

Création des courbes d'évolution

Calcul des possibilités forestières 2013-2018

Bureau du forestier en chef



Rédaction :

Julie Poulin, biol., M.Sc.

Collaboration :

Marie-Josée Blais, ing.f., M.Sc.

Toma Guillemette, ing.f., M.Sc.

Daniel Pin, ing.f., M.Sc.

Adrian Spatacean, ing.f., M.Sc.

Révision :

Isabelle Auger, stat. ASSQ, M.Sc.

Mathieu Fortin, Ph.D.

Antoine Nappi, biol., Ph.D.

Marc Plante, ing.f.

David Pothier, ing.f., Ph.D.

Révision linguistique

Claire Fecteau

Référence à citer

Poulin, J. 2013. Création des courbes d'évolution. Calcul des possibilités forestières 2013-2018. Bureau du forestier en chef, Roberval, Qc, 53 p.

Adresse :

Bureau du forestier en chef

845, boulevard Saint-Joseph

Roberval (Québec) G8H 2L6

<http://www.forestierenchef.gouv.qc.ca>

Contexte

L'évolution du volume de bois sur pied constitue un élément central du calcul des possibilités forestières. En 2004, lors des travaux de la commission Coulombe, un comité scientifique chargé d'examiner le calcul a identifié de nombreuses lacunes¹. Les principales concernaient les modèles de prévisions de la croissance, la précision des intrants, l'évolution des strates de moins de 7 m et la composition des strates après perturbations.

Les travaux de recherche récents ont amélioré et simplifié la modélisation de la croissance des peuplements et la prévision à long terme de leur volume. Ainsi, une nouvelle génération de modèles de croissance, ARTÉMIS-2009 et NATURA-2009, remplace respectivement les modèles de prévision de la croissance « par taux » et « par courbes ». De plus, le Bureau du forestier en chef, en collaboration avec la Direction de la recherche forestière (ministère des Ressources naturelles), a développé une nouvelle méthode de création des courbes d'évolution des volumes de bois. Les effets des coupes partielles sur l'évolution du volume et de la composition sont désormais simulés par un modèle de prévision des prélèvements ou par une modification « proportionnelle » ou « parallèle » des courbes existantes. Les améliorations apportées ont favorisé la crédibilité de l'estimation de ces volumes auprès de la communauté d'experts et autres intervenants consultés.

À l'instar des calculs des périodes précédentes, de nombreuses hypothèses reposent sur des jugements d'experts, particulièrement l'évolution des strates de moins de 7 m et la composition des strates après perturbations. Le Forestier en chef s'est engagé dans un processus d'amélioration continue afin de minimiser les incertitudes entourant le calcul des possibilités forestières. En collaborant avec la communauté scientifique, le Forestier en chef s'assure que le calcul intègre les connaissances actuelles.

Le présent document s'adresse au public, aux chercheurs et aux différents intervenants forestiers concernés par cette étape de la détermination des possibilités forestières.

À moins d'indication contraire, la méthodologie utilisée a été développée par le Bureau du forestier en chef.

¹ Comité scientifique chargé d'examiner le calcul de la possibilité forestière (2004).

Résumé

Les courbes d'évolution représentent la dynamique de croissance des strates d'aménagement dans le calcul des possibilités forestières. Les différentes variables qui décrivent les strates d'aménagement (ex. : volume, surface terrière) évoluent sur l'ensemble des périodes du calcul des possibilités forestières.

Les strates d'aménagement sont le produit du regroupement des strates cartographiques similaires. Ce regroupement vise à minimiser le nombre de strates d'aménagement, tout en maintenant le plus possible l'homogénéité des caractéristiques écoforestières aux fins d'une planification forestière stratégique. Diminuer le nombre de strates allège le calcul des possibilités forestières et permet généralement d'évaluer plus précisément le volume total en matière ligneuse.

Les strates d'aménagement relativement similaires, mais de stades de développement différents, sont ensuite regroupées en groupe de strates. Une courbe d'évolution est construite pour chaque groupe de strates. Tout d'abord, une courbe de croissance est produite pour chacune des placettes d'inventaire forestier. Ces courbes sont issues des modèles de croissance ARTÉMIS-2009 ou NATURA-2009. La courbe d'évolution est une moyenne des courbes de croissance.

Deux types de courbes d'évolution existent : la courbe *actuelle d'évolution* et la courbe *effets de traitement*. La courbe *actuelle d'évolution* fait évoluer les strates au début du calcul, tant qu'aucun traitement sylvicole n'est appliqué sur la strate. Dès qu'un traitement sylvicole s'applique, la strate évolue sur une courbe *effets de traitement*. Cette dernière est 1) une courbe *actuelle d'évolution* sélectionnée parmi les courbes existantes, 2) une courbe produite à l'aide d'un modèle de prélèvement de ARTÉMIS-2009 ou 3) une courbe de plantation.

Table des matières

Contexte.....	iii
Résumé.....	v
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	viii
Liste des annexes.....	ix
Introduction.....	4
Modèles de croissance.....	4
Description des modèles.....	4
ARTÉMIS-2009.....	5
NATURA-2009.....	6
Sélection du modèle.....	7
Préparation des données.....	8
Création des strates d'aménagement.....	8
Création des groupes de strates.....	8
Strates de 7 m et plus de hauteur.....	9
Strates de moins de 7 m de hauteur.....	9
Données dendrométriques des groupes de strates.....	9
Création des courbes d'évolution.....	9
<i>Courbe actuelle d'évolution.....</i>	<i>10</i>
1. Production des courbes de croissance.....	10
2. Positionnement des courbes de croissance sur l'axe du temps.....	10
3. Création de la courbe <i>actuelle d'évolution</i>	11
4. Correction du départ de la courbe <i>actuelle d'évolution</i>	12
5. Ajustement des courbes <i>actuelles d'évolution</i> de pessières noires.....	13
6. Ventilation de la courbe <i>actuelle d'évolution</i> en essences individuelles.....	13
7. Positionnement des strates sur la courbe <i>actuelle d'évolution</i>	14
<i>Courbes effets de traitement.....</i>	<i>15</i>
1. Courbe <i>actuelle d'évolution</i> existante.....	16
2. Courbe d'un modèle de prélèvement de ARTÉMIS-2009.....	18
3. Courbe de plantation.....	18
Conclusion.....	23
Références.....	24



Liste des figures

Figure 1. Courbes de croissance de la surface terrière marchande d'un groupe de strates composé de 6 strates d'aménagement. Les courbes de croissance sont présentées à l'échelle de la strate d'aménagement pour simplifier la représentation du résultat de la répartition des courbes de croissance sur l'axe du temps en fonction du patron de croissance.	11
Figure 2. Exemple d'une courbe <i>actuelle d'évolution</i> d'un groupe de strates (en brun) issue du modèle de régression sur les courbes de croissance des placettes de deux strates d'aménagement.	11
Figure 3. Extrapolation de la courbe <i>actuelle d'évolution</i> jusqu'à un volume marchand nul.	13
Figure 4. Exemple d'une courbe <i>actuelle d'évolution</i> d'une pessière noire dont un plateau a été fixé à 80 % du sommet pour pallier une trop forte diminution du volume prévue par le segment décroissant des courbes.	13
Figure 5. Exemple d'une courbe <i>actuelle d'évolution</i> par groupes d'essences (à gauche) ventilée par essences individuelles (à droite).	14
Figure 6. Positionnement des strates d'aménagement sur la courbe <i>actuelle d'évolution</i> de leur groupe de strates.	14
Figure 7. Répartition des volumes par classe d'écart entre le volume total inventorié des strates d'aménagement et leur volume total prévu par les courbes actuelles d'évolution. L'évaluation de la classe d'écart est effectuée à l'échelle de l'unité d'aménagement.	15
Figure 8. Courbes <i>effets de traitement</i> sans modification, parallèle et proportionnelle.	17
Figure 9. Courbes de plantation (2 000 plants à l'hectare) en fonction de l'essence mise en terre et de l'IQS.	22

Liste des tableaux

Tableau 1. Exemple partiel d'un regroupement d'essences d'une végétation potentielle de ARTÉMIS-2009.	5
Tableau 2. Variables explicatives utilisées pour élaborer ARTÉMIS-2009.....	6
Tableau 3. Principales variables explicatives utilisées pour élaborer NATURA-2009.....	7
Tableau 4. Modèle de croissance utilisé pour chaque combinaison de type de forêt et de végétation potentielle.....	7
Tableau 5. Variables des courbes d'évolution.....	12
Tableau 6. Essences qui composent les groupes d'essences des courbes selon le modèle de croissance.....	12
Tableau 7. Position de retour des strates (résineuses autres que cédrières, prucheraies et pinèdes, résineuses à feuillus intolérants et de feuillus intolérants) sur la courbe <i>effets de traitement</i> en fonction du traitement sylvicole.....	17
Tableau 8. Exemple de surface terrière résiduelle (position de retour sur la courbe <i>effets de traitement</i>) d'une bétulaie jaune à la suite de l'application de la coupe d'ensemencement de la coupe progressive à couvert permanent. Les positions de retour varient selon le traitement sylvicole, la surface terrière avant traitement et le type de forêt. De plus, ces dernières peuvent être adaptées aux conditions régionales.....	18
Tableau 9. IQS moyen par essence, par végétation potentielle et par domaine bioclimatique des courbes <i>effets de traitement</i> de la plantation uniforme (compilation du Bureau du forestier en chef des données de Guy Prégent (DRF, MRN) et de la Direction générale des pépinières et des stations piscicoles).....	19
Tableau 10. Modèle de plantation par essence et âge des plantations utilisées pour élaborer le modèle.....	20
Tableau 11. Modèle de régression utilisé pour extrapoler les valeurs des variables des courbes de plantation d'épinette noire, d'épinette blanche et de pin gris en fonction de l'âge.	20
Tableau 12. Âge auquel le volume est prévu par le modèle de plantation ainsi que les valeurs cibles utilisées pour élaborer le modèle de régression du volume pour les courbes de plantation de l'épinette noire (EPN), de l'épinette blanche (EPB), du pin gris (PIG), du pin rouge (PIR) et du pin blanc (PIB) (<i>Manuel : Manuel d'aménagement forestier</i> (MRN 1998); V : Volume; AAM : Accroissement annuel moyen).	21
Tableau 13. Modèle de régression utilisé pour extrapoler les valeurs des variables des courbes de plantation du mélèze hybride, du pin blanc et du pin rouge en fonction de l'âge.....	22



Liste des annexes

Annexe I. Regroupements d'essences utilisés par ARTÉMIS-2009.....	25
Annexe II. Élaboration des modèles de prélèvement de ARTÉMIS-2009.....	31
Annexe III. Modèle de succession forestière SUCCÈS-2009.....	34
Annexe IV. Méthode de positionnement des courbes de croissance issues de ARTÉMIS-2009.....	36
Annexe V. Méthode de production des courbes moyennes du groupe de strates.....	38
Annexe VI. Tables de rendement des plantations.....	39



Introduction

Les courbes d'évolution font évoluer les strates d'aménagement sur tout l'horizon du calcul des possibilités forestières. Ces courbes sont une prévision, entre autres, de l'évolution des volumes disponibles à la récolte forestière, par essence et par groupe d'essences.

Le présent document décrit les modèles de croissance utilisés dans le processus de production des courbes d'évolution : NATURA-2009, un modèle par peuplement et ARTÉMIS-2009, un modèle par tiges individuelles. Ensuite, il présente les données utilisées pour produire les courbes. Enfin, il explique les différentes étapes de production des deux types de courbes d'évolution : les courbes *actuelles d'évolution* et les courbes *effets de traitement*. Les courbes *actuelles d'évolution* font évoluer les strates jusqu'à l'application d'un traitement sylvicole et les courbes *effets de traitement*, à la suite de l'application d'un des traitements sylvicoles du calcul.

Modèles de croissance

Les modèles de croissance produits par la Direction de la recherche forestière (MRN) sont utilisés dans le processus de production des courbes d'évolution du calcul des possibilités forestières. Cette section présente les modèles et les données utilisés pour leur élaboration ainsi que le modèle sélectionné par les analystes du Bureau du forestier en chef pour chaque combinaison de type de forêt et de végétation potentielle.

Description des modèles

Les modèles de croissance sont élaborés à partir des données du réseau de placettes échantillons permanentes du Québec de la Direction des inventaires forestiers (MRN). Les placettes retenues comptent au moins deux mesures. Ces données fournissent les conditions initiales ainsi que l'évolution réelle des différentes variables qui décrivent un peuplement. Elles couvrent au total jusqu'à une quarantaine d'années entre la première et la dernière mesure. L'évaluation des modèles montre que les prévisions de croissance sont fiables sur un horizon de 40 ans. Toutefois, aucune aberration n'a été observée au-delà de cet horizon.

Les modèles de croissance ARTÉMIS-2009² et NATURA-2009³ servent à prévoir l'évolution des placettes échantillons en peuplements forestiers de 7 m et plus de hauteur⁴. Ces modèles permettent de déterminer l'évolution, par intervalle de 5 ans, des six variables⁵ suivantes :

- le volume marchand (m^3/ha);
- la surface terrière marchande (m^2/ha);
- le nombre de tiges marchandes (tiges/ha);
- la hauteur dominante (m);
- le diamètre quadratique moyen (cm);
- le volume moyen par tige ($dm^3/tige$).

² Fortin et Langevin (2010).

³ Pothier et Auger (2011).

⁴ Revue dans Auger et al. (2011).

⁵ L'équation utilisée pour estimer le volume d'une tige est le tarif de cubage de Fortin et al. (2007) et pour calculer la hauteur, celle de Fortin et al. (2009). Le diamètre quadratique moyen (cm) et le volume par tige ($dm^3/tige$) sont des paramètres dérivés à partir des autres variables.



ARTÉMIS-2009

ARTÉMIS-2009 est un modèle de croissance par tiges individuelles⁶ mis au point par Mathieu Fortin, chercheur, et Luc Langevin, statisticien, à la Direction de la recherche forestière. Ce modèle prévoit la probabilité de mortalité des tiges, l'accroissement du diamètre à hauteur de poitrine (dhp) des tiges vivantes, le nombre de recrues en tiges marchandes et le dhp de ces recrues.

ARTÉMIS-2009 est élaboré pour les 25 végétations potentielles les plus abondantes au Québec. Des regroupements d'essences propres à chacune des végétations potentielles sont réalisés. Les essences suivantes sont regroupées dès le départ :

- les épinettes (EPX) : blanche, noire, rouge et de Norvège;
- les pins (PIN) : rouge et blanc;
- les chênes (CHX) : rouge, blanc, bicolore et à gros fruits;
- les peupliers (PEU) : faux-tremble, baumier, deltoïde et à grandes dents.

Afin de ne pas être regroupés davantage par végétation potentielle, ces groupes d'essences et les autres essences doivent satisfaire les trois conditions suivantes :

- suffisamment de tiges vivantes;
- suffisamment de tiges mortes;
- suffisamment de recrues.

Ainsi, lorsque les essences et les groupes d'essences ne satisfont pas ces trois conditions, un regroupement supplémentaire se produit selon la hiérarchie suivante :

1. les essences et les groupes d'essences de type résineux regroupés en « autres résineux » (RES);
2. les essences et les groupes d'essences de type feuillu regroupés en « autres feuillus tolérants » (F_0) et « autres feuillus intolérants » (F_1);
3. « autres feuillus » (FEU);
4. « autres feuillus tolérants et résineux » (FOR);
5. « autres » (AUT).

Selon la végétation potentielle, ARTÉMIS-2009 tient compte de 3 à 18 groupes d'essences ou essences individuelles (annexe I). Un exemple partiel de regroupement est présenté au tableau 1.

Tableau 1. Exemple partiel d'un regroupement d'essences d'une végétation potentielle de ARTÉMIS-2009.

Essence ou groupe d'essences	1 ^{er} regroupement	2 ^e regroupement
Bouleau à papier	Bouleau à papier	Bouleau à papier
Sapin baumier	Sapin baumier	Sapin baumier
EPX	EPX	EPX
Saules	F_1	FEU
Cerisier tardif		
Mélèze	RES	FOR
PIN		
CHX		

⁶ Un modèle par tiges individuelles simule les différents processus qui se déroulent à l'échelle de l'arbre. Il fournit une liste d'arbres selon leur essence et leurs dimensions. Les prévisions d'évolution de chacune des tiges sont compilées à l'échelle de la placette (adaptée de Auger et al. 2011).

Le modèle ARTÉMIS-2009 intègre des données sur les placettes, sur les intervalles de croissance ainsi que sur l'arbre individuel (tableau 2).

Tableau 2. Variables explicatives utilisées pour élaborer ARTÉMIS-2009.

Niveau d'information	Variable explicative
Placette	Précipitations annuelles moyennes entre 1971-2000 (mm) Température annuelle moyenne entre 1971-2000 (°C)
Intervalle de croissance	Occurrence de coupe partielle dans l'intervalle (oui/non) Occurrence de coupe partielle durant l'intervalle précédent (oui/non) Occurrence de défoliations sévères causées par la TBE durant l'intervalle (oui/non) Diamètre moyen quadratique marchand de la placette (cm) Densité des tiges marchandes (tiges/ha) Densité de tiges marchandes du groupe d'essences (tiges/ha) Surface terrière marchande (m ² /ha) Durée de l'intervalle (années)
Arbre individuel	Groupe d'essences Dhp (cm) Surface terrière des arbres dont le dhp est plus grand que le sujet (m ² /ha)

ARTÉMIS-2009 comporte également des modèles de prélèvement qui prévoient la probabilité de prélèvement de chacune des tiges en fonction de l'essence, du dhp, de la densité de tiges marchandes et du traitement⁷. Ces modèles ont été élaborés à partir des placettes échantillons ayant subi une coupe partielle (annexe II). Les huit traitements génériques de coupe partielle suivants sont disponibles :

- coupe d'amélioration;
- coupe d'éclaircie équivalente au préjardinage;
- coupe de jardinage avant 1997;
- coupe de jardinage de 1997 à 2004;
- coupe de jardinage après 2004;
- coupe progressive régulière, phase d'ensemencement;
- éclaircie commerciale;
- éclaircie sélective individuelle.

NATURA-2009

NATURA-2009 est un modèle de croissance à l'échelle du peuplement⁸ mis au point par David Pothier, professeur-chercheur à l'Université Laval, et Isabelle Auger, statisticienne à la Direction de la recherche forestière. Il prévoit entre autres l'évolution de la surface terrière marchande, le nombre de tiges marchandes et le volume marchand en fonction de l'âge de la placette.

Le modèle est élaboré à l'échelle du sous-domaine bioclimatique, par groupe d'essences : feuillus intolérants, feuillus tolérants, résineux intolérants, résineux tolérants et sapin baumier. Les placettes qui ont subi une perturbation majeure sont exclues. Les mesurages influencés par une perturbation naturelle légère (épidémie

⁷ Fortin et al. (*en préparation*).

⁸ Un modèle par peuplement entier fait évoluer directement les caractéristiques dendrométriques d'un peuplement, sans utiliser d'information à l'échelle de la tige individuelle. Il fournit donc des informations plus sommaires, telles la densité, la surface terrière et le volume d'un peuplement à l'échelle de la placette (adapté de Auger et al. 2011).



légère, chablis partiel, brûlis partiel, dépérissement partiel) sont conservés. L'effet des coupes partielles est évalué avec les placettes qui ont subi une coupe partielle qui a prélevé moins de 75 % de la surface terrière. Seules les tiges de plus de 9,1 cm au dhp et les essences commerciales sont conservées. Au total, 13 244 segments d'évolution ont servi à l'élaboration du modèle. Le modèle intègre des données sur la placette ainsi que sur l'intervalle de croissance (tableau 3). L'âge des placettes est déterminé par la moyenne de l'âge des arbres échantillons dominants et codominants, toutes essences confondues.

Tableau 3. Principales variables explicatives utilisées pour élaborer NATURA-2009.

Niveau d'information	Variable explicative
Placette	Sous-domaine bioclimatique
	Drainage
	Hauteur dominante (m)
	Âge moyen des arbres dominants et codominants (années)
	Nombre de tiges marchandes (tiges/ha)
	Surface terrière marchande (m ² /ha)
	Volume marchand (m ³ /ha)
	Variables de composition
	Indice de Shannon
Intervalle de croissance	Durée de l'intervalle entre les deux mesures (années)
	Relevés de défoliation (indice de réduction de la croissance causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette)
	Occurrence de perturbation naturelle légère durant l'intervalle (oui/non)

Sélection du modèle

Aux fins du calcul, les caractéristiques et les limites de chacun des modèles conditionnent leur utilisation pour certaines combinaisons de type de forêt⁹ et de végétation potentielle (tableau 4). Généralement, NATURA-2009 convient davantage aux pessières et aux types de forêt résineux à feuillus. ARTÉMIS-2009 est utilisé pour les autres combinaisons de types de forêt et de végétations potentielles, particulièrement pour les feuillus nobles, les cédrières, les pinèdes et les prucheraies.

Tableau 4. Modèle de croissance utilisé pour chaque combinaison de type de forêt et de végétation potentielle.

Type de forêt	Végétation potentielle	
	FE1 à FE6, FC1 FO1, MJ1, MJ2 et MF1	Autres
Bétulaies blanches	ARTÉMIS-2009	NATURA-2009
Peupleraies		
Mélèzaies		
Pessières		
Pinèdes grises		
Sapinières (sauf à bouleau jaune)	ARTÉMIS-2009	
Bétulaies jaunes		
Chênaies		
Érabières		
Cédrières		
Pinèdes		
Prucheraies		
Sapinières (à bouleau jaune)		

⁹ Le type de forêt est déterminé par l'essence ou le groupe d'essences qui domine la composition de la strate d'aménagement.

Préparation des données

Plusieurs étapes de regroupement des différents peuplements forestiers qui composent le territoire à aménager sont nécessaires. Ce regroupement vise à alléger le calcul en diminuant le nombre de strates à aménager. De plus, le fait de regrouper les peuplements augmente le nombre de placettes échantillons qui caractérisent chaque strate et peut améliorer la précision de l'estimation du volume total. Le regroupement comporte deux principales étapes :

- 1) Les analystes du Bureau du forestier en chef regroupe les strates cartographiques¹⁰ en strates d'aménagement en fonction de la similarité de leur appellation cartographique. Ce sont les strates d'aménagement qui évoluent dans le calcul et sur lesquelles sont appliqués les traitements sylvicoles.
- 2) Les strates d'aménagement sont ensuite regroupées en groupes de strates. Le groupe de strates consiste à réunir les strates d'aménagement de stades de développement différents, mais dont la dynamique végétale, la structure (régulière, irrégulière et jardinée) et l'aménagement potentiel sont relativement homogènes. Des courbes d'évolution et des scénarios sylvicoles sont élaborés pour chaque groupe de strates.

Cette section décrit les principes des étapes de regroupement en strates d'aménagement et en groupes de strates ainsi que les données dendrométriques qui caractérisent les strates.

Création des strates d'aménagement

Les peuplements forestiers dont l'appellation cartographique est identique forment une strate cartographique. Les strates cartographiques constituent l'unité la plus homogène quant aux données écoforestières. Toutefois, leur très grand nombre par unité d'aménagement – souvent plus de 5 000 – impose un premier niveau de regroupement en strate d'aménagement. L'homogénéité des caractéristiques écoforestières doit demeurer acceptable pour une analyse stratégique. Ainsi, les strates cartographiques similaires, selon leur appellation cartographique, pouvant faire l'objet des mêmes scénarios sylvicoles forment une strate d'aménagement. En moyenne, 320 strates d'aménagement ont été créées par unité d'aménagement¹¹.

Création des groupes de strates

Les strates d'aménagement sont ensuite classées en groupes de strates. Ce classement repose principalement sur le diagnostic sylvicole, effectué à l'aide d'un filtre, ou clé dichotomique¹². Il doit entre autres permettre d'atteindre une représentativité de tous les stades d'évolution, d'un nombre suffisant de placettes et d'une homogénéité du volume actuel, afin de créer une courbe d'évolution robuste. Ainsi, un groupe de strates réunit des strates d'aménagement de différents stades de développement et dont les caractéristiques sont relativement homogènes sur le plan de l'aménagement potentiel, de la dynamique végétale et de la structure (régulière, irrégulière ou jardinée). En moyenne, 57 groupes de strates ont été créés par unité d'aménagement. Pour chaque groupe de strates de plus de 7 m de hauteur, des courbes d'évolution sont produites.

¹⁰ Les données forestières contenues dans la carte de la Direction des inventaires forestiers sont un regroupement de peuplements forestiers en strates cartographiques. Ces dernières réunissent les peuplements dont l'appellation cartographique est identique.

¹¹ La description des principes de regroupement en strates d'aménagement est présentée dans le *Manuel de détermination des possibilités forestières* au fascicule 2.2 – Strates d'aménagement (Poulin en préparation a).

¹² Ce classement est expliqué dans le *Manuel de détermination des possibilités forestières* au fascicule 2.3 – Stratégie sylvicole (Poulin en préparation b).



Le diagnostic repose sur des variables qui diffèrent en fonction de la classe de hauteur de la strate d'aménagement.

Strates de 7 m et plus de hauteur

Les variables déterminantes du diagnostic sont le type de forêt, la végétation potentielle et la structure; les options d'aménagement dépendent principalement de ces caractéristiques. Le type de forêt est déterminé par l'essence ou le groupe d'essences qui domine la composition de la strate. Tout d'abord, les strates dont plus de 25 % de la surface terrière est occupée par une essence en raréfaction (enjeu) – pin blanc, chênes, épinette rouge – sont regroupées en priorité. Ensuite, le diagnostic repose sur les données d'inventaire (ex. : surface terrière, volume), l'appellation de la strate (ex. : densité, végétation potentielle, milieu physique), l'analyse de structure des strates ou autres caractéristiques.

Strates de moins de 7 m de hauteur

Ces strates sont peu sondées lors de l'inventaire forestier décennal. Ainsi, le diagnostic de ces strates repose sur le type de couvert, la végétation potentielle, la perturbation d'origine et la perturbation partielle. Un type de forêt leur est attribué à l'aide des données de suivi des traitements sylvicoles et des prévisions de composition forestière après intervention sont générées par le modèle SUCCÈS-2009 (annexe III).

Données dendrométriques des groupes de strates

Les placettes échantillons fournissent les données dendrométriques des groupes de strates utilisées pour la création des courbes d'évolution (ex. : dhp, essence).

Les placettes échantillons proviennent de deux sources¹³ :

- 1) Les placettes échantillons des programmes d'inventaire écoforestier décennal sont issues de deux programmes d'inventaire. Pour environ 60 % du territoire, les données proviennent du troisième programme, dont la couverture photographique a été faite entre 1990 et 2000. Pour l'autre portion du territoire, les photographies ont été prises entre 2003 et 2006 dans le cadre du quatrième programme.
- 2) Les placettes échantillons des suivis des interventions forestières, nommées *placettes locales*, procurent les données sur les strates perturbées, principalement les strates traitées par une coupe partielle depuis 1990. Ces strates ne sont pas sondées dans le programme d'inventaire écoforestier décennal.

Création des courbes d'évolution

Chaque groupe de strates possède ses propres courbes d'évolution. Une courbe d'évolution est une courbe qui traduit la croissance d'un groupe de strates à tous ses stades de développement. Les six variables¹⁴ d'un groupe de strates évoluent sur l'ensemble des périodes du calcul des possibilités forestières (150 ans). Deux types de courbe d'évolution sont utilisés dans le calcul :

- la courbe *actuelle d'évolution*;
- la courbe *effets de traitement*.

¹³ Ces deux types de données ne sont pas mélangés puisque les paramètres d'échantillonnage sont différents.

¹⁴ Le volume marchand, la surface terrière, le nombre de tiges, la hauteur dominante, le diamètre quadratique moyen et le volume moyen par tige.



Courbe actuelle d'évolution

La courbe *actuelle d'évolution* fait évoluer les strates d'aménagement d'un groupe de strates jusqu'à l'application d'un traitement sylvicole. La production de cette courbe aux fins du calcul des possibilités forestières nécessite les sept étapes suivantes :

1. Production des courbes de croissance;
2. Positionnement des courbes de croissance sur l'axe du temps;
3. Création de la courbe *actuelle d'évolution*;
4. Correction du départ de la courbe *actuelle d'évolution*;
5. Ajustement des courbes *actuelles d'évolution* de pessières noires;
6. Conversion des groupes d'essences de la courbe *actuelle d'évolution* en essences individuelles;
7. Positionnement des strates sur la courbe *actuelle d'évolution*.

1. Production des courbes de croissance

Les modèles de croissance ont été utilisés pour produire les courbes de croissance à l'échelle de la placette échantillon.

2. Positionnement des courbes de croissance sur l'axe du temps

Cette étape consiste à positionner les courbes de croissance de chaque strate d'aménagement d'un groupe de strates sur l'axe du temps. Deux méthodes sont utilisées : 1) selon l'âge moyen de la strate d'aménagement, 2) selon le patron de croissance en surface terrière de la courbe de croissance de la strate d'aménagement.

- 1) Pour les strates d'aménagement où l'âge des arbres échantillons est connu, le début de la courbe de croissance correspond à l'âge moyen des placettes échantillons. Généralement, cette méthode s'applique aux types de forêt résineux, à feuillus intolérants, mixtes à feuillus intolérants ainsi qu'aux pinèdes blanches et aux cédrières. Les courbes de croissance sont issues de NATURA-2009 ou de ARTÉMIS-2009¹⁵.
- 2) Pour les strates d'aménagement où l'âge des arbres échantillons est inconnu, le positionnement est réalisé à l'aide d'un modèle qui estime la translation des courbes de croissance à l'échelle des strates d'aménagement en fonction de leur patron de croissance en surface terrière (figure 1 et annexe IV). Cette méthode s'applique aux types de forêt de feuillus tolérants et mixtes à feuillus tolérants. Les courbes de croissance sont issues de ARTÉMIS-2009.

¹⁵ Pour certaines combinaisons de type de forêt et de végétation potentielle, un âge moyen a été attribué aux courbes produites à l'aide de ARTÉMIS-2009 afin de pallier des prévisions invraisemblables.



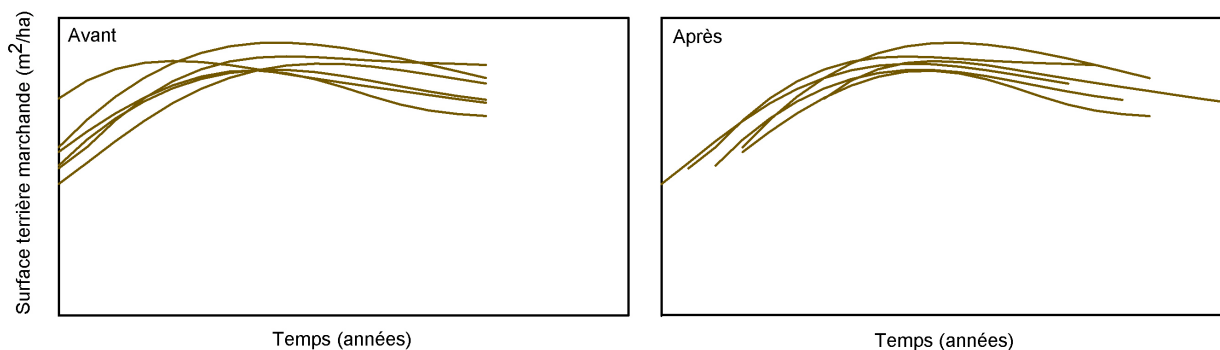


Figure 1. Courbes de croissance de la surface terrière marchande d'un groupe de strates composé de 6 strates d'aménagement avant et après leur positionnement sur l'axe du temps. Les courbes de croissance sont présentées à l'échelle de la strate d'aménagement pour simplifier la représentation du résultat de la répartition des courbes de croissance sur l'axe du temps en fonction du patron de croissance.

3. Création de la courbe *actuelle d'évolution*

La courbe *actuelle d'évolution* est la courbe moyenne du groupe de strates obtenue par un modèle de régression polynomiale du 6^e degré entre la variable (ex. : volume marchand) et le temps (figure 2; annexe V). Une pondération est appliquée, basée sur la superficie des strates et le poids des placettes échantillons à l'intérieur des strates. Les variables décrites par les courbes *actuelles d'évolution* sont présentées au tableau 5.

Les données de la courbe *actuelle d'évolution* sont disponibles par groupe d'essences. Les groupes d'essences diffèrent selon le modèle de croissance utilisé. Pour les courbes issues de NATURA-2009, les groupes d'essences sont les mêmes que ceux utilisés par le modèle (tableau 6). Pour les courbes issues de ARTÉMIS-2009, un regroupement additionnel est nécessaire pour uniformiser les groupes d'essences entre les différentes combinaisons de type de forêt et de végétation potentielle. Les groupes d'essences retenus sont présentés au tableau 6.

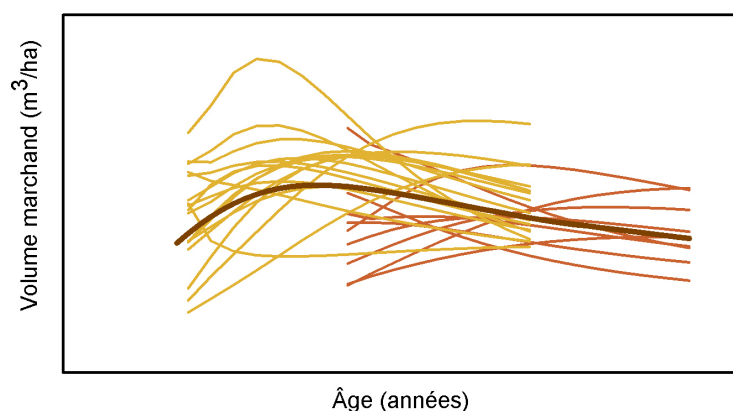


Figure 2. Exemple d'une courbe *actuelle d'évolution* d'un groupe de strates (en brun) issue du modèle de régression sur les courbes de croissance des placettes de deux strates d'aménagement.

Tableau 5. Variables des courbes d'évolution.

Variable	Description	
	ARTÉMIS-2009	NATURA-2009
Volume marchand ^a (m ³ /ha)	√	√
Surface terrière marchande ^a (m ² /ha)	√	√
Nombre de tiges marchandes ^a (tiges/ha)	√	√
Hauteur dominante ^b (m)	√	√
Diamètre quadratique moyen ^a (cm)	√	√
Volume moyen par tige ^a (dm ³ /tige)	√	√
Âge de la strate ^c (année)		√
Maturité absolue ^d (année)		√

^a Ces variables sont également disponibles par essence ou par groupe d'essences.

^b Hauteur dominante d'un peuplement définie par la hauteur moyenne des 100 plus gros arbres à l'hectare, ce qui correspond aux 4 arbres de plus gros dhp d'une placette de 0,04 ha ou 400 m².

^c Âge moyen des arbres études dominants et codominants.

^d Âge auquel l'accroissement annuel moyen en volume marchand de la strate est maximal. Cet âge est fixé à 0 aux fins du calcul. Des valeurs négatives sont obtenues pour les périodes précédant l'atteinte de la maturité absolue et des valeurs positives pour les périodes suivant la maturité absolue.

Tableau 6. Essences qui composent les groupes d'essences des courbes selon le modèle de croissance.

ARTÉMIS-2009	NATURA-2009
Feuillus intolérants (Fi) Bouleau gris, bouleau à papier, érable rouge, peuplier baumier, peuplier à feuilles deltoïdes, peuplier à grandes dents et peuplier faux-tremble.	Feuillus intolérants (Fi) Bouleau gris, bouleau à papier, caryer cordiforme, cerisier tardif, chêne rouge, érable argenté, noyer cendré, peuplier baumier, peuplier à feuilles deltoïdes, peuplier à grandes dents et peuplier faux-tremble.
Feuillus nobles (Fn) Cerisier tardif, Bouleau jaune, chêne blanc, chêne bicolore, chêne à gros fruits, chêne rouge, érable à sucre, frêne d'Amérique, tilleul d'Amérique et frêne noir.	Feuillus tolérants (Ft) Bouleau jaune, chêne blanc, chêne bicolore, chêne à gros fruits, érable rouge, érable à sucre, frêne d'Amérique, frêne noir, frêne de Pennsylvanie, hêtre à grandes feuilles, orme d'Amérique, orme rouge, orme de Thomas, ostryer de Virginie et tilleul d'Amérique.
Résineux intolérants (Ri) Mélèze laricin et pin gris.	Résineux intolérants (Ri) Mélèze laricin, pin gris et pin rouge.
Résineux tolérants (Rt) Épinette blanche, épinette noire, épinette de Norvège, épinette rouge, pin blanc, pin rouge, pruche de l'Est et thuya occidental.	Résineux tolérants (Rt) Épinette blanche, épinette noire, épinette de Norvège, épinette rouge, pin blanc, pruche de l'Est et thuya occidental.
Sapin baumier (SAB)	Sapin baumier (SAB)
Autres (AUT) Hêtre à grandes feuilles, ostryer de Virginie, sorbier d'Amérique, saules et essences ou groupes d'essences marginaux.	

4. Correction du départ de la courbe *actuelle d'évolution*

Les strates d'aménagement de moins de 7 m de hauteur n'ont pas de placettes échantillons disponibles. Conséquemment, ces strates ne contribuent pas à l'élaboration du segment de début de courbe. Pour les strates qui évoluent en fonction de l'âge¹⁶, ce segment pour la courbe est nécessaire pour faire évoluer les strates de moins de 7 m de hauteur. Faute de données, une fonction linéaire relie le début de la courbe à un volume marchand nul à 15 ans (figure 3).

¹⁶ Les types de forêts résineux, à feuillus intolérants et mixtes à feuillus intolérants ainsi que les pinèdes blanches et les cédrières.



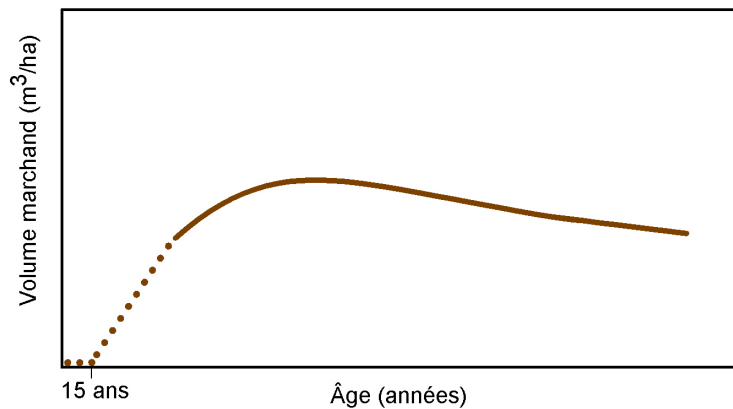


Figure 3. Extrapolation de la courbe *actuelle d'évolution* jusqu'à un volume marchand nul.

5. Ajustement des courbes *actuelles d'évolution* de pessières noires

Pour les courbes des groupes de strates dominés par l'épinette noire, après l'atteinte du volume marchand maximal, un plateau peut être fixé à 80 % du sommet pour pallier une trop forte diminution du volume prévue par le segment décroissant des courbes (figure 4). Cela permet de mieux refléter le passage d'une structure équiennne à la structure inéquiennne de ces types de peuplement, qui ne sont pas sujets à une mortalité de masse comme, par exemple, les peuplements de peuplier faux-tremble. Ce plateau a été fixé de façon arbitraire lors du calcul des possibilités forestières 2000-2005¹⁷.



Figure 4. Exemple d'une courbe *actuelle d'évolution* d'une pessière noire dont un plateau a été fixé à 80 % du sommet pour pallier une trop forte diminution du volume prévue par le segment décroissant des courbes.

6. Ventilation de la courbe *actuelle d'évolution* en essences individuelles

Les groupes d'essences de la courbe *actuelle d'évolution* (tableau 6) sont ventilés afin d'obtenir une courbe par essence. Ainsi, les données par groupe d'essences sont réparties en essences en fonction de leur représentativité au sein du groupe de strates selon l'inventaire. La proportion de chaque essence est maintenue sur tout l'horizon de la courbe (figure 5).

¹⁷ Revue dans Garêt et al. (2009).

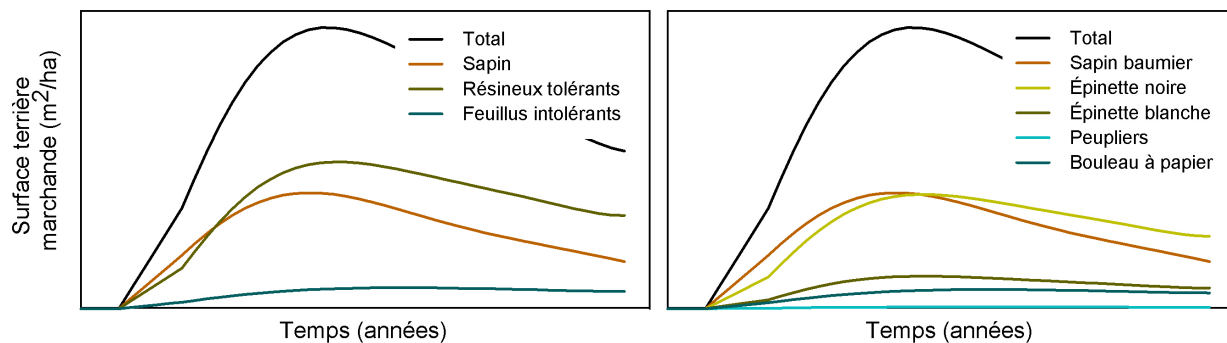


Figure 5. Exemple d'une courbe *actuelle d'évolution* par groupes d'essences (à gauche) ventilée par essences individuelles (à droite).

7. Positionnement des strates sur la courbe *actuelle d'évolution*

Les strates d'aménagement sont positionnées sur la courbe *actuelle d'évolution* de leur groupe de strates (figure 6). La méthode diffère entre les strates de plus de 7 m de hauteur et celles de moins de 7 m.

Les strates d'aménagement de 7 m et plus de hauteur conservent leur position sur l'axe du temps attribuée lors du positionnement des courbes de croissance (figure 1).

Les strates de moins de 7 m de hauteur sont positionnées selon leur âge. Leur âge est déterminé par le nombre d'années écoulées depuis la dernière perturbation totale ou la classe d'âge de l'appellation cartographique.

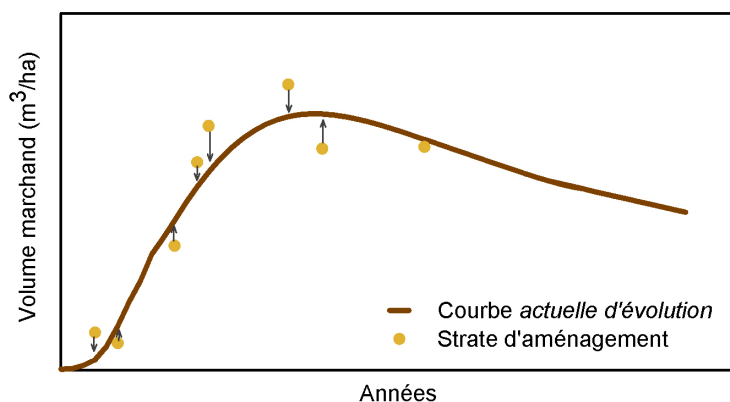


Figure 6. Positionnement des strates d'aménagement sur la courbe *actuelle d'évolution* de leur groupe de strates.

L'utilisation d'une courbe *actuelle d'évolution* à l'échelle d'un groupe de strates entraîne un écart entre le volume total inventorié d'une strate d'aménagement¹⁸ et le volume selon sa position sur la courbe. Pour certaines strates, le positionnement entraîne une surestimation du volume d'origine et, pour d'autres, une sous-estimation (figure 6). Une analyse de la précision, portant sur l'écart entre les deux volumes, est réalisée. L'objectif est que l'écart moyen, pondéré par les superficies des différentes strates, soit inférieur à 3,0 % (en valeur absolue) à

¹⁸ Volume toutes essences basé sur l'ensemble des placettes échantillons de la strate.



l'échelle de l'unité d'aménagement. Pour l'ensemble des 71 unités d'aménagement, le volume est surestimé de 0,93 %. Une unité d'aménagement a un écart supérieur à 3,1 % (figure 7).

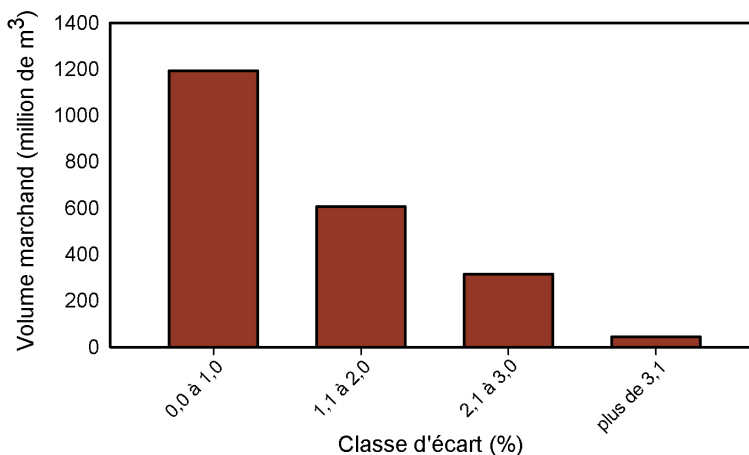


Figure 7. Répartition des volumes par classe d'écart entre le volume total inventorié des strates d'aménagement et leur volume total prévu par les courbes actuelles d'évolution. L'évaluation de la classe d'écart est effectuée à l'échelle de l'unité d'aménagement.

Courbes effets de traitement

Certaines stratégies sylvicoles comprennent des traitements sylvicoles qui n'entraînent pas d'effets sur l'évolution du volume des strates. Ils sont toutefois nécessaires au maintien ou à l'amélioration de la productivité de la strate ou au maintien ou à une modification de sa composition. Ainsi, ces traitements n'impliquent pas de changement de courbe d'évolution. Seul le coût de la stratégie sylvicole est adapté en conséquence. Ce sont les « traitements connexes » :

- scarifiage;
- regarni;
- ensemencement;
- nettoyage;
- élagage.

L'application des autres traitements sylvicoles dans le calcul implique un repositionnement de la strate sur une nouvelle courbe d'évolution. Cette courbe qui fait évoluer la strate traitée est la courbe *effets de traitement*. Le type de courbe *effets de traitement* et la méthode de positionnement de la strate traitée sur cette dernière (position de retour) dépendent du type de forêt et du traitement sylvicole. Les courbes *effets de traitement* sont de trois types :

1. la courbe *actuelle d'évolution* sélectionnée parmi les courbes existantes;
2. la courbe produite à l'aide d'un modèle de prélèvement de ARTÉMIS-2009;
3. la courbe de plantation.

1. Courbe *actuelle d'évolution existante*

Ces courbes *effets de traitement* sont les courbes *actuelles d'évolution*. Ainsi, l'ensemble des courbes *actuelles d'évolution* forment une banque de courbes *effets de traitement*. Elles peuvent être originales, c'est-à-dire sans modification, ou avoir subi certaines modifications. Ces courbes *effets de traitement* sans modification sont utilisées pour les types de forêt suivants :

- résineux (autres que cédrières, prucheraies et pinèdes blanches);
- résineux à feuillus intolérants;
- feuillus intolérants.

Sans modification

Les courbes *effets de traitement* sans modification font évoluer les strates à la suite de l'un des traitements sylvicoles suivants :

- éclaircie précommerciale;
- coupes totales (coupe totale sans protection de la régénération, coupe avec protection de la régénération et des sols, coupe avec protection de la haute régénération et des sols, coupe avec réserve de semenciers);
- coupe avec protection des petites tiges marchandes;
- coupe finale de la coupe progressive régulière ou irrégulière.

Généralement, le scénario sylvicole est planifié de façon à ce que la courbe *effets de traitement* soit la même que celle avant l'application du traitement sylvicole. Parfois, la courbe *effets de traitement* est de composition différente que la courbe d'évolution avant l'application du traitement. Deux stratégies peuvent entraîner ce changement de composition :

- La première est la conséquence d'un scénario sylvicole extensif. Par exemple, une pessière blanche à sapins sur une végétation potentielle RS2 traitée par une coupe totale retourne sur la courbe *effets de traitement* d'une sapinière;
- La seconde est le résultat d'un scénario composé des traitements sylvicoles qui modifient la composition de la strate vers l'essence principale objectif. Par exemple, une pessière blanche à sapins traitée par une coupe progressive régulière retourne sur une courbe *effets de traitement* d'une pessière blanche pure.

La composition de la courbe attribuée à la suite du traitement est déterminée à l'aide de l'information véhiculée par *Le guide sylvicole du Québec*¹⁹, du modèle de succession forestière SUCCÈS-2009²⁰, des données de suivi après intervention sylvicole et de l'expertise des analystes.

Avec modifications

Certaines courbes *effets de traitement* sont des courbes *actuelles d'évolution* qui sont modifiées afin de traduire les effets de coupes partielles. Deux formes sont utilisées²¹ (figure 8) :

- la courbe parallèle – pour l'éclaircie commerciale;
- la courbe proportionnelle – pour les coupes d'ensemencement des coupes progressives.

La courbe parallèle représente un maintien de l'accroissement annuel moyen en volume (m³/ha/an) du peuplement après traitement, puisque les courbes d'évolution du volume demeurent parallèles. Cette courbe

¹⁹ Ministère des Ressources naturelles (*sous presse*).

²⁰ SUCCÈS-2009 est un modèle de prévision de la succession forestière après une perturbation ou une intervention majeure (annexe II).

²¹ Comité consultatif scientifique du manuel d'aménagement forestier (2003).



traduit une augmentation de l'accroissement en diamètre des arbres résiduels de façon à compenser pour les arbres coupés. Le volume marchand est réduit du tiers à l'âge de maturité absolue, pour traduire la récolte de l'éclaircie commerciale, et cette différence est maintenue dans le temps.

La courbe proportionnelle est utilisée pour représenter un accroissement annuel moyen en volume ($m^3/ha/an$) du peuplement qui est inférieur après le traitement²¹. Cette courbe traduit le maintien de l'accroissement en diamètre des arbres résiduels, sans compenser pour les arbres coupés. Le volume marchand est réduit de 40 %, pour traduire la coupe d'ensemencement de la coupe progressive régulière et de la coupe progressive irrégulière à régénération lente, sur l'ensemble de l'horizon de la courbe.

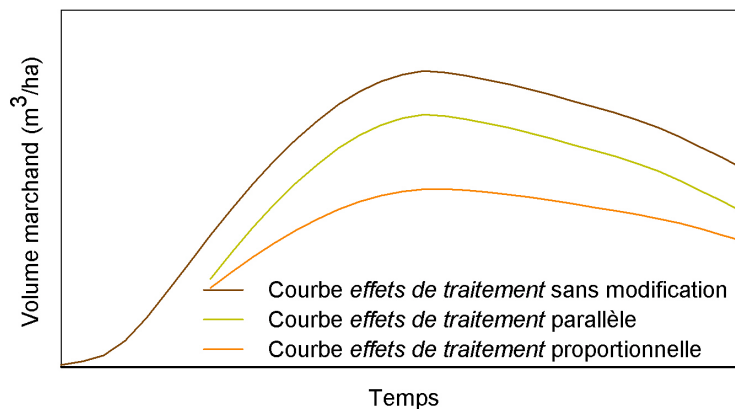


Figure 8. Courbes *effets de traitement* sans modification, parallèle et proportionnelle.

Positionnement des strates sur leur courbe *effets de traitement*

Le positionnement de la strate sur ce type de courbe *effets de traitement* est déterminé par l'âge (tableau 7). Plus la régénération est développée après le prélèvement, plus l'âge de la position de retour est avancé sur l'axe du temps.

Tableau 7. Position de retour des strates (résineuses autres que cédrières, prucheraies et pinèdes, résineuses à feuillus intolérants et de feuillus intolérants) sur la courbe *effets de traitement* en fonction du traitement sylvicole.

Traitement sylvicole Variante	Position de retour (âge en années)
Courbe sans modification	
Éclaircie précommerciale	Âge avant le traitement
Coupes totales	
Coupe totale sans protection de la régénération	0
Coupe avec protection de la régénération et des sols	0
Coupe avec protection de la haute régénération et des sols	5
Coupe avec réserve de semenciers	0
Coupe avec protection des petites tiges marchandes	10
Coupe finale de la coupe progressive régulière	5
Coupe finale de la coupe progressive irrégulière	20
Courbe parallèle	
Éclaircie commerciale	Âge avant le traitement
Courbe proportionnelle	
Coupe d'ensemencement de la coupe progressive régulière	Âge avant le traitement
Coupe d'ensemencement de la coupe progressive irrégulière à régénération lente	Âge avant le traitement

2. Courbe d'un modèle de prélèvement de ARTÉMIS-2009

Les modèles de prélèvement de ARTÉMIS-2009 simulent un traitement de coupe partielle sur une strate. Ils déterminent la probabilité de prélèvement de chacune des tiges en fonction de l'essence, du dhp, de la densité de tiges marchandes et du traitement sylvicole. À partir de la nouvelle table de peuplement de la strate traitée, ARTÉMIS-2009 génère les données utilisées pour la création de la courbe *effets de traitement*.

Le positionnement de la strate sur ce type de courbe *effets de traitement* est déterminé par la surface terrière ou le volume après traitement (tableau 8). Ainsi, le pourcentage de prélèvement correspond à la différence entre la surface terrière (ou volume) de la strate avant le traitement et la surface terrière (ou volume) à la position de retour sur sa courbe *effets de traitement*.

Ce type de courbe *effets de traitement* fait évoluer les types de forêts suivants :

- cédrières, prucheraies, pinèdes blanches et sapinières à bouleau jaune;
- chênaies, érablières et bétulaies jaunes;

à la suite d'un des traitements sylvicoles suivants :

- éclaircie commerciale;
- coupe d'ensemencement de la coupe progressive régulière;
- coupe d'ensemencement de la coupe progressive irrégulière;
- coupes de jardinage.

Tableau 8. Exemple de surface terrière résiduelle (position de retour sur la courbe *effets de traitement*) d'une bétulaie jaune à la suite de l'application de la coupe d'ensemencement de la coupe progressive à couvert permanent. Les positions de retour varient selon le traitement sylvicole, la surface terrière avant traitement et le type de forêt. De plus, ces dernières peuvent être adaptées aux conditions régionales.

Type de forêt	Surface terrière avant l'application de la CPI-CP (m ² /ha)	Position de retour sur la courbe <i>effets de traitement</i> (m ² /ha)
Bétulaies jaunes	22,0 à 23,9	15,0
	24,0 à 25,9	16,5
	26,0 à 29,9	18,0
	≥ 30,0	19,0

3. Courbe de plantation

Les courbes de plantation, présentées à l'annexe VI, sont spécifiques à chaque combinaison :

- d'essence – épinette noire, épinette blanche, pins (blanc, rouge et gris), mélèze hybride et peuplier hybride;
- de densité de mise en terre – 1 600 et 2 000 plants à l'hectare;
- d'indice de qualité de station.

L'indice de qualité de station²² (IQS), arrondi au mètre près, est déterminé pour chacune des combinaisons de domaine bioclimatique et de végétation potentielle²³ (tableau 9).

²² Indice de qualité de station : mesure de la qualité de la station basée sur la hauteur (m) des arbres dominants et codominants dans un peuplement à un âge donné.

²³ Guy Prigent, compilation interne. Les parcelles envahies par la végétation concurrente sont exclues du calcul de ces moyennes. Celles-ci sont généralement situées sur des stations fertiles (IQS généralement supérieurs à la moyenne), de sorte que les IQS moyens fournis ne sont pas surévalués.



Tableau 9. IQS moyen par essence, par végétation potentielle et par domaine bioclimatique des courbes *effets de traitement* de la plantation uniforme (compilation du Bureau du forestier en chef des données de Guy Prigent (DRF, MRN) et de la Direction générale des pépinières et des stations piscicoles).

Essence Végétation potentielle	Âge de référence de l'IQS ^a	IQS par domaine bioclimatique			
		Pessière	Sapinière à bouleau blanc	Sapinière à bouleau jaune	Érablière
Épinette noire	25				
ME1		7	7		
MJ2			9 ^b	8	7
MS2		8	8		
RE2		6	6	7	7 ^b
RS2		6	7	9 ^b	9 ^b
Épinette blanche	25				
FE3					11 ^b
MJ1				9 ^b	11
MJ2 (MS1)		10 ^b	11	9	11
MS2		10 ^b	10	10 ^b	10 ^b
RE2		6			
RS2			8		
Pin gris	15				
ME1		6	6		
MS2		5 ^b			
RE2		5	4	5	5 ^b
RS2		5	5	6	6 ^b
Pin blanc	25				
MJ1			8	8	9
MJ2				8	9
Pin rouge	15				
RP1				5	6

^a L'âge de référence de l'IQS est l'âge de la plantation pour l'épinette blanche et l'âge total (incluant les années passées en pépinière) pour les autres essences.

^b Ces IQS ont été estimés.

Pour l'épinette noire, l'épinette blanche, le pin gris, le pin rouge et le pin blanc, les IQS reposent sur des moyennes observées à partir du réseau de placettes de la Direction de la recherche forestière utilisé pour l'étude de la croissance et du rendement des plantations. Pour le mélèze hybride, la sélection de l'IQS de 15 repose sur une décision régionale. Pour le peuplier hybride, la notion d'IQS n'est pas utilisée.

Pour l'épinette noire, l'épinette blanche et le pin gris, les IQS moyens incluent les gains en hauteur attribuables à l'amélioration génétique des plants mis en terre. Les gains en hauteur des plants issus des vergers à graines de 1^{re} génération proviennent de compilations internes de chercheurs de la Direction de la recherche forestière²⁴ : 7,9 % pour l'épinette noire, 5 % pour l'épinette blanche et 5,9 % pour le pin gris.

Pour l'ensemble des essences, sauf le peuplier hybride, les courbes de plantation sont générées par les modèles de plantation issus de travaux de recherche présentés au tableau 10.

Les variables prévues par ces modèles sont :

- le volume marchand (m³/ha);
- la surface terrière marchande (m²/ha);

²⁴ Mireille Despots pour l'épinette noire, André Rainville pour l'épinette blanche et Mireille Despots et Roger Beaudoin pour le pin gris.

- la hauteur dominante (m);
- le nombre de tiges marchandes (n/ha).

À partir de ces dernières, trois variables sont calculées :

- l'accroissement annuel moyen (m), nécessaire pour déterminer l'âge de la maturité absolue²⁵;
- le diamètre quadratique moyen (cm);
- le volume moyen par tige (dm³/tige).

La méthode de production des courbes de plantation utilisées dans le calcul des possibilités forestières diffère selon l'essence.

Tableau 10. Modèle de plantation par essence et âge des plantations utilisées pour élaborer le modèle.

Essence	Modèle de plantation	Âge des plantations observées
Épinette noire	Prégent et al. (1996)	20 à 35 ans
Épinette blanche	Prégent et al. (2010)	20 à 50 ans
Pin gris	Bolghari et Bertrand (1984)	20 à 40 ans
Pin rouge	Bolghari et Bertrand (1984)	20 à 45 ans
Pin blanc	Bolghari et Bertrand (1984)	20 à 40 ans
Mélèze hybride	Bolghari et Bertrand (1984)	20 à 45 ans

Épinette noire, épinette blanche et pin gris

La méthode de production des courbes est inspirée de celle des tables de rendement de l'annexe I du *Manuel d'aménagement forestier*²⁶. Ces tables ne conviennent pas au présent calcul car les densités de mise en terre (tiges/ha) sont différentes. De plus, ces tables existent uniquement pour le volume marchand.

Conformément aux recommandations de Guy Prégent, chercheur à la Direction de la recherche forestière, ces modèles sont utilisés pour générer les courbes pour la période allant de 20 à 40 ou 60 ans selon l'essence (âges en indice [ex. : $V_{15 \text{ à } 60 \text{ ans}}$] de la colonne « modèle de plantation » du tableau 12). Afin que ces courbes couvrent l'horizon de temps nécessaire au calcul des possibilités forestières, les valeurs ont été extrapolées à l'aide de modèles de régression entre la variable et l'âge de la plantation²⁷ (tableau 11; figure 9).

Tableau 11. Modèle de régression utilisé pour extrapoler les valeurs des variables des courbes de plantation d'épinette noire, d'épinette blanche et de pin gris en fonction de l'âge.

Variable	Modèle de régression ^a
Volume marchand (m ³ /ha)	Polynomiale du 4 ^e degré
Accroissement annuel moyen (m)	Polynomiale du 2 ^e degré
Diamètre quadratique moyen (cm)	Linéaire
Volume moyen par tige (dm ³ /tige)	Polynomiale du 2 ^e degré
Nombre de tiges marchandes (tiges/ha)	Volume marchand / Volume moyen par tige
Surface terrière marchande (m ² /ha)	$\pi \times (\text{Diamètre quadratique moyen}/2)^2 \times \text{Nbre de tiges marchandes}$
Hauteur dominante (m)	Linéaire

²⁵ La maturité absolue est l'âge auquel l'accroissement annuel moyen en volume marchand (dhp égal ou supérieur à 9 cm) de la strate est maximal. Aux fins du calcul, la valeur de cette variable est égale à 0 lorsque la maturité absolue est atteinte. Des valeurs négatives sont obtenues pour les périodes précédant l'atteinte de la maturité absolue et des valeurs positives pour les périodes suivant la maturité absolue.

²⁶ MRN (1998).

²⁷ L'âge de la plantation inclut les années passées en pépinière sauf pour l'épinette blanche.



Tableau 12. Âge auquel le volume est prévu par le modèle de plantation ainsi que les valeurs cibles utilisées pour élaborer le modèle de régression du volume pour les courbes de plantation de l'épinette noire (EPN), de l'épinette blanche (EPB), du pin gris (PIG), du pin rouge (PIR) et du pin blanc (PIB) (*Manuel : Manuel d'aménagement forestier* (MRN 1998); V : Volume; AAM : Accroissement annuel moyen).

Ess. Modèle de plantation		Valeur cible pour la régression	
		Cible	Explication
EPN	V _{20 à 60 ans} = Prégent et al. (1996)	V _{80 et 130 ans} = V _{60 ans} + 25 %	Le volume à 80 et à 130 ans est 25 % plus élevé que le volume à 60 ans. 25 % = $V_{60 \text{ ans}}/V_{80 \text{ ans}} \times 100$ de la table de l'EPN d'IQS 7 du <i>Manuel</i> .
		V _{170 ans} = V _{60 ans}	Le volume à 170 ans est égal au volume à 60 ans de la table de l'EPN d'IQS 7 du <i>Manuel</i>
EPB	V _{15 à 60 ans} = Prégent et al. (2010)	V _{AAM=0} = V _{60 ans} + 25 % ^b	Lorsque l'AAM est égal à 0, le volume est 25 % plus élevé que le volume à 60 ans. 25 % = $V_{60 \text{ ans}}/V_{110 \text{ ans}} \times 100$ de la table de l'EPB d'IQS 10 du <i>Manuel</i> .
		V _{170 ans} = 0	Le volume à 170 ans est égal à 0, tel que la table de l'EPB d'IQS 10 du <i>Manuel</i> .
PIG	V _{15 à 40 ans} = Bolghari et Bertrand (1984)	V _{110 ans} = V _{55 ans} + 15 %	Le volume à 110 ans est 25 % plus élevé que le volume à 55 ans. 15 % = $V_{55 \text{ ans}}/V_{110 \text{ ans}} \times 100$ de la table du PIG d'IQS 7 du <i>Manuel</i> .
		V _{45 à 70 ans} = AAM x Âge _{pl}	Les volumes de 45 à 70 ans correspondent à l'AAM des 5 dernières années multiplié par l'âge de la plantation (de 45 à 70 ans).
		V _{155 ans} = 0	Le volume à 170 ans est égal à 0, tel que la table du PIG d'IQS 10 du <i>Manuel</i> .

^a Pour tous les modèles de régression, le R² est toujours supérieur à 0,99.

Ces régressions sont construites à partir des prévisions générées par les modèles de plantation aux âges observés. Compte tenu du type de régression utilisé pour l'extrapolation du volume (polynomiale du 4^e degré), l'ajout de nouveaux points, des valeurs « cibles », est nécessaire à des âges supérieurs à l'âge maximal observé (tableau 12). Le principe qui a guidé le choix des valeurs cibles est d'obtenir une courbe semblable à celle du *Manuel d'aménagement forestier* pour une même essence. Pour l'épinette noire, par exemple, la première valeur cible est le volume à 80 ans. Ce volume est équivalent au volume prévu par le modèle de Prégent et al. (1996) à 60 ans plus 25 %. Ce pourcentage correspond à la différence entre le volume à 60 et 80 ans de la table de rendement du *Manuel d'aménagement forestier* : le volume à 80 ans est 25 % plus élevé que le volume à 60 ans. La méthode de détermination des autres valeurs cibles, inspirée des tables de rendement du *Manuel d'aménagement forestier*, varie selon l'essence (tableau 12).

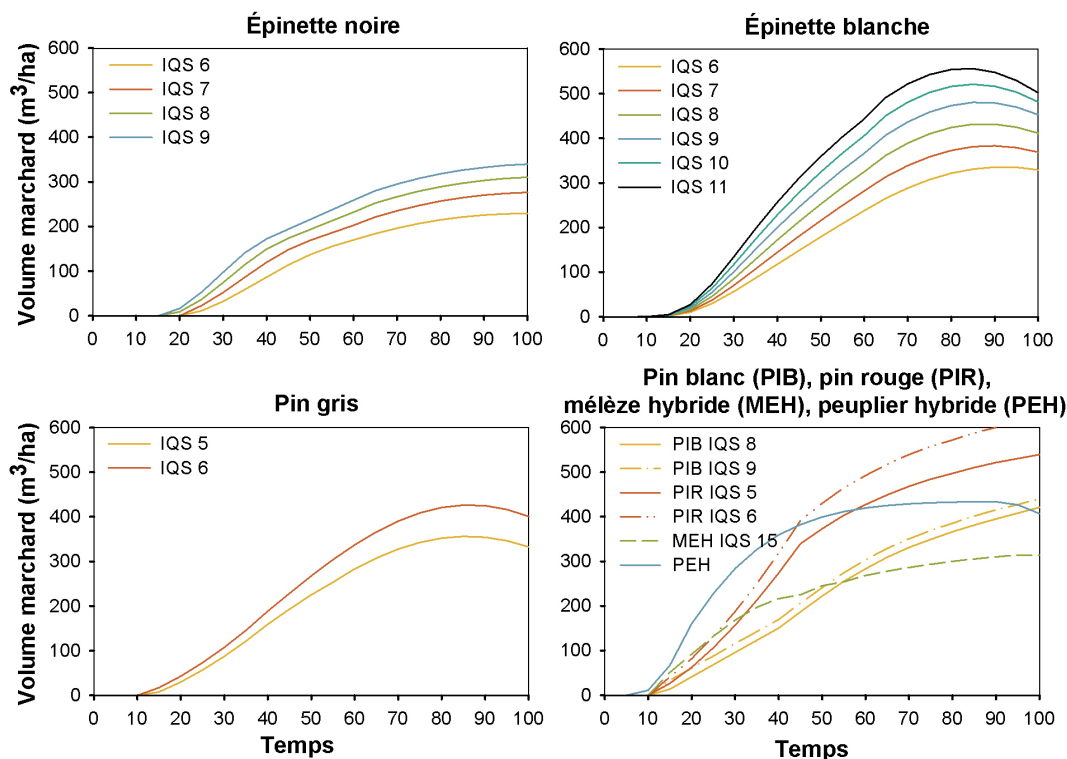


Figure 9. Courbes de plantation (2 000 plants à l'hectare) en fonction de l'essence mise en terre et de l'IQS.

Mélèze hybride, pin blanc et pin rouge

Pour le mélèze hybride²⁸, le pin blanc et le pin rouge, l'extrapolation de la courbe du volume est la même que celle du *Manuel d'aménagement forestier* d'IQS et de densité appropriée. Les autres variables sont extrapolées à l'aide de modèles de régression présentés au tableau 13.

Tableau 13. Modèle de régression utilisé pour extrapoler les valeurs des variables des courbes de plantation du mélèze hybride, du pin blanc et du pin rouge en fonction de l'âge.

Variable	Modèle de régression ^a
Diamètre quadratique moyen (cm)	$2 \times (\text{Surface terrière} / (\text{nombre de tiges} \times \pi))^{1/2} \times 100$
Volume moyen par tige (dm ³ /tige)	(Volume / nombre de tiges) × 1000
Nombre de tiges marchandes (tiges/ha)	Décroissance de 5 % par période
Surface terrière marchande (m ² /ha)	Ratio du volume
Hauteur dominante (m)	Linéaire

^a Pour tous les modèles de régression, le R² est toujours supérieur à 0,99.

Peuplier hybride

Pour le peuplier hybride, la courbe du volume est celle élaborée pour l'épinette blanche d'IQS 8 d'une densité de 1 600 plants à l'hectare. Toutefois, elle est décalée de 20 ans pour que le volume à l'âge de maturité absolue soit égal celui du *Manuel d'aménagement forestier* pour la zone résineuse, c'est-à-dire 160 m³/ha à 20 ans. L'ensemble des valeurs des autres variables de la courbe sont également décalées de 20 ans.

²⁸ Table des mélèzes du Japon et d'Europe en plantation du *Manuel d'aménagement forestier*, IQS 15, densité de 2 000 plants à l'hectare.



Conclusion

Les travaux de recherche récents ont amélioré et simplifié la modélisation de la croissance des peuplements et la prévision à long terme de leur volume. De par les modifications apportées au processus, le calcul de la possibilité forestière repose désormais sur une plus grande précision de l'évolution des volumes de bois. Des améliorations doivent être apportées en ce qui a trait à la composition et à l'évolution des strates de moins de 7 m de hauteur. À l'issue du présent exercice de détermination des possibilités forestières pour la période 2013-2018, le Forestier en chef, en collaboration avec la communauté scientifique, identifiera les méthodes à améliorer et les besoins de connaissances.

Références

- Auger, I., M. Fortin, D. Pothier et J.-P. Saucier. 2011. Une nouvelle génération de modèles de prévision pour les forêts du Québec. *Avis de recherche forestière*, n° 32, octobre 2011, 2 p.
<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Avis32.pdf> (consulté le 15 juin 2012)
- Bolghari, H.A. et V. Bertrand. 1984. Tables préliminaires de production des principales essences résineuses plantées dans la partie centrale du sud du Québec. *Mémoire n°79*. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Service de la recherche, Québec, Qc, 392 p.
- Bureau du forestier en chef. *En préparation*. Manuel de détermination des possibilités forestières 2008-2013. Gouvernement du Québec, Roberval, Qc.
- Comité consultatif scientifique du manuel d'aménagement forestier. 2003. Éclaircie commerciale pour le groupe de production prioritaire SEPM. *Avis scientifique*. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction de la recherche forestière, 79 p.
- Comité scientifique chargé d'examiner le calcul de la possibilité forestière. 2004. Rapport du Comité scientifique chargé d'examiner le calcul de la possibilité forestière. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Québec, Qc, 376 p.
- Fortin, M., D. Pin, G. Weber et G. Gagnon. *En préparation*. Using a segmented logistic model to predict which trees are to be harvested in forest growth forecasts.
- Fortin, M. et L. Langevin. 2010. ARTÉMIS-2009 – un modèle de croissance basé sur une approche par tiges individuelles pour les forêts du Québec. *Mémoire de recherche forestière no 156*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière, Québec, Qc, 48 p.
- Fortin, M., J. DeBlois, S. Bernier et G. Blais. 2007. Mise au point d'un tarif de cubage général pour les forêts québécoises : une approche pour mieux évaluer l'incertitude associée aux prévisions. *The Forestry Chronicle*, 83(5) : 754-765.
- Fortin, M., S. Bernier, J.-P. Saucier et F. Labbé. 2009. Une relation hauteur-diamètre tenant compte de l'influence de la station et du climat pour 20 espèces commerciales du Québec. *Mémoire de recherche forestière n° 153*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière, Québec, Qc, 22 p.
- Garet, J., D. Pothier et M. Bouchard. 2009. Predicting the long-term yield trajectory of black spruce stands using time since fire. *Forest Ecology and Management*, 257 : 2189-2197.
- Ministère des Ressources naturelles. 1998. Manuel d'aménagement forestier. Document d'annexes. Annexe 1. Les tables de rendement. Mise à jour septembre 2000. Gouvernement du Québec, Direction des programmes forestiers, Charlesbourg, Québec.
- Ministère des Ressources naturelles. *Sous presse*. Le guide sylvicole du Québec. Gouvernement du Québec, Québec, Qc.
- Poulin, J. *En préparation a*. Strates d'aménagement. Fascicule 2.2. *Dans* Bureau du forestier en chef. Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018. Gouvernement du Québec, Roberval, Qc.
- Poulin, J. *En préparation b*. Stratégie sylvicole. Fascicule 2.3. *Dans* Bureau du forestier en chef. Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018. Gouvernement du Québec, Roberval, Qc.
- Pothier, D. et I. Auger. 2011. NATURA-2009 – un modèle de prévision de la croissance à l'échelle du peuplement pour les forêts du Québec. *Mémoire de recherche forestière n° 163*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière, Québec, Qc, 76 p.
- Prégent, G., V. Bertrand et L. Charette. 1996. Tables préliminaires de rendement pour les plantations d'épinette noire au Québec. *Mémoire de recherche forestière n°118*. Gouvernement du Québec, Québec, Qc, 88 p.
- Prégent, G., G. Picher et I. Auger. 2010. Tarif de cubage, tables de rendement et modèles de croissance pour les plantations d'épinette blanche au Québec. *Mémoire de recherche n°160*. Gouvernement du Québec, Québec, Qc, 82 p.



Annexe I. Regroupements d'essences utilisés par ARTÉMIS-2009

Ces tableaux, extraits de l'annexe III de Fortin et Langevin (2009), rapportent le regroupement d'essences utilisé par le modèle de croissance ARTÉMIS-2009 pour chaque essence d'une végétation potentielle.

Végétations potentielles à dominance de feuillus

Espèce	Code d'espèce		Végétation potentielle											
	FC1	FE1	FE2	FE3	FE4	FE5	FE6	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7
Bouleau gris	FEU	F_1	F_1	AUT	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1
Bouleau jaune	FEU	F0R	BOJ	BOJ	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F_0
Bouleau à papier	FEU	F_1	BOP	BOP	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1
Caryer cordiforme	FEU	F_1	F_1	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1
Caryer à fruits doux	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F_0
Charme de Caroline	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F_0
Micocoulier occidental	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F_0
Cerisier tardif	FEU	F_1	CET	CET	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1
Chênes (sp.)	CHX	F_1	F_1	F_1	CHX	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1	CHX	F_1	CHX	F_1
Aubépinnes (sp.)	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F_0
Épinettes (sp.)	RES	F0R	EPX	EPX	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	EPX	RES
Érable argenté	FEU	F_1	F_1	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1
Érable négondo	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F_0
Érable noir	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F_0
Érable de Pennsylvanie	FEU	F0R	F0R	F0R	ERP	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F_0
Érable rouge	ERR	F0R	ERR	ERR	AUT	ERR	AUT	ERR	AUT	ERR	AUT	ERR	AUT	F_0
Érable à sucre	FEU	ERS	ERS	ERS	ERS	ERS	ERS	ERS	ERS	ERS	ERS	ERS	ERS	F_0
Frêne d'Amérique	FEU	F0R	F0R	F0R	FRA	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F_0
Frêne noir	FEU	F0R	F0R	F0R	FRN	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F_0
Frêne de Pennsylvanie	FEU	F0R	F0R	F0R	FRP	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F_0
Hêtre à grandes feuilles	FEU	F0R	HEG	HEG	HEG	HEG	HEG	HEG	HEG	HEG	HEG	HEG	HEG	F_0
Génévrier de Virginie	RES	F0R	F0R	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	RES
Pommiers (sp.)	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F_0
Mélèze japonais	RES	F0R	F0R	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	F0R	AUT	RES

Végétations potentielles à dominance de feuillus (suite)

Espèce	Végétation potentielle									
	Code d'espèce	FC1	FE1	FE2	FE3	FE4	FE5	FE6	FOI	
Méleze laricin	MEL	RES	F0R	F0R	AUT	AUT	F0R	AUT	RES	
Méleze européen	MEU	RES	F0R	F0R	AUT	AUT	F0R	AUT	RES	
Noyer cendré	NOC	FEU	F_1	F_1	AUT	AUT	F_1	AUT	F_1	
Orme d'Amérique	ORA	FEU	F0R	F0R	AUT	AUT	F0R	AUT	F_0	
Orme rouge	ORR	FEU	F0R	F0R	AUT	AUT	F0R	AUT	F_0	
Orme de Thomas	ORT	FEU	F0R	F0R	AUT	AUT	F0R	AUT	F_0	
Ostryer de Virginie	OSV	FEU	OSV	OSV	OSV	AUT	OSV	OSV	F_0	
Peupliers (sp.)	PEU	FEU	F_1	PEU	PEU	AUT	F_1	PEU	F_1	
Pin rigide	PID	RES	F0R	F0R	AUT	AUT	F0R	AUT	RES	
Pin gris	PIG	RES	F0R	F0R	AUT	AUT	F0R	AUT	RES	
Pins (rouge et blanc)	PIN	RES	F0R	F0R	AUT	AUT	F0R	PIN	RES	
Pin sylvestre	PIS	RES	F0R	F0R	AUT	AUT	F0R	AUT	RES	
Cerisier de Pennsylvanie	PRP	FEU	F_1	F_1	PRP	AUT	F_1	AUT	F_1	
Pruche	PRU	RES	F0R	PRU	PRU	AUT	F0R	AUT	RES	
Sapin baumier	SAB	RES	F0R	SAB	SAB	AUT	SAB	SAB	RES	
Saulles (sp.)	SAL	FEU	F_1	F_1	AUT	AUT	F_1	AUT	F_1	
Sorbier d'Amérique	SOA	FEU	F0R	F0R	AUT	AUT	F0R	AUT	F_0	
Sorbier des montagnes	SOD	FEU	F0R	F0R	AUT	AUT	F0R	AUT	F_0	
Thuya occidental	THO	RES	F0R	F0R	THO	AUT	F0R	AUT	RES	
Tilleul d'Amérique	TIL	FEU	F0R	TIL	AUT	AUT	F0R	AUT	F_0	

N.B. L'appellation « F_1 » désigne les autres feuillus intolérants, « F_0 », les autres feuillus tolérants, « RES », les autres résineux, « F0R », les autres feuillus tolérants et autres résineux regroupés, « FEU », les autres feuillus (tolérants et intolérants regroupés) et « AUT », les autres espèces



Végétations potentielles à dominance mixte

Espèce	Code d'espèce		Végétation potentielle					
	MF1	MJ1	MJ2	MS1	MS2	MS6		
Bouleau gris	F_1	F_1	F_1	F_1	BOG	FEU		
Bouleau jaune	BOJ	BOJ	BOJ	BOJ	BOJ	FEU		
Bouleau à papier	F_1	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP		
Caryer cordiforme	F_1	F_1	F_1	F_1	AUT	FEU		
Caryer à fruits doux	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		
Charme de Caroline	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		
Micooulier occidental	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		
Cerisier tardif	F_1	F_1	F_1	F_1	AUT	FEU		
Chênes (sp.)	F_1	CHX	F_1	F_1	AUT	FEU		
Aubépines (sp.)	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		
Épinettes (sp.)	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX		
Érable argenté	F_1	F_1	F_1	F_1	AUT	FEU		
Érable négondo	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		
Érable noir	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		
Érable de Pennsylvanie	F0R	ERP	ERP	ERP	AUT	FEU		
Érable rouge	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR		
Érable à sucre	F0R	ERS	ERS	ERS	AUT	FEU		
Frêne d'Amérique	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		
Frêne noir	FRN	FRN	FRN	FRN	AUT	FEU		
Frêne de Pennsylvanie	FRP	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		
Hêtre à grandes feuilles	HEG	HEG	F0R	F0R	AUT	FEU		
Génévrier de Virginie	JUV	F0R	F0R	F0R	AUT	RES		
Pommiers (sp.)	MAS	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		
Mélèze japonais	MEJ	F0R	F0R	F0R	AUT	RES		

Végétations potentielles à dominance mixte (suite)

Espèce	Code d'espèce		Végétation potentielle					
	MF1	MJ1	MJ2	MS1	MS2	MS6		
Méleze laricin	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	RES		
Méleze européen	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	RES		
Noyer cendré	F_1	F_1	F_1	F_1	AUT	FEU		
Orme d'Amérique	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		
Orme rouge	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		
Orme de Thomas	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		
Ostryer de Virginie	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		
Peupliers (sp.)	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU		
Pin rigide	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	RES		
Pin gris	F0R	F0R	F0R	F0R	PIG	RES		
Pins (rouge et blanc)	F0R	F0R	PIN	F0R	PIN	RES		
Pin sylvestre	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	RES		
Cerisier de Pennsylvanie	F_1	PRP	PRP	PRP	PRP	PRP		
Pruche	F0R	PRU	PRU	F0R	AUT	RES		
Sapin baumier	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB		
Saules (sp.)	F_1	F_1	F_1	F_1	SAL	FEU		
Sorbier d'Amérique	F0R	F0R	SOA	SOA	SOA	FEU		
Sorbier des montagnes	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		
Thuja occidentale	F0R	THO	THO	THO	THO	RES		
Tilleul d'Amérique	F0R	F0R	F0R	F0R	AUT	FEU		

N.B. L'appellation « F_1 » désigne les autres feuillus intolérants, « F_0 », les autres feuillus tolérants, « RES », les autres résineux, « F0R », les autres feuillus tolérants et autres résineux regroupés, « FEU », les autres feuillus (tolérants et intolérants regroupés) et « AUT », les autres espèces



Végétations potentielles à dominance de résineux

Espèce	Code d'espèce			Végétation potentielle							
	RB1	RC3	RE1	RE2	RE3	RP1	RS1	RS2	RS3	RS5	RT1
Bouleau gris	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_1	AUT	F_1	FEU	FEU
Bouleau jaune	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	BOJ	AUT	F_0	FEU	BOJ
Bouleau à papier	AUT	BOP	AUT	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	FEU
Caryer cordiforme	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_1	AUT	F_1	FEU	FEU
Caryer à fruits doux	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_0	AUT	F_0	FEU	FEU
Charme de Caroline	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_0	AUT	F_0	FEU	FEU
Micocoulier occidental	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_0	AUT	F_0	FEU	FEU
Cerisier tardif	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_1	AUT	F_1	FEU	FEU
Chênes (sp.)	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_1	AUT	F_1	FEU	FEU
Aubépines (sp.)	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_0	AUT	F_0	FEU	FEU
Épinettes (sp.)	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	RES
Érable argenté	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_1	AUT	F_1	FEU	FEU
Érable négondo	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_0	AUT	F_0	FEU	FEU
Érable noir	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_0	AUT	F_0	FEU	FEU
Érable de Pennsylvanie	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_0	AUT	F_0	FEU	FEU
Érable rouge	AUT	ERR	AUT	ERR	FEU	ERR	ERR	ERR	F_0	ERR	ERR
Érable à sucre	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_0	AUT	F_0	FEU	FEU
Frêne d'Amérique	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_0	AUT	F_0	FEU	FEU
Frêne noir	AUT	FRN	AUT	AUT	FEU	FEU	FRN	AUT	F_0	FEU	FEU
Frêne de Pennsylvanie	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_0	AUT	F_0	FEU	FEU
Hêtre à grandes feuilles	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_0	AUT	F_0	FEU	FEU
Génévrier de Virginie	AUT	RES	AUT	AUT	RES	RES	RES	AUT	RES	RES	RES
Pommiers (sp.)	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	F_0	AUT	F_0	FEU	FEU
Mélèze japonais	AUT	RES	AUT	AUT	RES	RES	RES	AUT	RES	RES	RES

Végétations potentielles à dominance de résineux (suite)

Espèce	Code d'espèce										Végétation potentielle												
	RBI	RC3	RE1	RE2	RE3	RPI	RS1	RS2	RS3	RS5	RTI	RBI	RC3	RE1	RE2	RE3	RPI	RS1	RS2	RS3	RS5	RTI	
Mélèze laricin	AUT	RES	AUT	MEL	MEL	RES	RES	MEL	MEL	RES	RES	MEL	RES	RES	MEL	RES	RES	RES	RES	RES	RES	RES	RES
Mélèze européen	AUT	RES	AUT	AUT	RES	RES	RES	AUT	RES	RES	RES	AUT	RES	RES	AUT	RES	RES	RES	AUT	RES	RES	RES	RES
Noyer cendré	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	F_1	AUT	FEU	F_1	AUT	F_1	F_1	FEU	FEU	FEU
Orme d'Amérique	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	F_0	AUT	FEU	F_0	AUT	F_0	F_0	FEU	FEU	FEU
Orme rouge	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	F_0	AUT	FEU	F_0	AUT	F_0	F_0	FEU	FEU	FEU
Orme de Thomas	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	F_0	AUT	FEU	F_0	AUT	F_0	F_0	FEU	FEU	FEU
Ostryer de Virginie	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	F_0	AUT	FEU	F_0	AUT	F_0	F_0	FEU	FEU	FEU
Peupliers (sp.)	AUT	PEU	AUT	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	F_1	PEU	PEU	FEU
Pin rigide	AUT	RES	AUT	AUT	RES	RES	RES	AUT	RES	RES	RES	AUT	RES	RES	AUT	RES	RES	RES	AUT	RES	RES	RES	RES
Pin gris	AUT	RES	PIG	PIG	RES	RES	RES	PIG	RES	RES	RES	PIG	RES	RES	PIG	RES	RES	RES	PIG	RES	RES	RES	RES
Pins (rouge et blanc)	AUT	RES	AUT	PIN	RES	RES	RES	PIN	RES	RES	RES	PIN	RES	PIN	PIN	RES	PIN	PIN	PIN	RES	RES	RES	RES
Pin sylvestre	AUT	RES	AUT	AUT	RES	RES	RES	AUT	RES	RES	RES	AUT	RES	RES	AUT	RES	RES	RES	AUT	RES	RES	RES	RES
Cerisier de Pennsylvanie	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	F_1	PRP	FEU	F_1	PRP	F_1	F_1	FEU	FEU	FEU
Pruche	AUT	RES	AUT	AUT	RES	RES	RES	AUT	RES	RES	RES	AUT	RES	RES	AUT	RES	RES	AUT	RES	RES	RES	RES	PRU
Sapin baumier	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB
Saules (sp.)	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	F_1	SAL	FEU	F_1	SAL	F_1	F_1	FEU	FEU	FEU
Sorbier d'Amérique	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	F_0	AUT	FEU	F_0	AUT	F_0	F_0	FEU	FEU	FEU
Sorbier des montagnes	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	F_0	AUT	FEU	F_0	AUT	F_0	F_0	FEU	FEU	FEU
Thuya occidentale	AUT	THO	AUT	AUT	THO	THO	THO	AUT	THO	THO	THO	AUT	THO	THO	THO	THO	THO	THO	THO	THO	RES	RES	RES
Tilleul d'Amérique	AUT	FEU	AUT	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	FEU	FEU	AUT	FEU	F_0	AUT	FEU	F_0	AUT	F_0	F_0	FEU	FEU	FEU

N.B. L'appellation « F_1 » désigne les autres feuillus intolérants, « F_0 », les autres feuillus tolérants, « RES », les autres résineux, « F0R », les autres feuillus tolérants et autres résineux regroupés, « FEU », les autres feuillus (tolérants et intolérants regroupés) et « AUT », les autres espèces.



Annexe II. Élaboration des modèles de prélèvement de ARTÉMIS-2009

Par Mathieu Fortin

Mise en contexte

Les modèles de prélèvement sont utiles à l'aménagement forestier dans le sens qu'ils évitent toute subjectivité dans la quantification de l'effet des traitements sylvicoles. On évite ainsi de sélectionner les arbres à récolter uniquement sur une base théorique. Les modèles les sélectionnent plutôt en se basant sur l'historique de récolte associé à ces traitements donnés. En contrepartie, il est évident que les nouveaux traitements ne peuvent être modélisés puisqu'aucune donnée n'est disponible. Un suivi minimal de l'intervention est requis pour pouvoir modéliser le prélèvement.

Base de données

Les données mises à profit dans cette étude proviennent des suivis d'intervention de coupes partielles. Afin de vérifier si les traitements sylvicoles répondent aux normes en vigueur, des placettes échantillons à rayon variable sont établies à l'aide d'un prisme de facteur 2 dans des secteurs d'intervention entre 1988 et 2005. Dans chaque placette, tous les arbres de 9,1 cm et plus en diamètre à hauteur de poitrine (1,3 m de hauteur) ont été systématiquement identifiés. Leur espèce ainsi que leur classe de diamètre (2 cm de largeur) ont été notées. L'identification du centre de la placette ainsi que celle des arbres est demeurée la plus discrète possible afin d'éviter un biais dans l'application du traitement. Après l'intervention, les placettes ont été revisitées et les arbres abattus ont été dénombrés. Ce suivi fournit donc l'état de l'arbre après l'intervention, à savoir s'il a été coupé ou s'il était toujours sur pied, en plus de son espèce et de son diamètre avant coupe. Les compilations à l'échelle de la placette permettent également d'estimer la surface terrière locale ainsi que la densité de tiges.

Nous disposons de suffisamment d'observations pour six traitements :

- la coupe d'amélioration;
- la coupe d'ensemencement;
- la coupe de jardinage;
- la coupe partielle;
- l'éclaircie commerciale;
- l'éclaircie sélective,

pour un total de 763 361 observations d'arbres réparties dans 59 794 placettes. Le nombre d'observations le permettant, le traitement de coupe de jardinage a pu être subdivisé en cinq variantes, soit :

- la coupe de jardinage après 2004;
- la coupe de jardinage après 2004 avec modalités cerf;
- la coupe de jardinage avant 1997;
- la coupe de jardinage entre 1997 et 2004;
- la coupe de jardinage entre 1997 et 2004 avec modalités cerf.

Modélisation du prélèvement

Le prélèvement est une variable aléatoire de type binaire. Dans le cas présent, on pourrait définir cette variable comme étant y_{ij} où i et j sont respectivement l'indice de la placette et de l'arbre. La variable y_{ij} prend donc la valeur de 1 lorsque l'arbre a été coupé et de 0 lorsqu'il est toujours sur pied après l'intervention. Les modèles logistiques sont adaptés à la prédiction de variables binaires. On peut définir ce genre de modèle de la façon suivante :

$$[1] \quad \Pr(y_{ij} = 1 \mid \mathbf{x}_{ij}; \boldsymbol{\beta}) = \frac{e^{\mathbf{x}_{ij}\boldsymbol{\beta}}}{1 + e^{\mathbf{x}_{ij}\boldsymbol{\beta}}}$$

où \mathbf{x}_{ij} est un vecteur rangée de variables explicatives et $\boldsymbol{\beta}$ est un vecteur colonne de paramètres. Il est à noter que le modèle 1 utilise une fonction lien de type logit, laquelle permet de restreindre les prévisions du modèle à la plage $[0, 1]$.

Les éléments de $\boldsymbol{\beta}$ sont évidemment inconnus, mais peuvent être estimés par la méthode du maximum de vraisemblance. À l'aide de cette approche, les modèles qui s'ajustaient le mieux aux données étaient les suivants :

- pour la coupe d'amélioration :

$$[2a] \quad \Pr(y_{ij} = 1 \mid \mathbf{x}_{ij}; \boldsymbol{\beta}) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + \beta_{2,s}d_{ij} + (\beta_3 + \beta_4 m_{ij})d_{ij}^2 + \beta_5 \ln(N_i + 1)}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + \beta_{2,s}d_{ij} + (\beta_3 + \beta_4 m_{ij})d_{ij}^2 + \beta_5 \ln(N_i + 1)}}$$

- pour la coupe d'ensemencement :

$$[2b] \quad \Pr(y_{ij} = 1 \mid \mathbf{x}_{ij}; \boldsymbol{\beta}) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + (\beta_{2,s} + \beta_3 m_{ij})d_{ij} + (\beta_{4,s} + \beta_5 m_{ij})d_{ij}^2 + \beta_6 \ln(N_i + 1)}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + (\beta_{2,s} + \beta_3 m_{ij})d_{ij} + (\beta_{4,s} + \beta_5 m_{ij})d_{ij}^2 + \beta_6 \ln(N_i + 1)}}$$



- pour la coupe de jardinage avant 1997 :

$$[2c] \quad \Pr(y_{ij} = 1 | \mathbf{x}_{ij}; \boldsymbol{\beta}) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + (\beta_{2,s} + \beta_{3,s}m_{ij})d_{ij} + (\beta_{4,s} + \beta_{5,s}m_{ij})d_{ij}^2 + \beta_6 m_{ij}N_i}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + (\beta_{2,s} + \beta_{3,s}m_{ij})d_{ij} + (\beta_{4,s} + \beta_{5,s}m_{ij})d_{ij}^2 + \beta_6 m_{ij}N_i}}$$

- pour la coupe de jardinage entre 1997 et 2004 :

$$[2d] \quad \Pr(y_{ij} = 1 | \mathbf{x}_{ij}; \boldsymbol{\beta}) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + (\beta_{2,s} + \beta_{3,s}m_{ij})d_{ij} + (\beta_{4,s} + \beta_{5,s}m_{ij})d_{ij}^2 + \beta_6 m_{ij}N_i}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + (\beta_{2,s} + \beta_{3,s}m_{ij})d_{ij} + (\beta_{4,s} + \beta_{5,s}m_{ij})d_{ij}^2 + \beta_6 m_{ij}N_i}}$$

- pour la coupe de jardinage entre 1997 et 2004 avec modalités cerf :

$$[2e] \quad \Pr(y_{ij} = 1 | \mathbf{x}_{ij}; \boldsymbol{\beta}) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + (\beta_{2,s} + \beta_{3,s}m_{ij})d_{ij} + \beta_{4,s}d_{ij}^2 + \beta_5 m_{ij}N_i}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + (\beta_{2,s} + \beta_{3,s}m_{ij})d_{ij} + \beta_{4,s}d_{ij}^2 + \beta_5 m_{ij}N_i}}$$

- pour la coupe de jardinage après 2004 :

$$[2f] \quad \Pr(y_{ij} = 1 | \mathbf{x}_{ij}; \boldsymbol{\beta}) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + (\beta_{2,s} + \beta_{3,s}m_{ij})d_{ij} + (\beta_{4,s} + \beta_{5,s}m_{ij})d_{ij}^2 + \beta_6 m_{ij}N_i}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + (\beta_{2,s} + \beta_{3,s}m_{ij})d_{ij} + (\beta_{4,s} + \beta_{5,s}m_{ij})d_{ij}^2 + \beta_6 m_{ij}N_i}}$$

- pour la coupe de jardinage après 2004 avec modalités cerf :

$$[2g] \quad \Pr(y_{ij} = 1 | \mathbf{x}_{ij}; \boldsymbol{\beta}) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + \beta_{2,s}d_{ij} + \beta_{3,s}d_{ij}^2 + \beta_4 m_{ij}N_i}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + \beta_{2,s}d_{ij} + \beta_{3,s}d_{ij}^2 + \beta_4 m_{ij}N_i}}$$

- pour la coupe partielle :

$$[2h] \quad \Pr(y_{ij} = 1 | \mathbf{x}_{ij}; \boldsymbol{\beta}) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + \beta_{2,s}d_{ij} + (\beta_{3,s} + \beta_4 m_{ij})d_{ij}^2 + \beta_5 \ln(N_i + 1)}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + \beta_{2,s}d_{ij} + (\beta_{3,s} + \beta_4 m_{ij})d_{ij}^2 + \beta_5 \ln(N_i + 1)}}$$

- pour l'éclaircie commerciale :

$$[2i] \quad \Pr(y_{ij} = 1 | \mathbf{x}_{ij}; \boldsymbol{\beta}) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + (\beta_{2,s} + \beta_3 m_{ij})d_{ij}}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + (\beta_{2,s} + \beta_3 m_{ij})d_{ij}}}$$

- pour l'éclaircie sélective :

$$[2j] \quad \Pr(y_{ij} = 1 | \mathbf{x}_{ij}; \boldsymbol{\beta}) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + \beta_2 d_{ij} + \beta_3 d_{ij}^2}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_{1,s} + \beta_2 d_{ij} + \beta_3 d_{ij}^2}}$$

où d_{ij} correspond au diamètre de l'arbre j dans la placette i (cm) auquel on soustrait 23 cm; m_{ij} correspond à une variable binaire qui prend la valeur de 1 si l'arbre a un diamètre supérieur à 23 ou 0 dans le cas contraire, N_i est la densité de tiges à l'hectare de la placette (tiges ha⁻¹) et s est un indice désignant l'espèce ou le groupe d'essences de l'arbre. La limite de 23 cm correspond au seuil marchand chez les feuillus et nous observons deux tendances bien distinctes au-dessus et en dessous de ce seuil. La création des variables d_{ij} et m_{ij} permettait de bien tenir compte de ces deux tendances.

Annexe III. Modèle de succession forestière SUCCÈS-2009

Description du modèle

Le modèle de succession forestière SUCCÈS-2009 sert à prédire la composition des strates d'aménagement qui ont subi une perturbation naturelle sévère ou une intervention sylvicole de la famille des coupes totales. Ce modèle fonctionne en trois étapes : 1) il détermine la probabilité de succession vers un stade évolutif donné; 2) il détermine la composition en essences et la distribution des diamètres de la strate traitée; 3) enfin, il estime le temps nécessaire au nouveau peuplement pour atteindre 7 m de hauteur en fonction de l'IQS potentiel et du délai de régénération. Aux fins du calcul, SUCCÈS-2009 est utilisé pour déterminer la composition future des strates de plus de 7 m de hauteur actuelles et des strates de moins de sept mètres de hauteur, afin de leur attribuer un type de forêt existant. Par contre, SUCCÈS-2009 n'est pas utilisé pour prédire le temps nécessaire pour l'atteinte de certaines hauteurs cibles, étant donné que pour l'instant, cette partie du modèle fonctionne avec les IQS potentiels seulement.

La succession est prédite en fonction du dhp et du nombre de tiges par essence ainsi qu'en fonction des variables de perturbation (sévere ou totale), de classification écologique (sous-domaine bioclimatique, végétation potentielle, régime hydrique et texture), climatiques (température, précipitation, etc.) et spatio-temporelles (perturbations intermédiaires telles que éclaircie précommerciale, chablis partiel, etc.).

Détermination du stade évolutif

À la suite d'une perturbation majeure, la végétation se réinstalle en passant par différents stades évolutifs. Ces stades sont déterminés en fonction de la tolérance à l'ombre des essences du couvert principal et des étages inférieurs, ainsi que par la structure et l'évolution probable du peuplement (tableau 1). Les probabilités de présence de chaque stade évolutif après une perturbation ou une intervention d'origine sont évaluées avec des équations logistiques généralisées.

Tableau 1. Description des différents stades évolutifs.

Stade évolutif	Description
Pionnier	Étage principal inférieur à 4 m, à l'exception de la végétation prostrée, caractéristique de certains sites sur lesquels les conditions édaphiques ou le climat sont défavorables.
Essences de lumière	Étage principal composé presque exclusivement d'essences intolérantes à l'ombre (PET, PEG, PEB, BOP, BOG, ERR, PIR, PIG, PIB, CHR, MEL), qui ne se régénèrent pas sous le couvert.
Intermédiaire	Étage principal dominé par les essences intolérantes à l'ombre avec sous-étage ou présence d'essences tolérantes à l'ombre (> 4 m) (ERS, BOJ, HEG, PRU, SAB, EPR, EPN, EPB, ORA, THO).
Faciès	Étage principal dominé par les essences tolérantes à l'ombre, avec persistance d'essences intolérantes à l'ombre.
Stabilité	Étage principal presque entièrement composé d'essences tolérantes à l'ombre et de régénération de ces mêmes essences ou étage principal dominé par des essences semi-intolérantes à l'ombre (CHR, PIB, ERA, ERR), longévives, qui se régénèrent par endroit.



Un catalogue répertorie les données des placettes qui sont passées d'une perturbation majeure ou intervention totale à un stade évolutif donné. Une placette aux caractéristiques écologiques et climatiques voisines de celle de la strate d'aménagement perturbée sera sélectionnée. Ainsi, les variables descriptives de la placette du catalogue seront imputées à cette dernière.

Étalonnage

Le modèle est étalonné à partir des placettes échantillon dont la classe de hauteur est entre 4 et 5, soit autour de 7 m de hauteur. La perturbation ou l'intervention d'origine doit être connue et inventoriée : brûlis, chablis, épidémie grave, coupe totale, plantation, ensemencement et friche.

Extrants

Les extrants du modèle SUCCÈS-2009 sont des placettes de 7 m de hauteur avec tous les attributs classiques des placettes temporaires. Les variables permanentes de la placette sont les mêmes que celles des placettes originales de la strate, alors que les variables de composition et de structure (nombre de tiges par essence et par classe de diamètre, etc.) sont des valeurs imputées à partir du catalogue des placettes. L'âge de la placette est le temps de succession nécessaire pour que la hauteur dominante de la placette passe de 0 à 7 m, calculé selon les courbes d'IQS. Le temps de 0 à 1 m a été séparé du temps de 1 à 7 m et de 1 m à la hauteur dominante explicitement pour laisser la possibilité d'intervention à l'aménagiste pour l'ajuster, en cas de besoin, en fonction des caractéristiques de station et des connaissances préalables.

L'imputation des attributs du peuplement consiste à lui attribuer les caractéristiques d'un peuplement semblable (nombre de tiges par classe de diamètre par essence) parmi un groupe de placettes voisines.



Annexe IV. Méthode de positionnement des courbes de croissance issues de ARTÉMIS-2009

Méthode décrite par Isabelle Auger et Mathieu Fortin

Mise en contexte

Aux fins du calcul, les peuplements dont la croissance est simulée avec ARTÉMIS-2009 sont généralement de structure irrégulière et, en conséquence, ils n'ont pas d'âge. Dans un tel contexte, la référence est le temps de projection, soit de 0 à 150 ans. Malgré la similarité entre les strates d'un même groupe, des disparités peuvent exister entre leurs courbes de croissance (figure 1). En effet, en raison de la variabilité naturelle de la forêt, les courbes des différentes strates qui composent un groupe peuvent se croiser ou diverger dans quelques cas. Ainsi, les courbes doivent être positionnées sur l'axe du temps par un procédé qui ne repose pas sur l'âge.

La translation adoptée par le Bureau du forestier en chef repose sur un ajustement mathématique. Cette translation permet, par exemple, de déplacer de quelques décennies les courbes de croissance d'une strate en phase de sénescence dès le début de la simulation (figure 1).

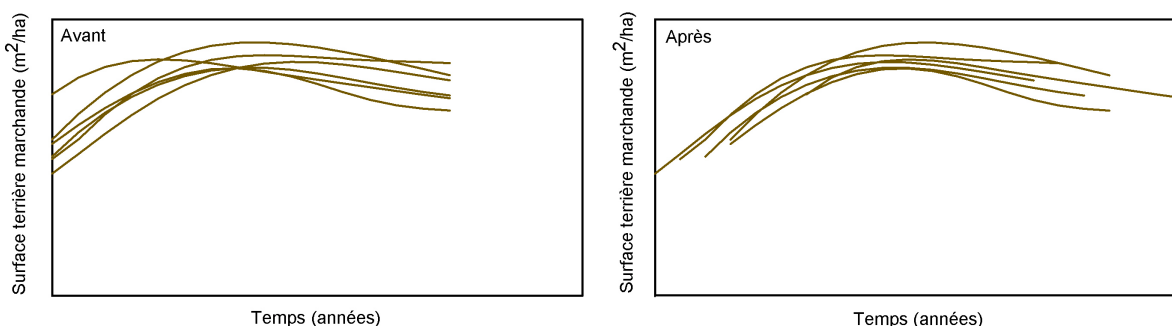


Figure 1. Courbes de croissance de strate prédites par ARTÉMIS-2009 avant la translation et après la translation.

Estimation de la translation

Les courbes des strates ont été translattées sur la base de la surface terrière. Un modèle linéaire mixte est utilisé, dans lequel le temps est considéré comme une variable continue, et la forme de l'équation est un polynôme de degré deux :



$$St_{ijk} = (\beta_0 + u_{ij}) + \beta_1 TpsTrans_{ijk} + \beta_2 TpsTrans_{ijk}^2 + \varepsilon_{ijk}$$

$$TpsTrans_{ijk} = Temps_{ijk} + \delta_i$$

$$u_{ij} \sim N(0, \sigma_{\text{placette}}^2)$$

$$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$$

où St_{ijk} est la surface terrière de la placette j de la strate i au k^e pas de simulation, $Temps_{ijk}$ est le temps, en années, écoulé depuis le début de la simulation pour la placette j de la strate i au k^e pas de simulation, δ_i est un paramètre à estimer représentant la translation (en années) de la strate i , β_0 , β_1 et β_2 sont les paramètres de régression à estimer, u_{ij} est un effet aléatoire de placette suivant une distribution normale de moyenne 0 et de variance $\sigma_{\text{placette}}^2$ et ε_{ijk} est le terme d'erreur résiduelle qui suit une loi normale de moyenne 0 et de variance σ^2 . Cette équation est étalonnée avec la procédure NLMIXED de SAS. Une procédure pour modèle non linéaire est nécessaire dû à la structure emboîtée du paramètre δ_i à l'intérieur de $TpsTrans_{ijk}$ et $TpsTrans_{ijk}^2$.

Le temps translaté de la strate i est obtenu en additionnant le paramètre δ_i à tous les temps des placettes de la strate. Toutes les placettes d'une même strate auront la même série de temps translatés. Afin que le point de départ minimal d'une courbe soit 10 ans dans un groupe de strates, on soustrait le temps translaté minimal du groupe de strates aux temps translatés de chacune des strates, et on additionne 10.

Annexe V. Méthode de production des courbes moyennes du groupe de strates

Méthode décrite par Isabelle Auger et Mathieu Fortin

Courbes moyennes du groupe de strates

Que ce soit pour ARTÉMIS-2009 ou NATURA-2009, la courbe moyenne du groupe de strates est obtenue en modélisant la variable réponse en fonction du temps à l'aide d'un polynôme de degré six :

$$Y_{ijk} = \beta_0 + \beta_1 TpsTrans_{ijk} + \beta_2 TpsTrans_{ijk}^2 + \beta_3 TpsTrans_{ijk}^3 + \beta_4 TpsTrans_{ijk}^4 + \beta_5 TpsTrans_{ijk}^5 + \beta_6 TpsTrans_{ijk}^6 + \varepsilon_{ijk}$$

où Y_{ijk} est la variable réponse de la placette j de la strate i au k^e pas de simulation, $TpsTrans_{ijk}$ est le temps translaté, en années, β_0 à β_6 sont les paramètres de régression à estimer, et ε_{ijk} est le terme d'erreur résiduelle. On fait l'hypothèse que ε_{ij} , le vecteur des erreurs résiduelles de placette j de la strate i , suit une loi normale multivariée de moyenne $\mathbf{0}$ et de matrice de variances-covariances \mathbf{R}_{ij} . Les éléments de la matrice \mathbf{R}_{ij} sont estimés avec une structure de corrélation autorégressive de premier ordre et une variance constante. Les placettes sont pondérées en fonction du poids qu'on leur attribue dans le plan de sondage de l'inventaire forestier et de la superficie des strates qu'elles représentent.

Cette équation est étalonnée avec la procédure MIXED de SAS, séparément pour quatre caractéristiques (surface terrière [St], nombre de tiges [Nt], volume [Vol], hauteur dominante [Hd]), six groupes d'espèces (feuillus nobles [FN], feuillus intolérants [FI], sapin baumier [Sab], résineux tolérants [Rt], résineux intolérants [Ri], autres [Aut]) et le total (Tot). Afin que la somme des prévisions des six groupes d'espèces corresponde à la prévision du total à chaque temps, les prévisions d'un groupe d'espèces sont multipliées par le ratio entre la prévision du total et la somme des prévisions des six groupes d'espèces. Cet ajustement est effectué pour St, Nt et Vol. Le diamètre moyen quadratique du groupe de strates est déduit à partir de St et Nt prédits et le volume moyen par tige est déduit de Vol et Nt prédits.



Table de rendement de la surface terrière (m²/ha) par essence (épinette noire (EPN), épinette blanche (EPB), pin blanc (PIB), pin rouge (PIR), pin gris (PIG), mélèze hybride (MEH) et peuplier hybride (PEH)), indice de qualité de station (IQS) et densité de mise en terre.

Ess.	IQS	Densité	Âge de la plantation																																
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	
EPN	6	1600				3	10	17	21	27	32	35	38	41	44	46	48	49	50	50	50	49	48	46	44	43	41	39	36	35	33	31			
	2000				4	11	18	25	30	35	38	39	41	43	44	45	45	45	44	43	42	41	39	38	36	35	33	32	30	29					
	1600			0	7	15	22	30	36	40	43	46	50	52	54	56	57	58	57	56	55	54	52	51	49	47	45	43	42	40					
	2000				8	16	24	30	35	38	40	41	44	45	46	47	48	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36					
	1600				3	11	20	27	33	37	39	42	44	47	48	50	51	51	51	51	50	49	48	46	45	43	41	39	38	36	34				
	2000				3	12	21	29	34	37	39	41	43	45	46	47	48	48	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38						
	1600				5	15	24	31	35	37	39	41	43	46	47	48	49	49	50	50	49	48	47	46	45	44	43	41	40	39	37				
	2000				6	16	26	32	36	37	39	41	43	45	46	47	47	48	48	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37				
	1600				1	6	13	20	25	29	32	34	36	38	39	40	40	40	39	38	36	34	32	29	26	23	20	17	14	12	9	7	5		
	2000				1	7	16	23	28	32	34	36	38	40	41	41	41	40	39	37	35	32	30	27	24	21	18	15	13	10	8	6	4		
EPB	6	1600				1	6	14	21	27	31	34	36	38	39	41	42	42	42	41	40	38	37	34	32	29	26	23	20	17	14	11	8	6	5
	2000				1	8	17	24	30	33	36	38	40	42	43	43	43	43	42	40	38	36	33	30	27	24	21	17	14	11	8	5	3	1	
	1600				1	7	15	23	28	33	36	38	40	41	43	44	44	44	43	42	40	38	35	32	29	25	22	18	15	11	8	5	3	1	
	2000				1	8	17	25	31	35	38	40	42	43	45	46	46	45	44	42	40	38	35	32	29	25	21	18	14	11	8	6	4	3	
	1600				1	7	16	24	30	34	37	39	41	42	45	46	46	46	45	44	42	39	36	33	29	26	22	18	14	11	7	5	3	2	
	2000				2	9	18	27	32	36	39	41	43	45	47	48	48	47	46	44	42	39	36	32	27	23	18	14	9	5	1				
	1600				1	7	16	25	31	35	38	40	42	43	47	48	48	47	46	44	42	39	36	32	27	23	18	14	9	5	1				
	2000				2	9	19	28	34	38	41	43	44	46	49	50	50	49	48	47	44	41	38	34	30	26	21	17	12	8	4	1			
	1600				1	8	17	26	32	36	39	42	43	45	49	50	51	50	49	48	45	42	39	35	31	26	22	17	13	9	5	2			
	2000				2	9	20	29	35	39	42	44	46	47	51	52	52	50	48	46	42	39	34	30	25	20	15	10	6	2					
PIG	4	1600				6	12	19	26	32	34	36	38	40	41	42	43	42	42	40	39	36	33	30	26	22	18	13	9	4					
	2000				0	7	14	20	27	34	33	35	37	39	40	41	41	41	40	39	37	35	32	29	25	21	17	12	8	3					
	1600				2	9	16	22	29	36	35	38	39	41	43	44	44	44	43	42	40	38	35	32	28	24	20	15	10	6	1				
	2000				3	10	17	23	30	37	36	38	40	41	43	43	44	43	42	41	39	37	34	31	27	23	18	14	9	4					
	1600				5	12	19	25	32	39	39	41	44	46	47	48	49	48	48	46	45	42	39	36	32	27	22	17	12	6	1				
	2000				7	13	20	27	33	40	39	42	44	46	47	48	49	49	48	46	45	42	39	35	31	27	22	17	11	5					
	1600				9	15	22	29	35	42	42	45	49	51	53	54	55	55	54	53	51	48	44	40	35	30	24	19	12	6					
	2000				10	16	23	30	36	43	43	46	49	52	54	55	56	56	55	54	51	48	44	40	35	30	24	18	12	6					
	1600				8	14	21	27	35	42	50	58	61	63	64	65	66	66	65	65	65	64	64	63	62	62	62	61	61	60	59	59			
	2000				14	22	30	38	46	53	61	72	73	73	73	73	73	71	70	69	68	67	67	66	65	64	63	62	61	61	60	59	58		
MEH	15	2000				4	11	16	22	28	33	39	46	51	56	60	63	66	68	70	72	73	75	76	77	78	79	80	81	81	81				
PEH						15	23	28	33	36	38	40	41	42	43	43	42	41	40	39	37	36	34	32	30	27	25	22	19	16	13	10	7	3	3



Table de rendement du nombre de tiges marchandes (tige/ha) par essence (épinette noire (EPN), épinette blanche (EPB), pin blanc (PIB), pin rouge (PIR), pin gris (PIG), mélèze hybride (MEH) et peuplier hybride (PEH)), indice de qualité de station (IQS) et densité de mise en terre.

Ess.	IQS	Densité	Âge de la plantation																																	
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160		
6	1600	2000					358	850	1166	1244	1355	1381	1345	1279	1215	1155	1089	1021	951	881	812	745	681	619	561	506	454	407	363	323	288	257	230	207		
							468	1013	1378	1628	1730	1729	1654	1546	1449	1353	1257	1162	1071	984	901	823	750	682	619	560	506	457	412	371	334	301	272	246		
			11	668	1107	1327	1486	1501	1424	1329	1245	1176	1096	1017	940	866	796	730	667	609	554	503	456	413	373	336	303	273	246	223	202					
7	2000	1600					808	1309	1576	1704	1683	1569	1440	1332	1247	1153	1062	977	896	821	751	687	627	571	521	474	432	393	359	328	300	276	255	237		
			277	918	1273	1380	1394	1284	1163	1063	979	909	831	758	692	630	574	522	474	430	390	353	319	288	259	233	210	188	168	150	133					
			380	1090	1508	1650	1650	1512	1361	1239	1138	1057	966	882	805	734	670	611	558	509	465	424	388	354	324	297	272	250	230	213	197					
9	1600	2000					516	1109	1359	1347	1245	1094	976	883	806	741	671	608	552	501	454	413	375	341	310	282	256	233	212	193	175	159	144	131	119	
			640	1311	1619	1625	1501	1318	1177	1064	972	895	811	736	668	607	552	502	457	416	379	345	315	287	262	239	218	199	182	166	152					
			126	674	1286	1600	1600	1600	1600	1528	1416	1310	1231	1133	1037	943	852	764	680	601	526	456	391	330	275	225	180	141	106	78	54	36				
6	2000	1600					172	851	1548	1912	2000	1972	1869	1747	1623	1507	1394	1274	1157	1044	937	834	737	646	562	483	410	343	283	229	181	140	104	76	53	37
			131	674	1245	1542	1600	1567	1471	1361	1254	1156	1071	977	885	798	714	635	561	491	426	365	310	259	213	172	136	105	79	57	41	29				
			179	855	1508	1817	1874	1807	1694	1569	1449	1340	1232	1120	1011	907	808	715	626	544	467	396	330	271	217	170	128	92	63	39	21	9				
8	1600	2000					134	667	1194	1444	1486	1425	1326	1220	1121	1032	952	864	779	698	621	549	480	416	357	302	252	206	165	128	97	69	47	29	16	7
			184	850	1455	1714	1738	1656	1538	1416	1304	1203	1106	1002	902	807	717	631	551	476	407	343	285	232	185	144	109	79	55	36	24	17				
			136	654	1138	1348	1366	1298	1201	1102	1011	931	858	777	699	625	554	487	425	366	312	262	216	175	138	106	79	55	37	22	13	8				
9	1600	2000					187	838	1395	1610	1609	1518	1402	1287	1182	1092	1003	909	818	731	648	570	497	428	364	305	251	202	158	119	85	56	32	14		
			137	637	1079	1255	1257	1186	1094	1002	920	849	779	703	630	560	494	431	371	316	265	218	174	136	101	71	45	23	6							
			190	821	1331	1508	1490	1396	1284	1176	1081	999	918	830	746	665	588	515	447	383	323	269	219	174	133	98	68	42	22	6						
10	2000	1600					138	617	1019	1167	1159	1088	1001	918	844	781	722	654	588	525	464	407	353	302	255	212	172	137	105	77	53	33	18	6		
			191	799	1264	1410	1381	1287	1181	1082	996	923	848	767	688	612	539	471	406	345	289	238	190	148	110	77	49	26	7							
			628	1028	1113	1020	864	753	654	567	490	433	379	332	289	251	216	185	156	131	107	86	66	49	34	20	8									
4	1600	2000					34	773	1169	1238	1121	941	848	748	655	587	521	461	407	357	312	270	232	197	165	136	109	84	62	42	25	9				
			270	871	1115	1101	965	800	705	614	533	475	419	370	325	285	249	216	186	159	133	110	89	70	53	38	24	12	2							
			418	1025	1265	1231	1070	880	770	667	578	512	451	397	349	306	267	231	198	169	141	117	94	73	55	38	23	9								
5	1600	2000					601	1040	1149	1063	903	737	643	560	489	429	378	334	294	258	225	196	168	144	121	100	82	64	49	35	22	11	1			
			757	1207	1308	1198	1009	818	712	618	539	473	417	367	323	283	247	214	184	157	132	109	88	70	52	37	23	10								
			862	1141	1142	1008	837	676	589	515	454	402	355	313	276	242	211	183	158	134	113	93	75	59	44	31	19	9								
6	2000	1600					1034	1322	1539	1146	944	757	658	574	506	451	398	352	310	272	237	205	176	150	125	103	83	65	48	34	21	9				
			1012	1411	1532	1496	1385	1244	1099	1047	997	949	904	861	820	781	744	708	675	643	612	583	555	529	503	479	457	435	414	394	376	358				
			1245	1510	1551	1475	1344	1196	1051	1001	953	908	865	823	784	747	711	677	645	614	585	557	531	506	481	459	437	416	396	377	359	342				
8	2000	1600					437	885	1105	1208	1245	1246	1187	1130	1076	1025	976	930	886	843	803	765	729	694	661	629	599	571	544	518	493	470	447	426	406	386
			1194	1444	1486	1425	1326	1220	1121	1032	983	936	891	849	809	770	733	699	665	634	603	575	547	521	496	473	450	429	408	389	370	353	353			

Table de rendement du diamètre quadratique moyen (cm) par essence (épinette noire (EPN), épinette blanche (EPB), pin blanc (PIB), pin rouge (PIR), pin gris (PIG), mélèze hybride (MEH) et peuplier hybride (PEH)), indice de qualité de station (IQS) et densité de mise en terre.

Ess.	IQS	Densité	Âge de la plantation																														
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155
EPN	6	1600				11	12	13	15	16	17	18	20	21	22	23	24	26	27	28	29	30	32	33	34	35	37	38	39	40	41	43	44
		2000				11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39
	7	1600			10	12	13	15	16	17	19	20	22	23	25	26	27	29	30	32	33	35	36	37	39	40	42	43	44	46	47	49	50
		2000			11	13	14	15	16	17	19	21	22	24	25	26	27	28	30	31	32	33	34	36	37	38	39	41	42	43	44		
	8	1600		9	11	12	14	16	17	19	21	22	24	26	27	29	31	32	34	35	37	39	40	42	44	45	47	48	50	52	53	55	57
		2000		9	11	12	13	15	16	18	19	20	22	23	25	26	27	29	30	32	33	34	36	37	39	40	41	43	44	46	47	48	50
	9	1600		10	11	13	15	17	19	21	23	24	26	28	30	32	34	35	37	39	41	43	45	47	48	50	52	54	56	58	59	61	63
		2000		10	11	13	14	16	17	19	21	22	24	25	27	29	30	32	33	35	36	38	40	41	43	44	46	47	49	51	52	54	55
	EPB	6	1600		10	10	11	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	40
			2000		10	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
7		1600		10	11	12	13	15	16	17	18	20	21	22	23	25	26	27	28	30	31	32	33	35	36	37	38	40	41	42	43	45	46
		2000		10	11	12	13	14	15	16	18	19	20	21	22	23	24	26	27	28	29	30	31	32	34	35	36	37	38	40	41	42	43
8		1600		10	11	13	14	16	17	18	20	21	22	24	25	27	28	30	31	32	34	35	37	38	40	41	42	44	45	47	48	49	51
		2000		10	11	12	14	15	16	18	19	20	21	23	24	25	27	28	29	31	32	33	34	36	37	38	40	41	42	43	45	46	47
9		1600		10	12	13	15	17	18	20	21	23	24	26	27	29	31	32	34	35	37	38	40	42	43	45	46	48	49	51	53	54	56
		2000		10	11	13	14	16	17	19	20	21	23	24	26	27	29	31	32	34	35	36	38	40	41	43	45	46	48	49	51	53	54
10		1600		10	11	13	14	16	17	19	20	22	23	24	26	28	29	31	33	35	36	38	40	41	43	45	47	48	50	52	53	55	56
		2000		10	12	14	16	18	19	21	23	24	26	28	29	31	32	34	36	37	39	40	42	44	46	48	50	52	53	55	57	59	61
PIG	4	1600		10	12	14	16	18	20	21	23	24	25	28	29	31	33	34	36	38	39	41	43	45	46	48	50	51	53	55	56		
		2000		11	12	15	18	22	24	27	29	32	35	38	40	43	46	49	51	54	57	60	63	65	68	71	74	76	79	82	85	88	
	5	1600		10	11	12	14	18	21	22	25	27	29	31	34	36	39	41	44	47	50	52	55	58	60	63	66	69	71	74	77	79	
		2000		10	11	13	16	19	23	24	27	30	32	35	37	40	42	45	48	50	53	55	58	60	63	66	68	71	73	76	79	82	85
	6	1600		11	12	14	17	21	26	28	31	34	37	40	43	46	49	52	55	58	61	64	67	70	73	76	79	82	85	88	91	94	
		2000		10	12	14	17	20	25	27	29	32	35	38	41	44	47	50	53	55	58	61	64	67	70	73	76	79	81	84	88	91	94
	PIR	5	2000		11	13	16	19	23	28	30	34	37	40	44	47	50	54	57	61	64	67	71	74	77	81	84	88	91	94	97	100	
		6	2000		11	13	15	18	22	27	29	32	35	38	42	45	48	51	54	58	61	64	67	70	74	77	80	83	86	90	93	96	
	PIB	8	2000		11	13	15	17	20	23	26	27	28	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
		9	2000		12	14	16	18	21	24	27	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
MEH	15	2000		11	12	14	15	17	18	21	23	25	26	28	29	31	32	33	35	36	37	38	39	41	42	43	44	46	47	48	49	51	52
	PEH	2000		13	14	16	17	18	20	21	22	23	24	25	26	26	27	27	27	27	27	27	27	26	26	25	24	23	22	20	18	15	11

