

Avis technique

SSRF-31

Direction de la recherche forestière

Titre :	Méthodes de diagnostic sylvicole et précision de l'inventaire d'intervention par échantillonnage
Auteur(s) :	François Guillemette, ing.f., M. Sc. (Direction de la recherche forestière) et Louis Blais, B. Sc. stat. (Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers)
Collaborateurs :	François Boucher, ing.f. (Unité de gestion 14-15 — Laurentides) et Marie-Lou Gravel, ing.f., M.B.A. (Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers)
Date :	Septembre 2022

Des ingénieurs forestiers chargés de préparer des prescriptions sylvicoles dans des peuplements décidus ou mixtes de la zone tempérée nordique souhaitent savoir si leurs méthodes de travail permettaient de déterminer les bons traitements sylvicoles, et s'ils devaient apporter des ajustements à leurs démarches de diagnostic et de prescription sylvicoles. Entre autres, ils se questionnaient sur la précision de l'information dendrométrique qu'ils obtiennent dans leurs inventaires d'intervention. Nous avons recensé leurs méthodes et évalué la précision des variables dendrométriques évaluées dans des inventaires d'intervention.

1. Introduction

La réalisation d'un diagnostic sylvicole et la préparation d'une prescription sylvicole qui en découle sont deux des actions les plus fondamentales et les plus concrètes du travail des ingénieurs forestiers (Gravel *et al.* 2013). Le cadre général de ces activités est déjà bien documenté au niveau professionnel; il a été conçu pour s'appliquer à un peuplement écoforestier et il présume que l'on peut obtenir une assez bonne qualité d'information sur l'état du peuplement ou d'un regroupement de peuplements semblables (entités homogènes) afin de réduire l'effort d'échantillonnage pour inventorier leur contenu.

La pratique de l'action sylvicole dans la zone tempérée nordique¹ est relativement complexe. En effet, les forêts typiques de cette zone, comme les érablières et les bétulaies jaunes à résineux, sont caractérisées

¹ Voir la carte : <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/carte-regions-ecologiques.pdf>

par une grande variété d'essences et des individus avec des âges et des diamètres très variés, autant pour des raisons écologiques qu'en raison des différences dans l'historique des coupes partielles ou totales qui ont été pratiquées. De plus, la délimitation des peuplements écoforestiers n'est pas toujours aussi évidente sur le terrain que ce qu'elle peut sembler être sur la carte écoforestière. D'abord, le mélange des essences et des dimensions des arbres change souvent en suivant un gradient plutôt que de manière brusque et bien définie. Ensuite, les praticiens rapportent des écarts parfois importants entre le peuplement cartographié et le peuplement réel observé au moment du diagnostic. Ces écarts peuvent être causés par la grande variabilité des essences présentes, les limites inhérentes à la photo-interprétation qui a servi à produire la carte, ainsi que par les perturbations qui peuvent survenir entre le moment où la carte a été réalisée et le diagnostic sylvicole. Par conséquent, dans son action sylvicole, l'ingénieur forestier cherche non seulement à préciser le contenu des peuplements écoforestiers qui se trouvent dans le secteur d'intervention potentielle (SIP) à l'étude, mais aussi, parfois, à valider au préalable les contours desdits peuplements. Cependant, comme il n'existe pas de méthode normalisée pour réaliser ces tâches, chaque individu a développé sa méthode selon ses expériences de travail.

C'est dans ce contexte que la Direction de la recherche forestière et la Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers ont été approchées par des ingénieurs forestiers du Secteur des opérations régionales du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs responsables de la préparation des prescriptions sylvicoles dans des peuplements décidus ou mixtes de la zone tempérée nordique. Ceux-ci souhaitent savoir si leurs méthodes de travail permettaient de déterminer les bons traitements sylvicoles et s'ils devaient apporter des ajustements à leurs démarches de diagnostic et de prescription sylvicoles. Entre autres, ils se questionnaient sur la précision de l'information dendrométrique dont ils disposent pour effectuer ce travail.

2. Sondage des méthodes de diagnostic et de prescription

En avril 2022, nous avons contacté 6 ingénieurs forestiers chargés de préparer des diagnostics et des prescriptions sylvicoles dans les forêts du domaine de l'État du secteur Sud-ouest du Québec. Ces personnes nous ont décrit sommairement les étapes de leur travail en vue de parvenir à formuler une prescription sylvicole.

Nous avons d'abord trouvé qu'il existait 2 méthodes principales pour définir l'objet de leur action sylvicole (annexe 1) :

- La première méthode (**peuplement_carto**) est fondée sur l'utilisation des peuplements écoforestiers, tel qu'ils se retrouvent dans la plus récente édition disponible de la carte écoforestière. Cette méthode reflète l'intention qu'a l'ingénieur forestier de poser un diagnostic sylvicole sommaire et de préparer une prescription sylvicole sommaire pour chaque peuplement écoforestier (de 1 à 5 placettes par peuplement, en général) avant d'effectuer le sondage. Un

traitement sylvicole générique est choisi pour chaque peuplement, mais le choix d'une variante ou d'une modalité de récolte plus spécifique (voir MRN 2013 pour ces détails) est effectué seulement après avoir regroupé des peuplements semblables en unités homogènes pour former une unité de compilation (UC) avec les données du sondage.

- La seconde méthode (**peuplement_révisé**) est fondée sur la révision des limites des peuplements écoforestiers comme étape préalable au diagnostic sylvicole. Cette méthode a la particularité d'utiliser les données de l'inventaire d'intervention pour redéfinir les limites des peuplements. Ainsi, les placettes sont utilisées comme dans un inventaire de reconnaissance (points de contrôle) pour un projet de photo-interprétation en vue de produire une carte écoforestière (voir Méthot *et al.* 2014 pour cette terminologie).

Nous avons trouvé une faiblesse statistique à chacune de ces méthodes. Pour bien les comprendre, rappelons que dans la théorie de l'échantillonnage, il faut d'abord identifier la population avant de la sonder (voir Gregoire et Valentine 2008, Lohr 1999, ou Méthot *et al.* 2014). Les échantillons (placettes) doivent être répartis au hasard dans la population (peuplement[s]).

- La méthode `peuplement_carto` a comme faiblesse le peu de précision de l'inventaire, puisque seulement 1 à 5 placettes sont échantillonnées par peuplement (voir la section 3) au moment d'effectuer le diagnostic et la prescription sommaires. Une façon d'y remédier serait d'augmenter le nombre de placettes utilisées pour calculer les statistiques d'intérêt (souvent des moyennes)². Il est possible d'augmenter le nombre de placettes par peuplement. On peut aussi regrouper au préalable des peuplements semblables en unités homogènes, puis poser un diagnostic et formuler une prescription sur l'ensemble des peuplements semblables plutôt que sur chaque peuplement individuel. Par contre, si l'on pose d'abord un diagnostic sur chaque peuplement avec les données des placettes et que l'on regroupe ensuite les peuplements ayant un diagnostic semblable, alors les compilations des placettes sont susceptibles d'être biaisées. En effet, la population du sondage se trouve à être modifiée par le contenu du sondage.
- La méthode `peuplement_révisé`, quant à elle, comporte le risque d'introduire des biais dans les compilations de l'inventaire, puisque ce sont les données de celui-ci qui ont servi à délimiter les peuplements. Ainsi, il faudrait bien distinguer l'inventaire de reconnaissance, qui vise à délimiter les populations, de l'inventaire d'intervention, qui vise à sonder lesdites populations. Autrement, des biais seront introduits dans les compilations des données dendrométriques.

² Rappelons que la superficie totale de chaque population a généralement peu d'importance dans la détermination du nombre de placettes qu'il faudrait y placer (Blais 2014). La variable la plus importante est l'écart-type, ou la variance, de la variable qui est à l'étude selon la méthode d'échantillonnage retenue (voir la section 3).

2.1. Précision de l'inventaire d'intervention

Pour une variable donnée (comme la surface terrière marchande) et un type de placette donné (à rayon fixe [selon le rayon fixé] ou variable), la précision d'un inventaire par échantillonnage aléatoire est donnée par le nombre de placettes, l'écart-type (s) de ladite variable (ou sa variance, s^2), la marge d'erreur tolérée ($\pm 10\%$, par exemple) et le risque associé (p. ex. 19 fois sur 20). Lorsqu'un niveau donné de précision est recherché, alors la statistique la plus importante à connaître afin d'estimer le nombre de placettes requises est l'écart-type de la variable. Cette statistique est intimement liée au coefficient de variation (CV, calculé comme l'écart-type divisé par la moyenne et exprimé en pourcentage). Le CV permet également de connaître l'ampleur de la variabilité d'un critère forestier et de le comparer à un autre critère ayant des unités différentes. Par conséquent, nous avons estimé l'écart-type et le CV de différentes variables forestières qui peuvent être utilisées dans les critères décisionnels, pour ensuite présenter le nombre de placettes requises afin d'atteindre un niveau donné de précision. Un autre objectif était d'évaluer le nombre de placettes requises pour parvenir fréquemment au même choix de traitement en appliquant une clé décisionnelle utilisée dans le secteur Sud-ouest (*Logigramme pour la zone d'érable à sucre non minéralisé*, document non présenté). Cette clé contient des critères forestiers décisionnels, par exemple, le fait qu'un peuplement atteigne une surface terrière d'au moins $24 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ avant qu'on envisage d'effectuer une coupe de jardinage, faute de quoi d'autres options sylvicoles sont considérées.

2.2. Collecte de données

En collaboration avec les directions régionales, l'inventaire d'intervention a été intensifié dans des peuplements de 5 secteurs d'intervention situés dans les régions de la Mauricie (1 secteur composé de 4 UC), des Laurentides (quelques peuplements de 3 chantiers) et de la Capitale-Nationale (1 secteur d'intervention). L'intensité de l'inventaire d'intervention a été majorée à une placette à l'hectare plutôt qu'une seule par 3 ou 4 hectares. Les placettes avaient un rayon variable et respectaient les protocoles courants des régions concernées. Les territoires sondés couvrent une variété de compositions typiques et représentatives de celles envisagées pour des coupes partielles dans la zone de la forêt tempérée nordique, soit des érablières, des bétulaies jaunes à résineux et des bétulaies jaunes à érable rouge.

2.3. Analyse

Pour chaque territoire sondé, nous avons calculé les statistiques de base (p. ex. : moyenne et écart-type) de chacune des variables utilisées dans les critères forestiers décisionnels ainsi que d'autres caractéristiques dendrométriques courantes. Nous présentons la notion de précision par son inverse, soit la marge d'erreur tolérée, convertie en valeur relative (pourcentage de la moyenne). Nous présentons aussi le CV, car c'est la statistique la plus simple pour représenter l'effet de la variation de l'échantillon sur le nombre de placettes requises pour obtenir une marge d'erreur donnée.

Pour évaluer le nombre de placettes requises pour parvenir fréquemment au même choix de traitement, nous avons réalisé des simulations de Monte-Carlo avec les données d'inventaire à l'étude (Chernik 2008, Wicklin 2013). En bref, celles-ci comprennent les étapes suivantes :

- 1) Choix du nombre de placettes à échantillonner dans chaque UC (un multiple de 5, entre 5 et le nombre maximal de placettes mesurées dans l'UC, soit 45 à 65 [p. ex. : 5, 10, 15... 40, 45]);
- 2) Sélection au hasard de ce nombre de placettes avec remise;
- 3) Calcul des variables utilisées dans le logigramme pour le type de forêt correspondant (érablière ou peuplement mixte à bouleau jaune);
- 4) Obtention d'un choix de traitement;
- 5) Nouvelles sélections au hasard (7 500 fois dans chaque territoire sondé);
- 6) Construction d'un tableau de fréquence des différents choix obtenus;
- 7) Reprise des étapes 1 à 6 avec un nombre différent de placettes.

L'idée derrière une sélection aléatoire avec remise est d'exploiter la variabilité observée et, au besoin, d'évaluer plus d'unités d'échantillonnage que le maximum échantillonné.

3. Résultats

Pour l'ensemble des variables calculées, le CV est très lié au nombre de placettes requises (figure 1). Par exemple, si le CV du critère forestier à l'étude est de 21 %, alors seulement 5 placettes sont nécessaires si l'on accepte une marge d'erreur de 20 %, 19 fois sur 20. Par contre, si la marge d'erreur tolérée est abaissée à 10 %, alors le nombre de placettes requises passe de 5 à 21. À titre indicatif, pour un critère ayant un CV de 100 %, alors il faut 100 placettes si l'on souhaite une marge d'erreur de 20 % et 400 placettes pour une marge de 10 % (résultats non montrés). Pour un même CV, le nombre de placettes augmente par un facteur de 4 si l'on réduit de moitié la marge d'erreur.

Le tableau 1 présente des statistiques de base calculées sur 6 variables dans les 8 territoires à l'étude. Ces variables ont été sélectionnées de manière à couvrir toute l'étendue des situations observées avec les 19 critères forestiers étudiés.

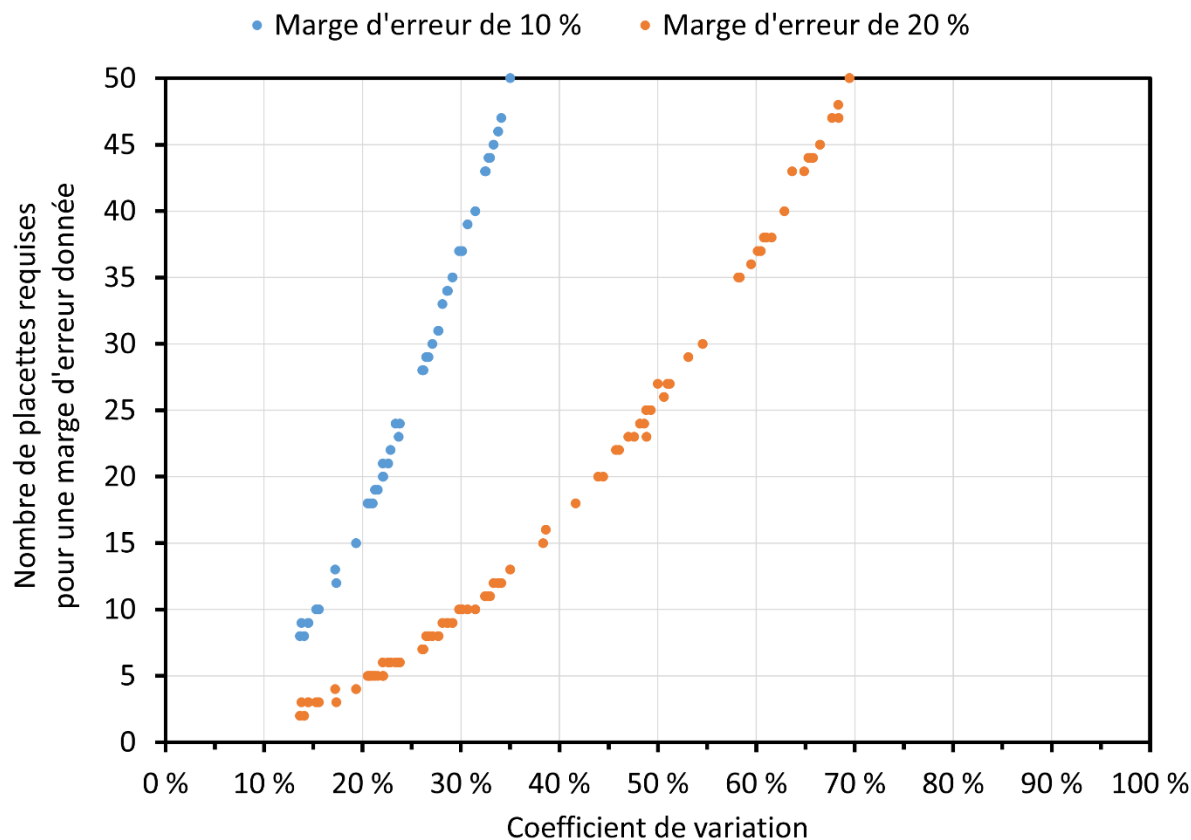


Figure 1. Nombre de placettes requises pour obtenir une marge d'erreur donnée selon le coefficient de variation de la variable à l'étude, pour deux marges d'erreur tolérées (10 % et 20 %).

Tableau 1. Valeurs moyennes [minimales et maximales] du coefficient de variation, de la moyenne et de son écart-type dans les 8 territoires à l'étude pour une sélection de 6 variables représentatives. Les valeurs ont été arrondies à l'unité près aux fins de présentation, mais les coefficients de variation ont été calculés sur les valeurs d'origine. DHP = diamètre à hauteur de poitrine.

Variable	Coefficient de variation	Moyenne	Écart-type
Volume net (m ³ /ha)	26 [21 – 34]	156 [140 – 186]	40 [33 – 52]
Proportion	Pâte	63 [58 – 69]	11 [8 – 15]
	Bouleau jaune	17 [7 – 26]	17 [10 – 23]
Surface terrière marchande (m ² ·ha ⁻¹)	Totale	27 [23 – 32]	7 [5 – 8]
	Classe de DHP : 10-22 cm	116 [93 – 131]	2 [1 – 4]
	Classe de DHP : 24-44 cm	80 [61 – 116]	5 [3 – 8]

Les variables dont le calcul inclut tous les arbres de l'inventaire, comme la surface terrière marchande, la proportion de volume de pâte ou le volume net de tous les arbres confondus, présentent les plus faibles CV (tableau 1), soit environ de 15 % à 35 %, selon le territoire et le critère. Pour échantillonner ces variables avec une précision acceptable, il faut généralement 3 placettes pour un CV de 15 % et 13 placettes pour un CV de 35 % si l'on accepte une marge d'erreur de 20 %, 19 fois sur 20 (figure 1).

Plus la proportion de la surface terrière totale contenant des arbres utilisés pour calculer ladite variable est faible, alors plus le CV et le nombre de placettes requises sont grands. À titre indicatif, la proportion de bouleau jaune dans le peuplement (variable dont la moyenne était de 17 %) a un CV moyen de 112 % (tableau 1). Si l'on accepte une marge d'erreur de 20 %, 19 fois sur 20, alors il faut environ 130 placettes pour bien échantillonner cette variable. La situation est semblable pour des variables comme la surface terrière marchande d'un groupe d'arbres ayant un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) de 10 à 22 cm (groupe 10_22) et pour ceux ayant un DHP de 24 à 44 cm (groupe 24_44)³.

À titre indicatif, la figure 2 montre la variation du nombre de placettes requises pour obtenir une marge d'erreur de 20 %, 19 fois sur 20, selon la proportion de la surface terrière ou du volume net du peuplement représenté par la variable d'intérêt dans le territoire. Dans une population sondée à l'aide d'une dizaine de placettes, une précision acceptable peut être obtenue pour une variable qui se trouve dans au moins 75 % de la surface terrière ou du volume net. Ce seuil est plus près de 40 % pour les populations sondées avec au moins 25 placettes. Notons que le volume des résineux est plus difficile à estimer avec précision, probablement à cause de l'agglomération de ces essences dans les peuplements dominés par les feuillus.

³ **Groupe 10_22** = arbres faisant partie des classes de DHP de 10 à 22 cm (DHP de 9,1 à 23,0 cm) de l'une des 4 essences suivantes : érable à sucre, bouleau jaune, bouleau à papier, chêne rouge. **Groupe 24_44** = arbres de ces mêmes 4 essences faisant partie des classes de DHP de 24 à 44 cm (DHP de 23,1 à 45,0 cm) compris dans le capital forestier en croissance.

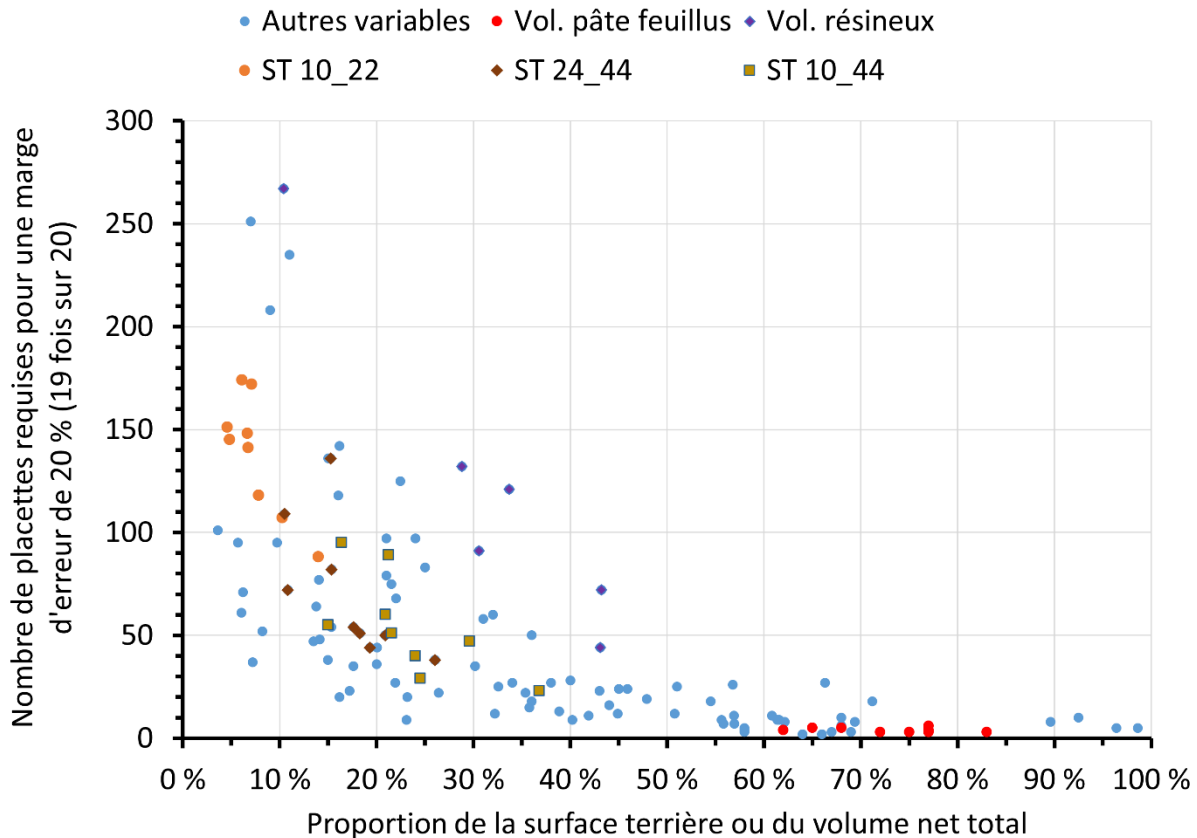


Figure 2. Nombre de placettes requises pour obtenir une marge d'erreur de 20 % (19 fois sur 20) selon la proportion de la surface terrière ou du volume net du peuplement que représente la variable d'intérêt dans le territoire. Les variables suivantes sont montrées plus spécifiquement : le volume net de pâte des feuillus (Vol. pâte feuillus), le volume net des résineux (Vol. résineux), la surface terrière du groupe 10_22 (ST 10_22), la surface terrière du groupe 24_44 (ST 24_44), la surface terrière du groupe 10_44 (ST 10_44, soit la somme des groupes 10_22 et 24-44), puis les 10 autres variables étudiées.

La proportion des simulations d'échantillonnage ayant donné le choix de traitement le plus fréquent augmentait légèrement en fonction du nombre de placettes, passant d'une moyenne de 57,2 % avec 15 placettes à 66,1 % avec 50 placettes (tableau 2). La confiance dans le choix d'une coupe de jardinage dans le secteur David Lord était très élevée (88,9 % des simulations), même avec seulement 15 placettes. À l'opposé, le choix d'une CPI_RL dans le secteur La Lune était incertain, puisque seulement de 46,2 à 48,2 % des simulations parvenaient à ce choix, qu'on inventorie 15 ou 50 placettes. Cette incertitude était provoquée par la moyenne de l'un des critères forestiers ($1,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ de 10_22) qui était près d'un seuil décisionnel (seuil à $1,6 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$). Ainsi, le hasard des placettes choisies avait de grandes répercussions sur la décision sylvicole. L'ajout de placettes ne réglait pas à lui seul cette situation.

Tableau 2. Proportion des simulations d'échantillonnage ayant donné le choix le plus fréquent, selon le nombre de placettes échantillonnées, et ce choix le plus fréquent, par territoire de sondage. CJ = coupe de jardinage; CPI_CP = coupe progressive irrégulière à couvert permanent de niveau 1 ou 2; CPI_RL = coupe progressive irrégulière à régénération lente; CR = une des coupes de régénération menant à la futaie de structure régulière; Ro = un état de peuplement à régénérer nécessitant d'autres données afin de choisir entre une CPI_RL ou une des CR.

Territoire	Nombre de choix, choix le plus fréquent	Proportion (%) des simulations ayant donné le choix le plus fréquent, selon le nombre de placettes échantillonnées				
		15	20	25	40	50
Mauricie_1	3, CPI_CP2	75,8	80,8	84,0	93,1	–
Mauricie_2	3, Ro	77,7	80,6	84,0	87,4	91,0
Mauricie_3	3, CPI_CP2	49,9	51,1	50,6	53,7	53,0
Mauricie_4	5, Ro	88,0	91,3	–	–	–
Félix	6, CPI_CP1	37,9	41,6	43,4	49,1	49,3
La Lune	6, CPI_RL	46,2	46,9	49,6	47,3	48,2
David Lord	6, CJ	88,9	93,4	–	–	–
Bleu	4, CR	74,1	77,9	80,7	85,6	88,8
Moyenne de 5 unités simulées jusqu'à 50 placettes		57,2	59,6	61,7	64,6	66,1

4. Discussion

Les résultats obtenus démontrent d'abord que l'utilisation d'une dizaine de placettes à rayon variable dans une population permet généralement d'obtenir une donnée suffisamment précise (p. ex., une marge d'erreur de 20 %, 19 fois sur 20) pour une information dendrométrique couvrant au moins 75 % de son contenu (figure 2). Cependant, le nombre de placettes requises pour obtenir une donnée aussi précise augmente très rapidement pour des variables dendrométriques obtenues avec une plus faible proportion des arbres de l'échantillon. Ainsi, même si l'inventaire d'une population contient souvent de 20 à 30 placettes dans le contexte opérationnel, ces nombres sont encore insuffisants pour que l'on puisse obtenir une donnée précise au sujet d'une information dendrométrique couvrant moins de 40 % du peuplement. L'ajout de placettes, compte tenu des contraintes budgétaires courantes, permet difficilement d'obtenir un bon niveau de précision pour les variables plus rares (par exemple, la surface terrière du groupe 10_22, qui représente 5 à 10 % de la population).

Pour améliorer la fiabilité des inventaires forestiers, il est possible de changer un peu l'approche quant à la précision et le nombre de placettes pour évaluer certaines variables dendrométriques. Une approche que nous avons évaluée consiste à estimer la probabilité que la moyenne d'une variable dans une population soit supérieure (ou inférieure) à un critère forestier. Même si la plupart des données de l'inventaire d'intervention ne suivent pas parfaitement une distribution normale, un test d'hypothèse peut fournir une estimation raisonnable. L'équation 1 permet de calculer la valeur t de Student pour obtenir, suivant la loi de Student⁴, la probabilité que la moyenne de l'échantillon, \bar{x} , soit supérieure à la valeur de référence μ , en fonction l'écart-type de l'échantillon s et le nombre d'échantillons n .

$$t_{n-1} = \frac{\bar{x} - \mu}{s / \sqrt{n}} \quad \text{Équation 1}$$

Pour illustrer cette approche, nous avons analysé le cas de la surface terrière du groupe 10_22 dans le secteur David Lord (superficie : 58 ha). Un critère pour y réaliser une coupe de jardinage est que cette variable soit d'au moins $2,6 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Or, la moyenne était de $4,1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, avec un écart-type de $3,8 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ et un CV de 93 %. Il aurait fallu inventorier 88 placettes pour obtenir une marge d'erreur de 20 %, 19 fois sur 20, sur cette variable, plutôt que les 53 réalisées dans notre étude et que les 17 qui auraient été réalisées dans les opérations courantes (figure 1). Toutefois, selon l'équation 1 et la probabilité unilatérale suivant une loi de Student, il y avait une probabilité de 99 % que la vraie moyenne de ce secteur soit supérieure à $2,6 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Notons que dans 51 % des placettes, la surface terrière du groupe 10_22 était d'au moins $4 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Par conséquent, il n'était pas nécessaire d'inventorier de nombreuses placettes dans ce secteur pour avoir confiance de répondre au critère forestier menant au choix d'une coupe de jardinage, et ce, même si la précision était faible.

Le calcul de cette probabilité est fortement influencé par la moyenne de l'échantillon, puis par le nombre de placettes et l'écart-type de l'échantillon, comme l'illustrent les 5 échantillons présentés à l'annexe 2.

Une autre approche qui mériterait d'être évaluée est celle de Leak *et al.* (2014). Dans leur guide, ces auteurs proposent d'analyser la proportion de la surface terrière de chaque placette en fonction d'un critère forestier, puis de poser un diagnostic selon la proportion des placettes répondant ou non à ce critère. L'évaluation de cette méthode nécessiterait des travaux de recherche afin de déterminer les seuils de diagnostic appropriés.

⁴ Ce calcul peut être réalisé avec un tableur. Dans le logiciel Microsoft Excel^{MD}, la formule est :
probabilité = 1 — LOI.STUDENT.DROITE(; $n - 1$).

5. Implications pour la réalisation des diagnostics et prescriptions sylvicoles

Des ingénieurs forestiers chargés de préparer des prescriptions sylvicoles dans les forêts du domaine de l'État de la zone tempérée nordique souhaitent d'abord savoir si leurs méthodes de travail permettaient de choisir les bons traitements sylvicoles et, ensuite, s'ils devaient ajuster leurs démarches de diagnostic et de prescription sylvicoles. À la lumière des informations obtenues, nous les avisons de bien définir les populations (unités homogènes ou ensembles de peuplements) qu'ils souhaitent sonder avant de réaliser l'inventaire d'intervention, puis de ne plus les modifier, dans la mesure du possible. Certains pourraient choisir d'investir le budget de sondage dans la réalisation d'un inventaire de reconnaissance afin de valider l'information interprétée en cabinet. Si un tel budget n'est pas disponible ou requis avant la réalisation de l'inventaire d'intervention, il est possible de livrer des prescriptions sylvicoles peu documentées sur le plan dendrométrique. À titre indicatif, c'est la façon de fonctionner dans l'unité de gestion du Bas-Saint-Maurice (Yves Gauvreau, ing.f. et Pascale Doyon, ing.f., communications personnelles, mai 2022). Plusieurs sources d'informations disponibles en cabinet (par exemple, la donnée lidar) offrent l'avantage de couvrir l'ensemble des peuplements plutôt qu'une faible proportion, comme le ferait un inventaire par échantillonnage⁵.

Concernant la question de la précision de l'information dendrométrique obtenue dans l'inventaire d'intervention, nous avons documenté le nombre de placettes qu'il faudrait inventorier pour obtenir un niveau de précision donnée, selon l'ampleur que la variable d'intérêt présente dans la population sondée. Les résultats démontrent ce qui suit :

- 1) Il est généralement facile d'obtenir un bon niveau de précision avec au moins 10 points de prisme pour des variables dendrométriques calculées sur au moins 75 % de la surface terrière ou du volume de la population. Exemple de variable : la proportion d'érables dans une érablière.
- 2) Il est généralement facile d'obtenir un bon niveau de précision avec au moins 25 points de prisme pour des variables dendrométriques calculées sur au moins 40 % de la surface terrière ou du volume de la population. Exemple de variable : la somme des surfaces terrières du groupe 10_22 et du groupe 24_44.
- 3) Le nombre de placettes requises augmente très rapidement si l'on souhaite obtenir un bon niveau de précision pour des variables dendrométriques calculées sur moins de 40 % de la surface terrière ou du volume de la population. Exemple de variable : la surface terrière du groupe 10_22. À cet effet, nous recommandons d'éviter le plus possible d'utiliser de telles variables comme critère de diagnostic sylvicole. Dans le cas contraire, nous recommandons de faire des essais en calculant la probabilité que la moyenne d'une variable soit supérieure (ou inférieure) à un critère forestier (équation 1 et distribution selon la loi de Student). L'utilisation de cette information et la communication de celle-ci

⁵ Une placette à rayon variable d'un facteur de $2 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ permet d'échantillonner un arbre avec un DHP de 30 cm sur une surface de 353 m^2 , ce qui équivaut à 1 % d'une aire de 3,5 ha.

aux partenaires pourrait aider les praticiens à reconnaître, puis à se familiariser avec la part d'incertitude inhérente à l'inventaire par échantillonnage. Une autre approche envisageable, que nous n'avons cependant pas évaluée, serait de sonder différemment les informations plus rares, à la manière d'un coefficient de distribution de la régénération (voir Guillemette *et al.*, en préparation). Autrement dit, au lieu de chercher à connaître la valeur moyenne du peuplement pour une variable, il pourrait être avantageux de chercher à vérifier si un critère donné (p. ex. : une surface terrière d'au moins 6 m²·ha⁻¹ pour le groupe 24_44) est respecté dans une proportion suffisante de placettes (p. ex. : au moins 2 placettes sur 3, ou bien 3 placettes sur 4, etc.).

Finalement, nous recommandons aux praticiens d'énoncer de nouveaux besoins de recherche en lien avec les méthodes de diagnostic et de prescription sylvicoles, notamment pour y favoriser l'intégration des résultats de recherche en sylviculture. Nous percevons le besoin de réaliser des travaux de recherche qui faciliteront la mise à l'échelle des résultats expérimentaux dans la pratique opérationnelle.

Références bibliographiques

- Blais, L., 2014. *Simplifions la statistique — De quoi la taille d'un échantillon dépend-elle?* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, 4 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/simplifions-statistique-taille-echantillon/>
- Chernik, M.R., 2008. *Bootstrap methods: A guide for practitioners and researchers*. Second edition. Wiley, Newtown, PA (États-Unis). 400 p.
- Gravel, J., S. Meunier et É. Provost, 2013. « Chapitre 4 — Le diagnostic et la prescription sylvicoles » dans : Ministère des Ressources naturelles, *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2 — Les concepts et l'application de la sylviculture*. Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier. Les Publications du Québec. Québec, QC. p. 42-55.
- Guillemette, F., M.-C. Lambert, H. Power et P. Raymond, en préparation. *Évaluation du nombre de placettes requises pour rencontrer une marge d'erreur donnée lors de l'inventaire des gaules en forêt tempérée*. Article scientifique.
- Gregoire, T. G. et H.T. Valentine, 2008. *Sampling strategies for natural resources and the environment*. Chapman & Hall/CRC. New York. 457 p.
- Leak, W.B., M. Yamasaki et R. Holleran, 2014. *Silvicultural guide for northern hardwoods in the northeast*. U.S.D.A. Forest Service, Northern Research Station. Newtown Square, PA (États-Unis). General Technical Report n° NRS-132. 46 p. <https://doi.org/10.2737/nrs-gtr-132>.
- Lohr, S.L., 1999. *Sampling: Design and analysis*. Duxbury Press. New York, NY (États-Unis). 494 p.

Méthot, S., L. Blais, J. Gravel, I. Latrémouille, S. St-Pierre et S. Vézeau, 2014. *Guide d'inventaire et d'échantillonnage en milieu forestier*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, 237 p.
<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/Guide-Inventaire-Echantillonnage.pdf>

[MRN] Ministère des Ressources naturelles, 2013. *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2. Les concepts et l'application de la sylviculture*. Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier. Les Publications du Québec. Québec, QC, 744 p.

Wicklin, R., 2013. *Simulating data with SAS®*. SAS Institute Inc., Cary, NC (États-Unis).
https://support.sas.com/content/dam/SAS/support/en/books/simulating-data-with-sas/65378_excerpt.pdf

François Guillemette, ing.f., M. Sc.

Service de la sylviculture et du rendement des forêts

Louis Blais, B. Sc., stat.

Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers,
Service de la planification et de la sylviculture

Correspondance :

François Guillemette
Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein, bureau C.1.345.11
Québec (Québec) G1P 3W8
Tél : 418 643-7994 poste 706629
Courriel : françois.guillemette@mffp.gouv.qc.ca

On peut citer tout ou partie de ce texte en indiquant la référence. Citation recommandée :

Guillemette, F. et L. Blais, 2022. *Méthodes de diagnostic sylvicole et précision de l'inventaire d'intervention par échantillonnage*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis technique SSRF-31. 18 p.

Annexe 1. Description des méthodes relevées de diagnostic et de prescription

A1.1 Méthode peuplement_carto

Avec cette méthode, l'ingénieur forestier utilise les peuplements écoforestiers tels qu'ils sont délimités sur la carte écoforestière la plus récente, puis il réalise un diagnostic et une prescription sommaires de chaque peuplement avant de procéder à un inventaire par échantillonnage. Voici les principales étapes qu'il entreprend pour y parvenir :

- 1) Il rassemble d'abord les nombreuses informations mises à sa disposition en cabinet, comme la plus récente édition de la carte écoforestière, les éditions précédentes de la cartographie forestière⁶, les photographies aériennes, les données du lidar aéroporté, le rapport de la visite sur le terrain effectuée par un technicien forestier (prospection)* et une carte de l'historique des interventions. Ces produits d'information sont décrits dans Méthot *et al.* (2014). Il utilise aussi sa connaissance et son expérience du territoire.
- 2) Il utilise ensuite ces informations pour délimiter le SIP et retirer des aires non accessibles (pentes) ou des emprises de chemins forestiers, par exemple. Il évalue aussi la faisabilité opérationnelle du SIP.
- 3) Il prépare un plan de sondage à l'aide de placettes à rayon variable (points de prisme). L'intensité moyenne généralement visée est d'une placette par 3,5 ha de forêt du SIP. Notons qu'il place habituellement au moins une placette par peuplement écoforestier à cette étape, même lorsque certains sont plus petits que 3,5 ha.
- 4) Il utilise ensuite la donnée de l'inventaire d'intervention pour poser un diagnostic sylvicole sommaire et préparer une prescription sylvicole sommaire pour chaque peuplement écoforestier (de 1 à 5 placettes par peuplement, en général). Il identifie le traitement sylvicole générique qu'il prévoit retenir pour chaque peuplement, mais il n'entre pas encore dans les variantes ou les modalités de ces traitements (voir MRN 2013 pour ces détails). S'il constate un écart important entre le type forestier attendu d'après la cartographie et celui rapporté par les placettes de l'inventaire d'intervention, alors il privilégie l'information des placettes, après avoir vérifié toutes les autres sources d'informations disponibles (photographie aérienne, notes d'une visite de prospection, autres produits de la cartographie, etc.). Au besoin, il effectuera une visite sur le terrain afin de vérifier l'information.
- 5) Par la suite, il regroupe des peuplements selon leur type forestier et le traitement sylvicole générique dans le SIP; ce sont des unités homogènes qui, une fois rassemblées, formeront l'UC pour laquelle il finalisera sa prescription.

⁶ Les sources d'information marquées d'un astérisque (*) indiquent celles qui ne sont pas utilisées par toutes les personnes sondées.

- 6) Il évalue ensuite la faisabilité opérationnelle du SIP et révisé au besoin certains choix de traitements sylvicoles potentiels. Par exemple, un petit peuplement d'un type forestier différent de ses voisins pourrait être regroupé avec les peuplements adjacents si la réalisation d'un traitement sylvicole différent n'est pas pratique, d'un point de vue opérationnel. Au besoin, il confirme certaines décisions lors d'une visite sur le terrain. Il identifie alors les regroupements finaux de peuplements semblables sous forme d'UC.
- 7) Finalement, il compile les placettes de chacune des UC et rédige une prescription sylvicole pour chacune d'elles. Cette prescription comprend la directive opérationnelle (DO) de récolte et, le cas échéant, la directive de martelage (DM). C'est à cette étape que les décisions finales sont prises — les étapes précédentes ayant servi à regrouper les peuplements les plus semblables. Même s'il dispose d'outils qui proposent des choix de traitements selon des seuils dendrométriques (surface terrière minimale, par exemple), l'ingénieur forestier utilise son jugement professionnel et se réfère aux orientations d'aménagement du territoire.

A1.2. Méthode peuplement_révisé

Avec cette méthode, l'ingénieur forestier commence par réviser la cartographie écoforestière du SIP. Voici les principales étapes qu'il entreprend pour y parvenir :

- 1) Il rassemble les nombreuses informations mises à sa disposition en cabinet, comme la plus récente édition de la carte écoforestière, les éditions précédentes de la cartographie forestière^{*7}, les photographies aériennes, les données du lidar aéroporté, le rapport de la visite effectuée par un technicien forestier sur le terrain (prospection)^{*} et une carte de l'historique des interventions. Il utilise aussi sa connaissance et son expérience du territoire.
- 2) À la lumière de ces informations, il révisé une première fois la délimitation des peuplements écoforestiers selon ses besoins. Entre autres, il peut retirer du SIP des aires non accessibles (pentes) ou des emprises de chemins forestiers, par exemple. Il évalue aussi la faisabilité opérationnelle des traitements sylvicoles. À cette étape, nous avons recensé 3 façons de faire :
 - a) L'ingénieur forestier fait une première délimitation des principaux types forestiers et il effectue une prescription sylvicole sommaire en déterminant le traitement sylvicole potentiel de chaque peuplement_révisé.
 - b) Il délimite seulement les aires susceptibles d'être traitées par coupe partielle et celles susceptibles de l'être par coupe totale.
 - c) Il suspend la délimitation plus fine en attendant d'obtenir les données provenant des placettes de l'inventaire.

⁷ Les sources d'information marquées d'un astérisque (*) indiquent celles qui ne sont pas utilisées par toutes les personnes sondées.

- 3) Par la suite, il prépare un plan de sondage d'inventaire d'intervention à l'aide de placettes à rayon variable (prisme). L'intensité du sondage et les variables mesurées peuvent varier selon le type de traitement sylvicole envisagé. Néanmoins, comme pour la méthode peuplement_carto, l'intensité moyenne généralement visée dans les coupes partielles est d'une placette par 3,5 ha de forêt du SIP. Notons qu'à cette étape, il place habituellement au moins une placette par peuplement écoforestier, tout en cherchant à en cumuler au moins une dizaine par unité homogène d'un même SIP.
- 4) Il utilise ensuite la donnée de l'inventaire d'intervention soit pour réviser la délimitation des peuplements (étape 2a, révisions généralement mineures), soit pour la faire une première fois (étapes 2b et 2c). Ainsi, il utilise les placettes un peu comme des points de contrôle pour un projet de photo-interprétation en vue de produire une carte écoforestière. Il délimite les peuplements de manière à distinguer des types forestiers ou des traitements sylvicoles différents à l'intérieur d'un même type forestier, mais en utilisant une aire minimale plus petite que celle de l'inventaire forestier provincial (travail mieux connu sous le nom « photo-interprétation fine » ou « interprétation opérationnelle »; Méthot *et al.* 2014). Encore une fois, il évalue la faisabilité opérationnelle des traitements sylvicoles avant de finaliser les délimitations. Ainsi, un petit peuplement d'un type forestier différent de ses voisins pourrait être regroupé avec les peuplements adjacents si la réalisation d'un traitement sylvicole différent n'est pas pratique, d'un point de vue opérationnel. Il identifie alors les regroupements finaux de peuplements semblables sous la forme d'UC.
- 5) Finalement, il compile les placettes de chacune des UC et rédige une prescription sylvicole pour chacune d'elles. Cette prescription comprend la directive opérationnelle (DO) de récolte et, le cas échéant, la DM. C'est à cette étape que les décisions finales sont prises. Même s'il dispose d'outils qui proposent des choix de traitements selon des seuils dendrométriques (surface terrière minimale, par exemple), l'ingénieur forestier utilise son jugement professionnel et se réfère à des orientations d'aménagement du territoire.

Annexe 2. Facteurs influençant la probabilité face à un seuil

Le calcul de la probabilité que la moyenne d'une variable dans une population soit supérieure (ou inférieure) à un critère forestier est fortement influencé par la moyenne de l'échantillon, puis par le nombre de placettes et l'écart-type de l'échantillon, comme l'illustrent les 5 échantillons présentés au tableau A2.1.

Tableau A2.1. Comparaison des statistiques de base et de la probabilité que la moyenne d'un échantillon soit supérieure à la valeur de référence (soit 2,6 m²·ha⁻¹ dans cet exemple) dans 5 inventaires par échantillonnage d'une variable de surface terrière.

Placette	Surface terrière d'une variable dans chacune des placettes de 5 échantillons (m ² ·ha ⁻¹)				
	N° 1 (base de référence)	N° 2 (moyenne plus élevée)	N° 3 (moyenne plus élevée et moins de placettes)	N° 4 (moins de placettes)	N° 5 (plus de variabilité)
1	4	4	4	4	6
2	2	2	2	2	0
3	0	2	0	0	0
4	6	8	8	6	6
5	2	2	2	2	0
6	2	2	4	2	4
7	4	4			8
8	2	2			0
9	0	0			0
10	6	6			6
11	2	2			0
12	2	4			2
Moyenne, \bar{x}	2,7	3,2	3,3	2,7	2,7
Écart-type, s	2,0	2,2	2,7	2,1	3,1
Coefficient de variation	74 %	68 %	82 %	77 %	117 %
Critère, μ	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
t_{n-1}^*	0,12	0,91	0,66	0,08	0,07
Probabilité, $\bar{x} > \mu$	55 %	81 %	73 %	53 %	53 %

* Les calculs ont été faits sur les valeurs d'origine dans un tableur, puis les valeurs présentées ont été arrondies.

- L'échantillon n° 1 a été utilisé comme base de référence, avec une surface terrière moyenne de $2,7 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ et un écart-type de $2,0 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, estimés à partir d'un échantillon de 12 placettes. Pour cet échantillon, la probabilité d'avoir une moyenne supérieure au critère de $2,6 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ est de 55 %.
- L'échantillon n° 2, avec 12 placettes lui aussi, se démarque de l'échantillon n° 1 par une surface terrière moyenne plus élevée ($3,2 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), ce qui a fait grimper la probabilité à 81 % d'avoir une moyenne supérieure au critère de $2,6 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$.
- L'échantillon n° 3 a une surface terrière moyenne ($3,3 \text{ m}^2/\text{ha}$) semblable à celle de l'échantillon n° 2, mais ne comprend que 6 placettes, et l'écart-type est un peu plus grand ($2,7 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$). En conséquence, la probabilité d'avoir une moyenne supérieure au critère de $2,6 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ diminue à 73 %.
- Les échantillons n°s 4 et 5 ont la même moyenne que l'échantillon n° 1, mais un plus petit nombre de placettes (n° 4) ou une variabilité plus grande (n° 5). Pourtant, la probabilité que la moyenne soit supérieure au seuil de $2,6 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ diminue peu comparativement à l'échantillon n° 1, puisqu'elle atteint 53 % dans les deux cas.

Notons que même si les moyennes de ces 5 échantillons étaient toutes supérieures au critère de $2,6 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, aucun d'entre eux n'offrait de certitude que la vraie moyenne de la population soit supérieure à cette valeur, les probabilités variant de 53 à 81 %.

Nous pensons que de tels calculs de probabilités pour certaines variables dendrométriques pourraient aider à la prise de décision.