Rapport de paramétrisation du modèle de simulation de la dynamique forestière SORTIE-ND pour la forêt boréale et sub-boréale de l'ouest du Québec

SORTIE-ND/Boréal

par

Julie Poulin

Christian Messier, Michael Papaik, Marilou Beaudet et

K. Dave Coates

Centre d'étude de la forêt

Université du Québec à Montréal

Octobre 2008

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux iii
Liste des figures v
Liste des équations vii
Préface viii
Introduction 9
Paramétrisation 10
1. Ressource lumineuse 11
1.1. Simulation de la ressource lumineuse 11
1.2. Interception de la ressource lumineuse 13
2. Allométrie 14
2.1. Hauteur du semis 15
2.2. DHP des gaulis 17
2.3. Hauteur des arbres adultes 18
2.4. Rayon et profondeur de la couronne 22
2.5. Coefficient de transmission de la lumière 26
3. Croissance 28
3.1. Croissance juvénile 28
3.2. Croissance adulte 32
4. Mortalité 38
4.1. Mortalité juvénile 39
4.2. Mortalité adulte 41
4.3. Fonction d'auto éclaircie 44
5. Substrat 45
6. Production et dispersion 49
7. Établissement 51
Remerciements 54
Références 55
Annexe 1 58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Paramètres relatifs à la simulation de la ressource lumineuse. 13

Tableau 2. Détail de l'analyse du paramètre α de la relation entre le diamètre à 10 cm au collet (cm) et la hauteur du semis (m). 15

Tableau 3. Paramètre R de la relation entre le diamètre à 10 cm et le DHP. 17

Tableau 4. Détail de l'analyse des paramètres H_1 et B de la relation entre la hauteur (m) et le DHP (cm) pour les arbres adultes et les gaulis.....19

Tableau 5. Détail de l'analyse des paramètres C_1, $C_1 / 2$ et a de la relation entre le DHP (cm) et le rayon de la couronne (m) pour les arbres adultes et les gaulis. 22

Tableau 6. Détail de l'analyse des paramètres C_2 et b de la relation entre la hauteur de l'arbre (m) et la profondeur de la couronne (m) pour les arbres adultes et les gaulis. 24

Tableau 7. Coefficients de transmission de la lumière par la couronne des arbres vivants et des arbres morts de classe de décomposition 1 à 3. Le nombre d'arbres échantillons et l'écart type sont entre parenthèses. 28

Tableau 8. Détail de l'analyse des paramètres A et S pour l'équation de la croissance (mm) radiale juvénile à la base en fonction de la lumière (GLI (%)). 30

Tableau 9. Informations relatives aux arbres échantillonnés pour l'estimation des paramètres de la croissance des arbres adultes en fonction de la compétition (NCI).....34

Tableau 10. Paramètres de croissance des arbres adultes en fonction de la compétition (NCI). 37

Tableau 11. Nombre d'arbres par essence, minimum et maximum (min-max), moyenne (moy) et écart type (E.T.) du DHP (cm) et du taux de croissance radiale moyen (mm/an) des arbres adultes des placettes d'échantillonnage permanentes du Québec sélectionnées (région écologique 5a sur des dépôts fluvioglaciaires). 38

Tableau 12. Paramètres de mortalité dépendant de la croissance (M_2). 40

Tableau 13. Taux de mortalité annuels moyens (exprimés sous forme de fraction) des arbres adultes calculés à partir des placettes d'échantillonnage permanentes du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (région écologique 5a sur des dépôts fluvioglaciaires)…42

Tableau 14. Paramètres α, β et DHP_s issus de la calibration de la fonction de mortalité à la sénescence à partir des tables de production Pothier et Savard (1998) (voir page référence et IQS auquel cela correspond).....43

Tableau 15. Paramètres des fonctions linéaires d'auto-éclaircie utilisées pour les juvéniles et les adultes.....44

Tableau 16. Valeurs des paramètres α et β (Mike Papaik, communication personnelle) de l'Équation du taux annuel de transition entre différents substrats (Eq. 15). Les numéros entre parenthèses se rapportent à ceux de la Figure 15. 46

Tableau 17. Proportion initiale et après traitement des différents substrats. 47

Tableau 18. Paramètres STR, β, D et θ de l'Équation 18 décrivant la production et le patron de dispersion spatialement explicite des graines/semis sous canopée. 50

Tableau 19. Paramètres de *Favorability* des différents substrats pour chaque essence et auteur de l'étude correspondante.....52

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Illustrations simplifiées de la grille utilisée par le modèle SORTIE-ND pour l'analyse de la lumière: A) photo hémisphérique montrant le patron de déplacement du soleil au cours d'une saison de croissance; B) schéma de la portion du ciel analysée située entre le zénith et l'angle de 45° (0,785 radians). 12

Figure 2. Illustrations de la distribution de la lumière : A) schématisation de l'agencement spatiale des couronnes des arbres voisins susceptibles d'intercepter la lumière; B) exemple d'un patron de distribution de lumière calculé par cellule de 2 m par 2 m. Le ton des pixels, du noir au blanc, est un indice du pourcentage de lumière perçu à cet endroit, de 0% à 100% respectivement. 14

Figure 3. Hauteur du semis (m) en fonction du diamètre à 10 cm (cm). Les points représentent les valeurs observées et les lignes représentent les valeurs prédites selon l'Équation 1 et les paramètres du Tableau 3. 16

Figure 4. DHP (cm) des gaulis en fonction du diamètre à 10 cm (cm) prédit selon l'Équation 2 et les valeurs du paramètre *R* du Tableau 3. 18

Figure 5. Hauteur (m) des arbres adultes et gaulis en fonction du DHP (cm) prédite selon l'Équation 3 et les paramètres du Tableau 4. 20

Figure 6. Hauteur des arbres adultes et gaulis (m) en fonction du DHP (cm). Les points sont les valeurs observées et les lignes sont les valeurs prédites selon l'Équation 3 et les paramètres du Tableau 4. 21

Figure 7. Rayon (m) de la couronne des arbres adultes et gaulis en fonction du DHP (cm). Les points sont les valeurs observées et les lignes sont les valeurs prédites selon l'Équation 4 et le paramètre C_1 du Tableau 5. 23

Figure 8. Profondeur (m) de la couronne des arbres adultes et gaulis en fonction de la hauteur totale de l'arbre (m). Les points sont les valeurs observées et les lignes sont les valeurs prédites selon l'Équation 5 et les paramètres du Tableau 6. 25

Figure 9. Illustration de l'analyse du coefficient de transmission de la lumière par la couronne des arbres : a) la couronne de l'arbre cible isolée; b) le tracé du contour de la couronne; c) la couronne en noir, le ciel en blanc; d) la surface totale occupée par la couronne. 26

Figure 10. Croissance radiale annuelle (mm/an) à la hauteur du collet des juvéniles en fonction de la lumière (GLI (%)) prédite selon l'Équation 6 et les paramètres A et S du Tableau 8. 30

Figure 11. Croissance radiale annuelle (cm/an) des arbres juvéniles à 10 cm au-dessus du sol en fonction du pourcentage de lumière disponible (GLI (%)). Les points sont les valeurs observées et les lignes sont les valeurs prédites selon l'Équation 6 et les paramètres du Tableau 10. 31

Figure 12. Croissance radiale maximale potentielle annuelle (cm/an) (sans compétition) en fonction du DHP (cm) pour chacune des essences selon l'Équation 8 et les paramètres du Tableau 10. 35

Figure 13. Probabilité de mortalité des juvéniles en fonction de la croissance récente (mm/an) selon l'Équation12 et les paramètres du Tableau 12. 40

Figure 14. Probabilité de mortalité à la sénescence en fonction du DHP (cm) prédite selon l'Équation 14 et les paramètres du Tableau 16. 44

Figure 15. Schéma de la création et de la décomposition des substrats. Le *Forest floor* est composé de *Forest Floor litter* et *Forest Floor Moss*. 45

Figure 16. Schéma de la dynamique de décomposition des substrats. 47

Figure 17. Superficie de substrat *tip up mound* créée selon la dimension de l'arbre tombé (ici illustré en fonction du DHP, en cm), prédit selon l'Équation 17. 49

Figure 18. Nombre de semis par m^2 qui proviennent d'un adulte de 30 cm de DHP en fonction de la distance par rapport à l'arbre (m) selon l'Équation 15 et les paramètres du Tableau 18. ..51

Figure 19. Nombre de semis potentiel divisé par 1000 par m^2 pour chaque essence et substrat selon les paramètres du Tableau 19. 53

LISTE DES ÉQUATIONS

[Eq. 1] Hauteur des semis = 0,1 + 30 (1 - $e^{(-\propto * \text{Diamètre à 10 cm})}$) 15

[Eq. 2] DHP = ($Diam_{base}$ * R) + I 17

[Eq. 3] Hauteur = 1,35 + (H_1-1,35) * (1-$e^{-(B * DHP)}$) 18

[Eq. 4] Rayon de la couronne = C_1 * DHP^a 22

[Eq. 5] Profondeur de la couronne = C_2 * hauteur de l'arbre^b 24

[Eq. 6] Log_{10}(Croissance radiale + 1) = SF * (a • Lumière / ((a / s) + Lumière)) 29

[Eq. 7] Croiss=($CroissDiam_{max}$)(Effet DHP)(Effet Ombrage)(Effet Compétition) 34

[Eq. 8] $CroissDiam_{pot} = CroissDiam_{max} \bullet \text{EXP}\ [\ -0.5\ \{\ [\ ln\ (DHP / X_0)\ ]\ /\ X_b\ \}^2\ ]$ 34

[Eq. 9] *Effet Ombrage* = EXP ($-m \bullet S^n$) 35

[Eq. 10] *Effet Compétition* = EXP ($-C \bullet DHP^{\gamma} \bullet NCI^D$) 36

[Eq. 11] $NCI_i = \sum_{j=1}^{S} \sum_{k=1}^{N} \eta_k \lambda_{ik} \frac{\left(DHP_{jk} / q \right)^{\alpha}}{(dist_{ik})^{\beta}}$ 36

[Eq. 12] P (mortalité | croissance) = 1 - exp (- T • M_1 • exp (-M_2 • G)) 39

[Eq. 13] Taux de mortalité = ((V_1 – V_0) / V_0) / (t_1 – t_0) 41

[Eq. 14] m_s = EXP (α + β (DHP-DHP_s)) / (1 + EXP (α + β (DHP-DHP_s))) 42

[Eq. 15] y = EXP ($\alpha * t^{\beta}$) 46

[Eq. 16] Fresh Log Area = (DBH * h) / 2 48

[Eq. 17] Tip Up Area = π * $(r*F)^2$ 48

[Eq. 18] $Densité = \frac{STR}{n} \sum_j cover_j \left(sub_fav\right)_j \sum_k \left(\frac{dbh_k}{30}\right)^{\beta} e^{-D * \left(Dist_k^{\theta}\right)}$ 50

PRÉFACE

Ce rapport décrit les résultats des travaux effectués depuis 1999 et la provenance des données utilisées pour paramétrer le modèle SORTIE-ND/Boréal. Le modèle SORTIE-ND est constamment amélioré tant sur le plan de la paramétrisation que sur le plan de la programmation. Ces paramètres sont sujets à être modifiés à la suite de futurs travaux de terrain visant à améliorer les relations observées. La version SORTIE-ND/Boréal est présentement fonctionnelle pour répondre à un éventail de questions tout en ayant certaines limites.

La paramétrisation de la version de SORTIE-ND/Boréal est le fruit de la collaboration étroite de plusieurs équipes de chercheurs du Québec. D'abord Christian Messier, professeur en écologie forestière à l'Université du Québec à Montréal (UQAM), est le chercheur à la tête de ce projet. K. David Coates, chercheur au Service canadien des forêts de la Colombie-Britannique, a travaillé deux ans à l'UQAM (de 1999 à 2001), en tant que chercheur invité entre autres à coordonner les efforts des différentes équipes de recherche. Les recherches de l'équipe de K.D. Coates et C. Messier, se sont concentrées sur la paramétrisation de la lumière, de l'allométrie, de la croissance et de la mortalité des arbres adultes. L'équipe de Daniel Kneeshaw, professeur en écologie forestière à l'UQAM, s'est intéressée à la mortalité juvénile et l'équipe de David Greene, professeur en régénération forestière à l'Université Concordia, au substrat, à l'établissement et à la dispersion. Charles D. Canham, chercheur à l'*IES* (*Institute of Ecosystem Studies*) à Millbrook, dans l'état de New York aux États-Unis, principal chercheur au développement du modèle, a collaboré à la plupart des étapes de la paramétrisation.

Le modèle SORTIE-ND est disponible uniquement en anglais. Afin de permettre à l'utilisateur de faire le lien entre les termes utilisés le modèle et ceux de ce document, il a été nécessaire d'ajouter les noms anglais de certaines équations ou paramètres. À noter qu'à la dernière mise à jour de ce rapport, nous nous sommes référé à la version 6.09 de SORTIE-ND ainsi qu'à la documentation qui y est associée. Pour plus d'information concernant le modèle SORTIE-ND, on peut consulter le site Internet http://sortie-nd.org/.

INTRODUCTION

Les forestiers reconnaissent un important et urgent besoin de recherche à long terme en foresterie. La modélisation est un outil qui permet d'explorer la réponse à long terme de la forêt à partir de courtes études empiriques. La modélisation intègre les recherches de différents domaines et identifie de nouvelles problématiques.

Le modèle SORTIE-ND

SORTIE-ND, un modèle spatialement explicite, simule les interactions compétitives locales pour les ressources. Ce modèle détermine la performance de chacun des arbres en fonction de ses interactions avec son environnement. La dynamique simulée est estimée empiriquement et repose sur des interactions biologiques. Ce modèle facilite l'identification des interactions dominantes de la dynamique forestière.

SORTIE-ND simule la dynamique de peuplements complexes tels que des peuplements inéquiens et mixtes. Différents types, formes et grandeurs de coupes (coupe partielle, coupe par trouée, etc.) et d'ouvertures peuvent être simulés. Ce modèle répond à des questions théoriques et appliquées sur la succession, la dynamique de peuplement et la planification de la gestion forestière.

Historique

Le modèle SORTIE a été développé au début des années 90 pour les forêts *transitional oak-northern hardwood forests* du nord-est américain. À ce moment, il était considéré comme un modèle de simulation de petites et de moyennes perturbations (Pacala et al. 1993; Canham et al. 1994). À la fin des années 90, la version originale du modèle a été intensivement modifiée et paramétrée pour la forêt coniférienne *transitional coast-interior* du nord-ouest de la Colombie-Britannique (SORTIE/BC). L'objectif était de développer le potentiel du modèle à tester différents scénarios sylvicoles, notamment par l'ajout d'une interface de récolte. L'expertise acquise par les chercheurs de la Colombie-Britannique, particulièrement celle de K. David Coates, a été mise à contribution pour paramétrer le modèle SORTIE pour la forêt boréale mixte de la ceinture d'argile du Québec et de l'Ontario (SORTIE/Boréal). La paramétrisation du modèle pour les biomes du Canada s'insère dans le programme de recherche majeur en forêts boréales initié par le Réseau en gestion durable des forêts (RGDF).

Récemment, le modèle a été restructuré et reprogrammé en C++. En raison des changements majeurs apportés au modèle, il a été renommé SORTIE-ND. Le suffixe ND réfère à la dynamique de voisinage (*Neighborhood Dynamics*) maintenant à la base du modèle.

Depuis le début de l'année 2006, Michael Papaik, un chercheur postdoctoral de l'équipe de C. Messier, qui a préalablement contribué à la programmation du modèle au sein de l'équipe de C.D. Canham, a travaillé sur les derniers développements de la paramétrisation et de la calibration.

Essences et localisation

SORTIE-ND/Boréal a été paramétré pour le sud de la forêt boréale du Québec, dans la région de l'Abitibi au Nord-Ouest du Québec (Grondin *et al.* 1996). Les données ont été récoltées dans les forêts mixtes autour du Lac Duparquet, principalement dans la Forêt d'enseignement et de recherche du Lac Duparquet (FERLD). La région écologique est 5a. Les sols sont principalement argileux provenant de dépôts fluvioglaciaires.

Les six essences modélisées sont toutes dominantes ou sous-dominantes; le thuya de l'Est (*Thuya occidentalis*), le sapin baumier (*Abies balsamea*), l'épinette blanche (*Picea glauca*), le pin gris (*Pinus banksiana*), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) et le bouleau blanc (*Betula papyrifera*). Dernièrement, l'érable à épis (*Acer spicatum*), une essence du sous-couvert forestier reconnue pour sa forte compétitivité pour la lumière en forêt boréale, a aussi été paramétré afin de mieux simuler la dynamique de lumière en sous-couvert.

PARAMÉTRISATION

SORTIE-ND crée chaque arbre, à l'aide des relations allométriques, et simule certains processus (*Behaviors*), choisis par l'utilisateur, qui agiront sur le développement de l'arbre. Ces processus correspondent généralement à un processus biologique (ex. : transmission et répartition de la ressource, croissance, mortalité, régénération).

La lumière est la ressource clé du modèle SORTIE-ND. Pacala *et al.* (1993; 1996) ont estimé que même si l'eau et l'azote ont une influence, ces ressources n'étaient pas fortement reliées à la performance des arbres pour leurs sites d'étude (cela n'est cependant pas le cas pour toutes les forêts.). Ces ressources n'ont donc pas été incorporées explicitement au modèle.

L'autre grande particularité de ce modèle est qu'il est spatialement explicite. Cela implique que la position chaque arbre est connue. Les arbres sont répartis sur des cellules. La grosseur des cellules est définie par l'utilisateur. La disponibilité lumineuse des semis est simulée par défaut dans des cellules de 2 m par 2 m. Le substrat est simulé par défaut dans des cellules de 10 m par 10 m.

Les arbres ont trois stades ontogéniques;

- semis : soit plus petit que 1,35 m;
- gaulis : moins de 10 cm de diamètre à 1,35 m (DHP);
- adultes : plus de 10 cm de DHP (à noter que le seuil de DHP entre le stade gaulis et adulte peut être modifié par l'utilisateur).

Le terme ''juvénile'' est utilisé pour désigner à la fois les semis et les gaulis.

Le pas de temps par défaut est de 5 ans. Les concepteurs conseillent d'utiliser des pas de temps de 1 à 5 ans. Le demi pas de temps est déconseillé car la ressource lumineuse est calculée par année.

1. Ressource lumineuse

La lumière est la ressource clé du modèle SORTIE-ND. La croissance des arbres et, indirectement, la mortalité des juvéniles et la régénération dépendent de la quantité de lumière qu'ils reçoivent. Deux groupes d'informations sont nécessaires afin de calculer la disponibilité lumineuse: 1- la quantité de lumière qui provient de chaque région du ciel et 2- l'agencement des couronnes arbres avoisinants susceptibles d'intercepter cette lumière. Ces deux volets sont expliqués dans les deux prochaines sections.

1.1. Simulation de la ressource lumineuse

SORTIE-ND calcule la disponibilité lumineuse (*Light behavior*) en simulant la vision hémisphérique (Figure 1) au-dessus de chaque point d'intérêt (au-dessus de chaque gaulis et au centre des cellules de 2 m par 2 m à la hauteur de 0,675 m où il y a des semis). La quantification de la ressource lumineuse, à partir de cette vision hémisphérique, est effectuée tel que décrit pour le *gap light index* (GLI) (Canham 1988). La quantification de l'environnement lumineux, radiations directes et diffuses, est effectuée en considérant le patron de déplacement

du soleil (Figure 1A) en fonction de la latitude de la région simulée et du coefficient de transmission de la lumière du ciel dégagé. L'utilisateur doit définir à quel moment l'activité de croissance végétale commence et se termine pour la région étudiée. Comme peu de lumière provient des angles près de l'horizon, la lumière considérée provient par défaut de la portion du ciel située entre le zénith et l'angle de 45° (0,785 radians) (Canham *et al.* 1990). Une analyse préliminaire du modèle, effectuée par C.D. Canham (voir Pacala *et al.* 1996), a permis de déterminer que la subdivision de cette fraction du ciel en 216 fenêtres (12 grilles en altitude et 18 grilles en azimut) estimait convenablement l'environnement lumineux (schéma simplifié à la Figure 1B). Les paramètres utilisés sont rapportés au Tableau 1.

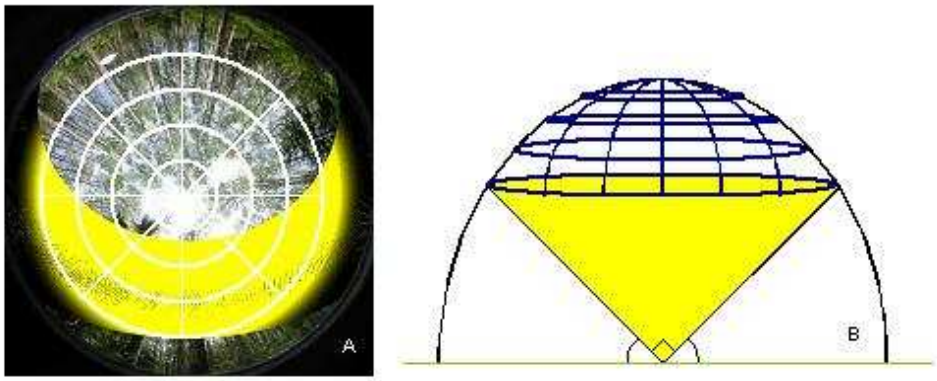

Figure 1. Illustrations simplifiées de la grille utilisée par le modèle SORTIE-ND pour l'analyse de la lumière: A) photo hémisphérique montrant le patron de déplacement du soleil au cours d'une saison de croissance; B) schéma de la portion du ciel analysée située entre le zénith et l'angle de 45° (0,785 radians).

Tableau 1. Paramètres relatifs à la simulation de la ressource lumineuse.

Description du paramètre	Terminologie de SORTIE-ND	Valeur utilisée
Latitude de la région simulée	Plot latitude	48,5°
Proportion de radiation directe	Beam Fraction of Global Radiation	0,5
Coefficient de transmission de la lumière du ciel dégagé	Clear Sky Transmission Coefficient	0,65
Premier jour de la saison de croissance (jour Julien)	First Day of Growing Season	105
Dernier jour de la saison de croissance (jour Julien)	Last Day of Growing Season	258
Nombre de divisions du ciel en Azimut pour tous les calculs (jour Julien)	Number of Azimuth Sky Divisions	18
Nombre de divisions du ciel en Altitude pour tous les calculs	Number of Altitude Sky Divisions	12
Angle minimum de la lumière simulée à partir de l'horizontale pour tous les calculs (radians)	Minimum Solar Angle, in rad	0,785

1.2. Interception de la ressource lumineuse

Une fois que la quantité de lumière potentielle par fenêtre pour chaque cible (arbre ou cellule) est connue, le modèle détermine la proportion interceptée par le voisinage. Ceci implique les étapes suivantes :

1- Identifier les arbres voisins; l'essence, le DHP et la distance;

2- Calculer la hauteur, la largeur et la profondeur des couronnes des arbres voisins à l'aide des équations allométriques (voir la section suivante);

3- Déterminer le pourcentage de lumière intercepté pour chaque fenêtre à l'aide du coefficient de transmission de la lumière des couronnes des arbres voisins.

La résultante est une table d'atténuation de la lumière par fenêtre pour chaque cible. Les éléments de cette table sont multipliés par la quantité de lumière par fenêtre pour chaque cible. Les résultats sont additionnés pour obtenir une seule donnée par cible, le GLI, exprimé en pourcentage (Figure 2).

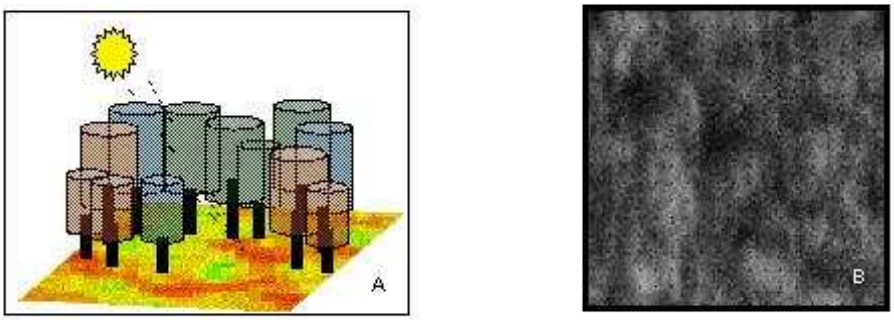

Figure 2. Illustrations de la distribution de la lumière : A) schématisation de l'agencement spatiale des couronnes des arbres voisins susceptibles d'intercepter la lumière; B) exemple d'un patron de distribution de lumière calculé par cellule de 2 m par 2 m. Le ton des pixels, du noir au blanc, est un indice du pourcentage de lumière perçu à cet endroit, de 0% à 100% respectivement.

2. Allométrie

La forme et la dimension des arbres sont simulées à partir d'équations allométriques (*Allometry behavior*). Afin d'alléger les calculs au cours de la simulation, les couronnes des arbres sont réduites à un cylindre. Le tronc n'est pas simulé par le modèle, laissant ce cylindre virtuellement flotter dans les airs.

Le rayon de la couronne et la hauteur des arbres adultes et des gaulis sont déterminés à partir du DHP alors que la profondeur de la couronne est estimée en fonction de la hauteur de l'arbre.

Pour les semis, la hauteur est calculée en fonction du diamètre à 10 cm au dessus su sol ($diam_{base}$). Les semis n'affectent pas l'interception de la lumière car ils n'ont pas de couronne. Cet aspect est très important à prendre en compte dans la conception de certaines simulations car cela implique qu'il n'y a pas d'atténuation de la lumière près du sol, par les semis.

La provenance des données et le détail des analyses sont présentés dans chacune des sous-sections qui suivent.

2.1. Hauteur du semis

L'équation qui détermine la hauteur du semis (m) (*Standard Diameter-Height Relationships*) est la suivante;

[Eq. 1] Hauteur des semis = 0,1 + 30 (1 - $e^{(-\alpha * \text{Diamètre à 10 cm})}$)

où α est la pente de la relation entre la hauteur (m) et le diamètre à 10 cm (cm). Le détail de l'analyse est présenté au Tableau 2 et la relation est illustrée à la Figure 3.

Tableau 2. Détail de l'analyse du paramètre α de la relation entre le diamètre à 10 cm au collet (cm) et la hauteur du semis (m).

	Thuya de l'Est[1]	Sapin baumier[2]	Érable à épis[1,3]	Épinette blanche[2]	Pin gris[1]	Peuplier faux-tremble[2]	Bouleau blanc[1]
n	138	1070	63	365	78	516	217
α	0,018	0,015	0,041	0,016	0,041	0,031	0,048
E.T.	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001
R^2	0,75	0,73	0,78	0,76	0,72	0,59	0,73

1 Données brutes d'une étude de D. Kneeshaw (GREFi)
2 Données brutes du Projet mortalité de Messier *et al.* (GREFi et SFMn)
3 Données brutes d'une étude de I. Aubin (GREFi)

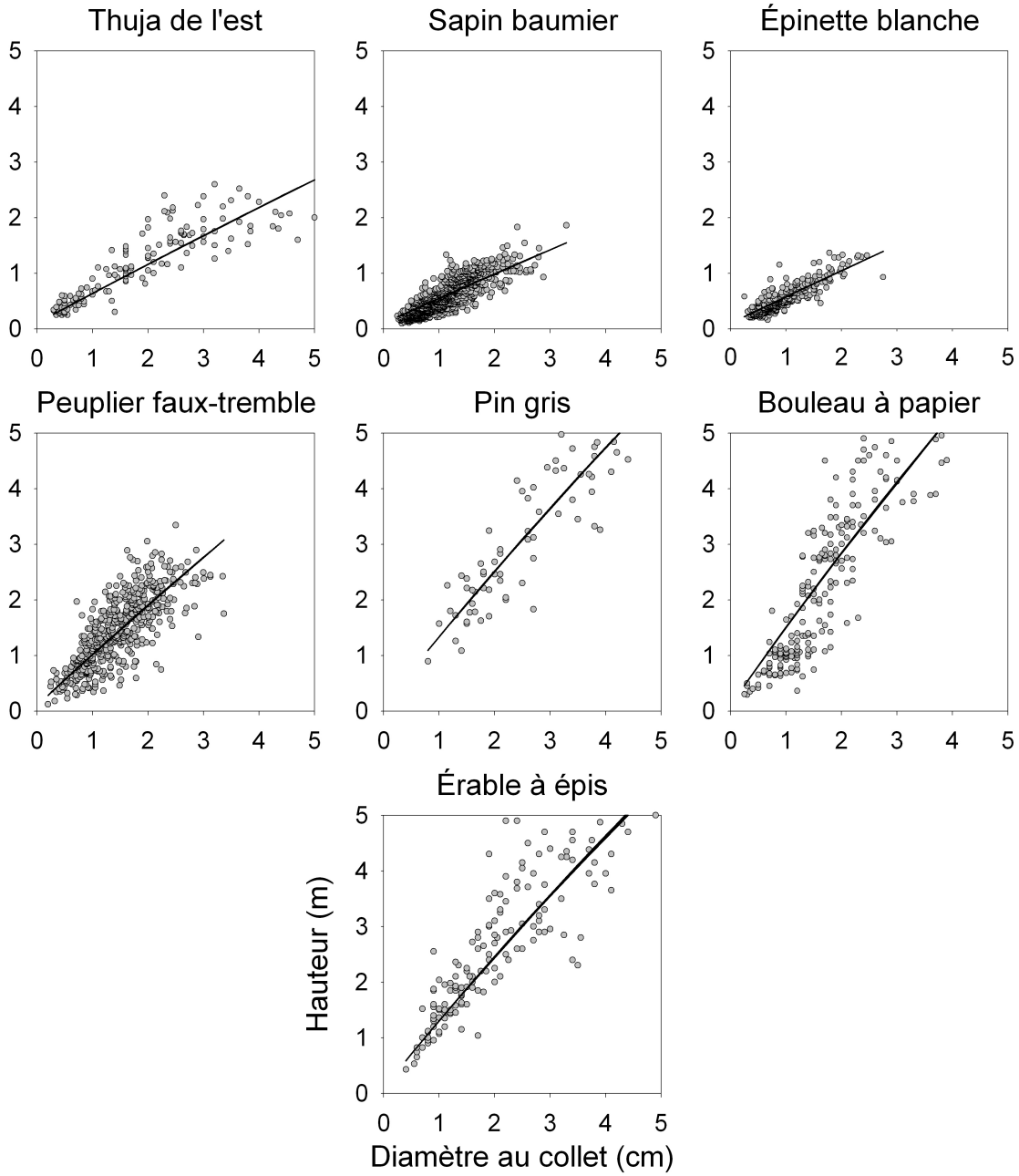

Figure 3. Hauteur du semis (m) en fonction du diamètre à 10 cm (cm). Les points représentent les valeurs observées et les lignes représentent les valeurs prédites selon l'Équation 1 et les paramètres du Tableau 3.

2.2. DHP des gaulis

Lorsque le juvénile atteint la hauteur de 1,35 m, l'équation linéaire qui détermine son DHP (cm) (*DBH-Diameter at 10 cm Relationship*) est la suivante;

[Eq. 2] DHP = ($Diam_{base}$ * R) + I

où $Diam_{base}$ est le diamètre à 10 cm (cm), *R* est la pente de la relation entre le diamètre à 10 cm (cm) et le DHP (cm), et I est l'intercepte. Le paramètre *R* a été calculé à partir de la table publiée par Alemdag et Honer (1977) (Annexe 1) pour toutes les essences sauf pour le thuya de l'Est, pour lequel la valeur utilisée est celle correspondant au thuya dans la version SORTIE/BC, ainsi que pour l'érable à épis, pour lequel la valeur du paramètre a été établie à partir de données provenant d'une étude L. Archambault (SCF-CFL). L'intercepte n'a pas été utilisé (I = 0 pour toutes les espèces). Les valeurs du paramètre *R* sont rapportées au Tableau 3 et la relation est illustrée à la Figure 4.

Tableau 3. Paramètre R de la relation entre le diamètre à 10 cm et le DHP.

	Thuya de l'Est[1]	Sapin baumier[2]	Érable à épis[3]	Épinette blanche[2]	Pin gris[2]	Peuplier faux-tremble[2]	Bouleau blanc[2]
R	0,5944	0,7892	0,8526	0,7557	0,7906	0,8241	0,7557

1 Données récoltées pour le projet SORTIE/BC, P. Bartemucci et K.D. Coates (BC Forest Service)
2 Alemdag et Honer 1977
3 Établi à partir de données d'une étude de L. Archambault (SCF-CFL)

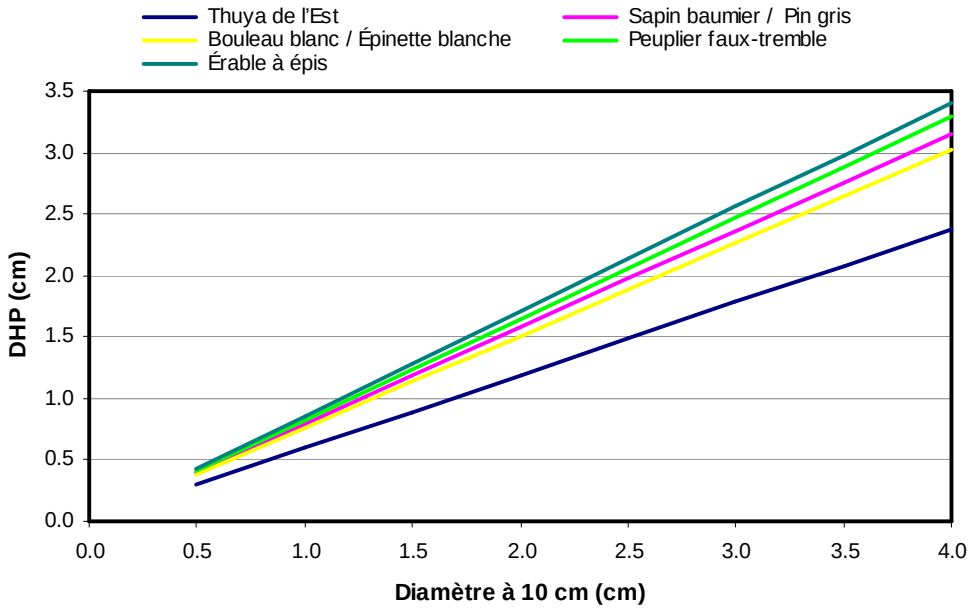

Figure 4. DHP (cm) des gaulis en fonction du diamètre à 10 cm (cm) prédit selon l'Équation 2 et les valeurs du paramètre *R* du Tableau 3.

2.3. Hauteur des arbres adultes

L'équation qui détermine la hauteur (m) des arbres adultes et des gaulis à partir de leur DHP (*Standard Diameter Height Relationship*) est la suivante:

[Eq. 3] Hauteur = 1,35 + (H_1-1,35) * (1-$e^{-(B * DHP)}$)

où H_1 est la hauteur maximum moyenne (m) que l'essence peut atteindre, *B* est la pente initiale de la relation entre la hauteur (m) et le DHP (cm).

L'analyse des résultats a démontré que la hauteur maximum moyenne n'était pas représentative de la réalité pour certaines essences (sapin baumier et érable à épis). La raison est le manque d'arbres suffisamment grands dans les échantillons. Le paramètre H_1 a donc été fixé, pour ces deux essences, en se basant sur la littérature. Dans le cas du sapin baumier, le H_1 a été fixé à 21 m en se basant l'étude de Pothier et Savard (1998) pour un IQS de 18. L'IQS du sapin baumier pour la région à l'étude variait de 16.6 à 18.7 m selon Grondin et al. (2000)

(voir Tableau 14, p. 73). Pour l'érable à épis, la valeur du paramètre H_1 a été fixée à 8 m (Farrar 1996). Les valeurs du paramètre B ont ensuite été recalculées, pour ces deux essences, avec les nouvelles valeurs de H_1. La hauteur relative des différentes essences a été comparée avec celle rapportée dans les études de Sharma et Parton (2007) et Peng (2001). Les données brutes proviennent de L. Archambault (SCF-CFL) pour l'érable à épis et de P. Bartemucci et K.D. Coates (BC Forest Service) pour toutes les autres essences. Le détail de l'analyse des paramètres est présenté au Tableau 4 et la relation est illustrée aux Figures 5 et 6.

Tableau 4. Détail de l'analyse des paramètres H_1 et B de la relation entre la hauteur (m) et le DHP (cm) pour les arbres adultes et les gaulis.

	Thuya de l'Est	Sapin baumier	Érable à épis	Épinette blanche	Pin gris	Peuplier faux-tremble	Bouleau blanc
n	227	280	116	104	79	330	142
H_1	18,78	21[1]	8[2]	34,56	29,10	26,26	20,74
E.T.	0,58	-	-	2,65	1,82	0,57	0,77
B	0,046	0,064	0,226	0,03	0,051	0,067	0,084
E.T.	0,003	0,001	0,009	0,004	0,007	0,003	0,007
R^2	0,93	0,93	0,85	0,87	0,80	0,77	0,70

1 Valeur de hauteur maximale basée sur Pothier et Savard (1998) pour un IQS de 18; valeur d'IQS du sapin pour la région à l'étude basée sur Grondin *et al.* (2000).
2 Valeur de hauteur maximale tirée de Farrar (1996)

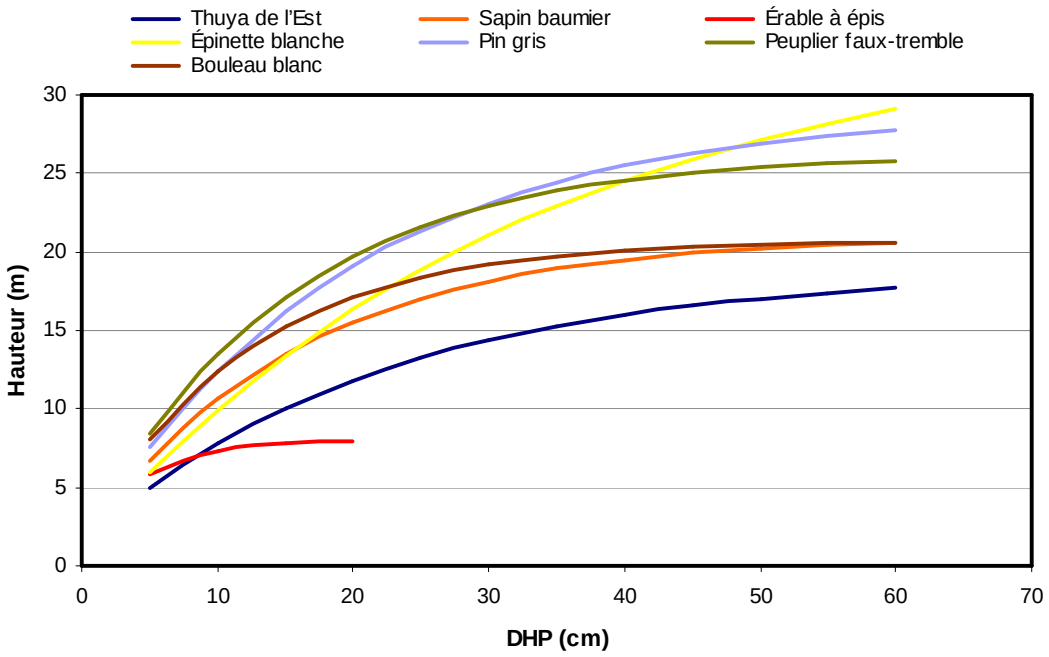

Figure 5. Hauteur (m) des arbres adultes et gaulis en fonction du DHP (cm) prédite selon l'Équation 3 et les paramètres du Tableau 4.

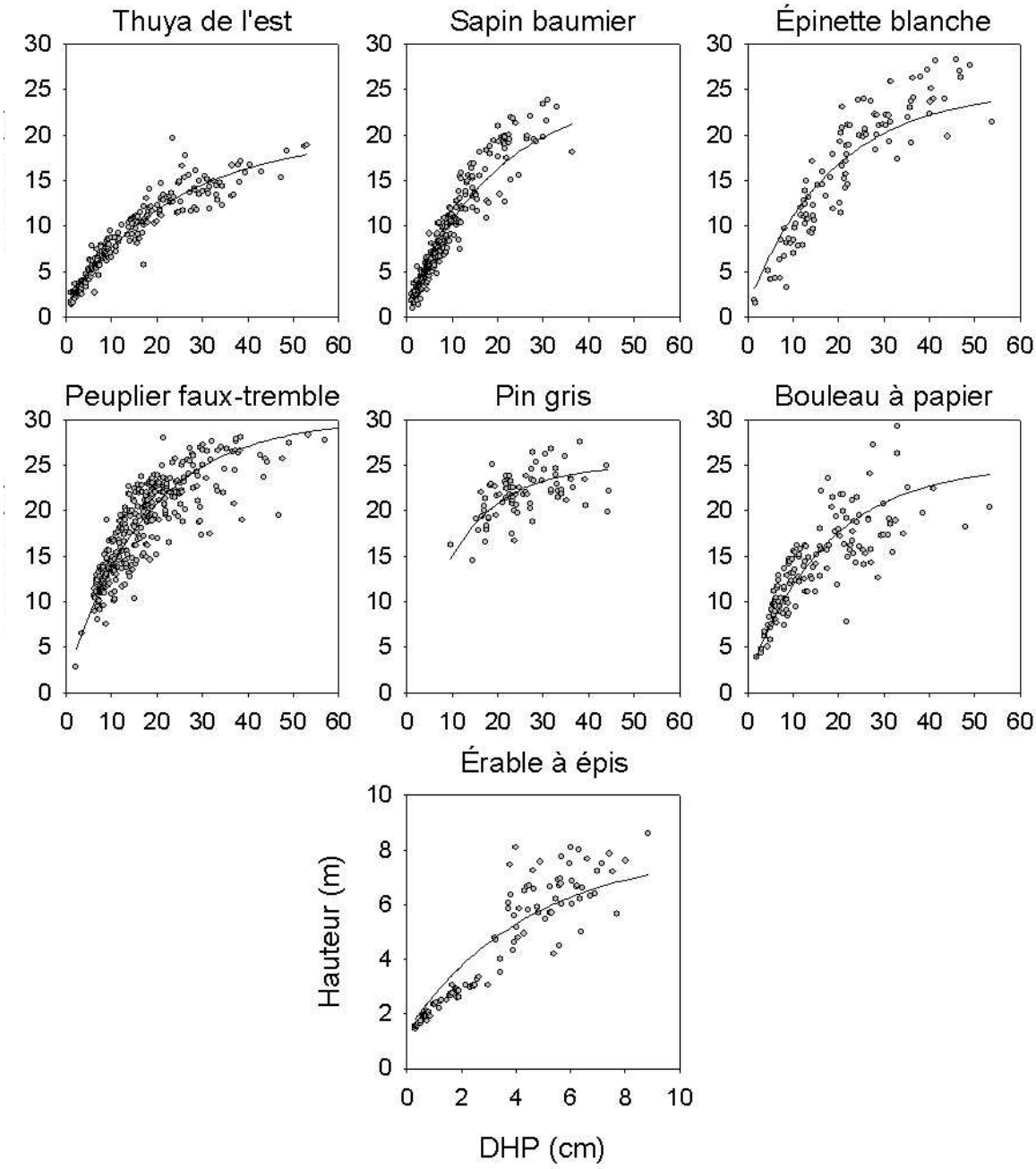

Figure 6. Hauteur des arbres adultes et gaulis (m) en fonction du DHP (cm). Les points sont les valeurs observées et les lignes sont les valeurs prédites selon l'Équation 3 et les paramètres du Tableau 4.

2.4. Rayon et profondeur de la couronne

La couronne simplifiée des adultes et des gaulis est représentée par un cylindre. L'équation qui détermine le rayon (m) de ce cylindre (*Standard Crown Width Relationship*) est la suivante:

[Eq. 4] Rayon de la couronne = C_1 * DHP^a

où C_1 est la pente de la relation (paramètre *Slope of Asymptotic Crown Radius*) et le *DHP* (diamètre à la hauteur de la poitrine en cm) élevé à la puissance *a* (paramètre *Crown Radius Exponent*). Les données brutes proviennent de L. Archambault (SCF-CFL) pour l'érable à épis et de P. Bartemucci et K.D. Coates (BC Forest Service) pour toutes les autres essences. La méthodologie consistait à mesurer le rayon de la couronne dans quatre directions opposées.

Le rayon de la couronne a été divisé par deux pour l'analyse des paramètres pour toutes les essences. Le paramètre C_1 a été divisé par 2 afin de compenser pour la forme conique ou sphérique des couronnes en opposition à la forme cylindrique définie par le modèle. Cette décision se justifie suite à un exercice de validation de la lumière effectué pour la version SORTIE/BC (Canham *et al.* 1999). Le détail de l'analyse est présenté au Tableau 5 et la relation est illustrée à la Figure 7.

Tableau 5. Détail de l'analyse des paramètres C_1, $C_1 / 2$ et *a* de la relation entre le DHP (cm) et le rayon de la couronne (m) pour les arbres adultes et les gaulis.

	Thuya de l'Est	Sapin baumier	Érable à épis	Épinette blanche	Pin gris	Peuplier faux-tremble	Bouleau blanc
n	246	242	103	164	105	352	198
C_1	0,399	0,532	0,355	0,524	0,082	0,183	0,440
C_1 / 2	0,199	0,266	0,177	0,262	0,041	0,092	0,220
E.T.	0,026	0,040	0,026	0,083	0,030	0,015	0,046
a	0,468	0,366	0,472	0,361	0,859	0,761	0,506
E.T.	0,021	0,029	0,049	0,049	0,111	0,025	0,035
R^2	71,1	41,0	57,7	28,2	38,2	72,5	52,0

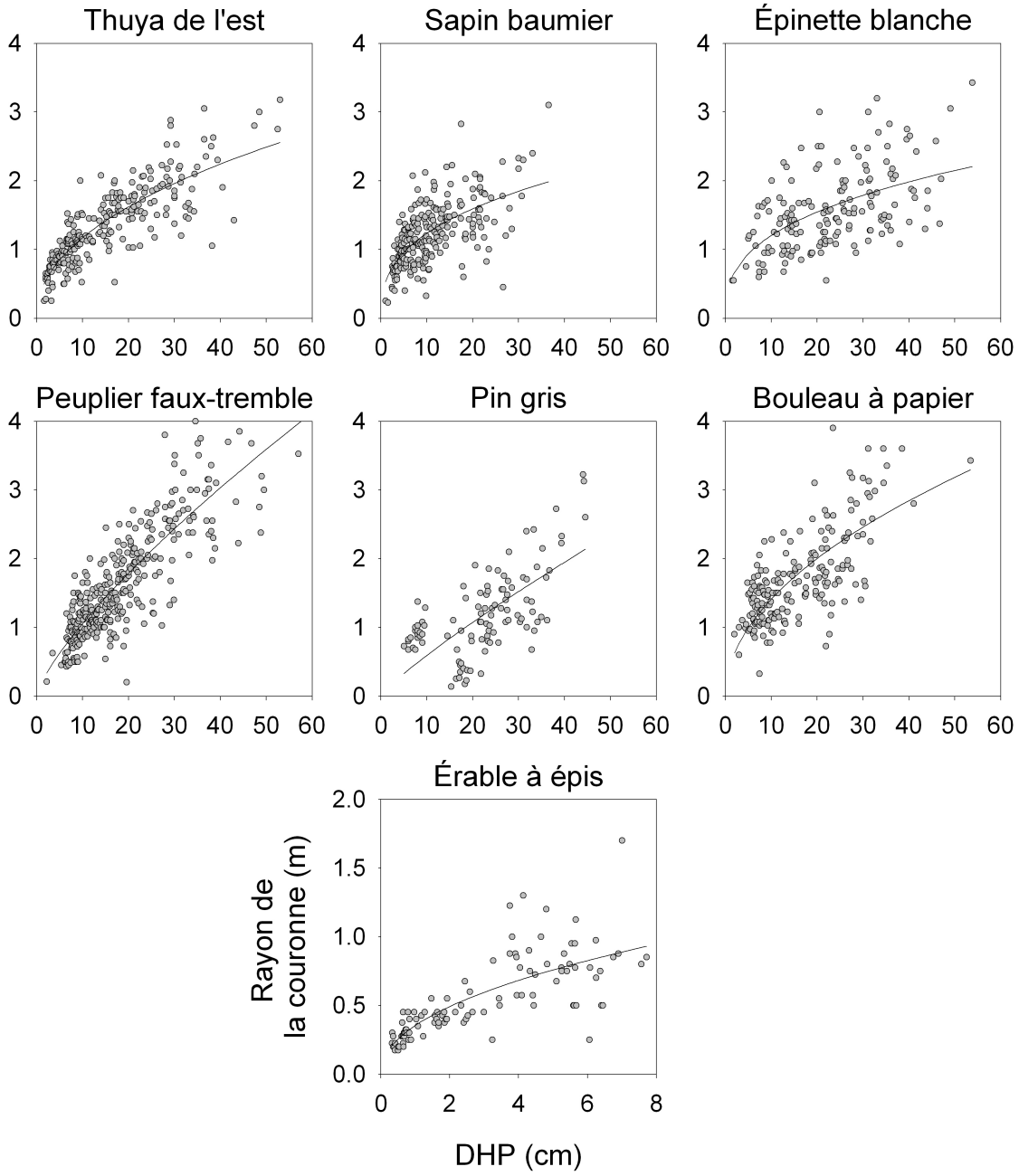

Figure 7. Rayon (m) de la couronne des arbres adultes et gaulis en fonction du DHP (cm). Les points sont les valeurs observées et les lignes sont les valeurs prédites selon l'Équation 4 et le paramètre C_1 du Tableau 5.

L'équation qui détermine la profondeur du cylindre de la couronne (m) (*Standard Crown Height Relationship*) pour les arbres adultes et les gaulis est la suivante :

[Eq. 5] Profondeur de la couronne = C_2 * hauteur de l'arbre^b

où C_2 est la fraction de la hauteur de l'arbre occupée par la couronne élevée à la puissance *b*. Le détail de l'analyse est présenté au Tableau 6 et la relation est illustrée à la Figure 8.

Les données brutes proviennent de L. Archambault (SCF-CFL) pour l'érable à épis et de P. Bartemucci et K.D. Coates (BC Forest Service) pour toutes les autres essences.

Tableau 6. Détail de l'analyse des paramètres C_2 et *b* de la relation entre la hauteur de l'arbre (m) et la profondeur de la couronne (m) pour les arbres adultes et les gaulis.

	Thuya de l'Est[1]	Sapin baumier[2]	Érable à épis[3]	Épinette blanche[1,2]	Pin gris[2]	Peuplier faux-tremble[1]	Bouleau blanc[1]
n	210	194	119	92	99	260	138
C_2	0,652	0,345	0,357	0,630	1,225	0,262	0,966
E.T.	0,072	0,047	0,050	0,125	0,345	0,057	0,063
b	0,982	1,188	0,877	1,010	0,581	1,110	0,751
E.T.	0,044	0,049	0,079	0,065	0,093	0,071	0,023
R^2	0,77	0,83	0,59	0,81	0,39	0,56	0,51

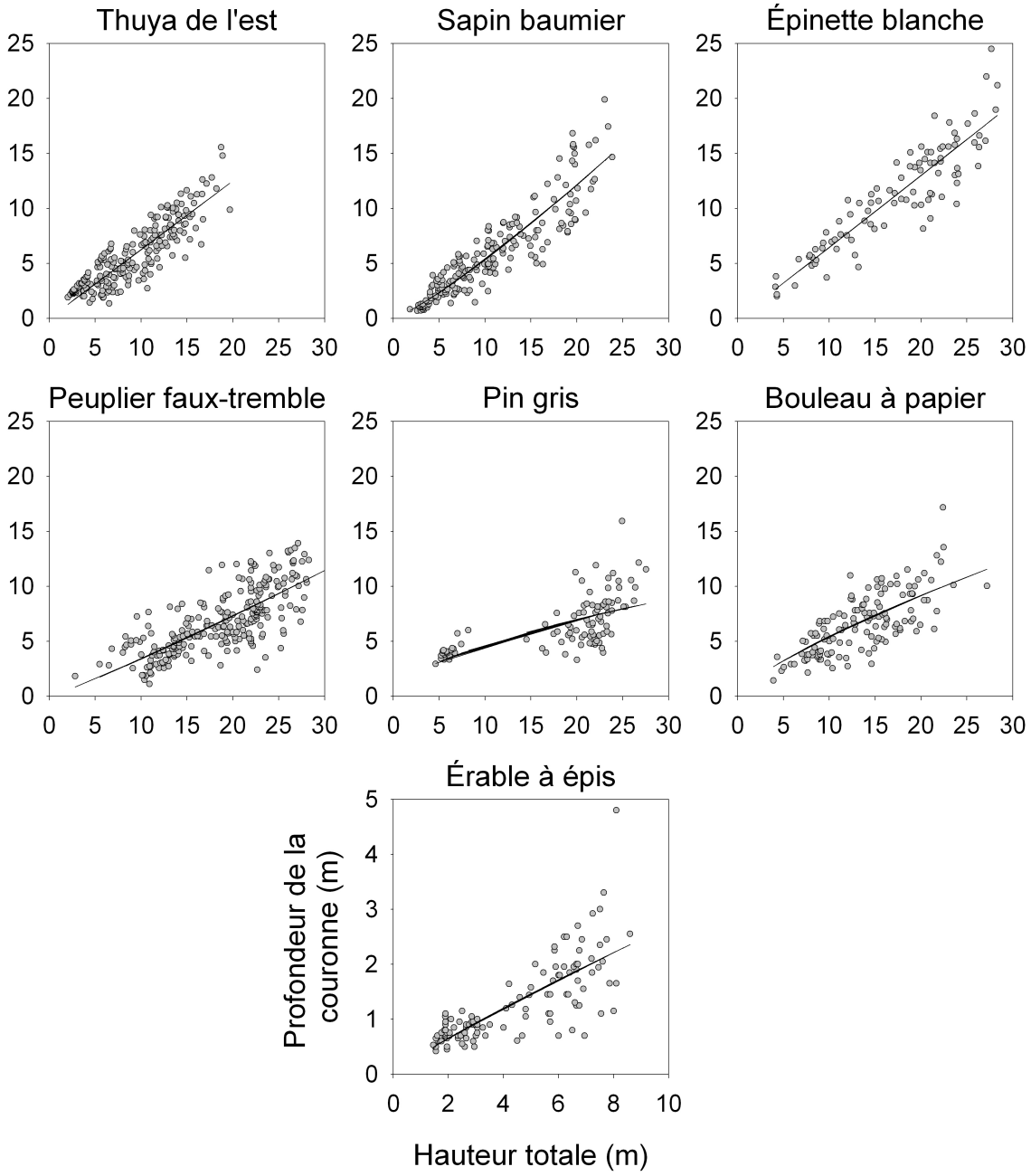

Figure 8. Profondeur (m) de la couronne des arbres adultes et gaulis en fonction de la hauteur totale de l'arbre (m). Les points sont les valeurs observées et les lignes sont les valeurs prédites selon l'Équation 5 et les paramètres du Tableau 6.

2.5. Coefficient de transmission de la lumière

Le coefficient de transmission de la lumière est le paramètre qui détermine la proportion de la ressource lumineuse intercepté par la couronne. Ce paramètre, dans SORTIE/ND, est traité dans le *Light Behavior*. SORTIE-ND ne tient pas compte de la lumière interceptée par le tronc. Ce choix est justifié par l'angle de la lumière analysé par le modèle qui est de 45° à partir du zénith. Dans cette fraction du ciel, ce sont majoritairement les branches et les feuilles qui interceptent la lumière.

Le coefficient a été estimé à partir de photos hémisphériques de couronnes des arbres. La caméra hémisphérique était placée à environ 2 m de l'arbre tout en isolant la couronne de l'arbre cible des couronnes voisines (Figure 9a). Les images numériques sont analysées avec le programme *Gap Light Analyser* (GLA, version 2.0) (Frazer *et al.* 2000). Le contour de la couronne à analyser doit être délimité (Figure 9b). Le tronc, les branches et les feuilles sont transformés en noir et le ciel en blanc par la fonction de seuillage (*Threshold*) (Figure 9c). Le programme GLA évalue la surface du ciel visible à travers la couronne en calculant le nombre de pixels blancs. Finalement, le nombre de pixels blancs (ciel) dans cette même surface sans l'arbre est calculé afin d'évaluer la quantité de lumière qui pénétrerait dans cette portion du ciel si cette couronne était absente (Figure 9d). La division du résultat obtenu à la Figure 9c par celui de la Figure 9d donne la fraction de la lumière qui traverse la couronne de l'arbre de cette essence (Tableau 9). Il est à noter que la proportion de pixels blancs sur une image est fournie par GLA sous le nom de *% openness*.

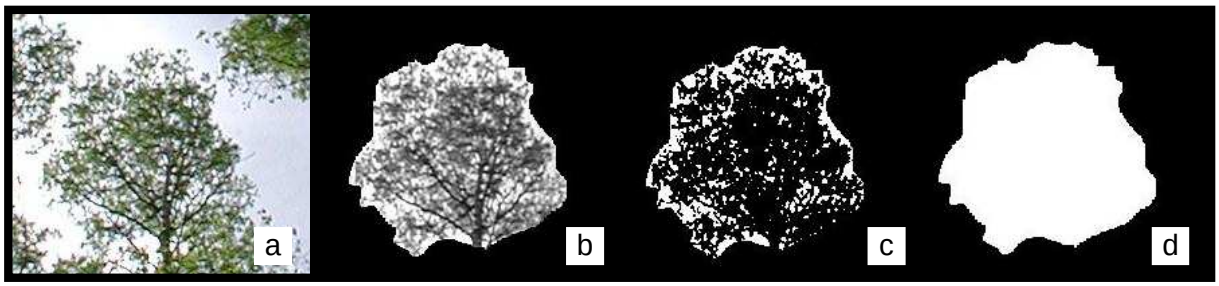

Figure 9. Illustration de l'analyse du coefficient de transmission de la lumière par la couronne des arbres : a) la couronne de l'arbre cible isolée; b) le tracé du contour de la couronne; c) la couronne en noir, le ciel en blanc; d) la surface totale occupée par la couronne.

Une étude de J. Poulin, K.D. Coates, C. Messier et P. Bartemucci (soumis) a permis de quantifier la lumière interceptée par la couronne des arbres morts (Tableau 7) en utilisant la méthode décrite pour les arbres vivants. Cependant, puisque l'arbre est mort, le contour de la couronne analysée a été tracé en estimant ce qu'elle aurait due être si l'arbre était vivant. Les arbres morts ont été divisés en trois classes de dégradation de la couronne :

- Classe 1; arbre dont la mortalité est récente et la forme de la couronne, telle qu'elle était vivante, est clairement définie par les fines branches ou les rameaux encore présents sur les branches plus grosses;

- Classe 2; arbre dont la mortalité est moins récente et qui a perdu ses fines branches. La forme de la couronne est moins bien définie mais elle peut être extrapolée à partir de branches plus grosses;

- Classe 3; arbre dont la mortalité n'est pas récente, sur lequel seulement quelques branches de fort diamètre persistent. La forme de la couronne est pratiquement absente. La forme de la couronne telle qu'elle était lorsque l'arbre était vivant est une estimation.

En connaissant le temps nécessaire à un arbre mort pour passer d'une classe à une autre (données à venir), il est possible de simuler la dynamique forestière suite à un feu, une épidémie d'insectes ou autres perturbations majeures.

Tableau 7. Coefficients de transmission de la lumière par la couronne des arbres vivants et des arbres morts de classe de décomposition 1 à 3. Le nombre d'arbres échantillons et l'écart type sont entre parenthèses.

	Vivant	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Thuya de l'Est	0,144 (n=31, ± 0,047)	-	-	-
Sapin baumier	0,111 (n=33, ± 0,040)	0,478 (n=31, ± 0,047)	0,684 (n=31, ± 0,047)	0,900 (n=31, ± 0,047)
Épinette blanche	0,109 (n=37, ± 0,044)	-	-	-
Pin gris	0,124 (n=36, ± 0,045)	0,489 (n=31, ± 0,047)	0,511 (n=31, ± 0,047)	0,740 (n=31, ± 0,047)
Peuplier faux-tremble	0,160 (n=38, ± 0,048)	0,650 (n=31, ± 0,047)	0,755 (n=31, ± 0,047)	0,883 (n=31, ± 0,047)
Bouleau blanc	0,101 (n=31, ± 0,036)	0,772 (n=31, ± 0,047)	0,841 (n=31, ± 0,047)	0,898 (n=31, ± 0,047)
Érable à épis	0,100[1]	-	-	-

[1] Cette valeur de paramètre est estimée, elle n'a pas encore été mesurée.

3. Croissance

Le module de croissance attribue un taux de croissance propre aux arbres juvéniles et adultes. Au stade juvénile, l'arbre croît radialement à 10 cm au dessus du sol et en fonction de la disponibilité lumineuse. Au stade adulte, il croît radialement au DHP, soit à un taux constant ou en fonction de ses voisins. Ces fonctions sont expliquées dans cette section.

3.1. Croissance juvénile

La croissance radiale des juvéniles à la hauteur du collet est fonction de la disponibilité lumineuse (Wright *et al.* 1998). L'échantillonnage avait comme objectif d'évaluer le taux de croissance des juvéniles sous différents environnements lumineux. Les arbres échantillonnés avaient un DHP inférieur à 5 cm et provenaient d'un environnement lumineux constant depuis 5 à 10 ans. Les environnements lumineux des gaulis échantillonnés variaient de 0 à 100% et étaient créés seulement par les arbres de la canopée. Les individus en compétition avec des gaulis plus grands et juxtaposés ont été évités. Les arbres étaient d'abord mesurés (hauteur,

diamètre au collet et DHP), puis coupés pour prélever une galette à 10 cm du sol pour analyse dendrochronologique (croissance moyenne des cinq dernières années). Une photo hémisphérique était ensuite prise à la mi-hauteur de l'arbre, au-dessus de la souche. Ces photos ont été analysées à l'aide du logiciel *Gap Light Analyser* (GLA, version 2.0. Frazer et al. 2000) afin d'évaluer le pourcentage de lumière (soit le Gap Light Index [GLI] sensu Canham [1988], tel que fourni dans le GLA par la valeur de *%TransTot*).

L'équation de la croissance radiale des arbres juvéniles à 10 cm (*Unlimited Absolute Growth Behavior - diam with auto height*) est la suivante:

[Eq. 6] $\mathbf{Log_{10}(Croissance\ radiale + 1) = SF * (a \bullet Lumière / ((a / s) + Lumière))}$

où Croissance radiale est un taux annuel de croissance mesuré à la base et exprimé en mm, où SF désigne un facteur d'oppression (*Suppression factor*), *A* est le paramètre *Asymptotic Diameter Growth* (à noter que malgré l'utilisation du terme « *Diameter growth* » dans le nom du paramètre, cette formule réfère à une croissance radiale); *S* est le paramètre *Slope of Growth Response* représentant la pente initiale de la relation entre la lumière et la croissance; et *GLI* est le pourcentage de lumière que reçoit le juvénile. C'est par la suite, dans des calculs internes, que SORTIE calcule la croissance en diamètre, en cm, pour la durée d'un pas de temps à l'aide de la conversion suivante: croiss diam (cm) par pas de temps = (((10^Y - 1) * 2)/ 10) * T, où Y est le Log10 (croissance radiale annuelle en mm + 1) et où T désigne le nombre d'années par pas de temps. Le détail de l'analyse des paramètres est rapporté au Tableau 8 et la relation est illustrée aux Figures 10 et 11. Le facteur d'oppression n'est pas utilisé (des valeurs de 0 doivent être attribuées aux paramètres *Length of Current Release Factor* et *Length of Last Suppression Factor*).

Tableau 8. Détail de l'analyse des paramètres A et S pour l'équation de la croissance (mm) radiale juvénile à la base en fonction de la lumière (GLI (%)).

	Thuya de l'Est[1]	Sapin baumier[2]	Érable à épis[3]	Épinette blanche[1,2]	Pin gris[2]	Peuplier faux-tremble[1]	Bouleau blanc[1]
n	49	63	96	63	44	52	51
A	0,382	0,567	0,409	0,561	6,176	0,828	2,162
E.T.	0,023	0,041	0,018	0,034	23,6	0,094	0,589
S	0,339	0,079	0,074	0,072	0,006	0,024	0,011
E.T.	0,127	0,015	0,014	0,014	0,001	0,004	0,001
R^2	0,60	0,56	0,29	0,56	0,38	0,46	0,81

1 Coates et Poulin, données non publiées et récoltées exclusivement pour la paramétrisation
2 Claveau *et al.* 2002
3 Aubin *et al.* 2005

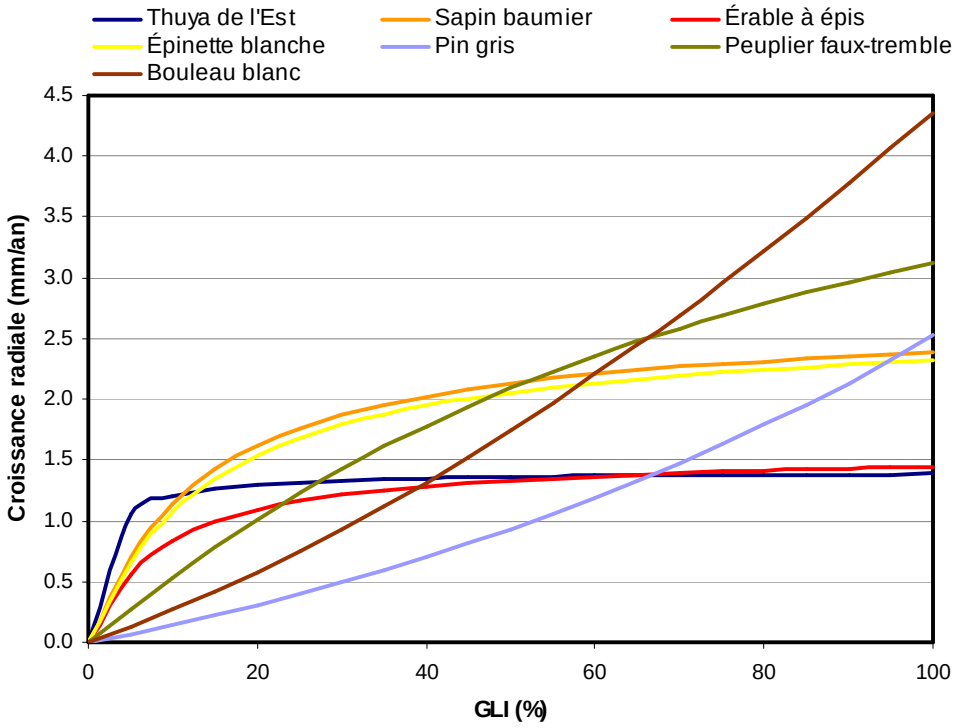

Figure 10. Croissance radiale annuelle (mm/an) à la hauteur du collet des juvéniles en fonction de la lumière (GLI (%)) prédite selon l'Équation 6 et les paramètres A et S du Tableau 8.

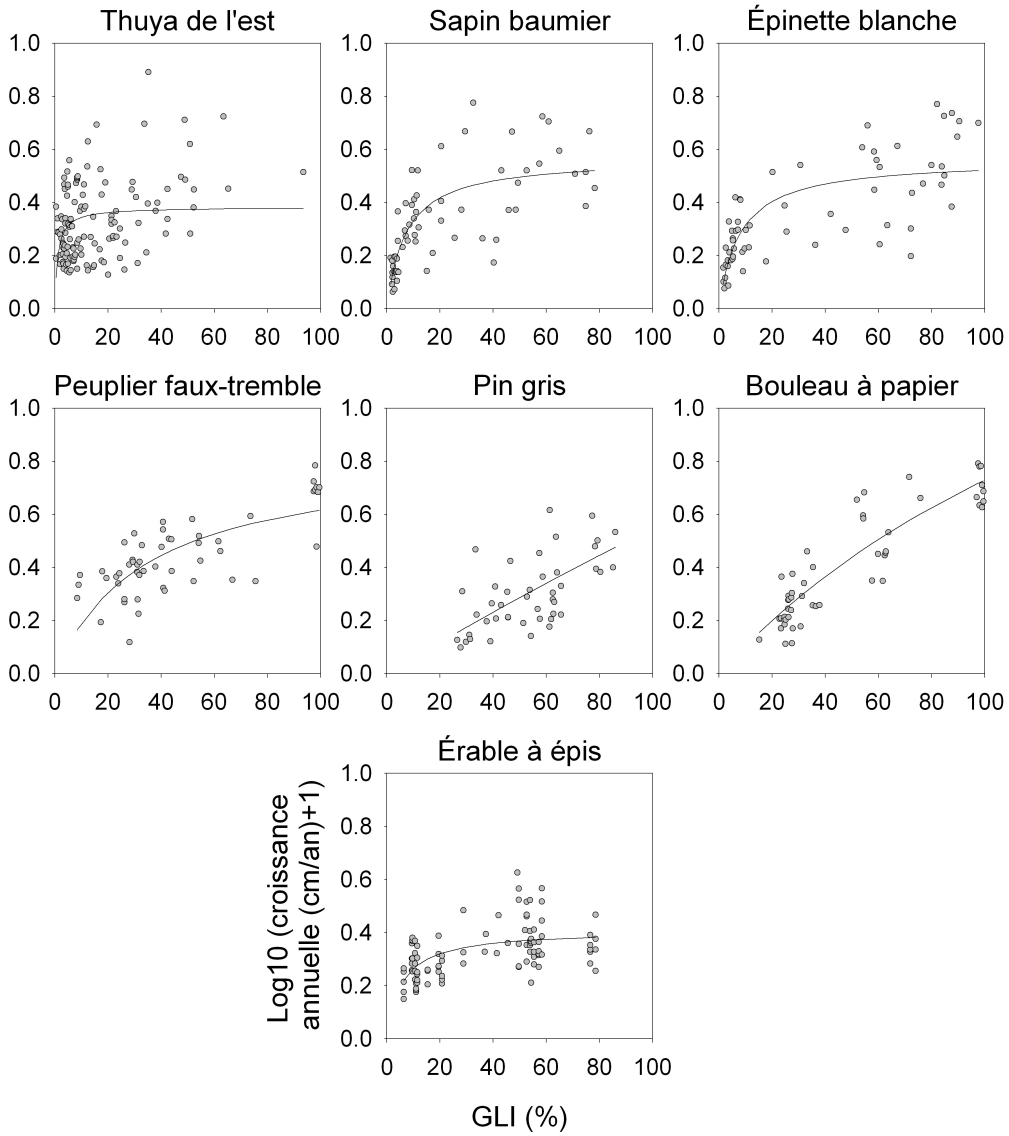

Figure 11. Croissance radiale annuelle (cm/an) des arbres juvéniles à 10 cm au-dessus du sol en fonction du pourcentage de lumière disponible (GLI (%)). Les points sont les valeurs observées et les lignes sont les valeurs prédites selon l'Équation 6 et les paramètres du Tableau 10.

3.2. Croissance adulte

La croissance des arbres adultes (individus de plus de 10 cm au DHP, sauf pour l'érable à épis pour lequel on utilise un seuil de 6 cm) peut être modélisée de diverses façons. La croissance en fonction de l'entourage (*Neighborhood Competition Index*, NCI) permet de tenir compte de l'effet des arbres voisins sur la croissance d'un arbre sujet. Malgré tous les avantages de cette approche, l'absence d'érable à épis et de pin gris dans la base de données recueillies pour la paramétrisation de la croissance NCI oblige l'utilisation de la croissance constante pour ces deux essences. La croissance constante, dont l'estimation est plus rapide et peu coûteuse, s'avère suffisamment précise sous certaines conditions de simulation. Ces deux approches sont expliquées dans cette section.

3.2.1. Croissance en fonction de la compétition (NCI)

Cette fonction simule la croissance de l'arbre sujet en fonction de la compétition exercée par les voisins. La croissance dépend 1) de l'essence et du DHP de l'arbre sujet, et 2) de la disposition des arbres voisins. Ainsi, un arbre situé à proximité d'une trouée aura une croissance potentiellement supérieure à celle d'un arbre de même essence et de même DHP entouré de voisins. La croissance en fonction de la compétition utilisée par SORTIE-ND/boréal est le *NCI growth – diam with auto height*. Les paramètres de la croissance NCI sont estimés par le programme *BCNeighborhood*, élaboré par C. Canham (voir Canham *et al.* 2004). La base de données et les équations sont décrites dans cette section.

Description de la base de données

Les données nécessaires à la paramétrisation de la croissance de type NCI sont 1) le DHP et la croissance radiale moyenne des cinq dernières années des arbres études et 2) la position cartésienne, le DHP et l'essence des arbres vivants de plus de 9 cm de DHP dans un rayon de 10 m autour des arbres études. La base de données doit être composée 1) de jeunes à de vieux peuplements, 2) d'une représentativité suffisante de chaque essence, 3) de petit à fort DHP et 4) de densités faibles à élevées.

Les données proviennent des placettes d'échantillonnage permanentes et destructives (tous les arbres y ont été coupés en 1990) de l'équipe de Y. Bergeron situées dans la Forêt d'enseignement et de recherche du Lac Duparquet (FERLD). Ces placettes sont situées dans des peuplements de différents stades de succession, ce qui correspond à différentes années de

feu soit 1760, 1797, 1823, 1847, 1870, 1916, 1944 et 1964 (une placette permanente et une destructive par année de feu). L'analyse de la base de données obtenue a démontré une lacune au niveau des individus DHP élevé pour le sapin baumier. Ainsi, cette base a été complétée avec l'échantillonnage de placettes permanentes du Ministère des Ressources naturelles de l'Ontario.

Placettes permanentes de la FERLD

Les données disponibles étaient la position cartésienne, l'essence et le DHP des arbres études en 1990-91 et en 2001, dans des placettes de 20 m par 20 m. L'échantillonnage supplémentaire, en 2001, consistait à 1) cartographier sur une largeur de 10 m supplémentaire au pourtour des parcelles originales de 20 m x 20 m pour obtenir la position, l'essence et le DHP des arbres susceptibles d'être voisins aux arbres études et 2) prélever deux carottes par arbre étude afin de mesurer la croissance annuelle moyenne des cinq dernières années (1996 à 2000).

Placettes destructives de la FERLD

Ces placettes destructives de 20 m par 20 m ont été coupées en 1990. Les données disponibles étaient la position cartésienne, l'essence, le DHP et la croissance annuelle des arbres études. Les croissances annuelles de 1985 à 1989 ont été utilisées pour calculer la croissance moyenne annuelle des arbres études. L'échantillonnage supplémentaire, en 2001, consistait cartographier sur une largeur de 10 m supplémentaire au pourtour des parcelles originales de 20 m x 20 m pour obtenir la position, l'essence et le DHP des arbres susceptibles d'être voisins aux arbres études en 1990. Le DHP des arbres susceptibles d'être voisins a été réduit pour correspondre au DHP de 1990.

Placettes permanentes du Ministère des Ressources naturelles de l'Ontario

À l'été 2006, 5 placettes ont été sélectionnés sur la base de la présence de sapin baumier. L'information disponible est l'essence et le DHP des arbres études dans un rayon de 11,28 m. Les données nécessaires pour compléter cette base étaient la cartographie et le DHP de tous les arbres dans un rayon de 21,28 m. La croissance annuelle moyenne pour les arbres études est la différence de DHP divisé par le nombre d'années entre les échantillonnages. Le détail de la base de données est rapporté au Tableau 9.

Tableau 9. Informations relatives aux arbres échantillonnés pour l'estimation des paramètres de la croissance des arbres adultes en fonction de la compétition (NCI).

	Nombre d'arbres études	DHP_{min} des arbres études (cm)	DHP_{max} des arbres études (cm)
Placettes permanentes et destructives de la Forêt d'enseignement et de recherche du Lac Duparquet			
Thuya de l'Est	90	9,0	44,7
Sapin baumier	55	9,2	22,5
Épinette blanche	48	9,5	46,2
Pin gris	-	-	-
Peuplier faux-tremble	260	9,0	42,9
Bouleau blanc	48	9,0	41,2
Érable à épis	-	-	-
Placettes permanentes du Ministère des Ressources naturelles de l'Ontario			
Thuya de l'Est	-	-	-
Sapin baumier	144	9	44,6
Épinette blanche	106	9,2	36,6
Pin gris	-	-	-
Peuplier faux-tremble	35	9,8	34,1
Bouleau blanc	46	9,4	34,7
Érable à épis	-	-	-

Description de l'équation

La fonction NCI permet de prédire la croissance diamétrale (cm/an) pour un arbre sujet d'une essence donnée en tenant compte de différents effets, soit :

[Eq. 7] Croiss=(CroissDiam$_{max}$)(Effet DHP)(Effet Ombrage)(Effet Compétition)

où *CroissDiam$_{max}$* est la croissance diamétrale maximale de l'arbre sujet (cm/an). Cette croissance potentielle est altérée par son DHP (*Effet DHP*), l'ombrage (*Effet Ombrage*) et la compétition (*Effet Compétition*).

La *CroissDiam$_{max}$* et l'*Effet DHP* (Éq. 7) se regroupent pour exprimer la variation de la croissance potentielle *(NCI Maximum Potential Growth,* cm/yr) en fonction du DHP à l'aide d'une fonction log-normale:

[Eq. 8] $CroissDiam_{pot} = CroissDiam_{max} \bullet EXP\ [\ -0.5\ \{\ [\ ln\ (DHP\ /\ X_0)\ ]\ /\ X_b\ \}^2\ ]$

où la $CroissDiam_{max}$ est la croissance diamétrale maximale (cm/an), le *DHP* est le DHP de l'arbre sujet (cm), X_0 est le DHP (cm) auquel la croissance potentielle est la plus élevée (*NCI Size Effect Mode*), X_b est la variance de la fonction (*NCI Size Effect Variance*). Les valeurs des paramètres $CroissDiam_{max}$, X_0, et X_b sont rapportées au Tableau 10 et le graphique illustrant la relation est à la Figure12.

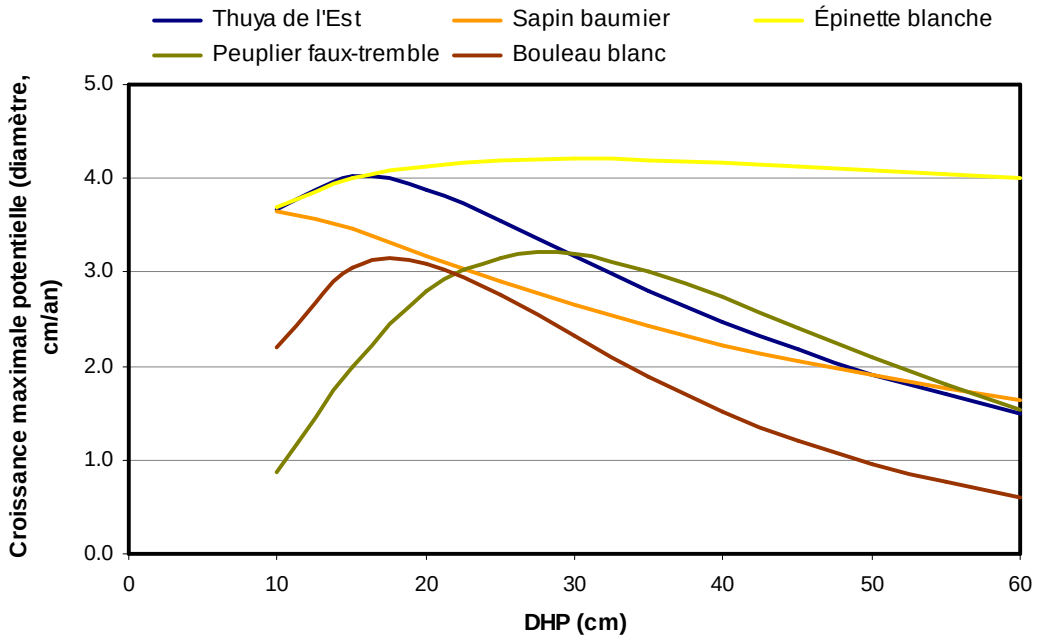

Figure 12. Croissance radiale maximale potentielle annuelle (cm/an) (sans compétition) en fonction du DHP (cm) pour chacune des essences selon l'Équation 8 et les paramètres du Tableau 10.

L'effet d'ombrage (Éq. 7) est calculé de la façon suivante :

[Eq. 9] ***Effet Ombrage* = EXP (-*m* • *S*^{n})**

où *m* est le *NCI Shading Effect Coefficient* (si = 0, l'effet ombrage n'est pas considéré), *n* est le *NCI Shading Effect Exponent*, *S* est l'ombrage provenant des arbres voisins calculée par le *Sail Light Behavior* (si = 0, aucun ombrage par les voisins; si = 1, ombrage maximum par les voisins). La valeur du paramètre *m* sont rapportées au Tableau 10.

L'effet compétition (Éq. 7) est calculé de la façon suivante :

[Eq. 10] ***Effet Compétition* = EXP (-*C* • *DHP*$^{\gamma}$ • *NCI*^{D})**

où *C* est la pente de la fonction (*NCI Crowding Effect Slope*) (si = 0, annule l'*Effet Compétition)*, *DHP* est le DHP de l'arbre sujet (cm), le paramètre γ (*NCI Size Sensitivity to NCI*) détermine comment le DHP de l'arbre sujet affectera sa sensibilité à la compétition (si = 0, le DHP de l'arbre sujet n'affecte pas l'*Effet Compétition*), *D* est le *NCI Crowding Effect Steepness* (si = 1, annule son effet), et *NCI* est l'indice de compétition (*Neighborhood Competition Index*). Les valeurs des paramètres *C,* γ*, et D* sont rapportées au Tableau 10.

L'indice de compétition (*NCI*, Éq. 10) quantifie la pression de compétition exercée par les voisins. Les valeurs de trois paramètres doivent être définies. Le premier est le DHP minimum des arbres voisins à considérer (*NCI Minimum Neighbor DBH, in cm*). À noter que les semis ne peuvent pas être considérés comme voisins potentiels dans le NCI. Le deuxième paramètre à définir est la distance maximale des arbres voisins à considérer (*NCI Maximum Radius of Crowding Neighbors*) et le troisième détermine si on inclue les chicots ou non dans le calcul du NCI (*Include Snags in NCI Calculations*). Le NCI (*Neighborhood Competition Index*) est calculé comme suit:

[Eq. 11] $$NCI_i = \sum_{j=1}^{S} \sum_{k=1}^{N} \eta_k \lambda_{ik} \frac{\left(DHP_{jk} / q \right)^{\alpha}}{\left(dist_{ik} \right)^{\beta}}$$

où *i* représente l'arbre sujet; *j* désigne l'essence des arbres voisins; *k* numérote les voisins. Le paramètre η_k sert à ternir compte de l'état de dommage des voisins, mais n'est pas utilisé dans notre cas (une valeur de 1 lui est donc attribuée). Les valeurs du paramètre λ_{ik} (*Species j NCI Lambda parameter*) servent à pondérer l'effet de compétition exercé par les voisins selon leur essence et l'essence de l'arbre sujet. Si l'ensemble des λ = 1, la pression de compétition exercée par les voisins ne dépendra pas de l'essence des voisins par rapport à l'arbre sujet. Le DHP_{jk} est le DHP (cm) du k^e voisin de l'essence *j*. Le paramètre *q* est le *NCI DBH Divisor* (*q* = 100 pour la présente version). Une valeur de *q* supérieur à 1 permet de calibrer la pression de compétition exercée par les voisins. Le paramètre α est le *NCI Alpha* (si = 0, le DHP des voisins n'est pas considéré, seul leur nombre est répertorié). La variable $dist_{ik}$ est la distance (m) de

chacun des voisins *k* par rapport à l'arbre sujet *i*. Le paramètre β est le *NCI Beta parameter* (si = 1, la pression de compétition exercée par un voisin diminue avec sa distance de l'arbre sujet; si = 0, la distance des voisins n'est pas prise en compte). Les valeurs des paramètres λ, α et β sont rapportées au Tableau 10.

Tableau 10. Paramètres de croissance des arbres adultes en fonction de la compétition (NCI).

	Thuya de l'Est	**Sapin baumier**	**Épinette blanche**	**Peuplier faux-tremble**	**Bouleau blanc**
Effets inclus dans le meilleur modèle retenu	DHP & Ombrage	DHP, Ombrage, Compétition	DHP, Ombrage, Compétition	DHP & Compétition	DHP & Compétition
R^2 du modèle retenu	0,212	0,402	0,330	0,325	0,506
NCI Minimum Neighbor DBH, in cm	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
NCI Maximum Potential Growth, cm/yr[1]	0,807	0,733	0,842	0,642	0,629
NCI Maximum Crowding Distance, in meters (R)	10,000	9,968	9,915	5,229	7,334
NCI Alpha	0,000	1,638	0.563	2,858	0,303
NCI Beta	0,0	0,0	0	0,272	0,128
NCI Size Sensitivity to NCI (gamma)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NCI Crowding Effect Slope (C)	0,000	0,574	0,182	7,067	0,627
NCI Crowding Effect Steepness (D) (non utilisé)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
NCI Size Effect Mode, in cm (X_0)	15,32	9,00	30,00[2]	27,88	17,72
NCI Size Effect Variance, in cm (X_b)	0,970	1,496	2,166	0,633	0,672
NCI Shading Effect Coefficient (m)	1,940	1,022	0,862	1,000	1,000
Lambda (λ)					
Groupements	Sans compétition	5 espèces	5 espèces	2 groupes (compétition intra/inter spécifique)	5 espèces
Thuya de l'Est	0,000	0,707	0,706	1,000	0,000
Sapin baumier	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
Érable à épis	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Épinette blanche	0,000	0,396	0,413	1,000	0,205
Pin gris	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Peuplier faux-tremble	0,000	0,606	0,198	0,010	0,349
Bouleau blanc	0,000	1,000	1,000	1,000	0,699

[1] Croissance diamétrale.
[2] Cette valeur est estimée, échantillonnage insuffisant.

3.2.2. Croissance constante

L'approche de la croissance constante consiste à augmenter le diamètre des arbres peu importe les conditions de lumière et de compétition. Cette approche est utilisée pour les essences pour lesquelles nous n'avons pas de données permettant d'évaluer l'effet de la compétition sur la croissance. Les données utilisées pour évaluer le taux de croissance moyen constant proviennent des placettes d'échantillonnage permanentes (PEP) du Ministère des Ressources naturelles et de la faune du Québec. Les placettes sélectionnées provenaient de la région écologique 5a, sur des dépôts fluvioglaciaires, comportaient un nombre d'arbre supérieur à 10 et étaient exemptes de coupe. Une croissance diamétrale annuelle moyenne a été calculée pour chaque intervalle d'échantillonnage. Le résultat a été divisé par deux afin d'obtenir la croissance radiale moyenne annuelle (mm/an) (Tableau 11).

Tableau 11. Nombre d'arbres par essence, minimum et maximum (min-max), moyenne (moy) et écart type (E.T.) du DHP (cm) et du taux de croissance radiale moyen (mm/an) des arbres adultes des placettes d'échantillonnage permanentes du Québec sélectionnées (région écologique 5a sur des dépôts fluvioglaciaires).

		DHP			**Taux de croissance**		
	n	**min-max**	**moy**	**E.T.**	**min-max**	**moy**	**E.T.**
Érable à épis	89	0,6 - 6,8	2,5	1,5	0,41 - 2,69	1,144	0,489
Pin gris	751	9,1 - 26,8	14,3	3,4	0,03 - 3,31	0,659	0,41

4. Mortalité

Le taux de mortalité varie selon le stade ontogénique de l'individu. Au stade juvénile, la probabilité de mortalité est d'une part aléatoire et d'autre part dépendante de la croissance récente (celle-ci étant elle-même dépendante de la lumière). Au stade adulte, la probabilité de mortalité est d'une part aléatoire, et d'autre part dépendante du DHP; plus l'arbre croît et

s'approche d'un certain seuil de DHP, appelé DHP au début de la sénescence, plus sa probabilité de mortalité augmente de sorte que tous les arbres d'une essence finissent par disparaître au-dessus d'un certain DHP. Une fonction d'auto-éclaircie peut de plus être utilisée pour simuler la mortalité lorsque la densité est très élevée. Ces fonctions sont expliquées plus en détails dans les sections suivantes.

4.1. Mortalité juvénile

La mortalité juvénile est déterminée simultanément par deux fonctions, l'une aléatoire et l'autre qui est fonction de la croissance récente. Ces fonctions sont expliquées dans cette section.

4.1.1. Mortalité aléatoire

Le taux annuel de mortalité juvénile aléatoire (*Juvenile Background Mortality*) doit être estimé à partir de données empiriques par l'utilisateur en considérant la densité initiale d'une simulation donnée. Ce taux annuel de mortalité est par défaut fixé à 1 % pour toutes les essences, sauf le thuya pour lequel une valeur de 0,5 % a été utilisée. À noter que le taux doit être sous forme de fraction (donc 0.005 pour le thuya et 0,01 pour les autres espèces).

4.1.2. Mortalité en fonction de la croissance

La fonction de mortalité dépendante du taux de croissance radiale (*BC mortality*) fonctionne comme suit; plus la croissance récente est élevée, plus la probabilité de mortalité diminue. Puisque la croissance juvénile est dépendante de la ressource lumineuse, la mortalité est indirectement dépendante de cette ressource. L'étude ayant permis l'évaluation des paramètres pour la région du Lac Duparquet a été effectuée par D. Kneeshaw (Kneeshaw *et al.* 2006). L'équation de la probabilité de mortalité est la suivante :

[Eq. 12] $$P(\text{mortalité} \mid \text{croissance}) = 1 - \exp(-T \cdot M_1 \cdot \exp(-M_2 \cdot G))$$

où M_1 est la probabilité de mortalité du juvénile à une croissance nulle (*Mortality at Zero Growth*, ce paramètre n'est pas utilisé, donc M_1 =1); T est le nombre d'années dans un pas de temps; G est l'accroissement radiale de l'arbre pendant le temps T en mm; M_2 est le paramètre de mortalité dépendant de la croissance (*Light-Dependent Mortality*) (Kobe *et al.* 1995, Kobe et Coates 1997; Kneeshaw *et al.* 2006). La valeur de ce paramètre nous informe sur la tolérance à

l'ombre de l'essence; plus la valeur de M_2 est élevée, plus l'essence est tolérante à l'ombre. La valeur de ce paramètre est rapportée au Tableau 12.

Tableau 12. Paramètres de mortalité dépendant de la croissance (M_2).

	Thuya de l'Est	Sapin baumier	Érable à épis	Épinette blanche	Pin gris	Peuplier faux-tremble	Bouleau blanc
Mortality at Zero Growth (M_1 dans Eq. 12)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Light-Dependent Mortality (M_2 dans Eq. 12)	9,15[1]	8,45[1]	3,50[1]	6,75[1]	3,74[2]	2,55[1]	3,61[1]

1 Kneeshaw *et al*. (2006).
2 Kobe et Coates (1997), même valeur que Lodgepole pine (SORTIE/BC).

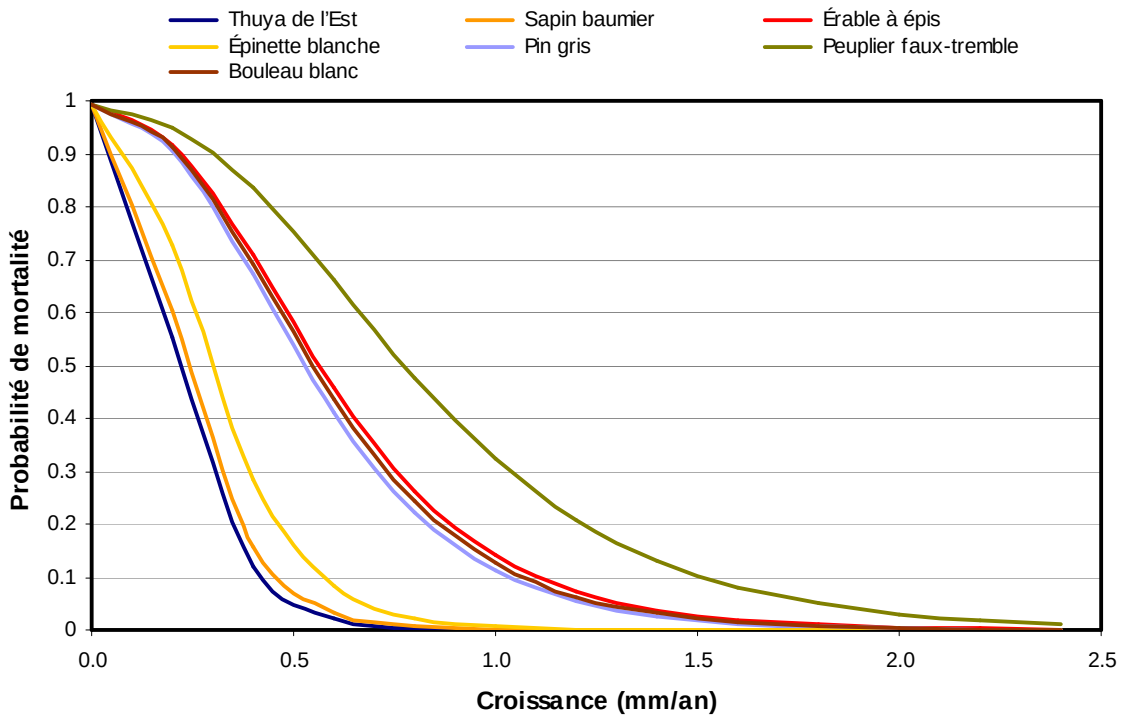

Figure 13. Probabilité de mortalité des juvéniles en fonction de la croissance récente (mm/an) selon l'Équation12 et les paramètres du Tableau 12.

4.2. Mortalité adulte

La probabilité de mortalité des adultes est déterminée simultanément par deux fonctions, l'une aléatoire et l'autre qui est fonction du DHP (et donc indirectement du stade de sénescence). Ces fonctions sont expliquées dans cette section.

4.2.1. Mortalité aléatoire

Le taux de mortalité annuelle aléatoire des arbres adultes (*Adult stochastic mortality*), indépendant du DHP, a été calculé à partir de données des placettes d'échantillonnage permanentes (PEP) du ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Les placettes sélectionnées étaient les mêmes que celles utilisées pour calculer le taux de croissance constant de certaines espèces (voir section sur la croissance adulte constante). Cette étude a été menée par J. Poulin et K.D. Coates. Le taux de mortalité annuel a été calculé ainsi :

[Eq. 13] **Taux de mortalité = $((V_1 - V_0) / V_0) / (t_1 - t_0)$**

où V_0 est le nombre d'arbres vivants de plus de 10 cm de DHP au temps 0; V_1 est le nombre des arbres V_0 encore vivants au temps 1; t_1-t_0 est le nombre d'années séparant le temps 0 du temps 1. Les placettes dont le remesurage (au temps t_1) était effectué après le 1er août se voyait ajouter 1 an à la durée de l'intervalle t_1-t_0 (exemple: t_0= août 1995 et t_1= juin 2000, t_1-t_0=4). Les taux de mortalité annuel ainsi calculés pour chaque essence sont rapportés au Tableau 13.

Tableau 13. Taux de mortalité annuels moyens (exprimés sous forme de fraction) des arbres adultes calculés à partir des placettes d'échantillonnage permanentes du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (région écologique 5a sur des dépôts fluvioglaciaires).

	Thuya de l'Est	Sapin baumier	Érable à épis	Épinette blanche	Pin gris	Peuplier faux-tremble	Bouleau blanc
n[1]	-	28	-	26	26	22	-
Taux de mortalité (*Adult Background Mortality*)	0,005[2]	0,020	0,020	0,013[2]	0,019	0,016	0,006[2]
Écart type	-	0,031	-	0,026	0,017	0,015	-

1 Le n est le nombre de placettes utilisées pour calculer les taux moyens de mortalité.
2 Les taux de mortalité du thuya de l'Est, de l'épinette blanche et de l'érable à épis ont été estimés, faute de données empiriques, lors de la calibration de la sénescence (voir section suivante).

4.2.2. Mortalité à la sénescence

Cette fonction de mortalité à la sénescence (*Senescence*) impose un taux de mortalité qui augmente progressivement à mesure que l'arbre croît (et que son DHP augmente). Les probabilités de mortalité augmentent drastiquement lorsque l'arbre atteint un certain seuil de DHP (*DBH at Onset of Senescence*), indiquant le début du stade de sénescence, puis le taux de mortalité demeure constant au-delà d'un certain DHP (*DBH of Maximum Senesence*), ici fixé à 100 cm. Cet accroissement important de la probabilité de mortalité fait en sorte que l'ensemble des arbres de fort DHP finissent par disparaître à l'âge maximum connu pour l'essence. L'évaluation des paramètres relatifs à cette fonction a été effectuée par M. Papaik, J. Poulin, et C. Messier. L'équation de la probabilité de mortalité à la sénescence (une valeur entre 0 et 1 qui représente la probabilité annuelle de mortalité) est la suivante :

[Eq. 14] $$m_s = EXP(\alpha + \beta(DHP-DHP_s)) / (1 + EXP(\alpha + \beta(DHP-DHP_s)))$$

où α (*Senescence Mortality Alpha*) et β (*Senescence Mortality Beta*) sont des paramètres qui contrôlent la magnitude de l'augmentation de la de la probabilité de mortalité en fonction du DHP; *DHP* (cm) est le diamètre à la hauteur de la poitrine de l'arbre sujet; DHP_s est le DHP (cm) estimé comme indiquant le début du stade de sénescence de l'essence (*DHP at Onset of Senescence*).

Cette fonction est calibrée en comparant les tables de production publiées par Pothier et Savard (1998) avec la démographie obtenue lors des simulations des conditions initiales de ces mêmes tables. Les tables utilisées étaient celles ayant le plus haut indice de qualité de la station (IQS) pour l'essence et correspondant à des peuplements de densité moyenne. La longévité obtenue a aussi été comparée aux valeurs rapportées par Harvey *et al.* (2002). Pour l'érable à épis, les paramètres ont été estimés sans comparaison possible faute de données empiriques. La valeur de ces paramètres et la référence de la table utilisée pour chaque essence sont rapportées au Tableau 14 et la relation est illustrée à la Figure 14.

Tableau 14. Paramètres α, β et DHP_s issus de la calibration de la fonction de mortalité à la sénescence à partir des tables de production Pothier et Savard (1998) (voir page référence et IQS auquel cela correspond).

	Thuya de l'Est	**Sapin baumier**	**Érable à épis**	**Épinette blanche**	**Pin gris**	**Peuplier faux-tremble**	**Bouleau blanc**
α	-4,0	-4,5	-3,0	-4,1	-3,7	-3,5	-3,1
β	0,05	0,22	0,2	0,04	0,28	0,08	0,12
DHP_s	75,0	40,0	8,0	40,0	35,0	45,0	30,0
Table (page)	182	172	-	114	156	143	101
IQS	15	21		18	18	24	21

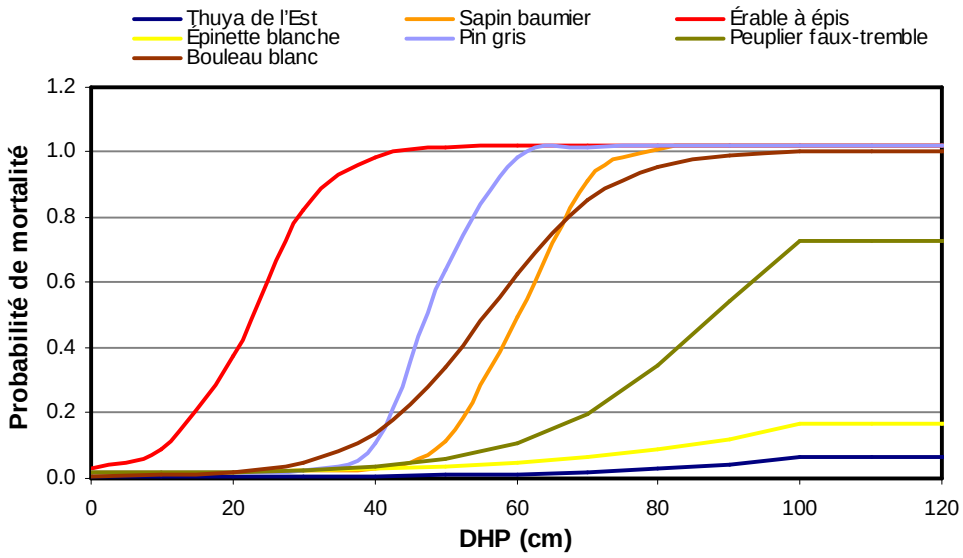

Figure 14. Probabilité de mortalité à la sénescence en fonction du DHP (cm) prédite selon l'Équation 14 et les paramètres du Tableau 16.

4.3. Fonction d'auto éclaircie

Lors de la simulation de peuplements équiens très denses, les fonctions de mortalité décrites précédemment n'éliminent pas suffisamment d'arbres. La fonction d'auto éclaircie (*Self-thinning*) répond à ce problème en appliquant une probabilité pseudo dépendante de la densité. Cette fonction très simple, linéaire et dépendante du DHP, gagnerait à être raffinée. Par défaut, cette fonction n'est pas activée. En l'activant, deux fonctions sont définies; une pour les semis et les gaulis et l'autre pour les adultes, cela pour toutes les essences dont les paramètres pour cette fonction sont différents de zéro (Tableau 15). Cette fonction est paramétrée uniquement pour le peuplier (K.D. Coates, données non publiées). Elle simule très bien la dynamique des rejets de peuplier d'une densité relativement uniforme de plus de 5 000 tiges à l'hectare.

Tableau 15. Paramètres des fonctions linéaires d'auto-éclaircie utilisées pour les juvéniles et les adultes.

	Peuplier faux-tremble
Juvénile	
Pente (*Juvenile Self-Thinning Slope*)	-0,005

Intercepte (*Juvenile Self-Thinning Intercept*)	0,0871
Adulte	
Pente (*Adult Self-Thinning Slope*)	-0,0019
Intercepte (*Adult Self-Thinning Intercept*)	0,0543
DHP maximum (cm)	30

5. Substrat

Le *Substrate behavior* simule la dynamique (i.e., les proportions et taux de conversion) existant entre six différents types de substrats (*Substrate*) : litière forestière (*forest floor litter*), litière de mousse (*forest floor moss*), sol scarifié (*scarified soil*), bois frais (*fresh logs*), bois décomposé (*decayed logs*) et sol minéral exposé suite à un chablis (*tip-up mounds*). Les litières forestière et de mousse forment un tout, litière (*forest floor substrate*), dont les proportions relatives sont fixées selon la valeur du paramètre *Proportion of Forest Floor Litter/Moss Pool that is Moss* qui, dans notre cas, est fixée à 0. Le schéma qui illustre le modèle de dynamique des substrats utilisé dans SORTIE-ND est présenté à la Figure 15.

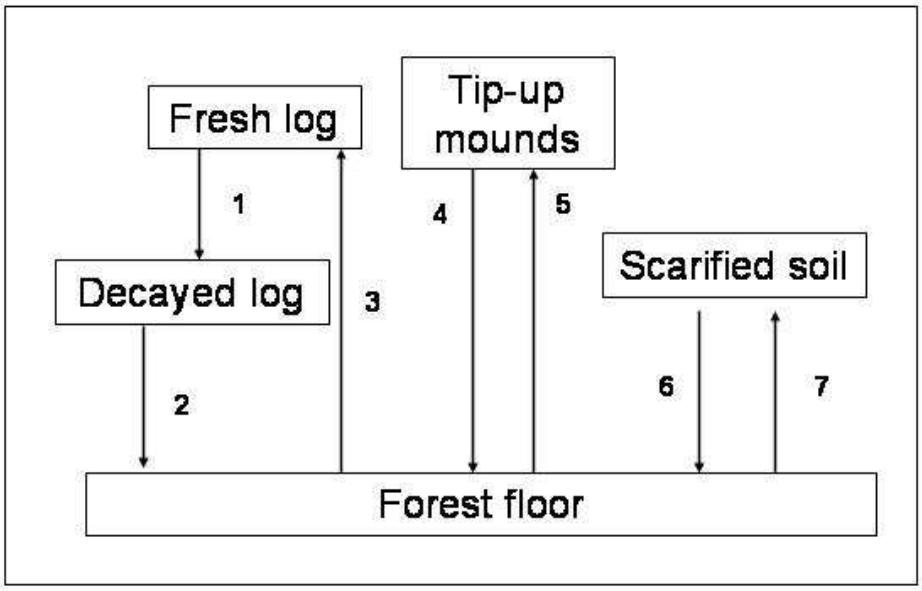

Figure 15. Schéma de la création et de la décomposition des substrats. Le *Forest floor* est composé de *Forest Floor litter* et *Forest Floor Moss*.

Les paramètres régissant les taux de transition entre certains types de substrats sont rapportés au Tableau 16. Les taux de transition correspondant aux flèches 1, 2, 4 et 6 du schéma de la Figure 15 sont calculés à l'aide de l'équation suivante et illustrés à la Figure 16:

[Eq. 15] $y = EXP(\alpha * t^{\beta})$

où y est la proportion restante du substrat de départ au temps t, et *t* représente le temps en nombre d'années.

Tableau 16. Valeurs des paramètres α et β (Mike Papaik, communication personnelle) de l'Équation du taux annuel de transition entre différents substrats (Eq. 15). Les numéros entre parenthèses se rapportent à ceux de la Figure 15.

	α	β
Scarified soil à Forest floor (flèche 6)	-0.0000005	4.36
Tip-up mounds à Forest floor (flèche 4)	-0.0000006	4.34
Fresh logs à Decayed logs (flèche 1)	-0.000002	6.4
Decayed Logs à Forest floor (flèche 2)	-0.11653383	1.0

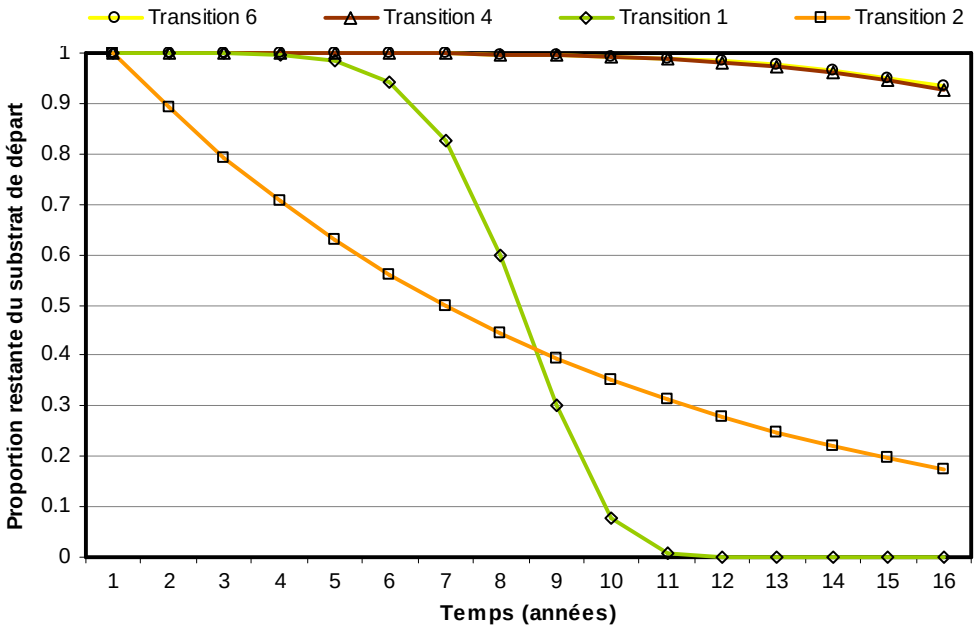

Figure 16. Schéma de la dynamique de décomposition des substrats.

Si aucun nouveau substrat n'est créé, tout le sol sera éventuellement composé de litière dans un temps maximum de 15 ans (défini par le paramètre *Maximum Number of Years that Decay Occurs*). La création de nouveau substrat réduit la quantité de litière et le processus de décomposition s'enclenche de nouveau.

Au début d'une simulation, chaque cellule (10 m X 10 m par défaut) de la parcelle a les mêmes proportions initiales des différents types de substrat (Tableau 17). Il existe deux types d'événements qui modifient le substrat; les traitements sylvicoles et les arbres morts qui tombent au sol. Lors de l'application d'un traitement sylvicole, la proportion de tous les types de substrats peut être modifiée de façon à ce que celles-ci correspondent, tout de suite après l'application d'un type de coupe donné, aux proportions spécifiées dans la feuille de paramètres pour ce type de coupe. À noter toutefois que les données requises pour évaluer ces nouvelles proportions de substrats après coupe n'ont pas encore été récoltées (Tableau 17).

Tableau 17. Proportion initiale et après traitement des différents substrats.

	Apellations dans feuille de paramètres	**Condition Initiale[1]**	**Coupe partielle[2]**	**Coupe par trouées[2]**	**Coupe totale[2]**
Conifer litter	Scarified soil	0,024	-	-	-
Rotten wood	Tip up mounds	0,215	-	-	-
Solid wood	Fresh Logs	0,147	-	-	-
Sphagnum	Decayed Logs	0,017	-	-	-
Deciduous litter	(Forest floor litter)	0,597	-	-	-

1 Étude de I. Ritchie et David Greene
2 Données à venir

La chute d'un arbre mort peut augmenter la proportion de deux types de substrats : *tip-up mounds* et *fresh logs*. Pour ce qui est des arbres morts, une certaine proportion de ceux-ci tombent. Cette proportion est définie par le paramètre *Proportion of Dead that Fall*, qui peut varier selon les espèces mais dont la valeur a ici été fixée à 0.7 pour toutes les espèces. Le

modèle calcule la surface maintenant occupée par ce bois frais dans la cellule correspondante. Ce calcul est effectué à l'aide de l'équation suivante :

[Eq. 16] Fresh Log Area = (DBH * h) / 2

où *Fresh Log Area* est la superficie (m^2) de bois frais créé, *DBH* est le DHP (cm) de l'arbre tombé, et *h* représente la hauteur (m) de ce dernier. L'ajout de superficie de bois frais au substrat se répartit spatialement selon la valeur du paramètre *Use Directional Tree Fall*. Si celui-ci est mis à « FALSE » (comme c'est le cas dans la feuille de paramètre décrite ici), la création de bois frais se limite à la cellule dans laquelle l'arbre mort se trouvait, alors que si le paramètre en question est mis à « TRUE », l'arbre tombe dans une direction aléatoire et la création de bois frais survient dans toutes les cellules affectées.

Certains de ces arbres morts tombés exposeront du sol minéral en formant une butte de chablis (*tip up mound*) (voir flèche 5 à la Figure 15), ce qui modifiera la proportion de ce dernier substrat pour la cellule. La proportion des arbres tombant qui formeront aussi une butte de chablis est définie par le paramètre *Proportion of Fallen that Uproot*, dont la valeur a ici été fixée à 0,5 pour toutes les espèces.

Pour chacun des arbres tombant qui se renversent en formant une butte de chablis, la superficie du substrat de type *tip up mound* qui sera créé est calculée selon l'équation suivante :

[Eq. 17] Tip Up Area = π * $(r*F)^2$

où Tip Up Area est la superficie (m^2) du substrat *tip up mound* créé, r est la rayon (m) du tronc de l'arbre tombé, et F est le paramètre *Uprooted Tree Radius Increase Factor for Root Rip-Out* dont la valeur est ici fixée à 3.1. La superficie de substrat tip up mound créé varie donc selon la taille de l'arbre, tel qu'illustré à la Figure 17.

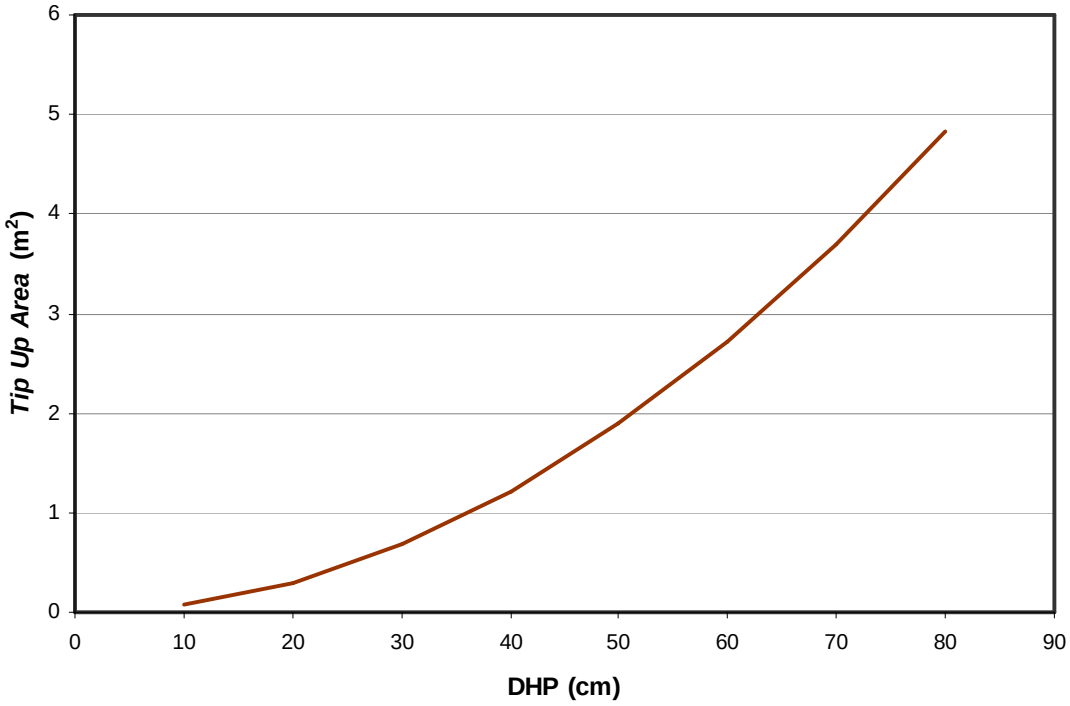

Figure 17. Superficie de substrat *tip up mound* créée selon la dimension de l'arbre tombé (ici illustré en fonction du DHP, en cm), prédit selon l'Équation 17.

6. Production et dispersion

La fonction de dispersion spatialement explicite (*Gap spatial disperse*) détermine le nombre et la distribution spatiale des semis produits par les arbres semenciers en fonction de leur DHP, de leur essence et de leur localisation. Le DHP auquel l'arbre commence à se reproduire (défini par le paramètre *Minimum DBH for Reproduction, in cm*) a été établi à 4 cm pour l'érable à épis et 15 cm pour les autres essences. Le diamètre à 10 cm au-dessus du sol des nouveaux semis produits (paramètre *New Seedling Diameter at 10 cm* dans *Tree Population Behavior*) a été fixé à 0,1 cm.

L'équation qui détermine la quantité de semis produits par un arbre et leur patron de dispersion (ici, selon une fonction de Weibull radialement symétrique centrée sur l'arbre et déterministe) est la suivante:

[Eq. 18] $$\textbf{\textit{Densité}} = \frac{STR}{n}\sum_{j} cover_j \left(sub_fav\right)_j \sum_{k}\left(\frac{dbh_k}{30}\right)^{\beta} e^{-D*\left(Dist_k^{\theta}\right)}$$

où la *Densité* désigne la quantité de semis par m^2 en un point donné *i*, *STR* (*Standardized total recruits*) est le nombre de semis produits par un arbre de 30 cm de DHP sur un substrat optimal; *n* est un terme normalisant (Ribbens *et al.* 1994); *β* est le paramètre *Weibull Canopy or Gap Beta* dont la valeur est ici fixée à 2 (faisant en sorte que la quantité de semis produits est une fonction de la surface terrière du semencier), *D* est le paramètre de dispersion spécifique à chaque espèce (*Weibull Canopy or Gap Dispersal*) qui contrôle la probabilité de trouver un semis à une distance *Dist* (m) du semencier *k*, et *θ* est le paramètre *Weibull Canopy or Gap Theta* dont la valeur est ici fixée à 3.

La valeur du paramètre *STR* est calculée à partir de la masse des graines selon des calculs décrits dans Papaik et Canham (2006), basés sur des relations allométriques publiées dans Greene et Johnson (1994, 1998). Toutefois, le STR de l'érable à épis provient des données de terrain, tout comme les valeurs du paramètre D pour toutes les espèces. Les paramètres sont rapportés au Tableau 18, le détail de l'analyse des paramètres est présenté au Tableau 21 et la relation est illustrée à la Figure 18.

Tableau 18. Paramètres STR, β, D et θ de l'Équation 18 décrivant la production et le patron de dispersion spatialement explicite des graines/semis sous canopée.

	Thuya de l'Est	Sapin baumier	Érable à épis	Épinette blanche	Pin gris	Peuplier faux-tremble	Bouleau blanc
STR	15,33	10,58	87,19	13,57	12,29	20,91	16,04
β	2	2	2	2	2	2	2
D	8,35E-5[1]	5,45E-5[1]	0.00321978[2]	1,1E-7[1]	2,8E-4[3]	3,8E-5[4]	7,76E-6[5]
Θ	3	3	3	3	3	3	3

1 Étude de I. Richie
2 Étude de M. Kehle
3 Même de Lodgepole Pine (SORTIE/BC)
4 Étude de R. Clark
5 Lepage et al. (2000)

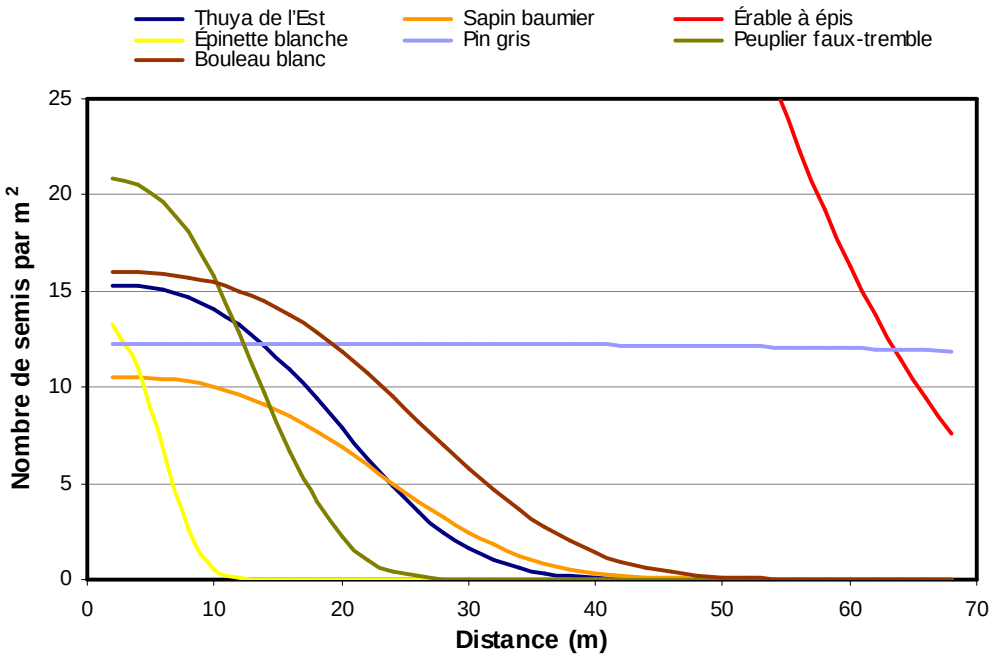

Figure 18. Nombre de semis par m^2 qui proviennent d'un adulte de 30 cm de DHP en fonction de la distance par rapport à l'arbre (m) selon l'Équation 18 et les paramètres du Tableau 18.

7. Établissement

L'*Establishment behavior* calcule le succès d'établissement des semis en fonction de la proportion de chaque substrat de la cellule et du couvert forestier (trouée ou canopée fermée) (*Substrate Dependent Seed Survival With Gap Status*). Ainsi, la composition du substrat de chaque cellule est multipliée par le paramètre de *Favorability*, c'est-à-dire la proportion de graines qui peut y germer. Le résultat est un index qui représente la proportion de graines de cette essence qui peut survivre dans cette cellule (*Substrate favorability Index*). Cet index sera repris dans l'Équation 15 afin de déterminer la quantité de semis établis par cellule.

Pour calculer empiriquement le paramètre *Favorability*, l'équipe de D. Greene a établi des quadrats de 1 m X 1 m. Dans ces quadrats, la proportion de chaque substrat ainsi que le nombre de semis établis par essence ont été recensés. À ce jour, ces paramètres sont les mêmes dans les trouées que sous la canopée faute de données empiriques permettant de distinguer les deux environnements (Tableau 19, Figure 19).

Tableau 19. Paramètres de *Favorability* des différents substrats pour chaque essence et auteur de l'étude correspondante.

	Thuya de l'Est	Sapin baumier	Érable à épis	Épinette blanche	Pin gris	Peuplier faux-tremble	Bouleau blanc
Forest Floor litter[1]	0,2609	0,3933	0,0100	0,2468	0,4620	0,7810	0,6870
Decayed Logs and Tip-up mounds[2]	0,9156	0,6197	0,7097	0,7126	0,1550	0,0130	0,0010
Fresh Logs	0,0428	0,0033	0,0033	0,0001	0,5660	0,0170	0,3810
Scarified Soil[3]	0,00001	0,8228	0,0033	0,1002	0,0080	0,0180	0,1000
Forest Floor moss[4]	0,00003	0,0409	0,1423	0,0002	0,0040	0,0100	0,1200
Auteur	I. Richie	I. Richie	M. Kehle	I. Richie	Estimé	Estimé	Estimé

[1] Ce terme dans SORTIE-ND correspond à la litière coniférienne du Lac Duparquet.
[2] L'établissement sur le substrat *tip up* mounds n'a pas été calculé empiriquement, ainsi le paramètre pour le substrat *tip up mounds* est le même que pour le substrat *decayed logs*.
[3] L'établissement sur le substrat *scarified soil* n'a pas été calculé empiriquement, ainsi, le paramètre pour le substrat *scarified soil* est le même que pour le substrat *sphagnum moss*.
[4] Ce terme dans SORTIE-ND correspond à la litière décidue du Lac Duparquet.

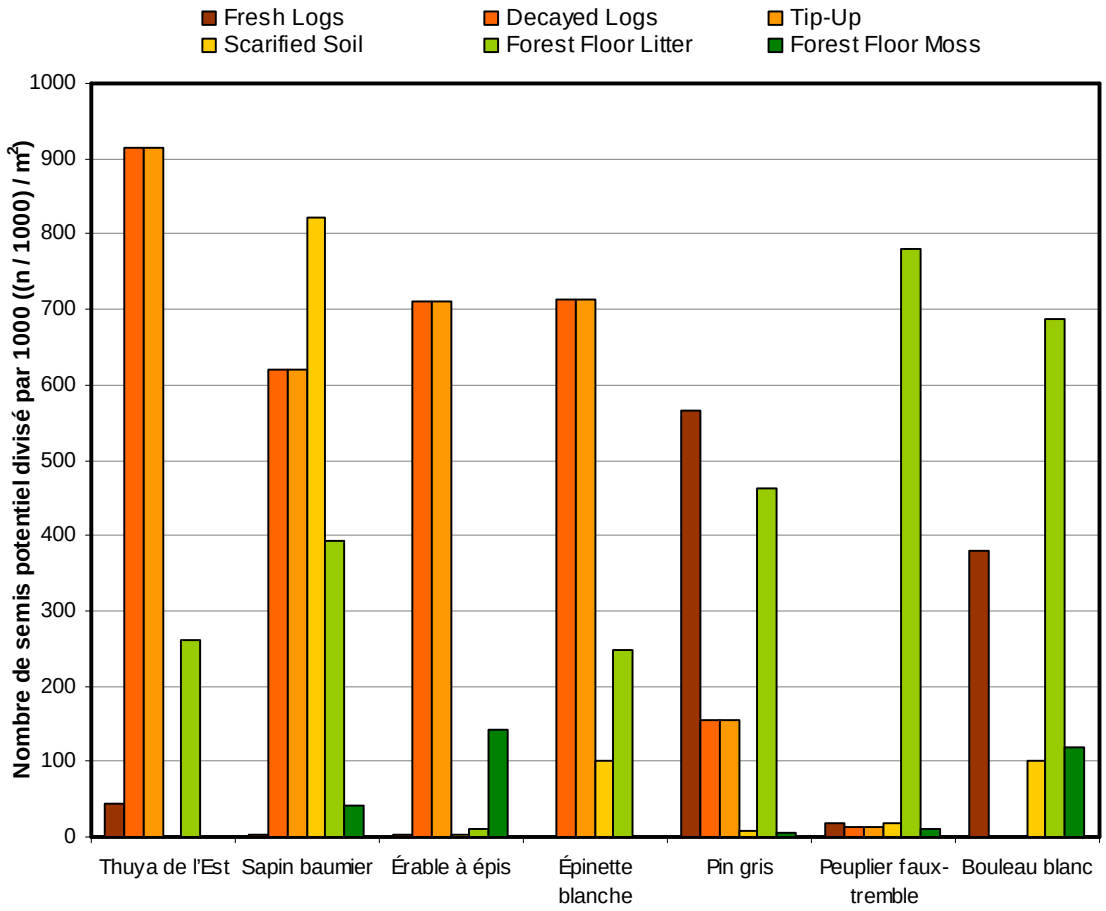

Figure 19. Nombre de semis potentiel divisé par 1000 par m^2 pour chaque essence et substrat selon les paramètres du Tableau 19.

REMERCIEMENTS

La paramétrisation du modèle SORTIE-ND pour la forêt boréale de l'ouest du Québec est un projet d'envergure s'échelonnant sur plusieurs années qui n'aurait pas vu le jour sans la coopération d'un très grand nombre de personnes. C'est pourquoi les auteurs aimeraient remercier tous ces gens qui ont participé de près ou de loin. Nous remercions d'abord C.D. Canham pour sa participation tout au long du projet. Merci à Lora Murphy, principale programmeure du modèle SORTIE-ND à l'*IES*, entre autres pour son efficacité à résoudre nos problèmes logistiques et sa grande disponibilité. Les auteurs aimeraient aussi remercier les chercheurs Daniel Kneewshaw et David Greene pour leur indispensable participation à la paramétrisation de certaines composantes du modèle. Merci aux chercheurs, aux étudiants et au personnel des différentes équipes de recherche qui ont à un moment ou un autre, apporté leur contribution à ce projet. Nous pensons particulièrement à Brian Harvey, Yves Bergeron, Danielle Charron, Ernest Lo, Yves Claveau, Paula Bartemucci, Dominic Sénécal, Isabelle Aubin, Louis Archambault, Daniel Lesieur, Ian Richie, Rodney Clark et Mike Kehle. Merci aussi aux aides de terrain qui ont été tellement nombreux qu'il est maintenant impossible de tous les nommer. Pour terminer, nous voulons remercier le principal organisme subventionnaire, le Réseau en gestion durable des forêts, qui a permis le financement de ce projet.

RÉFÉRENCES

Alemdag, I.S. et Honer, T.G. 1977 Metric relationships between breast-height and stump diameters for eleven tree species from eastern and central Canada. Canadian Forestry Service Information Report FMR-X-49M. Forest Management Institute: Ottawa, Ontario, Canada. 26 pp.

Aubin, I., Messier, C. et Kneeshaw, D. 2005. Population structure and growth acclimation of mountain maple along a successional gradient in the southern boreal forest. Ecoscience. 12: 540-548.

Beaudet, M., Messier, C. et Canham, C.D. 2002. Predictions of understory light conditions in northern hardwood forests following parameterization, sensitivity analysis, and tests of the SORTIE light model. For. Ecol. Manag., 165: 235-248.

Beaudet, M., Harvey, B.D., Messier, C., Coates, K.D., Poulin, J., Kneeshaw, D.D., Brais, S. et Bergeron, Y. 2011. Managing understory light conditions in boreal mixedwoods through variation in the intensity and spatial pattern of harvest: a modelling approach. For. Ecol. Manag. 261 :84-94

Canham, C. D. 1988. An index for understory light levels in and around canopy gaps. Ecology. 1988; 69(5):1634-1638.

Canham, C.D., Denslow, J.S., Platt, W.J., Runkle, J.R. Spies, T.A. et White, P.S. 1990. Light regime beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. Can. J. For. Res., 20 (5): 620-631.

Canham, C.D., Finzi, A.C., Pacala, S.W. et Burbank D.H. 1994. Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees. Can. J. For. Res. 24:337-349.

Canham, C.D., Coates, K.D. Bartemucci, P. et Quaglia, S. 1999. Measurement and modeling of spatially-explicit variation in light transmission through interior cedar-hemlock forests of British Columbia. Can. J. For. Res., 29: 1775-1783.

Canham, C.D., Lepage, P. et Coates K.D. 2004. A neighbourhood analysis of canopy tree competition: effects of shading versus crowding. Can. J. For. Res., 34: 778-787.

Chazdon, R.L. et Field, C.B. 1987. Photographic estimation of photosynthetically active radiation evaluation of a computerized technique. Oecologia, 73 (4): 525-532.

Claveau, Y., Messier, C., Comeau, P.G. et Coates, K.D. 2002. Growth and crown morphological responses of boreal conifer seedlings and saplings with contrasting shade tolerance to a gradient of light and height. Can. J. For. Res. 32: 458-468.

Farrar, J.L. 1996. Les arbres du Canada. Fides et le Service canadien des forêts (Ressources naturelles Canada). Canada.

Frazer, G.W., Canham, C.D., et Lertzman, K.P. 2000. Gap Light Analyser, version 2.0. Bull. Ecol. Soc. Amer. 81(3): 191-197.

Greene, D.F. et Johnson, E.A. 1994. Estimating the mean annual seed production of trees. Ecology, 75: 642–647.

Greene, D.F. et Johnson, E.A. 1998. Seed mass and early survivorship of tree species in upland clearings and shelterwoods. Canadian Journal of Forest Research, 28, 1307–1316.

Grondin, P., Noël, J., Hotte, D., Tardif, P. et Lapointe, C. 2001. Croissance potentielle en hauteur et dynamique des espèces forestières sur les principaux types écologiques des régions écologiques 5a et 6a (Abitibi). Rapport interne n°461. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière; 129 p.

Harvey, B.D., Leduc, A., Gauthier, S. et Bergeron, Y. 2002. Stand-landscape integration in natural disturbance-based management of the southern boreal forest. For. Ecol. and Manag., 155: 369-385.

Kneeshaw, D., Kobe, R., Coates, K.D. et Messier, C. 2006. Sapling size influences shade tolerance ranking among southern boreal tree species. J. Ecol., 94: 471-480.

Kobe, R.K., Pacala, S.W., Silander, J.A., Jr. et Canham, C.D. 1995. Juvenile tree survivorship as a component of shade tolerance. Ecol. Appl., 5: 517-532.

Kobe, R.K. et Coates, K.D. 1997. Models of sapling mortality as a function of growth to characterize interspecific variation in shade tolerance of eight tree species of northwestern British Columbia. Can. J. For. Res., 27: 227-236.

Pacala, S.W., Canham, C.D. et Silander, J.A., Jr. 1993. Forest models defined by field measurements: I. The desing of a northeastern forest simulator. Can. J. For. Res., 23: 1980-1988.

Pacala, S.W., Canham, C.D., Saponara, J., Silander, J.A., Jr., Kobe, R.K. et Ribbens, E. 1996. Forest models defined by field measurements: II. Estimation, error analysis and dynamics. Ecol. Monogr., 66: 1-43.

Papaik , M.J. et C.D. Canham. 2006. Species resistance and community response to wind disturbance regimes in northern temperate forests. Journal of Ecology. 94: 1011–1026.

Peng, C. 2001. Developing and validating nonlinear height-diameter models for major tree species of Ontario's boreal forests. North. J. Appl. For. 18(3):87-94.

Pothier, D. et Savard, F. 1998. Actualisation des tables de production pour les principales essences forestières du Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. 183 pp.

Ribbens, E., Pacala, S.W. et Silander, J.A.Jr. 1994. Recruitment in forests: calibrating models to predict patterns of seedling dispersal. Ecology, 75: 1794-1806.

Sharma, M. et Parton, J. 2007. Height-diameter equations for boreal tree species in Ontario using a mixed-effects modeling approach. For. Ecol. Manage. 249:187-198.

Wright, E.F., Coates, K.D., Canham, C.D. et Bartemucci, P. 1998. Species variability in growth response to light across a climatic gradient in northwestern British Columbia. Can. J. For. Res., 28: 871-886.

ANNEXE 1

Extrait utilisé de la table de la relation métrique entre le DHP et le diamètre de la souche pour 11 essences d'arbre de l'est et du centre du Canada publié par Alemdag et Honer (1977).

	DBH (cm)				
Basal diameter outside bark (cm)	**Balsam fir**	**White spruce**	**Jack pine**	**Poplar spp**	**White birch**
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.7892	0.7557	0.7906	0.8241	0.7557
2	1.5785	1.5114	1.5813	1.6482	1.5114
3	2.3677	2.2671	2.3719	2.4723	2.2671
4	3.1570	3.0228	3.1626	3.2964	3.0228
5	3.9462	3.7785	3.9532	4.1205	3.7785
6	4.7355	4.5342	4.7438	4.9446	4.5342
7	5.5247	5.2900	5.5345	5.7687	5.2900
8	6.3139	6.0457	6.3251	6.5928	6.0457
9	7.1032	6.8014	7.1157	7.4169	6.8014
10	7.8924	7.5571	7.9064	8.2410	7.5571
11	8.6817	8.3128	8.6970	9.0651	8.3128
12	9.4709	9.0685	9.4877	9.8892	9.0685
13	10.2602	9.8242	10.2783	10.7133	9.8242
14	11.0494	10.5799	11.0689	11.5374	10.5799
15	11.8386	11.3356	11.8596	12.3615	11.3356