

ERRATA: Cette version comporte deux corrections apportées au document original

diffusé en mai 2024 :

Page 8, tableau 1, colonne 1 rangée 8 :

« Sapin baumier (avec effet TBE) » a été changé pour « Sapin baumier (sans effet TBE) ».

Page 8, tableau 1, colonne 1, rangée 9 :

« Sapin baumier (sans effet TBE) » a été changé pour « Sapin baumier (avec effet TBE) ».

Avis technique

SSRF-33

Direction de la recherche forestière

Titre :	Anticiper la composition future après coupe partielle des peuplements en forêt tempérée grâce aux suivis d'efficacité des traitements sylvicoles
Auteur :	François Guillemette, ing.f., M. Sc. (Direction de la recherche forestière, DRF)
Collaborateurs :	François Boucher, ing.f. (Direction de la gestion des forêts de Lanaudière et des Laurentides), Simon Bilodeau-Gauthier, biol, ing.f., Ph. D. (DRF), Marie-Claude Lambert, stat., M. Sc. (DRF) et Hugues Power, ing.f., Ph. D. (DRF)
Réviseur :	Daniel Dumais, ing.f., M. Sc. (DRF)
Date :	Février 2025 (version corrigée)

Des suivis d'efficacité des traitements sylvicoles peuvent être réalisés quelques années après une coupe forestière, notamment pour vérifier si la régénération naturelle s'installe comme prévu. Cette information est utile, entre autres, pour alimenter le calcul des possibilités forestières avec des hypothèses d'évolution au sujet de la composition des peuplements forestiers. Cependant, aucun modèle statistique ne permet encore de lier les données recueillies lors des suivis d'efficacité à la composition future de cette cohorte de régénération en forêt tempérée. Une procédure a été conçue afin de combler cette lacune.

1. Contexte

Le ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF) est responsable du suivi et du contrôle des interventions en forêt publique au Québec¹. Il réalise entre autres des suivis pour vérifier l'efficacité des traitements sylvicoles et des procédés de régénération qui en découlent. Ces suivis servent à la reddition de comptes publics visant à vérifier si la régénération naturelle s'installe comme prévu, c'est-à-dire si toutes les superficies traitées sont bien régénérées environ 5 ans (parfois 10) après la coupe. Ils servent aussi à détecter certains problèmes sylvicoles, comme un manque de régénération, puis à prescrire les traitements sylvicoles nécessaires pour l'atteinte des objectifs et respecter les stratégies d'aménagement préétablies. Ces suivis fournissent aussi des informations pour appuyer l'élaboration d'hypothèses de composition des strates de retour après une coupe dans le calcul des possibilités forestières. Les principales données ainsi

¹ <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/amenagement-durable-forets/suivis-forestiers-traitements-sylvicoles-rentabilite-investissements/>

recueillies consistent en des coefficients de distribution (CD)² mesurés à l'aide de groupes de 10 microplacettes d'une superficie d'environ 4 à 25 m² chacune.

C'est dans ce contexte que la Direction de la recherche forestière (DRF) a été approchée par la Direction de la gestion des forêts de Lanaudière et des Laurentides du MRNF qui souhaitait mettre à profit l'information contenue dans les données des suivis d'efficacité des procédés de régénération (annexe 1). Le besoin était d'être accompagné dans l'interprétation de ces données afin d'anticiper de futurs changements de composition des peuplements et de diagnostiquer si la régénération était suffisamment abondante. La demande visait particulièrement les peuplements traités par coupe partielle dans des bétulaies jaunes résineuses (50 % des données) et des érablières (41 % des données).

Nous n'avons trouvé aucun modèle statistique publié permettant de lier les CD des essences à l'étude recueillis environ 5 ans après une coupe partielle avec la composition future de cette cohorte de régénération. La DRF poursuit des travaux à long terme de collecte de données et de modélisation forestière visant entre autres à y parvenir. En attendant, nous avons trouvé des informations utiles pour élaborer une méthode d'interprétation plausible et reproductible. Les informations proviennent en partie de publications scientifiques et en partie de bases de données de la DRF dans lesquelles la régénération a été étudiée après une coupe partielle (généralement avec un prélèvement de 25 à 50 % de la surface terrière [ST]). Le lecteur doit savoir que l'analyse qui suit a été produite pour évaluer rapidement l'ordre de grandeur de la composition et de l'abondance future de cette régénération, mais qu'elle contient de nombreuses sources possibles de variation. Il faut par conséquent l'utiliser avec précaution, en considérant que les valeurs estimées comporteront un certain degré d'incertitude.

2. Hypothèses

2.1 Hypothèses générales

Il est reconnu que l'effet d'une perturbation (par exemple, un traitement sylvicole) sur la composition de peuplements associés à des essences de fin de succession varie selon l'intensité de cette perturbation (Frelich 2016, Oliver et Larson 1996, Olson et Wagner 2010).

- Ainsi, une **coupe de faible intensité** (par exemple, une coupe partielle avec un prélèvement de moins de 25 % de la ST; Raymond *et al.* 2013a) modifiera peu la composition des peuplements à l'étude. Cette hypothèse s'appuie d'abord sur le fait que la majeure partie du couvert demeure en place et que normalement, le peuplement maintient sa composition après la coupe (p. ex. :

² Le coefficient de distribution est la mesure du taux d'occupation d'une superficie donnée par des arbres d'une essence ou d'un groupe d'essences. Exprimé en pourcentage, il correspond au nombre de microplacettes occupées par au moins un individu d'une essence donnée par rapport au nombre total de microplacettes établies sur cette superficie.

Guillemette *et al.*, sous presse). Ensuite, les essences de fin de succession et tolérantes à l'ombre sont généralement préétablies sous le couvert et profitent des petites ouvertures pour combler l'espace de croissance qui vient d'être libéré (Bilodeau-Gauthier *et al.*, en préparation). De telles conditions devraient se remplir principalement dans les coupes de jardinage (CJ, prélèvement de 25 à 30 % de la ST; annexe 1).

- À l'opposé, une **coupe de forte intensité** (par exemple, une coupe totale avec un prélèvement d'au moins 75 % de la ST) peut créer des conditions plus favorables aux essences de début de succession, comme les feuillus intolérants à l'ombre. Ce type de conditions existe principalement après des coupes totales, lesquelles ne font pas l'objet de la présente étude.
- Entre ces deux extrêmes, une **coupe d'intensité modérée** (soit un prélèvement partiel de 25 à 49 % de la ST, mais plus particulièrement de 35 à 49 %) devrait aussi favoriser le maintien d'un couvert dominé par des essences tolérantes à l'ombre, tout en libérant une partie de l'espace de croissance pour la régénération des essences moins tolérantes à l'ombre (Power *et al.* 2023, Raymond *et al.* 2013b). Ce sont des conditions courantes dans les coupes progressives irrégulières, qu'il s'agisse de la variante à couvert permanent (CPI_CP : prélèvement de 30 à 40 % de la ST) ou de celle à régénération lente (CPI_RL : prélèvement de 35 à 45 % de la ST; annexe 1).³

Nous supposons aussi que les plus grandes tiges en régénération sont les plus susceptibles d'être recrutées⁴ dans le couvert principal. Ainsi, les gaules établies à 5 ans seraient les premières à être recrutées. Par la suite, si nous estimons qu'elles sont insuffisantes pour combler tout le recrutement attendu, alors nous supposons que les hauts semis (hauteur > 1 m) contribueront aussi au recrutement. Nous jugeons hasardeux d'évaluer la contribution potentielle des plus petits semis au couvert futur. En effet, l'absence ou la rareté de gaules et de semis > 1 m après 5 ans dans des stations de feuillus tempérés peut résulter de conditions particulières, comme un dégagement récent, un fort broutement par les cervidés ou un problème majeur de concurrence par des espèces non commerciales.

Nous posons aussi l'hypothèse que le niveau de recrutement sur une rotation de 30 ans correspond à une ST marchande cible de 3, 4 ou 5 m²·ha⁻¹ selon que le traitement est une CJ, une CPI_CP ou une CPI_RL, respectivement. En effet, le recrutement total sur 30 ans après une coupe de jardinage pratiquée au Québec dans des peuplements ayant initialement une ST d'environ 29 m²·ha⁻¹ et environ 1 000 gaules·ha⁻¹

³ La pratique de coupes partielles de forte intensité (50 à 75 % de prélèvement) n'est pas courante et n'est pas couverte dans cette étude.

⁴ Nous appelons « recrues » les arbres qui atteignent un diamètre à hauteur de poitrine (DHP, mesuré à 1,3 m du sol) de dimension marchande, c'est-à-dire plus grand que 9,0 cm, entre la coupe et une année de référence (soit la 20^e ou la 30^e année, dans cet avis).

après la coupe, est estimé à $3 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (soit $30 \text{ ans} \times 0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ selon les données non publiées, mais observées sur 20 ans dans la base de données MERCJ; annexe 2). Dans des peuplements initialement plus ouverts (ST de $18 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ avant la coupe) et bien pourvus en grosses gaules, une coupe partielle d'intensité modérée a déjà produit $0,2 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ de recrues sur 10 ans (données non publiées, dispositif Arcale), ce qui correspond à un potentiel de $6 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ en 30 ans. En zone tempérée, les CPI_RL sont pratiquées dans des peuplements ayant initialement une ST de 22 à $26 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ et près de $1000 \text{ gaules} \cdot \text{ha}^{-1}$ après la coupe (Michaud-Larochelle 2023). Dans ces conditions plus ensoleillées en sous-étage, il est donc raisonnable de poser l'hypothèse que le recrutement peut atteindre environ $5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ en 30 ans. Pour les CPI_CP, nous posons l'hypothèse que le recrutement se situerait entre celui des CJ ($3 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) et celui des CPI_RL ($5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), soit à $4 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Ces hypothèses de recrutement dans les CPI équivalent aux prévisions obtenues avec deux modèles de croissance pour des traitements comparables dans l'étude de Power *et al.* (2023, données non publiées).

2.2 Essences feuillues intolérantes à l'ombre

Il est raisonnable de poser l'hypothèse que la très grande majorité des peupliers (*Populus* spp.) observés en régénération 5 ans après une coupe partielle ne survivront pas pour former une partie du couvert futur. En effet, ce sont des essences très intolérantes à l'ombre. Prévost et Pothier (2003) ainsi que Prévost et DeBlois (2014) ont observé que les drageons de peupliers qui existent sous le couvert ou qui se forment après une coupe partielle avec prélèvement de 50 % ou moins de la ST (soit une ST résiduelle d'au moins $10 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) ne parviennent pas à recréer un couvert de peupliers par la suite. Nous avons corroboré ces résultats 10 ans après l'éclaircie commerciale d'une bétulaie jaune de 41 ans dont la ST marchande comportait 24 % de peupliers (données à 10 ans non publiées, provenant de l'étude de Guillemette *et al.* 2020). Bien qu'il y ait eu des drageons de peupliers au cours des premières années suivant le prélèvement de 35 à 56 % de la ST (ST résiduelle : 10 à $17 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), ceux-ci sont presque tous morts avant d'atteindre 10 ans. La présence de gaules et de recrues de peupliers est marginale aussi dans les bases de données décrites aux annexes 2, 4 et 5.

En ce qui concerne le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marshall), nous posons l'hypothèse qu'il se comportera de façon intermédiaire entre les peupliers et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton). C'est une essence un peu moins intolérante à l'ombre que les peupliers, mais nettement plus intolérante que le bouleau jaune. Selon une étude réalisée au Maine, la densité des semis de bouleau à papier peut s'accroître et la croissance en diamètre des gaules préétablies de cette essence peut s'accélérer au cours des 15 premières années suivant une coupe partielle (Bose *et al.* 2023). Cependant, la présence de gaules de bouleau à papier était marginale dans les bases de données décrites aux annexes 2 et 4.

2.3 Essences feuillues semi-tolérantes à l'ombre

Le bouleau jaune devrait être l'essence feuillue la plus performante au sein de la régénération dans les coupes partielles d'intensité modérée pratiquées dans les érablières à bouleau jaune (végétation potentielle FE3, Saucier *et al.* 2009) ou dans les bétulaies jaunes (végétation potentielle MJ1 ou MJ2), sauf s'il est affecté par le broutement qui survient en présence d'une forte densité de cervidés (Bédard *et al.* 2022, Power *et al.* 2022). Nos observations sur le terrain et nos données (résultats non publiés) démontrent que des semis de bouleau jaune peuvent germer après une coupe partielle sur une végétation potentielle à bouleau jaune (FE3, MJ1 ou MJ2), puis atteindre en 20 ans le seuil de DHP (diamètre à hauteur de poitrine, mesuré à 1,3 m du sol) correspondant au recrutement dans le couvert marchand, contrairement aux autres essences feuillues semi-tolérantes ou tolérantes à l'ombre. La performance des semis de bouleau jaune sous un couvert de CJ serait moindre que dans des trouées (Shabaga *et al.* 2019), mais quand même intéressante.

La performance de l'érable rouge (*Acer rubrum* Linné) devrait se situer entre celle du bouleau jaune et de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marshall), particulièrement dans les peuplements plus ouverts. Au Maine, Bose *et al.* (2023) ont rapporté une bonne réaction chez les semis et les gaules d'érable rouge dans les coupes partielles (5 à 80 % de prélèvement), tandis qu'au Québec, Power *et al.* (2022) ont rapporté une moins bonne performance pour cette espèce par rapport au bouleau jaune. En effet, pour produire $1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ en recrues d'érable rouge sur 30 ans après une coupe partielle, la valeur du CD observé dans des microplacettes de 4 m^2 (CD₄) en ne comptant que les gaules (CD_{4_gaules}) serait d'environ 35 % pour l'érable rouge, comparativement à environ 20 % pour le bouleau jaune (annexe 4).

Notons que pour ces deux essences, nous avons obtenu des facteurs de conversion à partir de deux bases de données : MERCJ (annexe 2) et BJR (annexe 4). Comme ces deux valeurs étaient légèrement différentes, nous avons utilisé la moyenne des deux pour la présente analyse.

2.4 Essences feuillues tolérantes à l'ombre

La performance du hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrhart) est généralement meilleure que celle de l'érable à sucre (Duchesne *et al.* 2013, Leduc *et al.* 2024), mais habituellement, ces deux espèces performant moins bien que les essences feuillues moins tolérantes à l'ombre (Dumont *et al.* 2023). Les taux de survie et de croissance de la régénération de hêtre peuvent être près du double de ceux de l'érable à sucre. Dans le Maine, Bose *et al.* (2023) ont rapporté qu'après une coupe partielle, la régénération de l'érable à sucre poursuivait sa croissance au même rythme, tandis que la croissance des gaules de hêtre était stimulée. Dans une étude au Québec, la croissance en diamètre des gaules d'érable était stimulée par l'ouverture du couvert (+77 %), mais pas autant que celle du hêtre (+195 %, Leduc *et al.* 2024). Plus l'ouverture du couvert était grande, meilleure était la croissance des deux essences. Le gain

d'accroissement était d'environ 16 % lorsque la ST résiduelle passait de 18 m²·ha⁻¹ (équivalent d'une CJ) à 14 m²·ha⁻¹ (équivalent d'une CPI_RL).

Selon la structure diamétrale et la ST recommandées par Arbogast (1957) pour l'aménagement d'érablières inéquiennes par coupe de jardinage, il faudrait environ 1 000 gaules·ha⁻¹ pour soutenir une production régulière dans un peuplement. Cette densité équivaut à un CD_{4_gaules} d'environ 28 % (annexe 3). Si l'on ajoute les semis aux gaules, Leak *et al.* (2014) recommandent de rechercher un CD₄ total de 40 à 50 % en essences désirées pour considérer qu'un peuplement feuillu est bien régénéré.

2.5 Résineux

La capacité de réaction de la régénération de sapin baumier (*Abies balsamea* (Linné) Miller) après une coupe partielle est bien reconnue (p. ex., Bose *et al.* 2023), mais elle semble contrainte par la croissance plus rapide des feuillus exposés à de bonnes conditions de croissance comme celles suivant une coupe avec un taux de prélèvement modéré ou élevé (Prévost et Charette 2015, Power *et al.* 2022). Par exemple, pour produire 1 m²·ha⁻¹ de recrues dans les 5 à 30 ans suivant une coupe partielle avec prélèvement de 40 à 60 % de la ST, il faudrait un CD_{4_gaules} d'environ 70 % pour le sapin baumier, comparativement à environ 20 % pour le bouleau jaune ou 30 % pour l'érable rouge (annexe 4).

Un autre élément qui pourrait réduire la capacité du sapin à constituer le futur couvert des peuplements est l'épidémie actuelle de tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE, *Choristoneura fumiferana* Clemens) qui entre progressivement dans la zone de la forêt tempérée de l'ouest de la province à partir de l'Abitibi-Témiscamingue⁵. Cependant, la durée et la sévérité de l'épidémie devraient être atténuées dans les paysages et les peuplements contenant plus de feuillus et moins de sapin (Gray 2013, Zhang *et al.* 2020), comme c'est le cas dans la zone de forêt tempérée, comparativement à la forêt boréale. Néanmoins, il est raisonnable de penser que la capacité de la régénération du sapin à former le futur couvert sera diminuée. Le modèle de croissance Artémis (Power 2021) simule une baisse de recrutement du sapin dans la période décennale affectée par la TBE sur les végétations potentielles mixtes. Le volume de sapin dans les peuplements mixtes de la zone tempérée nordique a diminué d'environ 25 % lors de l'épidémie précédente (Bouchard et Auger 2021).

Il est difficile de poser une hypothèse sur la performance relative de l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) et de l'épinette rouge (*Picea rubens* Sargent) (que nous regrouperons sous le nom « épinettes » à partir d'ici) dans le contexte de cet avis. En effet, la tolérance intermédiaire à l'ombre de l'épinette blanche pourrait retarder sa croissance et réduire sa survie. Par contraste, la performance de l'épinette rouge, très tolérante à l'ombre, peut être semblable ou moindre que celle du sapin, selon des

⁵ Voir les cartes produites par le MRNF : <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/protection-milieu-forestier/protection-forets-insectes-maladies/relevés-aériens-dommages-causes-insectes/>

différences subtiles dans les conditions de croissance (Dumais et Prévost 2021). De plus, dans l'étude de Power *et al.* (2022), l'épinette rouge performait mieux que le sapin : il lui faudrait un CD_{4_gaules} d'environ 35 % pour produire $1\text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ de recrues de la 5^e à la 30^e année après la coupe, comparativement à un CD_{4_gaules} de 70 % pour le sapin (annexe 4). Cette situation s'explique possiblement par la meilleure capacité de l'épinette rouge à survivre dans des conditions difficiles. De plus, les épinettes sont moins à risque que le sapin de subir de la mortalité causée par la TBE.

Finalement, nous n'avons pas d'informations appropriées pour bien évaluer la performance relative du pin blanc (*Pinus strobus* Linné), de la pruche du Canada (*Tsuga canadensis* (Linné) Carrière) et du thuya occidental (*Thuja occidentalis* Linné). Ce sont des espèces tolérantes à l'ombre et sensibles au broutement par le cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus* Zimmerman; Bédard et Majcen 2000, Boulfroy *et al.* 2012, Kern *et al.* 2012). Il est raisonnable de poser l'hypothèse selon laquelle les gaules et les semis $> 1\text{ m}$ de ces essences auront une performance comparable à celle des épinettes, mais que les individus $\leq 1\text{ m}$ de hauteur sont plus à risque de subir du broutement intensif.

Pour les résineux, nous disposons de deux sources de données pour calculer les facteurs de conversion des CD_4 en ST des recrues, soit les bases de données MERCJ et BJR (voir la section précédente), comme dans le cas des essences semi-tolérantes. Toutefois, pour les résineux, les valeurs de ces facteurs étaient de 2 à 8 fois plus grandes dans la base de données MERCJ que dans la base de données BJR. Nous avons utilisé la moyenne arithmétique de ces deux valeurs pour chaque essence.

3. Application d'une procédure d'estimation du recrutement à partir des CD

Nous avons élaboré une procédure pour estimer le recrutement attendu 30 ans après une coupe partielle dans la forêt tempérée sur la base des hypothèses de la section 2 et avec les données des annexes 2 à 5. Les 4 étapes de cette procédure sont détaillées ci-dessous, puis des exemples d'applications pratiques sont présentés à la section suivante.

La **première étape** est le calcul des CD des gaules (variable CD_{4_gaules}) et des semis $> 1\text{ m}$ (variable $CD_{4_semis > 1\text{ m}}$) observés pour chaque essence ou groupe d'essences dans au moins une centaine de microplacettes de 4 m^2 (ou dans une dizaine de grappes de 10 microplacettes) environ 5 ans après soit la coupe partielle, soit la préparation de terrain qui a suivi la coupe. Si les CD ont été obtenus avec des microplacettes d'une autre taille, alors il est possible de les convertir vers le format de 4 m^2 à l'aide des équations de l'annexe 3.

La **seconde étape** est l'application des facteurs de conversion du tableau 1 aux CD_4 correspondants pour estimer la ST des recrues à 30 ans. Ainsi, pour chaque essence :

$$ST = (CD_{4_gaules} \times \text{facteur}_{gaules}) + (CD_{4_semis > 1\text{ m}} \times \text{facteur}_{semis > 1\text{ m}})$$

Les valeurs des facteurs de conversion résultent des calculs détaillés aux annexes 2 à 5; elles ont été ajustées pour une période de 30 ans et, au besoin, selon les hypothèses de la section 2, afin de refléter les différences de croissances relatives attendues entre les essences et les traitements (voir l'annexe 6 pour les détails).

Tableau 1. Facteurs de conversion recommandés à l'étape 2 pour modéliser le transfert de la régénération observée à 5 ans vers la cohorte de recrues à 30 ans au sein du couvert d'arbres marchands, selon l'essence, le coefficient de distribution basé sur des placettes de 4 m² (CD_{4_gaules} pour les gaules, et CD_{4_semis > 1 m} pour les semis hauts de plus de 1 m) et le traitement sylvicole (CJ = coupe de jardinage; CPI_CP = coupe progressive irrégulière à couvert permanent; CPI_RL = coupe progressive irrégulière à régénération lente).

Essence	CD _{4_gaules}			CD _{4_semis > 1 m}		
	CJ	CPI_CP	CPI_RL	CJ	CPI_CP	CPI_RL
Bouleau jaune, frênes (<i>Fraxinus spp.</i>), ormes (<i>Ulmus spp.</i>) et tilleul d'Amérique (<i>Tilia americana</i> Linné)	0,072	0,077	0,083	0,024	0,026	0,028
Bouleau à papier	0,036	0,039	0,041	0,012	0,013	0,014
Épinette blanche, épinette rouge, pin blanc, pruche du Canada et thuya occidental	0,063	0,063	0,063	0,021	0,021	0,021
Érable rouge, cerisier tardif (<i>Prunus serotina</i> Ehrhart) et chêne rouge (<i>Quercus rubra</i> Linné)	0,041	0,044	0,048	0,014	0,015	0,016
Érable à sucre	0,045	0,049	0,052	0,015	0,016	0,017
Hêtre à grandes feuilles et ostryer de Virginie (<i>Ostrya virginiana</i> (Miller) K. Koch)	0,060	0,065	0,070	0,030	0,032	0,035
Peupliers	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sapin baumier (sans effet TBE)	0,095	0,082	0,069	0,032	0,027	0,023
Sapin baumier (avec effet TBE)	0,071	0,062	0,052	0,024	0,020	0,017

La **troisième étape** consiste à calculer la composition du recrutement, c'est-à-dire la proportion de chaque essence au sein de la ST des recrues. Cette information permet ensuite d'identifier un ou des types de forêts plausibles selon un filtre produit par le Bureau du forestier en chef (tableau 2; BFEC 2022). Au

moment d'associer un type forestier à ces compositions, nous recommandons d'envisager les autres types forestiers possibles en faisant varier d'environ 5 à 10 % la composition des essences principales.

Tableau 2. Composition en essences de certains types de forêts (TYF) selon la proportion attendue de la surface terrière (ST) occupée par essence parmi les recrues. Source : BFEC 2022.

TYF		Proportion de la ST totale des recrues occupée par les résineux	Composition (proportion de la ST des feuillus occupée par essence)		
Abréviation	Nom		Érable à sucre	Hêtre	Bouleau jaune
BjRx	Bétulaie jaune à résineux	25-49 %	–	–	≥ 50 %
BjRx_Fx	Bétulaie jaune à résineux sans dominance du bouleau jaune	25-49 %	< 50 %	< 25 %	≥ 40 %
EsBj	Érablière à bouleau jaune	< 25 %	≥ 50 %	< 25 %	≥ 25 %
EsHg	Érablière à hêtre	< 25 %	≥ 50 %	≥ 25 %	< 50 %
EsHg_Fx	Érablière à hêtre sans dominance d'érable à sucre	< 25 %	< 50 %	≥ 25 %	< 50 %
EsRx_Fx	Érablière à résineux sans dominance d'érable à sucre	25-49 %	< 50 %	≥ 25 %	< 50 %

La **quatrième étape** consiste à comparer la ST totale de recrutement prévu avec les cibles de 3, 4 ou 5 m²·ha⁻¹ associées à la CJ, à la CPI_CP ou à la CPR_RL, respectivement. La proportion de la cible atteinte permet d'évaluer l'abondance de la régénération. Advenant que ce cumul de la ST soit nettement inférieur aux cibles, alors nous recommandons d'approfondir l'investigation au cas par cas, et possiblement de réaliser une visite sur le terrain pour mieux comprendre ce qui freine la régénération. Des causes possibles sont : un couvert trop fermé, un broutement excessif, un envahissement par les espèces concurrentes ou un traitement réalisé sur la régénération (p. ex., le nettoyage des gaules de hêtre). Il est aussi possible que notre procédure sous-estime le potentiel de recrutement de la régénération à cet endroit.

4. Exemples pratiques et discussion

Nous avons appliqué cette méthode d'estimation du recrutement à la base de données des suivis d'efficacité de la région 14-15. Ensuite, nous avons évalué la composition du recrutement anticipé à la prochaine rotation par année (2021, 2022 et 2023), par secteur d'intervention (n = 24), par groupe de stations (n = 3) et pour chaque traitement sylvicole (CJ, CPI_CP et CPI_RL) associé à au moins 10 grappes de 10 microplacettes. En tout, 45 regroupements ont été ainsi retenus (n = 45).

Les cibles de recrutement total, toutes essences confondues, ont été atteintes avec les gaules dans un seul des 45 cas (2 %), mais dans jusqu'à 12 cas (27 %) si l'on considère aussi les hauts semis. Les cas pour lesquels la procédure prévoit une quantité suffisante de régénération totale sont principalement des CJ, soit les traitements pour lesquels la cible de recrutement était la plus faible ($3 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$). La méthode prévoyait tout de même un recrutement de 2,1 à $4,7 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ dans 84 % des cas de déficit de régénération. Il se pourrait que certains des facteurs de conversion utilisés ne soient pas suffisamment majorés avec la diminution de la ST résiduelle associée aux 3 types de coupes partielles à l'étude. De même, le recrutement dans les CPI_RL aurait pu bénéficier davantage de la contribution des semis > 1 m si nous avons retenu l'hypothèse selon laquelle une plus grande proportion de semis se transformaient en gaules de la 5^e à la 10^e année, ou encore, que ces semis avaient une meilleure croissance (annexe 6). Il est important de noter qu'une période de 30 ans est relativement courte pour évaluer le recrutement après une CPI_RL, puisqu'en forêt tempérée, la période de rotation pour ce traitement peut atteindre 40, voire 60 ans (Raymond *et al.* 2013b).

En ordre décroissant, les principales essences se classent comme suit quant à l'abondance moyenne prévue au sein du recrutement dans l'ensemble des 45 cas étudiés : l'érable à sucre (28 %), le bouleau jaune (20 %), le sapin (19 %), le hêtre (18 %), l'érable rouge (6 %), les épinettes (5 %), le bouleau à papier (2 %), les autres feuillus (2 %) et les autres résineux (1 %). Parmi les faits saillants, il y a :

- l'abondance relativement grande du bouleau jaune comme essence secondaire dans les stations d'érablières à sucre (moyenne = 20 %, soit de 5 à 39 % selon les regroupements);
- l'abondance relativement faible du bouleau jaune comme essence principale dans les stations de bétulaies jaunes à résineux (moyenne = 21 %, soit de 0 à 32 % selon les regroupements);
- l'abondance relativement grande de l'érable à sucre dans les stations de bétulaies jaunes à résineux (moyenne = 18 %, soit de 0 à 42 % selon les regroupements);
- l'abondance du hêtre (27 %, soit de 0 à 63 % selon les regroupements) dans les stations d'érablières à sucre;
- la présence du hêtre dans 50 % des stations de bétulaies jaunes à résineux, qui peut représenter jusqu'à 46 % de la proportion moyenne anticipée du recrutement;
- l'abondance généralisée du sapin baumier (19 %, soit de 0 à 81 % selon les regroupements) malgré l'application d'une réduction de 25 % de la valeur des facteurs de conversion à cause du risque posé par la TBE.

Le tableau 3 présente une sélection de 5 cas dont les résultats sont discutés par la suite.

Tableau 3. Cinq exemples d'application de la procédure d'estimation de recrutement décrite à la section 3. Les données du coefficient de distribution mesuré sur le terrain avec des placettes de 4 m² (CD₄) sont celles pour les semis de plus d'un mètre de hauteur (S) ou les gaules (G). Les essences sont : BOJ = bouleau jaune; EPX = regroupement des toutes les espèces d'épinettes; ERR = érable rouge; ERS = érable à sucre; HEG = hêtre à grandes feuilles; SAB = sapin baumier.

Secteur et traitement*	Région écologique† et station forestière‡	Type de CD ₄	CD ₄ par essence selon la classe de régénération (%)						Recrutement (m ² ·ha ⁻¹)§			Composition prédite (% de la ST) et type(s) forestier(s) correspondant(s)¶					
			BOJ	EPX	ERR	ERS	HEG	SAB	Prévu	Total	Cible	BOJ	EPX	ERR	ERS	HEG	SAB
064-71-210	4c	S	21	0	2	18	0	1	0,9	2,7	4	36	0	1	60	0	3
CPI_CP	Ers_M	G	5	0	0	27	0	1	1,8			EsBj					
064-52-215	3b	S	2	1	1	9	10	1	0,6	3,4	3	8	2	0	40	45	4
CJ	Ers_M	G	3	1	0	27	20	2	2,8			EsHg_Fx					
064-52-217	3b	S	5	1	2	9	9	6	0,8	3,5	3	8	10	1	21	42	14
CJ	Ers_M	G	2	5	0	13	20	5	2,7			EsRx_Fx ou EsHg_Fx					
062-71-016	4c	S	14	0	7	5	0	7	0,8	2,1	5	31	3	8	14	0	34
CPI_RL	BjR_MS	G	3	1	1	4	0	11	1,3			BjRx ou BjRx_Fx					
064-71-205	3b	S	3	2	3	8	4	4	0,5	3,2	4	10	13	3	27	35	7
CPI_CP	BjR_MS	G	3	6	1	15	15	2	2,7			EsHg_Fx ou EsRx_Fx					

* Les traitements sont : CPI_CP = coupe progressive irrégulière à couvert permanent; CJ = coupe de jardinage; CPI_RL = coupe progressive irrégulière à régénération lente.

† Les régions écologiques (Saucier *et al.* 2009) sont : 3b = les collines du lac Nominingue, 4c = les collines du moyen Saint-Maurice.

‡ Les types de stations forestières sont : Ers_M = érablière à sucre sur site mésique, BjR_MS = bétulaie jaune résineuse sur site mésique ou subhydrique.

§ La procédure d'estimation du recrutement est appliquée sur les CD de ces semis et gaules pour prévoir la surface terrière (ST) de recrutement et atteindre un total à comparer avec les cibles.

¶ Les proportions d'essences sont utilisées avec la clé du tableau 2 pour leur associer un ou des type(s) forestier(s).

Le **premier cas** (station forestière 064-71-210) montre une station d'érablière à sucre traitée par CPI_CP dans laquelle le recrutement estimé selon la procédure pourrait mener à la formation d'une érablière à bouleau jaune (EsBj, tableau 3). Le recrutement total prévu ($2,7 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) est insuffisant par rapport à la cible de $4 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ de notre hypothèse concernant le traitement de CPI_CP. Cela s'explique soit par une quantité insuffisante de régénération prévue pour atteindre cette cible en 30 ans (et donc, qu'il faudrait plus de temps pour l'atteindre), soit par le fait que notre procédure sous-estime sa croissance. Notre procédure parvient à estimer le type forestier EsBj, mais nous serions parvenus à la même conclusion en faisant une simple interprétation des CD_4 , car l'érable à sucre domine les gaules ($CD_{4_gaules} = 27 \%$), tandis que le bouleau jaune partage la dominance des hauts semis avec l'érable à sucre ($CD_{4_semis > 1 \text{ m}} = 21$ et 18% pour ces deux essences, respectivement). Il y a peu d'autres essences compagnes dans ce secteur. Notons que nous interprétons le $CD_{4_semis > 1 \text{ m}}$ de 21% pour le bouleau jaune comme le résultat probable d'une bonne régénération de cette essence, qui se serait établie dans les ouvertures créées par la coupe.

Le **deuxième cas** (station forestière 064-52-215) montre une station d'érablière à sucre traitée par CJ dans laquelle le recrutement estimé selon la procédure pourrait mener à la formation d'une érablière à hêtre sans dominance d'érable à sucre (ESHg_Fx, tableau 3). Comparativement à une simple interprétation des CD_4 , la procédure permet de relever une présence anticipée de 8% en bouleau jaune à partir d'un CD_{4_gaules} de 3% . Cela découle du fort effet potentiel de la présence de gaules sur le recrutement de cette essence après une CJ ($\text{Recrutement} = 0,072 \times CD_{4_gaules}$, tableau 1). De même, la procédure permet de prédire la dominance du hêtre sur l'érable à sucre dans la cohorte de recrutement, et ce, même si la tendance inverse est observée pour les CD_{4_gaules} .

Le **troisième cas** (station forestière 64-52-217) est aussi celui d'une érablière à sucre traitée par CJ, mais dans laquelle le recrutement d'érable à sucre pourrait mener à la formation d'une érablière à résineux sans dominance d'érable à sucre (EsRx_Fx), ou sinon, d'une érablière à hêtre sans dominance d'érable à sucre (EsHg_Fx, tableau 3). Considérant l'ensemble des sources d'erreurs de notre procédure, ces deux issues semblent aussi probables l'une que l'autre. Par rapport au secteur précédent, les gaules d'érable à sucre sont moins fréquemment observées ($CD_{4_gaules} = 13 \%$ contre 27%), alors que celles des épinettes et de sapin le sont davantage (chacun 5% contre 1 ou 2% , respectivement).

Le **quatrième cas** (station forestière 062-71-016) est celui d'une bétulaie jaune à résineux traitée par CPI_RL dont le recrutement pourrait mener à la formation d'une bétulaie jaune à résineux, avec ou sans dominance du bouleau jaune (BjRx ou BjRx_Fx, respectivement, tableau 3). Bien que la procédure retranche 25% de la ST du sapin en anticipant un effet de la TBE, elle prévoit quand même une forte proportion de sapin provenant surtout des gaules ($CD_{4_gaules} = 11 \%$). Notons que la régénération de plus d'un mètre de hauteur semble insuffisante dans ce cas, puisque le recrutement total prévu ($2,1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) correspond à seulement 42% de la ST cible de $5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Malgré tout, 72% des microplacettes de 4 m^2 contiennent au moins un semis ou une gaule d'une essence commerciale, mais une bonne part de cette régénération n'a pas encore 1 m de hauteur (données non montrées). Une part du recrutement pourrait donc survenir après la 30^e année suivant la coupe.

Finalement, le **cinquième cas** (station forestière 064-71_205) est celui d'une autre station de bétulaie jaune à résineux, traitée cette fois-ci par CPI_CP. La composition prédite est une celle d'une érablière à hêtre ou à résineux sans dominance d'érable à sucre (EsHg_Fx ou EsRx_Fx, tableau 3). Ce cas semble suivre une trajectoire de succession vers des essences feuillues préétablies et plus tolérantes à l'ombre que le bouleau jaune, conséquence de l'abondance des gaules d'érable à sucre et de hêtre. Le $CD_{4_semis} > 1\text{ m}$ de seulement 3 % pour le bouleau jaune indique que la coupe n'aurait pas stimulé la régénération pour cette essence.

5. Conclusion

Pour le territoire à l'étude, aucun modèle statistique publié ne permet actuellement de relier les coefficients de distribution observés quelques années après une coupe partielle pour diverses essences, d'une part, et la composition future de cette cohorte de régénération, d'autre part. Pour pallier ce manque, nous avons interprété les informations publiées et analysé sommairement des bases de données de la DRF, afin d'établir une procédure permettant d'estimer l'ordre de grandeur de la quantité et de la composition du recrutement des 30 prochaines années. Comme cette méthode repose sur de nombreuses hypothèses et comporte plusieurs sources d'incertitude, il faut interpréter les résultats avec prudence.

Rappelons qu'en l'absence d'une perturbation touchant une essence en particulier, la composition d'un couvert forestier change peu, ou rarement de manière importante, au cours d'une rotation de coupe partielle (avec prélèvement de moins de 50 % de la ST). Entre autres, le recrutement sur 30 ans est estimé à $3\text{--}5\text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$, ce qui représente 12 à 20 % d'une ST qui atteindrait $25\text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ après 30 ans. Ainsi, la majeure partie de la composition du couvert sera celle du couvert laissé après la coupe partielle. Cela dit, même si l'influence du recrutement ne se fait sentir qu'après quelques rotations, il demeure sage de l'envisager d'avance et de définir des pistes de solutions au besoin.

Malgré tout, nous notons la tendance envahissante du hêtre au sein du recrutement dans la plupart des cas étudiés, tout comme celle de l'érable à sucre dans plusieurs peuplements mixtes à bouleau jaune. Le bouleau jaune semble mieux se régénérer dans les érablières que dans les peuplements mixtes à bouleau jaune, et les épinettes semblent sous-représentées.

Références bibliographiques

- Arbogast, J.C., 1957. *Marking guides for northern hardwoods under the selection system*. U.S.D.A, Forest Service, Lake States For. Exp. Stn. Saint Paul, MN (États-Unis). Station Paper n° 56. 20 p. https://www.nrs.fs.usda.gov/pubs/misc/sp_ls056.pdf
- Bédard, S. et Z. Majcen, 2000. *Accroissement et régénération des prucheraies dix ans après une coupe de jardinage dans une aire d'hivernage de cerf de Virginie*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 103. 14 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Note103.pdf>

- Bédard, S., P. Raymond et J. DeBlois, 2022. *Northern hardwood regeneration dynamics 10 years after irregular shelterwood and mechanical control of understory American beech*. For. Ecol. Manage. 511 : 120142. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120142>
- [BFEC] Bureau du forestier en chef, 2022. « Section 2.3.1. Filtre TYF — Classification de la forêt pour le calcul ». Dans : *Manuel de détermination des possibilités forestières*. Mise à jour du 10 août 2022. <https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/TAB-00526-Filtre-TYF-CPF-2023-2028-4.0.0.xlsx>.
- Bilodeau-Gauthier, S., S. Bédard et F. Guillemette, 2020. *Assessing Post-Harvest Regeneration in Northern Hardwood and Mixedwood Stands: Evolution of Species Composition and Dominance within 15-Year-Old Group Selection and Patch Cutting*. Forests 11(7) : 742. <https://doi.org/10.3390/f11070742>
- Bilodeau-Gauthier, S., F. Guillemette et S. Bédard, en préparation. *Changes in stand composition 20 years after selection cutting* (titre provisoire). Projet d'article scientifique.
- Bose, A.K., M. Alcalá-Pajares, C.C. Kern, M. Montoro-Girona et N. Thiffault, 2023. *Complex regeneration responses of eight tree species to partial harvest in mixedwood forests of northeastern North America*. For. Ecol. Manage. 529(Février) : 120672. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120672>
- Bouchard, M. et I. Auger, 2021. *Effets de l'épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette des années 1970-80 sur les volumes marchands à l'échelle du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 156. 12 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/NRF156.pdf>
- Boulfroy, E., É. Forget, P.V. Hofmeyer, L.S. Kenefi, C. Larouche, G. Lessard, J.-M. Lussier, F. Pinto, J.-C. Ruel et A. Weiskittel, 2012. *Guide pour la sylviculture du thuya occidental*. Service canadien des forêts, Centre canadien sur la fibre de bois. Rapport d'information fi-X-008. 74 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/guide-sylviculture-thuya-occidental/>
- Duchesne, L., J.-D. Moore et R. Ouimet, 2013. *Partitioning the effect of release and liming on growth of sugar maple and American beech saplings*. North. J. Appl. For. 30(1) : 28–36. <https://doi.org/10.5849/njaf.12-012>
- Dumais, D. et M. Prévost, 2021. *Acclimatation de la basse régénération d'épinette et de sapin dans des trouées sylvicoles de différentes superficies en forêt mixte tempérée : développement après 15 ans*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 157. 17 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/NRF157.pdf>
- Dumont, S., S. Bédard et A. Achim, 2023. *Growth response and survival of American beech, yellow birch, and sugar maple regeneration to partial harvest*. For. Ecol. Manage. 549(Décembre) : 121476. 11 p. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121476>

- Frelich, L., 2016. *Forest dynamics*. F1000Research 5: F100 Faculty Rev-183. 17 février 2016. <http://dx.doi.org/10.12688/f1000research.7412.1>
- Guillemette, F., M.-M. Gauthier, M.-C. Lambert et S. Bédard, 2013. *Effets réels décennaux des coupes de jardinage pratiquées de 1995 à 1999 dans un contexte opérationnel*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 168. 34 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/memoire168.pdf>
- Guillemette, F., A. Morin-Bernard et S. Bédard, 2020. *Effets après 5 ans de l'éclaircie commerciale mécanisée dans une bétulaie jaune âgée de 41 ans*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 154. 20 p. <https://www.mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/NRF154.pdf>
- Guillemette, F., M.-C. Lambert, H. Power et P. Raymond, 2023. *Combien de placettes sont nécessaires pour estimer la densité et le coefficient de distribution des gaules dans les forêts tempérées?* For. Chron. 99(2) : 177-185. <https://doi.org/10.5558/tfc2023-019>
- Guillemette, F., F. Havreljuk, H. Power et S. Bédard, sous presse. *Rendements observés et simulés 20 ans après des coupes de jardinage pratiquées de 1995 à 1999 dans un contexte opérationnel*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 190.
- Gray, D.R., 2013. *The influence of forest composition and climate on outbreak characteristics of the spruce budworm in eastern Canada*. Can. J. For. Res. 43(12) : 1181-1195. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0240>
- Kern, C.C., P.B. Reich, R.A. Montgomery et T.F. Strong, 2012. *Do deer and shrubs override canopy gap size effects on growth and survival of yellow birch, northern red oak, eastern white pine, and eastern hemlock seedlings?* For. Ecol. Manage. 267(Mars): 134-143. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.002>
- Leak, W.B., M. Yamasaki, 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). n° 132. 46 p. https://www.fs.usda.gov/nrs/pubs/gtr/gtr_nrs132.pdf
- Leduc, F., C. Chagnon, G. Moreau, S. Dumont, É. St-Jean et A. Achim, 2024. *American beech outgrows sugar maple at the sapling stage regardless of partial harvest intensity in northern hardwood forests*. For. Ecol. Manage. 553(Février) : 121630. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121630>
- Michaud-Laroche, S., 2023. *Portrait des peuplements à la suite de coupes progressives irrégulières réalisées dans un contexte opérationnel : de la théorie à la pratique*. Présentation réalisée dans le cadre du Carrefour Forêts 2023. 25 avril 2023. Québec, Québec. 22 p.

- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2023. *Chantier sur les forêts feuillues et mixtes — Forêts tempérées nordiques*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, 111 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/RA_CFFM_MRNF.pdf
- Oliver, C.D. et B.C. Larson, 1996. *Forest stand dynamics, update edition*. Yale School of the Environment Other Publications. John Wiley & Sons, Inc. 544 p.
- Olson, M.G. et R.G. Wagner, 2010. *Long-term compositional dynamics of Acadian mixedwood stands under different silvicultural regimes*. Can. J. For. Res. 40(10) : 1993-2002. <https://doi.org/10.1139/X10-145>
- Power, H., 2021. *Artémis 2014 v. 4.2.0, une nouvelle version du modèle de croissance*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis technique SSRF-27. 15 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/AT_SSRF-27.pdf
- Power, H., I. Auger, F. Guillemette, P. Raymond et D. Dumais, 2022. *Sapling growth dynamics after partial cutting in temperate mixedwood stands*. Can. J. For. Res. 52(8): 1186-1200. <http://dx.doi.org/10.1139/cjfr-2022-0073>
- Power, H., P. Raymond, F. Guillemette, S. Bédard, D. Dumais et I. Auger, 2023. *Prévision de la période de rotation en contexte de coupe partielle pour les peuplements mixtes de bouleaux jaunes et de résineux du Québec*. For. Chron 99(2) : 161-176. <https://doi.org/10.5558/tfc2023-013>
- Prévost, M. et L. Charette, 2015. *Selection cutting in a yellow birch–conifer stand, in Quebec, Canada: Comparing the single-tree and two hybrid methods using different sizes of canopy opening*. For. Ecol. Manage. 357(Décembre) : 195-205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.003>
- Prévost, M. et J. DeBlois, 2014. *Shelterwood cutting to release coniferous advance growth and limit aspen sucker development in a boreal mixedwood stand*. For. Ecol. Manage. 323(Jillet) : 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.015>
- Prévost, M. et D. Pothier, 2003. *Partial cuts in a trembling aspen–conifer stand: Effects on microenvironmental conditions and regeneration dynamics*. Can. J. For. Res 33(1) : 1-15. <https://doi.org/10.1139/x02-147>
- Raymond, P., F. Guillemette et C. Larouche, 2013a. « Chapitre 6 — Les grands types de couvert et les groupements d'essences principales ». Dans : ministère des Ressources naturelles (édit.), *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 (Canada). p. 94-119.

- Raymond, P., F. Guillemette et C. Larouche, 2013b. « Chapitre 20 — La coupe progressive irrégulière ». Dans : ministère des Ressources naturelles (édit.), *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 (Canada). p. 456-515.
- Saucier, J.-P., A. Robitaille et P. Grondin. 2009. « Cadre bioclimatique du Québec ». Dans : « Écologie forestière ». Dans : *Manuel de foresterie, 2^e édition*. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Éditions MultiMondes, Québec (Québec). p. 186-205.
- Shabaga, J.A., T.A. Jones et K.A. Elliott, 2019. *Group-selection silviculture conditionally enhances recruitment of yellow birch in a shade-tolerant hardwood forest*. For. Ecol. Manage. 444(Juillet) : 244-255. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.04.029>
- Zhang, B., D.A. MacLean, R.C. Johns, E.S. Eveleigh et S. Edwards, 2020. *Hardwood-softwood composition influences early-instar larval dispersal mortality during a spruce budworm outbreak*. For. Ecol. Manage. 463(mai) : 118035. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118035>

François Guillemette, ing.f., M. Sc.

Service de la sylviculture et du rendement des forêts

Correspondance :

François Guillemette
Ministère des Ressources naturelles et des Forêts
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@mmf.gouv.qc.ca

On peut citer ce texte en indiquant la référence. Citation recommandée :

Guillemette, F., 2024. *Anticiper la composition future après coupe partielle des peuplements en forêt tempérée grâce aux suivis d'efficacité des traitements sylvicoles*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière. Avis technique SSRF-33. 27 p.

Annexe 1. Suivi réalisé de l'efficacité des procédés de régénération

Pour les besoins de cet avis technique, nous avons analysé sommairement les données provenant des suivis d'efficacité réalisés en forêt publique et tempérée par la région Lanaudière-Laurentides au cours des saisons 2021 à 2023. Ce suivi est normalement réalisé 5 ans après une coupe partielle. Il y avait 72 projets de sondage, cumulant 1 422 grappes de 10 microplacettes. L'échantillonnage a été réparti à 50 % dans des groupes de stations de bétulaies jaunes à résineux ayant un drainage mésique ou subhydrique (BjR_MS) et à 41 % dans des groupes de stations d'érablières à sucre à drainage mésique (Ers_M). Treize autres groupes de stations comptaient pour les 9 % restants.

Les traitements sylvicoles échantillonnés sont dans la famille des coupes de jardinage (CJ : prélèvement de 25 à 30 % de la ST) dans 9 % des cas, dans celle des coupes progressives irrégulières à couvert permanent (CPI_CP : prélèvement de 30 à 40 % de la ST) dans 49 % des cas et dans celle des coupes progressives irrégulières à régénération lente (CPI_RL : prélèvement de 35 à 45 % de la ST) dans 42 % des cas.

Les données recueillies sur le terrain et utilisées dans cet avis sont la présence de chaque essence commerciale au sein de la régénération dans les microplacettes de 4 m², de même que la classe de hauteur maximale de l'essence; cette variable a été estimée soit indirectement, par classe de DHP (2, 4, 6 ou 8 cm) dans le cas des gaules (DHP de 1,1 à 9,0 cm), soit directement (généralement par multiple de 10 cm) dans le cas des semis (DHP < 1,1 cm).

Annexe 2. Base de données MERCJ

La base de données MERCJ (mesure des effets réels de la coupe de jardinage par pied d'arbres) contient les données de suivi sur 20 ans de coupes partielles réalisées au cours des années 1995 à 1999 (voir Guillemette *et al.* 2013, Guillemette *et al.*, sous presse). Lors de ces coupes, 29 à 34 % de la ST marchande a été prélevée de façon relativement uniforme, laissant une ST résiduelle de 17 à 20 m²·ha⁻¹. Les peuplements traités étaient des érablières et des bétulaies jaunes réparties dans 213 secteurs (491 placettes) répartis en 8 groupes correspondant à des combinaisons de végétations potentielles et de régions écologiques (Saucier *et al.* 2009). Des mesures ont été prises avant et après la coupe, puis après 5, 10 et 20 ans, sur les arbres marchands dans des placettes circulaires de 400 m². Les gaules ont été dénombrées dans une sous-placette circulaire de 40 m² au sein de chaque placette, et le CD_{4_gaules} a été estimé à l'aide d'un modèle basé sur la densité des gaules (annexe 3).

Pour les principales essences, nous avons étalonné des régressions linéaires du CD_{4_gaules} observé 5 ans après la coupe en fonction de la ST représentée par ces essences parmi les recrues observées à la 20^e année suivant la coupe (figure A2.1). Pour évaluer les facteurs de conversion du CD_{4_gaules} observé à 5 ans en ST recrutée à 30 ans au lieu de 20 (valeur utiles au tableau 1), nous avons multiplié par 1,5 les paramètres des équations présentées sur la figure A2.1. Malgré la présence d'une ordonnée à l'origine différente de zéro pour le bouleau jaune (0,115 sur la figure A2.1), seule la pente (0,060) est utilisée dans le calcul des facteurs. Nous supposons que cette ordonnée à l'origine donne une estimation pour une partie du recrutement provenant des semis > 1 m. Or, notre procédure tient déjà compte de la contribution de ces semis, et nous ne voulions pas la comptabiliser en double. Cette modification aide aussi à simplifier le calcul de la moyenne des facteurs de conversion obtenus avec les bases de données MERCJ et BJR (annexe 4).

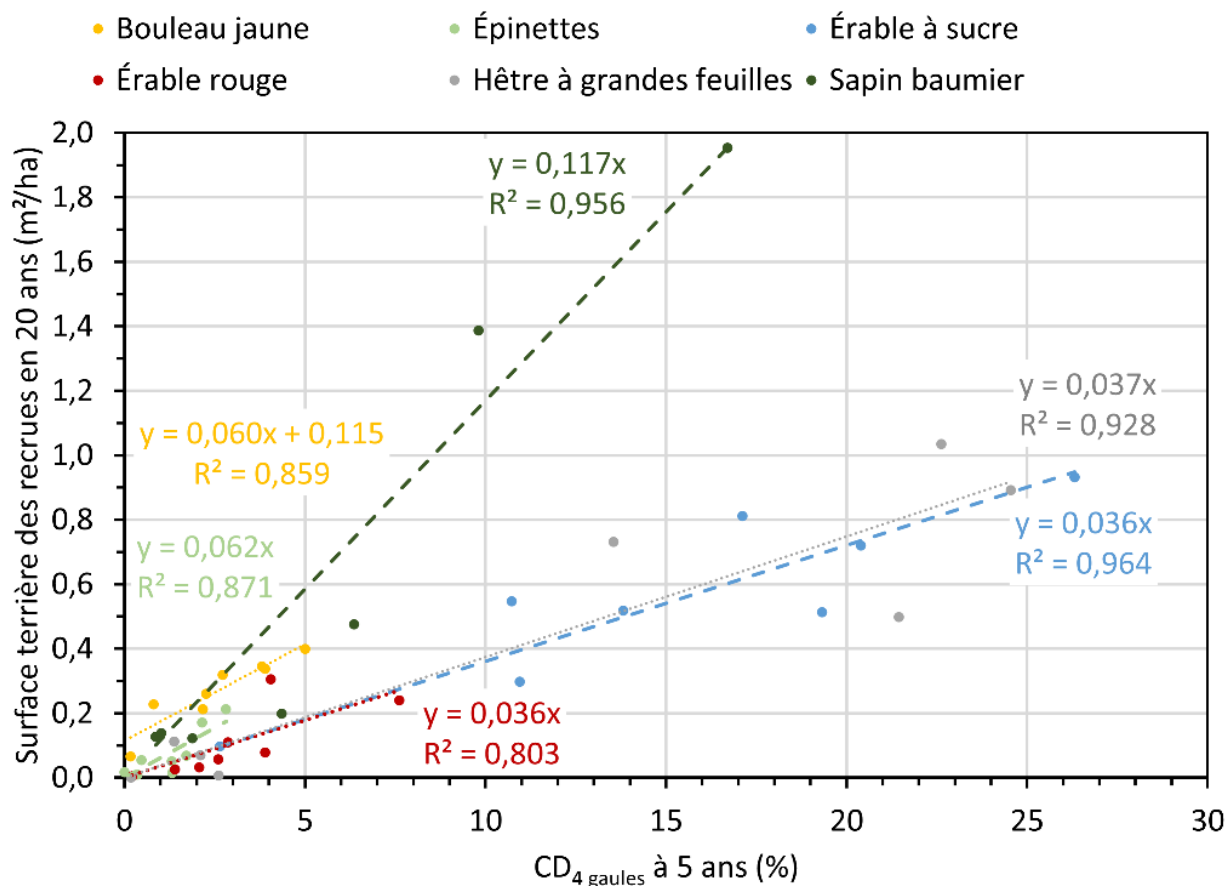


Figure A2.1. Relations entre la surface terrière des recrues observées 20 ans après la coupe de jardinage et le coefficient de distribution des gaules (CD_{4_gaules}) estimé 5 ans après la coupe, pour 6 essences. Les lignes pointillées de différentes couleurs montrent la modélisation des observations. L'estimation des paramètres et le coefficient de détermination (R^2) de chaque régression sont indiqués dans la couleur correspondante. Les pentes des équations correspondent aux facteurs de conversion du CD_{4_gaules} observé à 5 ans en surface terrière recrutée à 20 ans. L'ordonnée à l'origine est présentée seulement lorsqu'elle était significativement différente de 0 au seuil d'erreur $\alpha = 0,05$.

Annexe 3. Modélisation de la relation entre la densité des gaules et le coefficient de distribution

Nous avons utilisé les données de la publication de Guillemette *et al.* (2023) pour modéliser la relation entre la densité des gaules et le CD de celles-ci pour différentes tailles de microplacettes (figure A3.1). Ces modèles peuvent être utilisés pour estimer le CD des gaules à partir de leur densité observée. Les modèles peuvent aussi servir à convertir des données de CD recueillies avec des microplacettes d'une taille donnée en des valeurs de CD pour une autre taille de microplacette, en passant par une densité commune.

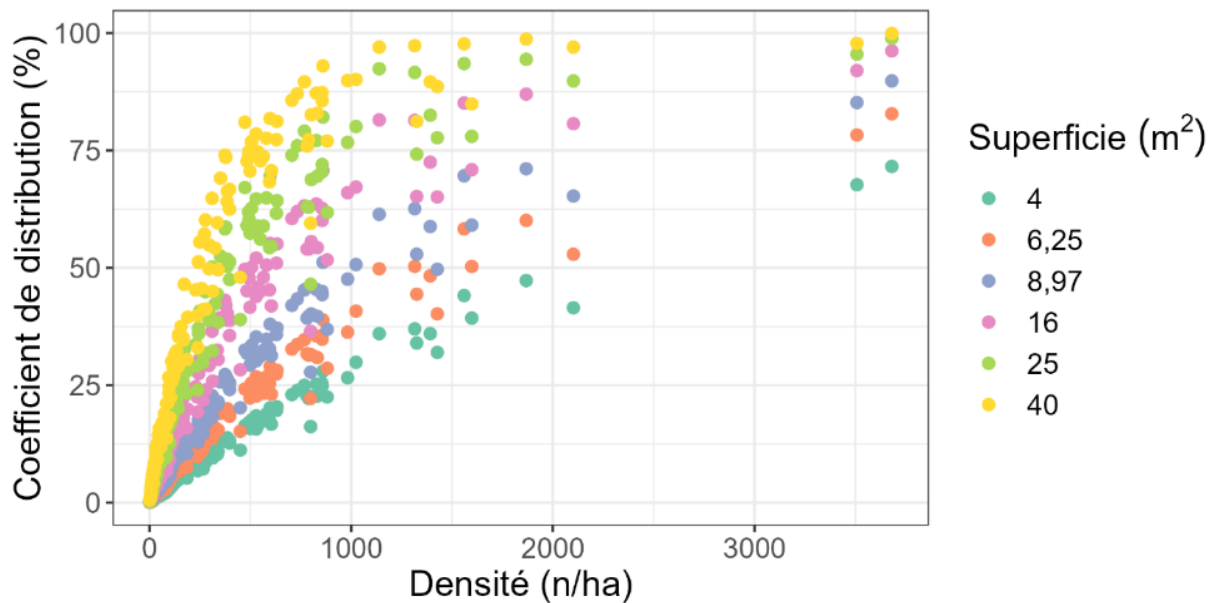


Figure A3.1. Distribution des observations de 6 coefficients de distribution des gaules en fonction de leur densité et pour différentes tailles d'unité expérimentale (de 0,09 à 0,5 ha).

L'équation de Chapman-Richard a été sélectionnée en fixant l'asymptote (β_1) à 100 %, soit la valeur maximale possible d'un CD (équation A3.1, figure A3.2). Nous avons estimé les paramètres (β_2 et β_3) pour le jeu de données et pour différentes tailles de microplacette (4, 6,25, 8,97, 16, 25 et 40 m²). Les paramètres (tableau A3.1) peuvent aussi être utilisés lorsque l'équation est inversée afin d'estimer la densité selon le CD (équation A3.2). Le logiciel SAS® (v. 9.4, SAS Institute Inc., Cary, North Carolina) a été utilisé pour calculer les estimations et leurs erreurs types.

Équation A3.1
$$CD = 100(1 - \exp(-\beta_2 \text{densité}))^{\beta_3}$$

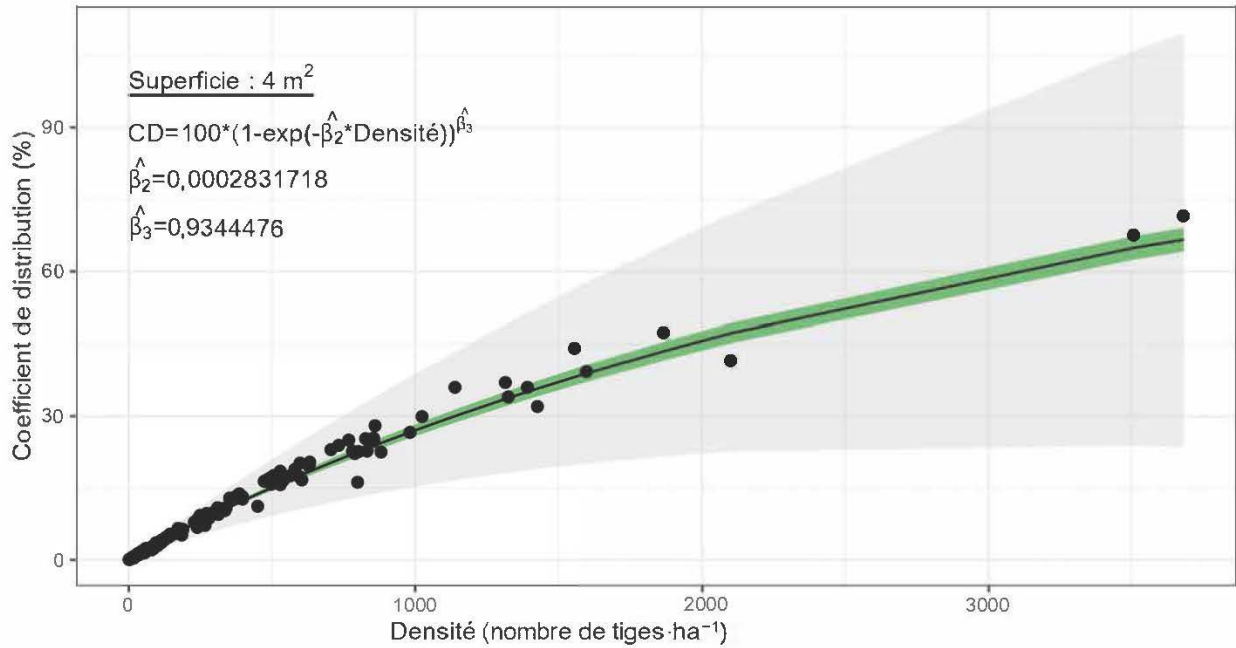


Figure A3.2. Observations (points noirs) et modélisation (ligne noire) du coefficient de distribution des gaules observées dans des microplacettes de 4 m², selon la densité de celles-ci dans l'unité expérimentale. L'étendue de l'intervalle de confiance à 95 % est représentée pour le modèle (bande verte) de même que pour les observations (bande grise).

Tableau A3.1. Estimation des paramètres β_2 et β_3 des équations A3.1 et A3.2, ainsi que leurs erreurs types, selon la taille des microplacettes.

Taille de microplacette (m ²)	β_2		β_3	
	Estimation	Erreur type	Estimation	Erreur type
4	0,00028317	0,0000119	0,93444763	0,00894478
6,25	0,00047732	0,0000128	0,96076264	0,00930403
8,97	0,00064618	0,0000176	0,94212617	0,01204825
16	0,00105027	0,0000336	0,92393178	0,01536725
25	0,00150343	0,0000522	0,90098052	0,01662642
40	0,00224132	0,0000788	0,87578880	0,01654643

Équation A3.2

$$densité = \frac{-\log\left(1 - \left(\frac{CD}{100}\right)^{1/\beta_3}\right)}{\beta_2}$$

Annexe 4. Base de données BJR

La base de données BJR (bétulaie jaune à résineux) est celle de 3 dispositifs d'expérimentation de coupes partielles (prélèvement de 40, 50 ou 60 % de la surface terrière) dans des peuplements mixtes à bouleau jaune (voir Power *et al.* 2022). Des mesures ont été prises avant et après la coupe, puis après 5, 10 et 15 ans dans les trois dispositifs, de même qu'après 20 ans dans deux dispositifs. Nous avons utilisé la modélisation des gaules de ces dispositifs préalablement publiée dans Power *et al.* (2022) et dans MRNF (2023, chapitre 7). Un des résultats de cette modélisation est la densité requise de gaules par essence (bouleau jaune, érable rouge, épinette rouge et sapin baumier) et par classe de DHP (2, 4, 6 ou 8 cm) pour produire une unité de ST marchande ($1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) en 20 à 40 ans après la coupe partielle.

Nous avons ensuite assemblé ces densités par classe de DHP pour obtenir une densité globale des gaules pour chaque essence, à l'aide des proportions moyennes observées 5 ans après la coupe dans les bases de données MERCJ (annexe 2) et BJR (tableau A4.1). Nous avons ensuite converti ces densités en $CD4_gaules$ avec l'équation A3.1 (annexe 3), de manière à lier l'estimation du $CD4_gaules$ d'une essence avec une production attendue d'environ $1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ en recrues de la même essence, 30 ans après la coupe.

Pour finir, nous avons calculé les facteurs de conversion des gaules en recrues de la 5^e à la 30^e année :

$$(facteur = \frac{1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}}{CD4_gaules})$$

Tableau A4.1. Données utilisées (A à C) pour estimer les coefficients de distribution (D) requis des gaules dans des placettes de 4 m² (CD_{4_gaules}) pour produire une unité de surface terrière marchande (1 m²·ha⁻¹) par essence au cours des 25 années suivant le suivi d'efficacité (réalisé 5 ans après la coupe partielle), et les facteurs de conversion (E) correspondants. Les données de densité des gaules par classe de DHP pour produire 1 m²·ha⁻¹ (A) proviennent du modèle de Power *et al.* (2022). Les proportions moyennes par classe de DHP (B) proviennent des bases de données MERCJ et BJR. La densité totale de gaules (C) résulte d'une pondération de la série A avec les proportions de B. Le modèle d'estimation du CD_{4_gaules} décrit à l'annexe 3 a été appliqué aux densités de gaules (C) pour estimer leurs CD_{4_gaules} correspondants (D). Les facteurs de conversion (E) ont été obtenus en calculant un rapport moyen entre 1 m²·ha⁻¹ et les CD_{4_gaules} correspondants (D) pour chaque essence.

A) Densité (n·ha⁻¹) de gaules nécessaires à la production de 1 m²·ha⁻¹ de surface terrière marchande 30 ans après la coupe (25 ans après le suivi d'efficacité), selon la classe de DHP.

DHP (cm)	Bouleau jaune	Érable rouge	Épinette blanche et épinette rouge	Sapin baumier
2	934	1700	2 167	7 046
4	277	344	598	952
6	126	131	221	263
8	78	74	108	120

B) Proportion moyenne (%) de gaules par classe de DHP, 5 ans après la coupe, selon la base de données.

DHP (cm)	Bouleau jaune		Érable rouge		Épinette blanche et épinette rouge		Sapin baumier	
	MERCJ	BJR	MERCJ	BJR	MERCJ	BJR	MERCJ	BJR
2	75	50	85	76	57	37	67	43
4	14	24	6	14	17	30	23	23
6	6	15	6	4	17	20	7	18
8	5	11	3	6	9	13	3	16

C) Densité totale (n·ha⁻¹) de gaules nécessaires à la production de 1 m²·ha⁻¹ de surface terrière marchande, 30 ans après la coupe (25 ans après le suivi d'efficacité)

DHP (cm)	Bouleau jaune		Érable rouge		Épinette blanche et épinette rouge		Sapin baumier	
	MERCJ	BJR	MERCJ	BJR	MERCJ	BJR	MERCJ	BJR
2 à 8	751	561	1476	1 350	1 384	1 040	4 962	3 315

D) Coefficients de distribution correspondant aux densités de la série C (CD_{4_gaules}, %)

DHP (cm)	Bouleau jaune		Érable rouge		Épinette blanche et épinette rouge		Sapin baumier	
	MERCJ	BJR	MERCJ	BJR	MERCJ	BJR	MERCJ	BJR
2 à 8	21	17	37	34	35	28	77	63

E) Facteurs de conversion du CD_{4_gaules} en recrutement de la 5^e à la 30^e année

DHP (cm)	Bouleau jaune	Érable rouge	Épinette blanche et épinette rouge	Sapin baumier
2 à 8	0,053	0,028	0,032	0,014

Annexe 5. Bases de données TOPA et Dubuc

Nous avons consulté les bases de données TOPA (mesure des effets réels des trouées et parquets réalisés de 2000 à 2005; voir Bilodeau-Gauthier et al. 2020) et Dubuc (un dispositif expérimental non publié) afin d'estimer la proportion du $CD4_{\text{semis}} > 1 \text{ m}$ qui était susceptible de s'ajouter au $CD4_{\text{gaules}}$ entre la 5^e et la 10^e année suivant les traitements sylvicoles.

La base de données TOPA contient les données observées sur 15 ans après des coupes par trouées (de petites coupes totales de 500–1 500 m²; 39 peuplements traités, chacun avec 3 trouées) ou par parquets (de petites coupes totales de 1–2 ha; 32 peuplements traités). Les résultats étaient semblables pour les deux traitements. Les peuplements étaient choisis en fonction de leur potentiel à régénérer le bouleau jaune dans des bétulaies jaunes et des érablières à bouleau jaune. La base de données TOPA présente l'avantage d'avoir suivi en détail une cohorte complète de régénération sur une période d'au moins 10 ans. Sa principale faiblesse est qu'elle suit une intervention qui s'apparente plus à une coupe partielle de forte intensité (50 à 75 % de prélèvement) ou à une coupe totale.

La base de données Dubuc présente elle aussi l'avantage d'avoir suivi en détail une cohorte complète de régénération sur au moins 10 ans, en plus de couvrir des coupes partielles par pieds d'arbres. Cependant, elle a l'inconvénient d'être située dans un seul secteur de l'Outaouais et dans des érablières à tilleul (végétation potentielle FE2), soit des peuplements moins représentatifs des conditions moyennes du suivi d'efficacité réalisé dans la région Lanaudière-Laurentides.

Pour ces deux bases de données, nous avons étalonné des régressions linéaires pour les principales essences entre le $CD4_{\text{semis}} > 1 \text{ m}$ observé 5 ans après la fin des traitements⁶ et le $CD4_{\text{gaules}}$ observé à 10 ans (figure 5.1). Les pentes de ces régressions correspondent aux facteurs de conversion du $CD4_{\text{semis}} > 1 \text{ m}$ observé à 5 ans en $CD4_{\text{gaules}}$ observé à 10 ans. Dans TOPA, ce facteur varie de 0,56 pour les peupliers à 1,80 pour les épinettes, avec une valeur moyenne de 0,86 pour l'ensemble des essences. Cependant, cette régénération évolue en l'absence d'arbres au-dessus d'elle. Dans la base de données Dubuc, ce facteur varie de près de 0 pour l'érable à sucre à environ 0,75 pour le hêtre et l'ostryer; le facteur du frêne blanc (*Fraxinus americana* Linné) est de 0,30 (données non montrées). Le facteur nul pour l'érable à sucre s'explique par sa quasi-absence avant la coupe, la très forte concurrence exercée par le frêne qui s'est établi après la coupe, puis par la présence de hêtre et d'ostryer, qui étaient établis avant la coupe. C'est un contexte particulier et moins commun, particulièrement sur les végétations potentielles FE3, MJ1 et MJ2 qui dominent le territoire à l'étude. La présence d'un couvert partiel explique la différence entre les deux bases de données pour le hêtre, avec un facteur de 0,90 à découvert (TOPA) et un facteur de 0,75 sous un couvert partiel (Dubuc).

⁶ La fin des traitements dans la base de données TOPA était une préparation de terrain réalisée dans l'année suivant la coupe.

En considérant les différentes sources d'incertitude, nous avons retenu les hypothèses que le facteur de conversion du $CD_{4_semis > 1\ m}$ observé à 5 ans en CD_{4_gaules} à 10 ans était de 0,75 pour le hêtre, de 0,75 pour l'ostryer et de 0,50 pour les autres essences. En réalité, il est fort possible que le facteur de conversion pour ces autres essences varie selon la région, la station, le type de coupe, etc., mais pour les besoins du présent exercice, il n'était pas possible de poser de telles hypothèses.

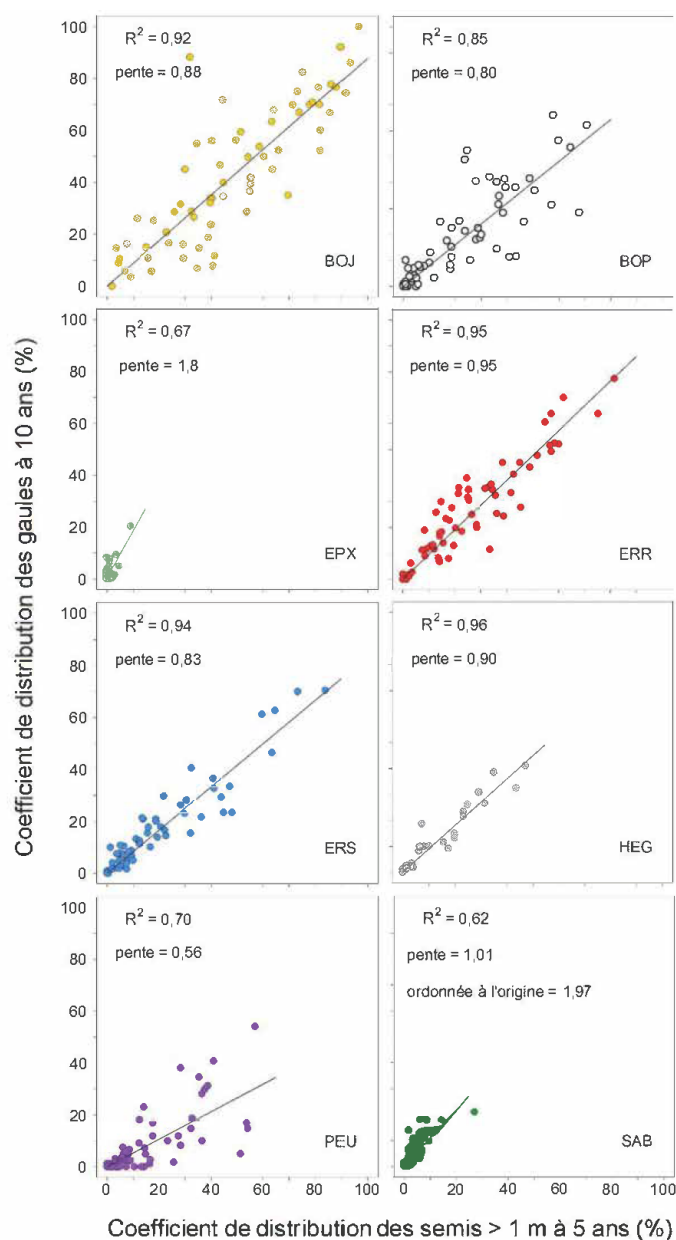


Figure A5.1. Régressions du CD des gaules à 10 ans en fonction du CD des semis > 1 m à 5 ans dans la base de données TOPA, par essence. Nous avons forcé le passage des droites par l'ordonnée à l'origine lorsque celle-ci n'était pas significativement différente de 0 au seuil d'erreur de 5 %. R^2 = coefficient de détermination; BOJ = bouleau jaune; BOP = bouleau à papier; EPX = épinettes; ERR = érable rouge; ERS = érable à sucre; HEG = hêtre à grandes feuilles; PEU = peupliers; SAB = sapin baumier. L'ordonnée à l'origine est présentée seulement lorsqu'elle était significativement différente de 0 au seuil d'erreur $\alpha = 0,05$.

Annexe 6. Attributions des facteurs de conversion dans le tableau 1

Les valeurs de départ sont celles du CD_{4_gaules} (étape 2 du tableau 1) pour la CJ que l'on trouve dans la base de données MERCJ (annexe 2, figure 2.1), majorées de 50 % pour couvrir l'allongement de la période de rotation de 20 à 30 ans.

En l'absence d'un facteur de conversion spécifique à une essence donnée, nous avons attribué une valeur selon les hypothèses de la section 2.1. Par exemple, le peuplier a un facteur de 0, puis le bouleau à papier (0,036) est à mi-chemin entre le peuplier (0) et le bouleau jaune (0,072). Nous avons rehaussé la valeur du facteur de conversion pour le hêtre et diminué celle pour l'érable à sucre afin de générer un léger écart reflétant une partie des écarts de croissance rapportés dans la section 2.4.

Pour la CPI_CP et la CPI_RL, les facteurs de conversion des essences feuillues sont ceux de la CJ, majorés respectivement de 8 % et de 16 % pour capter l'augmentation de la croissance qui a été rapportée avec la diminution de la ST résiduelle (section 2.4). Nous avons supposé que la ST résiduelle était de 18, 16 et 14 $m^2 \cdot ha^{-1}$ dans la CJ, la CPI_CP et la CPI_RL, respectivement. Nous n'avons pas identifié d'hypothèse plausible pour ajuster la croissance des épinettes entre les traitements. Une hypothèse de diminution de la croissance avec la diminution de la ST résiduelle dans les traitements (environ 15 % par traitement) a été utilisée pour le sapin afin de capter l'effet d'une croissance plus rapide des feuillus susceptibles de l'ombrager. De plus, nous avons appliqué la réduction de 25 % attribuable à l'hypothèse d'effet de la TBE (section 2.5).

Les facteurs de conversion applicables aux $CD_{4_semis > 1\ m}$ sont basés sur ceux des gaules, auxquels nous avons appliqué deux facteurs de réduction. Le premier est celui pour évaluer le CD_{4_gaules} à la 10^e année après la coupe selon le $CD_{4_semis > 1\ m}$ observé à 5 ans, tel que nous l'avons décrit à l'annexe 5. Ainsi, les facteurs de conversion du hêtre et de l'ostryer ont été multipliés par 0,75, tandis que ceux des autres essences l'ont été par 0,50. Le deuxième facteur de réduction découle de l'hypothèse selon laquelle la contribution de ces semis correspondra aux $\frac{2}{3}$ de celle des gaules. En effet, les semis ont au moins 5 années de retard sur la croissance des gaules en vue de former des recrues à 30 ans (retard de $\frac{5}{30}$), sans compter qu'ils subiront davantage l'effet de la fermeture du couvert limitant que les gaules. Faute d'une évaluation quantitative plus précise, nous avons estimé ce second retard à $\frac{5}{30}$, ce qui porte le total à $\frac{10}{30}$, soit $\frac{1}{3}$.