

Estimation de l'accroissement et de la production forestière à l'aide de placettes permanentes concentriques

Jacques HÉBERT, Nils BOURLAND, Jacques RONDEUX*

Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels, Passage des Déportés 2, 5030 Gembloux, Belgique

(Reçu le 5 décembre 2003 ; accepté le 7 juillet 2004)

Résumé – De nombreux inventaires forestiers nationaux permanents utilisent des unités d'échantillonnage constituées de 3–4 placettes concentriques au sein desquelles seuls les arbres de catégories de grosseur prédéterminées sont mesurés. Du fait de la modification de composition des placettes en termes d'arbres à mesurer entre inventaires successifs, les calculs d'accroissement sont plus complexes à réaliser. La méthode de calcul développée a été validée sur deux dispositifs installés en hêtraie irrégulière et en pessière équienne. Elle prend en compte plusieurs catégories d'arbres. Aucune différence significative n'est mise en évidence dans cette validation par simulation numérique lorsque accroissement et production sont estimés via des placettes concentriques ou des placettes uniques.

inventaire forestier / échantillonnage / placettes permanentes concentriques / accroissement / production

Abstract – Increments estimation from permanent concentric circular sampling plots. In many permanent national forest inventories the sampling units consist of 3–4 concentric circular plots in which only trees belonging to conventionally prefixed classes of diameter are measured. Assessing increment is rather complex because of the modification in plot composition ("shifting" trees) during the growth's period between successive inventories. The recommended method has been validated in an unevenaged stand of beech and an evenaged stand of spruce. It takes into account different pools of trees. The estimations of two increment types have been calculated using single plots of constant area and concentric plots. No significant difference has been observed in this validation step using computer simulation.

forest inventory / sampling / permanent concentric plots / increment / yield

1. INTRODUCTION

Dans la majorité des inventaires forestiers par échantillonnage, eu égard à la nature des mesures et des observations à réaliser et du type de résultats attendus, il est nécessaire de recourir à des unités d'échantillonnage constituées d'une ou de plusieurs « placettes » (surfaces de quelques ares). Cette dernière modalité est rencontrée dans de nombreux inventaires forestiers nationaux utilisant pour leur échantillonnage au sol des placettes circulaires (3 à 4) concentriques à surfaces définies et prenant chacune en compte des arbres appartenant à des catégories prédéterminées de grosseur [2, 6, 9, 10, 14]¹.

Pareille approche trouve surtout son origine dans la recherche du meilleur compromis possible entre la précision de la

mesure ou de l'observation à effectuer et la taille des placettes auxquelles elles se réfèrent.

Pour des raisons de représentativité, de précision et de coût, la dimension des différentes placettes est basée sur les effectifs moyens des arbres présents au sein des différentes catégories de grosseur de la population à échantillonner [3]. Ce type d'unité présente un certain nombre d'avantages tels que : une bonne répartition des nombres d'arbres par catégories de dimensions et un effort ou un temps de mesure mieux distribué en fonction des classes de grosseur. Lors d'inventaires réalisés à un moment déterminé, cette méthode ne pose pas de problème en ce qui concerne l'estimation de caractéristiques dendrométriques ramenées à l'hectare. Elle permet en outre de procéder à la récolte d'informations concernant la gestion forestière : régénération, biodiversité, état sanitaire, etc. en s'appuyant sur l'une ou l'autre de ces placettes. La plus petite, par exemple, est appropriée à l'analyse de la régénération et la plus grande à l'évaluation de l'état sanitaire en fonction du type de mesures ou d'observations à réaliser et à la recherche du meilleur compromis coût/précision. En revanche, dans le cas des inventaires

* Auteur pour correspondance : rondeux.j@fsagx.ac.be

¹ Cette liste de références bibliographiques se veut non exhaustive dans la mesure où de nombreux autres inventaires forestiers nationaux ou régionaux mettent en œuvre des placettes d'échantillonnage concentriques circulaires (Danemark, Espagne, Lituanie, Slovaquie, etc.).

permanents, il est bien moins évident de calculer des accroissements résultant de la comparaison d'inventaires successifs dans la mesure où des arbres pris en compte dans une placette bien déterminée, eu égard à leur croissance, peuvent très bien relever d'une autre placette p périodes de végétation plus tard, du fait de leur passage dans une autre catégorie de grosseur. On comprend donc aisément que le calcul de l'accroissement d'arbres se référant à des placettes éventuellement différentes au cours du temps ne peut être effectué de la même manière que s'ils étaient périodiquement mesurés au sein d'une seule placette (cas des échantillonnages à placettes uniques de surface constante, par exemple).

Nous avons étudié ce problème dans le cadre de la réalisation de l'Inventaire permanent des Ressources forestières de Wallonie (IPRFW) et plus particulièrement de remesurages opérés sur des unités d'échantillonnage (UE) principalement constituées de 3 placettes circulaires concentriques définies comme suit selon les grosseurs des arbres à mesurer (circonférences à 1,5 m du sol)² et leur éloignement par rapport au centre de l'UE [13] :

- une « grande » placette de 18 m de rayon pour la mesure des arbres d'une circonférence supérieure ou égale à 120 cm ;
- une placette « moyenne » de 9 m de rayon où les tiges dont la circonférence est comprise entre 70 et 119 cm sont mesurées ;
- enfin, une « petite » placette de 4,5 m de rayon réservée aux arbres dont la circonférence est comprise entre 20 et 69 cm, le seuil de l'inventaire étant fixé à 20 cm de circonférence.

Tous les arbres ayant franchi le seuil de l'inventaire, que l'on peut ainsi répartir en gros, moyens et petits bois, appartiennent donc à l'une des trois placettes et sont identifiés via leur distance et leur azimut par rapport au centre de l'unité d'échantillonnage.

Le présent article s'attache à décrire la méthode utilisée pour estimer l'accroissement et la production du matériel ligneux via la mise en œuvre du type d'unité d'échantillonnage évoqué ci-avant. Après avoir distingué les concepts d'accroissement et de production (§ 2), nous détaillerons la méthodologie retenue pour estimer ces deux notions à partir de la comparaison d'inventaires portant sur des placettes permanentes (§ 3). Nous montrerons ensuite comment la méthodologie a été validée en mettant à profit deux dispositifs expérimentaux (§ 4), avant de tirer quelques brèves conclusions (§ 5).

2. LES CONCEPTS D'ACCROISSEMENT ET DE PRODUCTION

Il est essentiel de bien préciser ce qu'il convient d'entendre par « accroissement », d'une part, et « production », d'autre part, notions souvent confondues et pouvant de ce fait donner lieu à des ambiguïtés lors de l'interprétation de calculs effectués à partir de comparaisons d'inventaires.

² Pour la suite de la publication, le terme « circonférence » se réfère systématiquement à la circonférence du tronc mesurée à 1,5 m au-dessus du niveau du sol.

2.1. L'accroissement

L'*accroissement* peut être défini comme une modification d'état subie au cours d'une période ou dans un laps de temps déterminé et pouvant être estimée à partir de la comparaison de mesures successives. Considéré à l'échelle d'un peuplement, il résulte de la *croissance* d'un ensemble d'arbres et doit tenir compte d'une série de facteurs tels que stade de développement, mortalités et éclaircies. L'accroissement concerne l'évolution du matériel ligneux inventorié au début de la période (= accroissement du matériel initial) de même que celle du matériel ayant franchi le seuil d'inventaire après le premier passage en inventaire. Dans ces conditions, l'accroissement périodique global du volume V^3 est donné par la formule suivante :

$$\Delta V_a = V_B - V_A + V_E + V_M - V_R,$$

sachant que :

ΔV_a = accroissement périodique en volume,

V_A = volume mesuré au temps A pour tous les arbres vivants ayant une circonférence supérieure ou égale au seuil de l'inventaire,

V_B = volume mesuré au temps B ($B > A$) pour tous les arbres vivants ayant une circonférence supérieure ou égale au seuil de l'inventaire, ce compris ceux ayant franchi ce seuil entre les temps A et B,

V_E = volume des arbres prélevés en éclaircie (au moment de l'éclaircie),

V_M = volume des arbres morts (au moment de la mort, sur pied ou a terre),

V_R = volume des arbres au moment de leur recrutement⁴.

2.2. La production

En toute rigueur, la *production* est ce qui est produit par la forêt [5]. Elle comprend à la fois l'accroissement et le recrutement correspondant au volume des arbres qui passent à la futaie en franchissant le seuil de mesure entre les deux passages en inventaire. La production périodique globale en volume correspondant à une période de temps déterminée se traduit par la formule suivante :

$$\Delta V_p = V_B - V_A + V_E + V_M$$

en conservant les mêmes définitions des symboles utilisés précédemment.

3. ESTIMATION DE L'ACCROISSEMENT ET DE LA PRODUCTION PAR COMPARAISON D'INVENTAIRES

3.1. Cas des placettes permanentes uniques de surface constante

Par comparaison d'inventaires successifs opérés sur des placettes uniques de même taille, l'accroissement périodique moyen en volume, ramené à l'hectare, s'écrit [3, 12] :

$$APM = \frac{V_B - V_A + V_E + V_M - V_R}{p \cdot S},$$

³ Le même raisonnement vaut évidemment aussi pour la surface terrière.

⁴ Le recrutement (ou « passage à la futaie » regroupe tous les individus non mesurés au premier inventaire car trop petits et atteignant au moins le seuil de l'inventaire avant ou au moment du deuxième inventaire.

sachant que :

APM = accroissement périodique moyen en volume ramené à l'hectare ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{an}$),

p = nombre de périodes de végétation séparant les inventaires réalisés aux temps A et B,

S = surface, exprimée en hectares, sur laquelle porte l'inventaire.

Quant à la production périodique moyenne en volume, elle est fournie par la relation :

$$\text{PPM} = \frac{V_B - V_A + V_E + V_M}{p \cdot S},$$

sachant que :

PPM = production périodique moyenne en volume ramenée à l'hectare ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{an}$).

3.2. Particularités liées aux placettes permanentes concentriques

3.2.1. Cas de figure rencontrés

Le raisonnement tenu ci-avant a été adapté pour prendre en compte les spécificités liées à l'utilisation de placettes concentriques et identifier les composantes de l'accroissement du fait de la modification de composition des placettes entre inventaires successifs. Cette modification sera d'autant plus marquée que la vitesse de croissance des arbres est élevée et que la période de temps séparant des inventaires successifs est longue. Tous les arbres mesurés au premier passage sont lors du second, soit vivants (encore appelés arbres « survivants »), soit morts, soit exploités. Au second passage de nouveaux arbres non mesurés lors du premier devront être considérés. Ils entrent dans les divers cas de figure suivants :

- un arbre franchit le seuil d'inventaire entre les 2 inventaires et est mesuré au second inventaire (recrutement),
- un arbre franchit le seuil d'accès à la placette moyenne (9 m de rayon), soit 70 cm de circonférence, entre les 2 inventaires,
- un arbre franchit le seuil d'accès à la grande placette (18 m de rayon), soit 120 cm de circonférence, entre les 2 inventaires.

On peut relever plusieurs catégories d'arbres mis en évidence lors de la comparaison d'inventaires en fonction de leur présence ou non aux deux inventaires et de leur appartenance à l'une ou l'autre des placettes. Chaque arbre peut être⁵ :

- *survivant*, et :
 - stationnaire* s'il ne change pas de placette d'un inventaire à l'autre, ou *promu* dans le cas contraire,
 - nouvellement mesuré* (non mesurable lors du premier inventaire, mesuré lors du second),
 - exploité* (ayant fait l'objet d'une coupe),
 - mort* (même statut qu'un arbre prélevé, puisqu'il ne participe plus à la production).

⁵ En 1962, Beers [1] identifie les 4 groupes d'arbres suivants à partir de données issues de points de sondage permanents : le groupe des survivants (*survivor growth*), la mortalité (*mortality*), les coupes (*cut*) et le recrutement (*ingrowth*). Myers et al. [8], Martin [7], Van Deusen et al. [15] et Roesch et al. [11] viendront par la suite compléter ces travaux.

Un même arbre peut, au fil du temps, combiner les différents cas de figure (la liste des 18 cas de figure ou de « statuts » résultant de ces considérations est reprise dans le Tab. I). La situation suivante est présentée à titre d'exemple.

Lors du premier inventaire, un arbre localisé à 7 m du centre de l'UE présente une circonférence de 118 cm, il est donc mesuré. Par sa croissance, il atteint le seuil de mesure de 120 cm entre les deux passages en inventaire (promu). Il est ensuite prélevé en éclaircie peu de temps avant le remesurage (exploité). Les procédures de calcul devront donc tenir compte d'un changement de placette puis d'une coupe en éclaircie (combinaison des deux cas de figure).

À tous ces cas, on devrait ajouter celui des arbres non mesurés au premier passage, qui atteignent un des trois seuils de mesure (20, 70 et 120 cm) et font l'objet d'une coupe avant d'avoir pu être mesurés au second passage. Ce cas d'espèce, relativement rare en pratique, ne peut pas être détecté sur le terrain. Par ailleurs, leur contribution est faible et conduit à une légère sous-estimation systématique de l'accroissement et de la production. Notre expérience (forêts expérimentales et virtuelles) n'a jamais mis en évidence un biais supérieur à 1 % pour les conditions de croissance rencontrées en Région wallonne. L'importance de ce biais est croissante avec le nombre de placettes concentriques par unité d'échantillonnage, le temps entre deux passages successifs en inventaire, la vitesse de croissance des arbres et la fréquence des coupes d'éclaircie.

3.2.2. Composantes de l'accroissement et de la production

La contribution de chacune des catégories d'arbres reprises dans le tableau I dans le calcul de l'accroissement et de la production sera présentée en utilisant le volume individuel « v » comme variable dendrométrique (le même développement est cependant directement transposable à la surface terrière individuelle « g »). Pour ramener à l'hectare les grandeurs calculées au sein des 3 placettes de 4,5 m, de 9 m et de 18 m de rayon, on utilisera des facteurs d'extension [13] que l'on peut écrire sous la forme suivante :

$$k_i = \frac{10000}{\pi \cdot R_i^2},$$

où k_i = facteur d'extension calculé pour chaque placette (petite, moyenne ou grande selon que $i = 1, 2$ ou 3) et R_i = rayon horizontal de la placette (4,5 m, 9 m ou 18 m selon que $i = 1, 2$ ou 3).

Quant aux volumes individuels correspondant aux divers seuils de mesure, ils seront notés v_{01} , v_{12} et v_{23} pour traduire le volume correspondant respectivement à la circonférence-seuil d'inventaire et à celles séparant les placettes 1 et 2 (petite et moyenne) et les placettes 2 et 3 (moyenne et grande). Le volume individuel estimé au moment de l'éclaircie ou de la mort de l'arbre est noté v_{est} (pour volume *estimé*). Les volumes individuels correspondant aux divers seuils de mesure et ceux des arbres prélevés ou morts sont estimés selon les données disponibles à l'aide d'un tarif de cubage à une entrée (circonférence à hauteur d'homme) ou d'un tarif à une entrée gradué en fonction de la hauteur dominante. La circonférence des arbres prélevés ou morts est estimée au départ de la circonférence au premier passage en inventaire, la relation « accroissement annuel courant en circonférence vs. circonférence » établie au

Tableau I. Catégories d'arbres rencontrées lors de la comparaison d'inventaires successifs.

Qualification adoptée pour l'arbre	Cas	Sigle	Présence de l'arbre		Placette concernée (1 à 3)	
			Inv. A	Inv. B	Inv. A	Inv. B
Stationnaire	1	S1	oui	oui	1	1
	2	S2	oui	oui	2	2
	3	S3	oui	oui	3	3
Promu	4	P12	oui	oui	1	2
	5	P23	oui	oui	2	3
	6	P13*	oui	oui	1	3
Nouvellement mesuré	7	N1	non	oui	–	1
	8	N2	non	oui	–	2
	9	N3	non	oui	–	3
	10	N12*	non	oui	–	1 puis 2
	11	N23*	non	oui	–	2 puis 3
	12	N13**	non	oui	–	1 puis 2, puis 3
Exploité ou mort***	13	E11	oui	non	1	– (1)
	14	E12	oui	non	1	– (2)
	15	E13*	oui	non	1	– (3)
	16	E2	oui	non	2	– (2)
	17	E23	oui	non	2	– (3)
	18	E3	oui	non	3	– (3)

* Cas rarement observé en pratique.

** Cas d'occurrence exceptionnelle.

*** Aucune distinction n'est en théorie nécessaire entre les arbres exploités et ceux découverts morts (sur pied ou à terre) au remesurage.

Les symboles et notations suivants sont utilisés : S = stationnaire, P = promu, N = nouvellement mesuré, E = exploité, 1, 2, 3 = petite, moyenne et grande placettes, (1), (2), (3) = au moment de la coupe/mort de l'arbre, celui-ci appartenait à la petite, moyenne ou grande placette (sur base de l'estimation de sa circonférence et de sa distance au centre de l'UE), A, B = premier et deuxième inventaire, – = l'arbre n'est pas mesuré.

départ des mesures réalisées sur les autres arbres de l'unité d'échantillonnage et le temps écoulé entre le premier passage et le prélèvement. Si la date de prélèvement est connue, l'estimation de la circonférence prend en considération le nombre entier et fractionnaire de saisons de végétation. Si la date du prélèvement n'est pas connue, il est réputé avoir eu lieu à mi-période, entre les deux passages successifs en inventaire.

Les formules à utiliser arbre par arbre pour chacun des cas exposés au tableau I font l'objet du tableau II. Les contributions de chaque arbre sont additionnées pour obtenir une estimation locale de l'accroissement périodique moyen du volume ramené à l'hectare. L'estimation de la production périodique moyenne est obtenue en ajoutant à l'estimation de l'accroissement périodique moyen, l'estimation du recrutement annuel moyen réalisée par l'application de la formule reprise au tableau III pour les arbres concernés.

4. VALIDATION NUMÉRIQUE DE LA MÉTHODE PROPOSÉE

4.1. Matériel expérimental

Afin de vérifier sa qualité, la méthode d'estimation a été appliquée à deux dispositifs expérimentaux différents par leur structure (sylviculture appliquée), la nature des essences présentes, le milieu de croissance, etc. Dans chacun des deux dispositifs situés en terrain plat et de forme rectangulaire, les coordonnées précises des arbres ont été mesurées et enregistrées. Il

a été tenu compte des effets de bord par le recours aux placettes miroirs. La validation a été réalisée en considérant l'estimation de l'accroissement et de la production en surface terrière plutôt qu'en volume pour s'affranchir de problèmes de définition et d'estimation.

4.1.1. Dispositif des « Longues Goutelles » (Dispositif 1)

Ce dispositif installé en futaie de hêtre d'allure jardinée sur une superficie de 4,1 ha a fait l'objet de plusieurs passages en inventaires complets. Les passages retenus pour la mise en œuvre des tests de validation s'échelonnent sur une période allant de 1960 à 1972 (Tab. IV). L'accroissement périodique moyen⁶ en surface terrière calculé (accroissement dit « réel ») à partir de la comparaison des deux inventaires complets est de 0,32496 m²/ha/an. La production moyenne périodique « réelle » est quant à elle égale à 0,35281 m²/ha/an. Ces deux valeurs sont par la suite utilisées comme valeurs de référence. La figure 1 donne la ventilation du nombre de tiges (fréquence absolue) par catégories de grosseur pour les premier et second passages en inventaire.

4.1.2. Dispositif de « La Croix Scaille » (Dispositif 2)

Celui-ci est installé dans une pessière équienne de 0,77 ha de superficie. Les arbres y ont été répertoriés puis mesurés

⁶ Accroissement périodique moyen = accroissement annuel moyen calculé sur p périodes de végétation ($p = 12,7$ pour le dispositif des « Longues Goutelles »).

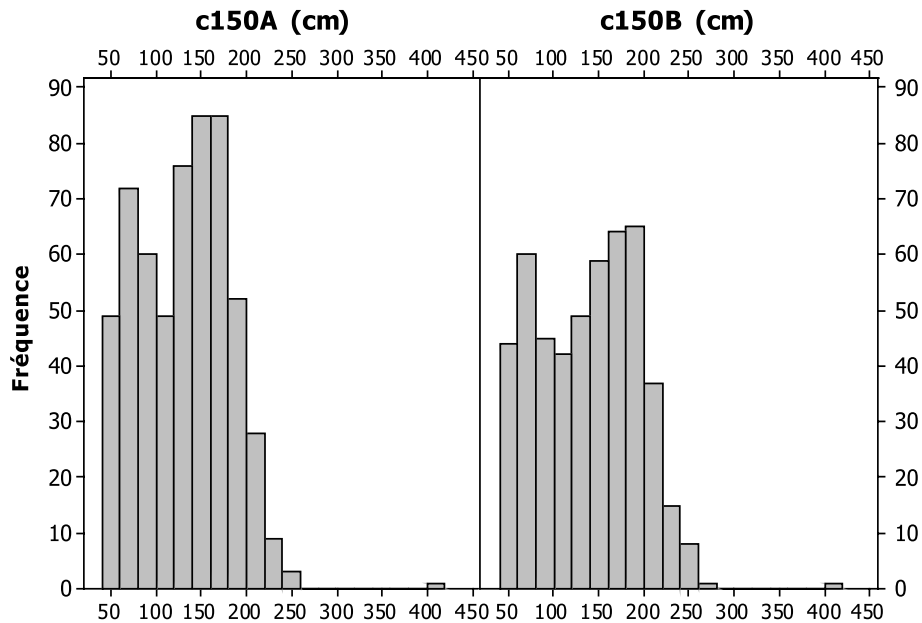


Figure 1. Ventilation du nombre de tiges par catégorie de grosseur lors des deux passages en inventaire complet (c150_A = circonférence en cm au premier passage ; c150_B = circonférence en cm au second passage).

Tableau II. Formules utilisées dans le calcul des composantes de l'accroissement périodique moyen en volume (m³/ha/an).

Sigle	Formule	Commentaires
S1	$k_1 (v_B - v_A) / p$	Arbre mesuré en A et en B dans la placette 1
S2	$k_2 (v_B - v_A) / p$	Arbre mesuré en A et en B dans la placette 2
S3	$k_3 (v_B - v_A) / p$	Arbre mesuré en A et en B dans la placette 3
P12	$[k_1 (v_{12} - v_A) + k_2 (v_B - v_{12})] / p$	Arbre mesuré en A dans la placette 1 et en B dans la placette 2
P23	$[k_2 (v_{23} - v_A) + k_3 (v_B - v_{23})] / p$	Arbre mesuré en A dans la placette 2 et en B dans la placette 3
P13	$[k_1 (v_{12} - v_A) + k_2 (v_{23} - v_{12}) + k_3 (v_B - v_{23})] / p$	Arbre mesuré en A dans la placette 1 et en B dans la placette 3
N1	$k_1 (v_B - v_{01}) / p$	Arbre apparu dans la placette 1 et mesuré en B dans cette même placette
N2	$k_2 (v_B - v_{12}) / p$	Arbre apparu dans la placette 2 et mesuré en B dans cette même placette
N3	$k_3 (v_B - v_{23}) / p$	Arbre apparu dans la placette 3 et mesuré en B dans cette même placette
N12	$[k_1 (v_{12} - v_{01}) + k_2 (v_B - v_{12})] / p$	Arbre apparu dans la placette 1 et mesuré en B dans la placette 2
N23	$[k_2 (v_{23} - v_{12}) + k_3 (v_B - v_{23})] / p$	Arbre apparu dans la placette 2 et mesuré en B dans la placette 3
N13	$[k_1 (v_{12} - v_{01}) + k_2 (v_{23} - v_{12}) + k_3 (v_B - v_{23})] / p$	Arbre apparu dans la placette 1 et mesuré en B dans la placette 3
E1	$k_1 (v_{est} - v_A) / p$	Arbre mesuré en A et estimé lors de la coupe/mort dans la même placette (placette 1)
E12	$[k_1 (v_{12} - v_A) + k_2 (v_{est} - v_{12})] / p$	Arbre mesuré en A (placette 1) et estimé lors de la coupe/mort (placette 2)
E13	$[k_1 (v_{12} - v_A) + k_2 (v_{23} - v_{12}) + k_3 (v_{est} - v_{23})] / p$	Arbre mesuré en A (placette 1) et estimé lors de la coupe/mort (placette 3)
E2	$k_2 (v_{est} - v_A) / p$	Arbre mesuré en A et estimé lors de la coupe/mort dans la même placette (placette 2)
E23	$[k_2 (v_{23} - v_A) + k_3 (v_{est} - v_{23})] / p$	Arbre mesuré en A (placette 2) et estimé lors de la coupe/mort (placette 3)
E3	$k_3 (v_{est} - v_A) / p$	Arbre mesuré en A et estimé lors de la coupe/mort dans la même placette (placette 3)

Les symboles et notations suivants sont utilisés : S = stationnaire, P = promu, N = nouvellement mesuré, E = exploité ou mort, k_1, k_2, k_3 = facteurs d'extension pour les petite, moyenne et grande placettes, v_{01}, v_{12}, v_{23} = volumes individuels correspondant aux seuils de mesure pour les petite, moyenne et grande placettes, v_{est} = volume individuel estimé au moment de la coupe/mort, A, B = premier et deuxième inventaires réalisés aux temps A et B, p = nombre de périodes de végétation observées entre les inventaires réalisés aux temps A et B.

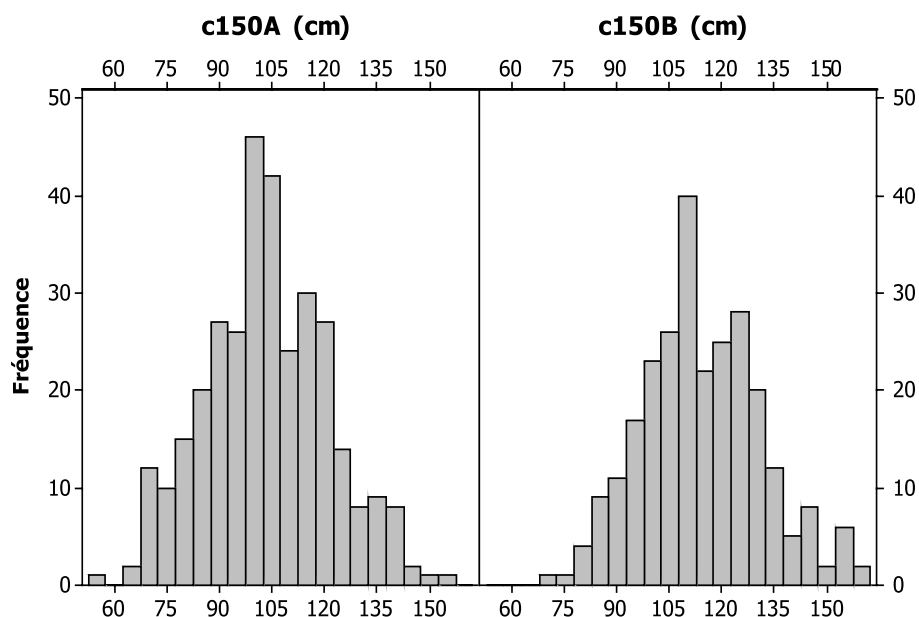


Figure 2. Ventilation du nombre de tiges par catégorie de grosseur lors des deux passages en inventaire complet (c150_A = circonférence en cm au premier passage ; c150_B = circonférence en cm au second passage).

Tableau III. Pour chacun des « statuts » concernés, formule utilisée dans le calcul des composantes du recrutement annuel moyen exprimé en volume (m³/ha/an) et commentaires associés.

Sigle	Formule*	Commentaires
N1	} $k_1 v_{01} / n$	Arbre apparu dans la placette 1 et mesuré en B dans cette même placette
N12		Arbre apparu dans la placette 1 et mesuré en B dans la placette 2
N13		Arbre apparu dans la placette 1 et mesuré en B dans la placette 3

* En conservant les mêmes définitions des symboles utilisés au tableau II.

Tableau IV. Principales caractéristiques dendrométriques de la hêtraie composant le dispositif des « Longues Goutelles » (GHA = surface terrière à l'hectare ; cmoy = moyenne des circonférences mesurées à 1,5 m).

Inventaires complets	Date de réalisation	Importance du hêtre (% nombre de tiges)	Nombre de tiges par ha	GHA (m ² /ha)	cmoy (cm)
1 ^{er} passage	1/6/1960	80,7	140	21,8	131
2 ^e passage	1/10/1972	82,7	121	20,9	137
Passage en éclaircie	1/5/1962	–	37	5,3	123

grâce à des inventaires complets (échelonnés sur 4 périodes de végétation entre 1992 et 1997). Un passage en éclaircie est opéré en 1995 (Tab. V). Aucun arbre n'ayant franchi le seuil d'inventaire au sein de ce dispositif (peuplement âgé), les valeurs calculées pour les accroissement et production « réels » en surface terrière sont identiques et égales à 1,14632 m²/ha/an. La figure 2 donne la ventilation du nombre de tiges (fréquence absolue) par catégories de grosseur pour les premier et second passages en inventaire.

4.2. Démarche de validation

Toutes les données relatives au positionnement des arbres et à diverses caractéristiques dendrométriques, dont les circonférences, ont été mémorisées dans une base de données pour chaque dispositif expérimental. Il a dès lors été possible de simuler l'implantation d'un grand nombre de placettes concentriques en fixant de manière aléatoire et simple les coordonnées de chacun des centres d'UE. Ces mêmes centres ont également

Tableau V. Principales caractéristiques dendrométriques de la pessière composant le dispositif de « La Croix Scaille » (GHA = surface terrière à l'hectare ; cmoy = moyenne des circonférences mesurées à 1,5 m).

Inventaires complets	Date de réalisation	Importance de l'épicéa (% nombre de tiges)	Nombre de tiges par ha	GHA (m ² /ha)	cmoy (cm)
1 ^{er} passage	14/12/1992	> 80 %	422	37,0	103,4
2 ^e passage	6/5/1997	> 80 %	341	36,2	114,3
Passage en éclaircie	1/8/1994*	–	81	5,4	89,3

* Deux arbres morts en juillet 1993.

été utilisés pour délimiter des placettes circulaires uniques de rayon fixe (18 m) équivalentes à la plus grande des placettes concentriques. De cette manière, nous avons pu procéder à l'estimation des accroissement et production périodiques moyens en surface terrière selon deux modalités d'échantillonnage et confronter les résultats obtenus aux *valeurs de référence*. Une fois les centres des UE attribués, la sélection des arbres a été réalisée sur base du premier inventaire en fonction de leur distance au centre (placette circulaire unique) ou de cette même distance et de leur circonférence (placettes concentriques identiques à celles de l'IPRFW à l'exception du seuil de l'inventaire fixé à 50 cm de circonférence pour les deux dispositifs). Cette opération est répétée au second passage à partir des mêmes centres de manière à déterminer les divers « statuts » d'arbres à prendre en compte dans les calculs.

En ce qui concerne les arbres récoltés lors du passage en éclaircie, seule la date de prélèvement est connue. L'estimation des circonférences correspondantes est effectuée sur la base des circonférences des arbres présents aux deux passages. Pour chaque dispositif, une régression linéaire simple a été établie entre l'accroissement périodique moyen en circonférence et la circonférence mesurée lors du premier passage.

Tous les calculs sont ramenés à l'année en prenant en compte le nombre de périodes de végétation séparant le premier passage en inventaire de l'époque de l'éclaircie⁷.

La démarche mise en œuvre est identique pour tous les dispositifs : choix aléatoire des centres des UE, sélection des arbres suivants le type d'UE et de placettes concernés, estimation des circonférences des arbres prélevés lors du passage en éclaircie, estimation de l'accroissement et de la production suivant les échantillonnages mis en œuvre et confrontation des résultats. Pour ce faire, un test de comparaison de variables estimées (test *t* par paires, pour un niveau de confiance de 95 %) a été mis en œuvre à l'aide du logiciel Minitab 13.31.

4.3. Résultats

La précision des résultats issus de l'utilisation de placettes concentriques, d'une part, et uniques, d'autre part, est évidemment fonction du nombre de points d'échantillonnage considérés. Aussi, afin de pouvoir mettre en évidence l'existence d'un biais, même très faible, entre les 2 méthodes d'échantillonnage,

⁷ Un algorithme simple a été développé permettant d'estimer les nombres de périodes de végétation entre deux dates données sur base d'hypothèses insérées par l'utilisateur (principalement les dates de début et de fin de période de végétation qui ont respectivement été fixées au 1^{er} mai et au 31 octobre).

les moyennes des accroissements et productions ont été calculées sur un nombre de points de sondage déterminé grâce à l'utilisation de la formule suivante, applicable au cas des échantillons non indépendants [4] :

$$n = \frac{(u_{1-\alpha/2} + u_{1-\beta})^2 \sigma^2}{\delta^2},$$

sachant que :

n = nombre d'UE à installer dans le dispositif,

α = risque de première espèce,

β = risque de deuxième espèce,

σ = variance des différences entre valeurs observées,

δ = différence de moyennes qu'on souhaite mettre en évidence.

Si l'on estime le biais entre les deux méthodes d'échantillonnage à 1 % et si l'on fixe les risques de première et deuxième espèces respectivement à 0,05 et 0,1, on obtient, pour les deux dispositifs, un nombre d'UE d'environ 8 500. Afin de s'assurer une marge suffisante, ce nombre a été arrondi à 10 000.

Les résultats sont analysés ci-après pour chacun des deux dispositifs.

4.3.1. Dispositif 1

Les accroissements moyens périodiques estimés sont égaux à 0,32495 m²/ha/an (cas des placettes concentriques) et 0,32497 m²/ha/an (cas des placettes uniques), la valeur de référence étant, comme mentionné précédemment, également de 0,32496 m²/ha/an. Le test de comparaison montre qu'il n'existerait pas de différence significative (*p* = 0,988) entre les valeurs estimées par les deux méthodes d'échantillonnage.

Paired T for AMP - AMPU				
	N	Mean	StDev	SE Mean
AMP	10000	0.32495	0.11304	0.00113
AMPU	10000	0.32497	0.06697	0.00067
Difference	10000	-1.3E-05	0.088823	0.000888

95% CI for mean difference: (-0.001754; 0.001728)
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -0.01 P-Value = 0.988

AMP = accroissement moyen estimé via les placettes concentriques
AMPU = accroissement moyen estimé via les placettes uniques (rayon fixe)

En termes de production moyenne périodique, les valeurs moyennes estimées sont respectivement égales à 0,35145 m²/ha/an (placettes concentriques) et 0,35213 m²/ha/an (placettes

uniques), pour une valeur de référence de 0,35281 m²/ha/an. Le test de comparaison des moyennes montre des résultats similaires à ceux obtenus en matière d'accroissement ($p = 0,626$).

Paired T for PMP - PMPU				
	N	Mean	StDev	SE Mean
PMP	10000	0.35145	0.15784	0.00158
PMPU	10000	0.35213	0.07144	0.00071
Difference	10000	-0.00068	0.13986	0.00140

95% CI for mean difference: (-0.00342; 0.00206)
 T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -0.49 P-Value = 0.626

PMP = production moyenne estimée via les placettes concentriques
PMPU = production moyenne estimée via les placettes uniques (rayon fixe)

4.3.2. Dispositif 2

Les accroissements⁸ moyens ont été estimés dans le cadre de ce dispositif à 1,14545 et 1,14622 m²/ha/an respectivement pour les placettes concentriques et uniques. Aucune différence statistiquement significative n'a été mise en évidence entre les deux méthodes d'échantillonnage ($p = 0,653$).

Paired T for AMP - AMPU				
	N	Mean	StDev	SE Mean
AMP	10000	1.14545	0.23333	0.00233
AMPU	10000	1.14622	0.15483	0.00155
Difference	10000	-0.00077	0.17057	0.00171

95% CI for mean difference: (-0.00411; 0.00258)
 T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -0.45 P-Value = 0.653

AMP = accroissement moyen estimé via les placettes concentriques
AMPU = accroissement moyen estimé via les placettes uniques (rayon fixe)

5. CONCLUSIONS

La présente étude avait pour objet d'évaluer la robustesse d'une méthode d'estimation de l'accroissement et de la production en surface terrière via l'utilisation de placettes concentriques identiques à celles souvent mises en œuvre dans le cadre d'inventaire forestiers nationaux permanents. Nous avons pris comme base expérimentale l'inventaire permanent des Ressources forestières de Wallonie utilisant des unités d'échantillonnage composées de trois placettes circulaires concentriques. La méthode proposée pour réaliser ces estimations repose sur l'identification précise des divers « cas de figure » pouvant être rencontrés (arbres « stationnaires », « promus », « nouvellement mesurés » et « exploités ») et justifiant l'utilisation de formules adaptées. Deux dispositifs expérimentaux ont permis de confronter la méthode d'échantillonnage s'appuyant sur des unités composées de trois placettes circulaires concentriques à celle reposant sur l'installation de placettes uniques de surface constante. Le premier dispositif, installé au sein d'une hêtraie d'allure jardinée, permet de prendre en compte la présence de tiges appartenant à des catégories de grosseur différentes, et donc de mettre en évidence la contribution de chacun des « cas de figure » répertoriés. Le second, implanté dans une pessière équiennne, comporte des arbres ayant un potentiel de croissance individuelle important.

⁸ Accroissement = production pour ce dispositif.

Aucun des deux dispositifs utilisés pour la validation des processus de calcul n'a permis de mettre en évidence l'existence, pour l'accroissement comme la production, d'une différence significative entre les deux méthodes d'estimation, et ce malgré le nombre élevé de placettes susceptibles de faire apparaître le léger biais attendu (par exemple résultant d'un arbre qui franchit le seuil de la moyenne ou de la grande placette et est prélevé en éclaircie avant le remesurage). Cela confirme que ce biais attendu est probablement inférieur à 1 % et peut donc être négligé.

Remerciements : Cette étude a pu être réalisée grâce au financement de la Région Wallonne. Les auteurs tiennent à remercier François Burnay, informaticien, pour sa contribution active à la programmation du traitement des données et Hugues Lecomte, responsable de la Cellule « Inventaire permanent des Ressources forestières de Wallonie » [Division de la Nature et des Forêts (DNF), Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGRNE) de la Région Wallonne] pour la pertinence de ses remarques.

RÉFÉRENCES

- [1] Beers T.W., Components of forest growth, *J. For.* 60 (1962) 245–248.
- [2] Brassel P., Brändli U.-B., Inventaire forestier national suisse. Résultats du deuxième inventaire 1993–1995, 2^e éd., Birmensdorf, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, Berne, Stuttgart, Vienne, Haupt, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 1999.
- [3] Chevrou R.B., La placette sol d'inventaire formée de plusieurs cercles concentriques, *Schweiz. Z. Forstwes.* 144 (1993) 271–296.
- [4] Dagnelie P., Statistique théorique et appliquée, Tome 2, Inférence statistique à une et à deux dimensions, De Boeck et Larcier, Paris et Bruxelles, 1998.
- [5] Duplat P., Perrotte G., Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers, Office National des Forêts, section technique, Paris, 1981.
- [6] Inventaire forestier national français, But et méthodes de l'Inventaire Forestier National, Ministère de l'Agriculture, Service des Forêts, Inventaire forestier national, Paris, 1985.
- [7] Martin G.L., A method for estimating ingrowth on permanent horizontal sample points, *For. Sci.* 28 (1982) 110–114.
- [8] Myers C.C., Beers T.W., Point sampling for forest growth estimation, *J. For.* 66 (1968) 927–929.
- [9] Polley H., Hennig P., Dahm S., Die zweite Bundeswaldinventur beginnt, *AFZ – Der Wald* v. 55 (2000) 1075–1076.
- [10] Ranney B., Cruse T., Hägglund B., Jonasson H., Swärd J., Designing a new national forest survey for Sweden, *Stud. For. Suec.* 177 (1987) 29 p.
- [11] Roesch F.A., Green E.J., Scott C.T., New compatible estimators for survivor growth and ingrowth from remeasured horizontal point samples, *For. Sci.* 35 (1989) 281–293.
- [12] Rondeux J., La mesure des arbres et des peuplements forestiers, 2^e éd., Presses agronomiques de Gembloux, Gembloux, 1999.
- [13] Rondeux J., Lecomte H., Florkin P., Thirion M., L'inventaire permanent des ressources ligneuses de la Région Wallonne : principaux aspects méthodologiques, *Cah. For. Gembloux* 19 (1996) 27 p.
- [14] Salas-Gonzales R., Houllier F., Lemoine B., Pignard G., Forecasting wood resources on the basis of national forest inventory data. Application to *Pinus pinaster* Ait. in southwestern France, *Ann. For. Sci.* 58 (2001) 785–802.
- [15] Van Deusen P.C., Dell T.R., Thomas C.E., Volume growth estimation from permanent horizontal points, *For. Sci.* 32 (1986) 410–414.