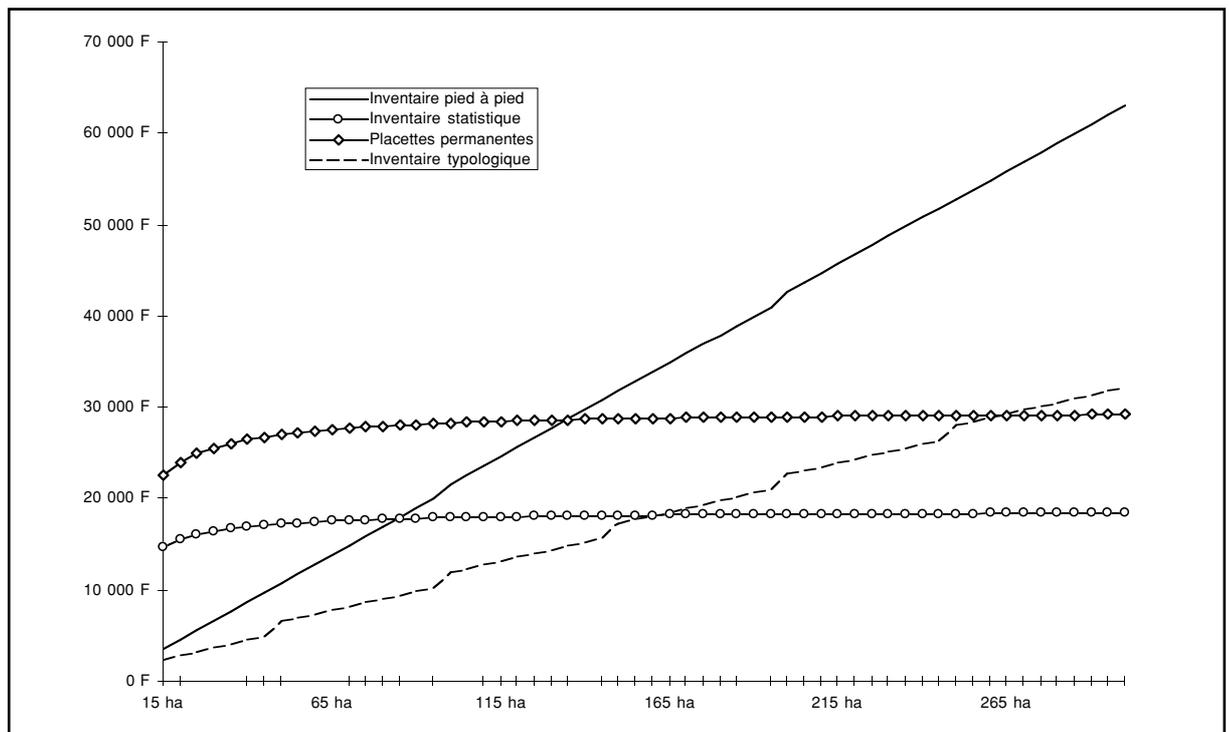
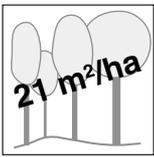
	Précision des résultats (Er)	Rendement	Nombre de placettes	15 ha	30 ha	50 ha	100 ha	150 ha	200 ha	300 ha
Inventaire pied à pied	8%	6 ha/per/jour	-	3 688 F	6 750 F	10 833 F	21 667 F	31 875 F	42 708 F	63 125 F
Inventaire statistique	8%		18 placettes/j/per	14 824 F	16 462 F	17 281 F	17 977 F	18 226 F	18 355 F	18 486 F
Placettes permanentes	8%		10 placettes/j/per	22 684 F	25 632 F	27 106 F	28 358 F	28 808 F	29 039 F	29 275 F
Inventaire typologique	15%	20 ha/per/jour		2 488 F	3 725 F	6 625 F	12 000 F	17 375 F	22 750 F	32 250 F
		Equipe	Coût/jour	15 ha	30 ha	50 ha	100 ha	150 ha	200 ha	300 ha
Inventaire pied à pied		1 T - 3 G	1 225 F/jour	246 F	225 F	217 F	217 F	213 F	214 F	210 F
Inventaire statistique		1 T - 1 G	1 650 F/jour	988 F	549 F	346 F	180 F	122 F	92 F	62 F
Placettes permanentes		1 T - 1 G	1 650 F/jour	1 512 F	854 F	542 F	284 F	192 F	145 F	98 F
Inventaire typologique		1 T-1G	1 650 F/jour	166 F	124 F	133 F	120 F	116 F	114 F	108 F
Coût technicien			Densité	Valeur de l'inventaire par hectare						
2500 F/jour			300 tiges/ha							
Coût ouvrier/garde			S placette							
800 F/jour			0,04 ha							
			Cv							
			50%							

Malheureusement, il est difficile de modéliser certaines données. Par exemple, le rendement moyen pour les placettes permanentes doit tenir compte de leur mise en place plus longue alors que les passages suivants sont plus rapides. De même, le nombre de placettes mises en place par jour dépend de la surface de la forêt car plus elle est grande, plus les déplacements entre placettes sont longs.

De ce tableau, on peut construire un graphique qui induit les remarques suivantes :

- L'inventaire à placettes temporaires est toujours moins cher que l'inventaire à placettes permanentes, entre autre parce qu'on y mesure moins de données. Son intérêt étant beaucoup moins grand, on préférera le plus souvent faire un inventaire à placettes permanentes même s'il est plus cher, les placettes temporaires étant elles utilisées le plus souvent en futaie régulière.

- L'inventaire typologique est toujours meilleur marché que l'inventaire pied à pied. Il est le plus souvent moins précis, mais il donne des informations complémentaires.



- Sur les petites forêts, on peut opter pour un inventaire pied à pied ou typologique (voire pratiquer les deux car ils sont complémentaires...). Sur les forêts de taille moyenne, l'inventaire typologique apparaît comme la meilleure solution d'un point de vue économique. Sur les grandes forêts, ce sont les placettes permanentes qui présentent le moindre coût.

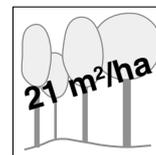
On peut toutefois pratiquer sur une même forêt des inventaires complémentaires. Par exemple, sur une forêt de 1 000 ha, on peut mettre en place un réseau de placettes permanentes et passer en inventaire pied à pied ou typologique sur certaines parcelles pour suivre de manière précise leur évolution et extrapoler les résultats aux parcelles de même allure.

Conclusion

Sans devenir un fou de chiffres et réduire la forêt à des équations et des modèles, le forestier doit savoir utiliser un certain nombre d'outils mathématiques et de données chiffrées. Ils lui permettent de mieux décrire les peuplements et de gérer leur évolution et sont utilisés dans de nombreuses disciplines forestières.

Bibliographie

- Allégrini C. 1981 - Les futaies jardinées privées du Haut-Jura, Besançon, CRPF, 9 p. (résumé des travaux de Herbert et Rébeiro à destination des propriétaires et gestionnaires forestiers).
- Anonyme 1992 - Jardinage cultural et méthode du contrôle - Forêts communales de Couvet, document photocopié, 12 p.
- Aubry S. 1992 - Inventaire typologique en Haute-Loire, ONF, Bulletin technique, n°24, pp. 21-42.
- Aubry et Druelle 1988 - Vers une meilleure connaissance des peuplements feuillus. Typologie en région Centre, Mémoire de troisième année ENITEF, 87 p. et annexes.
- Aubry S., Bruciamacchie M. et Druelle P. 1990 - L'inventaire typologique : un outil performant pour l'élaboration des aménagements ou plans simples de gestion, RFF, XLII, n°4, pp. 429-444.



- Bary-Lenger *et al.* 1993 - Contribution à la typologie des peuplements, RFF, XLV, n°6, pp. 669-680.
- Bedel F. et Pierrat R. 1995 - Influence de la gestion forestière sur la biodiversité, l'exemple des Vosges du Nord, Mémoire de troisième année FIF-ENGREF, 91 p. et annexes.
- Biolley H. 1980 - Œuvre écrite, Neuchâtel, 458 p.
- Bruciamacchie M. 1989 - Typologie des peuplements, RFF, XLI, n°6, pp. 507-512.
- Bruciamacchie M. 1990 - Cours de dendrométrie, document interne ENITEF.
- Bruciamacchie M. 1993 - L'état normal en jardinage, RFF, XLV, n°4, pp. 441-451.
- Couturier A. 1990 - Typologie des sapinières privées des Monts du Forez : propositions sylvicoles, Mémoire de troisième année ENITEF, 67 p.
- Décourt N. 1984 - Tables de production pour les forêts françaises, Nancy, ENGREF. 158 p. seconde édition.
- Doussot R. 1990 - Cours d'aménagement, document interne ENITEF.
- Duchiron M-S. 1994 - Gestion des futaies irrégulières et mélangées, édition de l'Auteur, 201 p. et annexes.
- Duplat P. et Perrotte G. 1981 - Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers, ONF, Section technique, 432 p.
- Escurat J.-M. 1989 - Etude forestière du Canton de la Chaise-Dieu (Haute-Loire), Mémoire de troisième année ENITEF.
- Favre L.-A. 1992 - L'inventaire intégral, La lettre de Pro Silva France, n°5, pp. 3-4.
- Gaudin S. 1992 - Contribution à une étude écologique forestière globale : typologie des peuplements de la forêt domaniale du Romersberg (Moselle), mémoire de troisième année ENITEF, 88 p. et annexes.
- Hachette A. 1996 - Contribution à une meilleure connaissance des taillis avec réserves dans la Nièvre - typologie a priori, Rapport de stage BTSA Productions Forestières, CFPPA de Châteaufarine (Besançon), 23 p. et annexes.
- Herbert I. et Rébeiro F. 1981 - Les futaies jardinées privées des hautes chaînes du Jura, Mémoire de troisième année ENITEF, 125 p. et annexes.
- Herbert I. et Rébeiro F. 1985 - Les futaies jardinées du Haut-Jura, RFF, XXXVII, n°6, pp. 465-481.
- Herbert I. et Rébeiro F. 1986 - Les futaies jardinées du Haut-Jura (seconde partie), RFF, XXXVIII, n°6, pp. 564-572.
- Jacobée F. 1994 - Sylviculture d'arbre : définition - contrôle - discussion, Synthèse de cours et documents, ONF Chaumont (document interne), 38 p. et annexes.
- Léonard et Porquet 1987 - La sapinière hêtraie du Vercors drômois - typologie des peuplements, Mémoire de troisième année ENITEF, 65 p.
- Martinot-Lagarde P. 1979 - Accroissement en volume des peuplements forestiers réguliers, ONF, Bulletin technique, n°10, pp. 31-35.
- Mayeux B. 1994 - Contribution au choix d'une méthode d'inventaire pour le contrôle d'un peuplement irrégulier en plaine, Rapport de stage BTSA Productions Forestières, CFPPA de Châteaufarine (Besançon), 30 p. et annexes.
- Pardé J. 1961 - Dendrométrie, Edition de l'ENEF, Nancy, 350 p. (épuisé).
- Pardé J. et Bouchon J. 1988 - Dendrométrie, ENGREF, Nancy, 2^{ème} édition, 328 p.
- Pro Silva France 1992 - Protocoles d'installation d'un réseau de placettes expérimentales dans des peuplements irréguliers, 25 p. et annexes.
- Rébeiro F. 1993 - Les futaies jardinées du massif jurassien - Deuxième plateau et pentes intermédiaires, Besançon, SFFC, 18 p.
- Prévost H. 1991 - Typologie de peuplements en futaie jardinée par bouquets, Mémoire de troisième année ENITEF, 62 p. et annexes.
- Schütz J.P. 1989 - Le régime du jardinage, Zürich, ETH 54 p.
- Soulé D. 1991 - Les peuplements jardinés feuillus, l'exemple de la Tiérache, Mémoire de troisième année ENITEF, 54 p. et annexes.
- Soulé et al. 1994 - Typologie des peuplements (de) plateaux calcaires Aube et Haute-Marne, ONF Champagne-Ardenne, 36 p. et annexes.
- Turckheim E. de 1992a - L'inventaire forestier, La lettre de Pro Silva France, n°4, pp. 1-3.
- Turckheim E. de 1992b - L'inventaire intégral, La lettre de Pro Silva France, n°5, p. 5.
- Wentz J. 1986 - Vers une meilleure connaissance des peuplements feuillus. Exemple Franc-Comtois, Mémoire de troisième année ENITEF, 87 p. et annexes.