

THOMAS Y. MOORE

**ANALYSE FINANCIÈRE AVEC SIMULATIONS MONTE
CARLO DE NOUVEAUX TRAITEMENTS DE COUPES
DE JARDINAGE EN FORÊT RÉSINEUSE
IRRÉGULIÈRE AU QUÉBEC**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en sciences forestières
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.)

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DU BOIS ET DE LA FORÊT
FACULTÉ DE FORESTERIE ET DE GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2009

Résumé

Cette étude évalue la faisabilité économique de deux nouveaux types de coupes de jardinage, développés pour la forêt résineuse irrégulière du Québec (Canada). Cette faisabilité économique a été comparée à la rentabilité d'une coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS), considère un horizon de croissance supérieur à 200 ans, et inclut la majorité des coûts d'opérations forestières, jusqu'aux produits finis (sciages et copeaux). Les résultats indiquent que les coupes de jardinage permettront des revenus et des coûts stables dans le temps, et même que dans le futur, elles seront économiquement plus intéressantes que les CPRS, selon nos hypothèses.

L'analyse financière comparant les deux types de coupes de jardinage à la CPRS, inclut des simulations Monte Carlo. Cette approche permet de considérer l'incertitude des nombreuses variables impliquées, leurs interactions, et leurs impacts sur la rentabilité. Les valeurs actuelles nettes obtenues sont ainsi associées à une distribution de probabilité.

Abstract

This study evaluated the economic feasibility of two new treatments of selection cutting, developed for the irregular softwood forests of Quebec (Canada). This economic feasibility was compared to the profitability of the clear cut with advance growth protection, cover a horizon superior to 200 years, and consider the majority of the operation costs, until the final products (lumber and chips). The results show that the two selection cuttings will allow constant revenues and costs over time, and also that, in the future, they will be economically more attractive than clear cuts, considering our hypothesis.

The financial study comparing the two selection cuttings to clear cut, includes Monte Carlo simulations. This approach allows considering uncertainties of variables, their interactions, and their impacts on profitability. So, the net present values are associated with a distribution of probabilities.

Remerciements

Cette étude a pu se dérouler grâce à la participation de plusieurs personnes de différents organismes. Mes premiers remerciements vont d'abord à mon directeur de recherche, monsieur Jean-Claude Ruel, qui a toujours été d'une très grande efficacité pour répondre à mes nombreuses interrogations et pour faire avancer le projet.

J'ai pu également compter sur deux bons collaborateurs ; mon codirecteur, monsieur Marc-André Lapointe (Université de Sherbrooke), pour son expertise en finance, et monsieur Jean-Martin Lussier (Service Canadien des Forêts) pour son aide liée à la simulation de croissance des coupes de jardinage. Sans l'aide de ces collaborateurs, cette étude n'aurait pas eu la même qualité.

De nombreuses autres personnes ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet. Je garderai un bon souvenir de toutes ces personnes. Du MRNF : messieurs Éric Fleury, Adrian Spatacean, Claude Allain, Langis Beaulieu et François-Robert Nadeau ; de FP Innovations – division FERIC : monsieur Philippe Meek ; des compagnies forestières : messieurs David Trudel et Jérôme Matte (Produits Forestier Arbec), Dave Chamberlain (Kruger), Charles Warren (Abitibi-Bowater) ; de FP Innovations - division Forintek : messieurs Tony Zhang et Chuangmin Liu ; de l'Université Laval : messieurs Jean-Gabriel Élie et Luc Lebel. L'aide de toutes ces personnes, ainsi que de d'autres qui ne sont pas nommées, a contribué grandement à la réussite et à la qualité de ce projet.

Je tiens aussi à remercier la chaire de recherche industrielle CRSNG-Université Laval en sylviculture et faune et le Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT), pour le soutien financier. Je suis également reconnaissant pour l'obtention des bourses facultaires Richard J. Cullen et celle du Fonds Avenor, attribuées au mérite, par la Faculté de foresterie et de géomatique de l'Université Laval.

Avant-propos

Ce mémoire de maîtrise est très exhaustif. Une version synthèse sera également produite, traduite en anglais, et soumise pour publication dans une revue scientifique.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract	iii
Remerciements	iv
Avant-propos	v
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xvii
1 Introduction	- 1 -
1.1 Mise en contexte.....	- 1 -
1.2 Problématique.....	- 3 -
1.3 Objectifs	- 5 -
2 Méthodologie	- 5 -
2.1 Localisation et description des sites à l'étude	- 5 -
2.2 Description des traitements sylvicoles	- 6 -
2.2.1 Coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS)	- 7 -
2.2.2 Coupe de jardinage avec sentiers permanents	- 7 -
2.2.3 Coupe de jardinage avec sentiers temporaires	- 8 -
2.2.4 Coupe de jardinage adaptée.....	- 10 -
2.3 Scénarios de comparaison	- 11 -
2.4 Simulation de la croissance	- 14 -
2.4.1 CPRS	- 15 -
2.4.1.1 Reboisement et traitements d'éducation	- 16 -
2.4.2 Coupes de jardinage	- 17 -
2.4.2.1 Durée des rotations	- 19 -
2.4.2.2 Croissance dans les sentiers de débardage.....	- 20 -
2.4.2.3 Structure verticale des peuplements et prescriptions sylvicoles	- 21 -
2.4.2.4 Proportion de sapin baumier et d'épinette noire	- 23 -
3 Structure des coûts et des revenus.....	- 24 -
3.1 Coûts.....	- 25 -
3.1.1 Hypothèses pour les coûts.....	- 25 -
3.1.2 Coûts des chemins.....	- 26 -

3.1.2.1	Coût de construction de chemin.....	- 27 -
3.1.2.1.1	Coût de construction chemins d'accès.....	- 27 -
3.1.2.1.2	Coût de construction chemins de récolte.....	- 28 -
3.1.2.2	Coût d'entretien des chemins.....	- 30 -
3.1.2.3	Coût de restauration des chemins	- 31 -
3.1.3	Coûts de récolte.....	- 31 -
3.1.3.1	Coût d'abattage	- 31 -
3.1.3.2	Coût du débardage	- 33 -
3.1.3.3	Supervision	- 33 -
3.1.3.3.1	Coût de la supervision CPRS.....	- 34 -
3.1.3.3.2	Coût de la supervision en coupe de jardinage	- 35 -
3.1.4	Autres coûts d'opérations forestières	- 35 -
3.1.4.1	Coût du déplacement de la machinerie	- 35 -
3.1.4.2	Chargement.....	- 37 -
3.1.4.3	Transport.....	- 37 -
3.1.4.3.1	Coût de transport en CPRS.....	- 37 -
3.1.4.3.2	Coût de transport en coupe de jardinage	- 38 -
3.1.4.4	Camp forestier.....	- 40 -
3.1.4.5	Inventaire	- 44 -
3.1.5	Coûts divers.....	- 45 -
3.1.6	Coût de la transformation.....	- 45 -
3.1.7	Coûts non considérés dans l'étude	- 46 -
3.2	Revenus	- 47 -
3.2.1	Proportion de sciage et de copeaux (épinette noire)	- 48 -
3.2.2	Proportion de sciage et de copeaux (sapin baumier).....	- 49 -
3.2.3	Détermination des prix et des revenus	- 50 -
3.2.3.1	Prix et revenus de sciage.....	- 51 -
3.2.3.2	Prix et revenus des copeaux.....	- 51 -
3.2.3.3	Prix et revenus des sciures	- 52 -
3.3	Variables utilisées dans l'étude.....	- 53 -
3.3.1	Valeurs de référence.....	- 53 -

3.3.1.1	Modèle Biolley et courbes de rendement du MRNF	- 53 -
3.3.1.2	Compagnies forestières	- 53 -
3.3.1.3	FP Innovation – division FERIC.....	- 54 -
3.3.1.4	Dispositif expérimental	- 54 -
3.3.1.5	Revue de littérature	- 55 -
3.3.2	Notes supplémentaires sur certaines variables	- 55 -
3.3.2.1	Ratio ha/km	- 55 -
3.3.2.1.1	CPRS	- 55 -
3.3.2.1.2	Coupe de jardinage	- 58 -
3.3.2.2	Coût de restauration vs construction des chemins	- 59 -
3.3.2.3	Coût additionnel en supervision pour les coupes de jardinage	- 60 -
4	Structure de l'analyse financière	- 61 -
4.1	Détermination du point de vue	- 61 -
4.2	Technique d'analyse : valeur actualisée nette (VAN).....	- 62 -
4.2.1	Trois calculs de rentabilité réalisés	- 64 -
4.2.2	Dollar par mètre cube vs dollar par hectare	- 65 -
4.2.3	Hypothèse du taux de réinvestissement	- 66 -
4.3	Risque.....	- 66 -
4.3.1	Taux d'actualisation	- 67 -
4.3.1.1	Taux dégressif.....	- 68 -
4.4	Simulations Monte Carlo	- 69 -
4.5	Traitement de l'inflation.....	- 70 -
5	Résultats et discussion.....	- 71 -
5.1	Simulations de croissance	- 71 -
5.1.1	Coupes de jardinage avec sentiers permanents	- 72 -
5.1.2	Coupe de jardinage adaptées.....	- 76 -
5.1.3	CPRS	- 78 -
5.2	Résultats de l'analyse financière : sans simulation Monte Carlo.....	- 79 -
5.3	Résultats : avec simulation Monte Carlo.....	- 81 -
5.3.1	Analyse de sensibilité.....	- 85 -
5.3.2	Analyse de probabilité.....	- 93 -

5.3.2.1	VAN.....	- 93 -
5.3.2.2	VAN sans le 1 ^{er} passage et revenus nets au premier passage	- 96 -
5.3.3	Analyse de scénarios	- 99 -
5.4	Éléments de coûts.....	- 102 -
5.5	Utilisation d'un taux d'actualisation dégressif.....	- 106 -
5.6	Hypothèse pour les crédits sylvicoles	- 110 -
6	Conclusion.....	- 111 -
	Bibliographie.....	- 113 -
	ANNEXES	- 119 -

Liste des tableaux

Tableau 1 : Prescription de récolte pour les deux variantes de coupes de jardinages (excluant les sentiers de débardage et les sentiers secondaires), en pourcentage de surface terrière. Les petits bois (BM) représentent les classes de diamètre de 10 et 12 cm, celle des bois moyen (MB) les classes de 14 à 20 cm et celle des gros bois (GB) les classes de 22 cm et plus. - 21 -	- 21 -
Tableau 2 : Pour la coupe de jardinage avec sentiers permanents, pourcentage de récolte (en surface terrière) dans la zone de sentiers secondaires, selon la rotation. - 23 -	- 23 -
Tableau 3 : Variables de coûts utilisées dans l'analyse financière. - 25 -	- 25 -
Tableau 4 : Nombre d'employés présents au camp forestier, selon le volume annuel à récolter. Le m ³ /employé est le rapport du volume annuel sur le nombre d'employés. - 41 -	- 41 -
Tableau 5 : Répartition des employés au camp (pourcentage) selon les catégories d'activités.- 41 -	- 41 -
Tableau 6 : Synthèse des valeurs des RAIF 2005-2006 et 2006-2007. Les CPRS inclut tout les types de coupes totales (CT) et de coupes à rétention variables (CRV). CP : coupes partielles. - 56 -	- 56 -
Tableau 7 : Taux d'actualisation réel dégressif proposé pour les projets sylvicoles au Québec (Lapointe 2008). - 69 -	- 69 -
Tableau 8 : Résultats de la rentabilité selon trois calculs différents sans simulation Monte Carlo, en dollars par mètre cube (\$/m ³) et en dollar par hectare (\$/ha), pour les traitements de CPRS, de coupes de jardinages adaptée et avec sentiers permanents. - 79 -	- 79 -
Tableau 9 : VAN, en dollar par mètre cube (\$/m ³), avec simulation Monte Carlo, pour les traitements de CPRS (rotation de 100 ans), de coupes de jardinage adaptées et avec sentiers permanents (rotation de 70 ans). - 81 -	- 81 -
Tableau 10 : VAN, en dollar par hectare (\$/ha), avec simulation Monte Carlo, pour les traitements de CPRS (rotation de 100 ans), de coupes de jardinage adaptées et avec sentiers permanents (rotation de 70 ans). - 81 -	- 81 -
Tableau 11 : VAN sans le premier passage, en dollar par mètre cube (\$/m ³), avec simulation Monte Carlo, pour les traitements de CPRS (rotation de 100 ans), de coupes de jardinage adaptées et avec sentiers permanents (rotation de 70 ans). - 83 -	- 83 -
Tableau 12 : VAN sans le premier passage, en dollar par hectare (\$/ha), avec simulation Monte Carlo, pour les traitements de CPRS (rotation de 100 ans), de coupes de jardinage adaptées et avec sentiers permanents (rotation de 70 ans). - 83 -	- 83 -

Tableau 13 : Revenus nets du 1er passage seulement, en dollar par mètre cube ($\$/m^3$), avec simulation Monte Carlo, pour les traitements de CPRS (rotation 100 ans), de coupes de jardinage adaptées et avec sentiers permanents (rotation 70 ans)..... - 84 -

Tableau 14 : Revenus nets du 1^{er} passage seulement, en dollar par hectare ($\$/ha$), avec simulation Monte Carlo, pour les traitements de CPRS (rotation 100 ans), de coupes de jardinage adaptées et avec sentiers permanents (rotation 70 ans)..... - 84 -

Tableau 15 : Éléments critiques pour les CPRS, suite à l'analyse de sensibilité. La sensibilité de chaque variable sur la VAN est déterminée par un coefficient de régression (Coef. Rég.). Les variables sont placées en ordre d'importance, sur la base des VAN en dollars par hectare mais la dernière colonne indique le classement des variables sur la base des dollars par mètre cube. - 86 -

Tableau 16 : Éléments critiques pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents, suite à l'analyse de sensibilité. La sensibilité de chaque variable sur la VAN est déterminée par un coefficient de régression (Coef. Rég.). Les variables sont placées en ordre d'importance, sur la base des VAN en dollars par hectare mais la dernière colonne indique le classement des variables sur la base des dollars par mètre cube. CJ : coupe de jardinage..... - 87 -

Tableau 17 : Éléments critiques pour les coupes de jardinage adaptées, suite à l'analyse de sensibilité. La sensibilité de chaque variable sur la VAN est déterminée par un coefficient de régression (Coef. Rég.). Les variables sont placées en ordre d'importance, sur la base des VAN en dollars par hectare mais la dernière colonne indique le classement des variables sur la base des dollars par mètre cube. CJ : coupe de jardinage. - 88 -

Tableau 18 : Comparaison entre les trois traitements (CPRS, coupe de jardinage avec sentier permanents (CJ perm) et coupe de jardinage adaptée), de certaines probabilités, basées sur les valeurs actuelles nettes (VAN) en dollars par hectare. - 93 -

Tableau 19 : Comparaison entre les trois traitements (CPRS, coupe de jardinage avec sentier permanents (CJ perm) et coupe de jardinage adaptée), de certaines probabilités, basées sur les valeurs actuelles nettes (VAN) en dollars par mètre cube..... - 94 -

Tableau 20 : Comparaison entre les trois traitements (CPRS, coupe de jardinage avec sentier permanents (CJ perm) et coupe de jardinage adaptée), de certaines probabilités, basées sur les valeurs actuelles nettes (VAN) sans le premier passage, en dollars par hectare. - 96 -

Tableau 21 : Comparaison entre les trois traitements (CPRS, coupe de jardinage avec sentier permanents (CJ perm) et coupe de jardinage adaptée), de certaines probabilités, basées sur les valeurs actuelles nettes (VAN) sans le premier passage, en dollars par mètre cube. ... - 97 -

Tableau 22 : Comparaison entre les trois traitements (CPRS, coupe de jardinage avec sentier permanents (CJ perm) et coupe de jardinage adaptée), de certaines probabilités, basées sur les revenus nets du premier passage, en dollars par hectare. - 97 -

Tableau 23 : Comparaison entre les trois traitements (CPRS, coupe de jardinage avec sentier permanents (CJ perm) et coupe de jardinage adaptée), de certaines probabilités, basées sur les revenus nets du premier passage, en dollars par mètre cube. - 98 -

Tableau 24 : Valeur du prix du sciage (\$/Mpmp) impliquant significativement l'obtention d'une VAN négative, pour chaque traitement (CPRS, coupe de jardinage avec sentiers permanents (CJ perm) et adaptée), sur la base des dollars par hectare (\$/ha) et de dollars par mètre cube (\$/m³). - 100 -

Tableau 25 : Valeur du prix du sciage (\$/Mpmp) impliquant significativement l'obtention d'une VAN sans le premier passage négative, pour chaque traitement (CPRS, coupe de jardinage avec sentiers permanents (CJ perm) et adaptée), sur la base des dollars par hectare (\$/ha) et de dollars par mètre cube (\$/m³). - 101 -

Tableau 26 : Valeur du prix du sciage (\$/Mpmp) impliquant significativement l'obtention de revenus nets au premier passage négatifs, pour chaque traitement (CPRS, coupe de jardinage avec sentiers permanents (CJ perm) et adaptée), sur la base des dollars par hectare (\$/ha) et de dollars par mètre cube (\$/m³). - 101 -

Tableau 27 : Valeurs moyennes, minimums et maximums en dollars constants par mètre cube (\$/m³), obtenues suite à une simulation Monte Carlo, pour différents éléments de coûts, pour le traitement de CPRS. - 102 -

Tableau 28 : Valeurs moyennes, minimums et maximums en dollars constants par mètre cube (\$/m³), obtenues suite à une simulation Monte Carlo, pour différents éléments de coûts, pour le traitement de coupe de jardinage avec sentiers permanents. - 103 -

Tableau 29 : Valeurs moyennes, minimums et maximums en dollars constants par mètre cube (\$/m³), obtenues suite à une simulation Monte Carlo, pour différents éléments de coûts, pour le traitement de coupe de jardinage adaptée. - 104 -

Tableau 30 : Résultats en dollars par mètre cube, des VAN obtenus suite à une simulation Monte Carlo avec l'utilisation de taux d'actualisation dégressifs. CJ perm : coupe de jardinage avec sentiers permanents.	- 107 -
Tableau 31 : Résultats en dollars par hectare, des VAN obtenus suite à une simulation Monte Carlo avec l'utilisation de taux d'actualisation dégressifs. CJ perm : coupe de jardinage avec sentiers permanents.	- 107 -
Tableau 32 : Résultats en dollars par hectare, des VAN futures (sans le 1 ^{er} passage), obtenus suite à une simulation Monte Carlo avec l'utilisation de taux d'actualisation dégressifs. CJ perm : coupe de jardinage avec sentiers permanents.....	- 109 -
Tableau 33 : Résultats en dollars par mètre cube, des VAN futures (sans le 1 ^{er} passage), obtenus suite à une simulation Monte Carlo avec l'utilisation de taux d'actualisation dégressifs. CJ perm : coupe de jardinage avec sentiers permanents.	- 109 -
Tableau 34 : Différences en dollars par hectare (\$/ha), pour les deux traitements de coupes de jardinage, par rapport aux CPRS, pour les coûts « bord de chemins » (abattage, débardage et supervision).	- 110 -
Tableau 35 : Superficie en hectare (ha), associée aux types écologiques et indices de fertilité correspondants, pour l'unité de compilation 8994.	- 121 -
Tableau 36 : Superficie en hectare (ha), associée aux types écologiques et indices de fertilité correspondants, pour l'unité de compilation 3793.	- 121 -
Tableau 37 : Superficie en hectare (ha), associée aux types écologiques et indices de fertilité correspondants, pour l'unité de compilation 8990.	- 122 -
Tableau 38 : Courbe unique représentant la croissance anticipée des peuplements issus des CPRS. Le volume (vol) par essence (SAB : sapin baumier, EPB : épinette blanche, EPN : épinette noire) est exprimé en mètre cube (m ³), par intervalle de 5 ans. La proportion du volume en SAB et EPN est aussi présentée, en pourcentage (%).	- 122 -
Tableau 39 : Table pondérée, adaptée de Pothier et Savard (1998), selon la méthodologie décrite à la section 2.4.1. Différentes données dendrométriques sont présentées selon des intervalles de temps de 5 ans. Hd : hauteur dominante, Dq : diamètre quadratique, N : nombre de tiges par hectare, G : surface terrière, V : volume, Vol/tige : volume par tige (m ³ /tige).	- 125 -

- Tableau 40 : Comparaison du volume prédit en fonction de l'âge entre la courbe unique (annexe I) et la table adaptée de Pothier et Savard (1998) (tableau 39). Les valeurs présentées sont des volumes exprimés en mètre cube (m³). - 126 -
- Tableau 41 : Liste de variables générales, avec certaines caractéristiques. Les valeurs indiquent les minimums (min) et les maximums (max) qu'une variable peut prendre. Les unités des valeurs pour chacune des variables sont présentées. La colonne « source » indique d'où proviennent principalement les données. La colonne « S. Dist. » indique d'où provient l'hypothèse ayant conduit au choix approprié de distribution de probabilité pour une variable donnée, et la colonne « Dist. » indique la distribution utilisée. Ind. : industrie (compagnie forestière), Hyp. : hypothèses, Comm. : communication personnelle (experts), RL : revue de littérature, Dispo. : dispositif expérimental. Pour les distributions : fixe : aucune distribution pour cette variable, Triang. : triangulaire, Norm. : normale, uni : uniforme. SAB : sapin baumier, CJ : coupe de jardinage, CJp : coupe de jardinage avec sentiers permanents, CJa : coupe de jardinage adaptée. Dans le cas des distributions normales, les pourcentages (%) présentées sont pour 3 écarts-types (99% des cas). - 128 -
- Tableau 42 : Liste de variables propres aux CPRS, avec certaines caractéristiques. Les valeurs indiquent les minimums (min) et les maximums (max) qu'une variable peut prendre. Les unités des valeurs pour chacune des variables sont présentées. La colonne « source » indique d'où proviennent principalement les données. La colonne « S. Dist. » indique d'où provient l'hypothèse ayant conduit au choix approprié de distribution de probabilité pour une variable donnée, et la colonne « Dist. » indique la distribution utilisée. Ind. : industrie (compagnie forestière), Hyp. : hypothèses, Comm. : communication personnelle (experts), RL : revue de littérature, Dispo. : dispositif expérimental. Pour les distributions : fixe : aucune distribution pour cette variable, Triang. : triangulaire, Norm. : normale, uni : uniforme. SAB : sapin baumier, CJ : coupe de jardinage, CJp : coupe de jardinage avec sentiers permanents, CJa : coupe de jardinage adaptée. Dans le cas des distributions normales, les pourcentages (%) présentées sont pour 3 écarts-types (99% des cas). Prop. : proportion, emp. : employés, sup. : supplémentaire, pass. : passage. - 130 -
- Tableau 43 : Liste de variables propres aux CJ (rotations 70 ans), avec certaines caractéristiques. Les valeurs indiquent les minimums (min) et les maximums (max) qu'une variable peut prendre. Les unités des valeurs pour chacune des variables sont présentées. La colonne

« source » indique d'où proviennent principalement les données. La colonne « S. Dist. » indique d'où provient l'hypothèse ayant conduit au choix approprié de distribution de probabilité pour une variable donnée, et la colonne « Dist. » indique la distribution utilisée. Ind. : industrie (compagnie forestière), Hyp. : hypothèses, Comm. : communication personnelle (experts), RL : revue de littérature, Dispo. : dispositif expérimental. Pour les distributions : fixe : aucune distribution pour cette variable, Triang. : triangulaire, Norm. : normale, uni : uniforme. SAB : sapin baumier, CJ : coupe de jardinage, CJp : coupe de jardinage avec sentiers permanents, CJa : coupe de jardinage adaptée. Dans le cas des distributions normales, les pourcentages (%) présentées sont pour 3 écarts-types (99% des cas). Prop. : proportion, emp. : employés, sup. : supplémentaire, pass. : passage. - 131 -

Tableau 44 : Liste de variables propres aux CJ avec sentiers permanents (rotation 70 ans), avec certaines caractéristiques. Les valeurs indiquent les minimums (min) et les maximums (max) qu'une variable peut prendre. Les unités des valeurs pour chacune des variables sont présentées. La colonne « source » indique d'où proviennent principalement les données. La colonne « S. Dist. » indique d'où provient l'hypothèse ayant conduit au choix approprié de distribution de probabilité pour une variable donnée, et la colonne « Dist. » indique la distribution utilisée. Ind. : industrie (compagnie forestière), Hyp. : hypothèses, Comm. : communication personnelle (experts), RL : revue de littérature, Dispo. : dispositif expérimental. Pour les distributions : fixe : aucune distribution pour cette variable, Triang. : triangulaire, Norm. : normale, uni : uniforme. SAB : sapin baumier, CJ : coupe de jardinage, CJ perm : coupe de jardinage avec sentiers permanents. Dans le cas des distributions normales, les pourcentages (%) présentées sont pour 3 écarts-types (99% des cas). Prop. : proportion, emp. : employés, sup. : supplémentaire, pass. : passage. - 132 -

Tableau 45 : Liste de variables propres aux CJ adaptées (rotation 70 ans), avec certaines caractéristiques. Les valeurs indiquent les minimums (min) et les maximums (max) qu'une variable peut prendre. Les unités des valeurs pour chacune des variables sont présentées. La colonne « source » indique d'où proviennent principalement les données. La colonne « S. Dist. » indique d'où provient l'hypothèse ayant conduit au choix approprié de distribution de probabilité pour une variable donnée, et la colonne « Dist. » indique la distribution utilisée. Ind. : industrie (compagnie forestière), Hyp. : hypothèses, Comm. : communication personnelle (experts), RL : revue de littérature, Dispo. : dispositif expérimental. Pour les

distributions : fixe : aucune distribution pour cette variable, Triang. : triangulaire, Norm. : normale, uni : uniforme. SAB : sapin baumier, CJ : coupe de jardinage, CJa : coupe de jardinage adaptée. Dans le cas des distributions normales, les pourcentages (%) présentées sont pour 3 écarts-types (99% des cas). Prop. : proportion, emp. : employés, sup. : supplémentaire, pass. : passage..... - 134 -

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des blocs du dispositif expérimental	- 6 -
Figure 2 : Coupe de jardinage avec sentiers permanents (Ruel et al. 2007)	- 8 -
Figure 3 : Coupe de jardinage avec sentiers temporaires (Ruel et al. 2007). Chaque bande a 5 mètres, et la moitié du peuplement est traitée à chaque passage.....	- 9 -
Figure 4 : Représentation schématique des coupes de jardinage avec sentiers temporaires dans le temps (Roy et al. 2006). Les entrées représentent la superposition des zones traitées et non-traitées. Les bandes blanches sont les sentiers de débardage, les pâles sont les bandes traités, et les foncées celles non-traitées.	- 10 -
Figure 5 : Représentation schématique des coupes de jardinage adaptées dans le temps. Les deux premiers passages de la coupe avec sentiers temporaires se perpétuent, il n'y a donc pas de chevauchement. Les bandes blanches sont les sentiers de débardage, les pâles sont les bandes traités, et les foncées celles non-traitées.	- 11 -
Figure 6 : Volume par hectare dans les bandes (entre les sentiers), à chaque rotation de 60 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.	- 72 -
Figure 7 : Volume récolté par hectare, à chaque rotation de 60 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.	- 72 -
Figure 8 : Nombre de tiges par hectare selon les catégories de petit bois (PB) (10 et 12 cm au DHP), bois moyen (BM) (14 à 20 cm au DHP) et gros bois (GB) (22 cm et plus au DHP), par période de 60 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.	- 73 -
Figure 9 : Volume par tige total récolté, par période de 60 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.	- 73 -
Figure 10 : Volume par hectare dans les bandes (entre les sentiers), à chaque rotation de 70 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.	- 73 -
Figure 11 : Volume récolté par hectare, à chaque rotation de 70 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.	- 73 -
Figure 12 : Nombre de tiges par hectare selon les catégories de petit bois (PB) (10 et 12 cm au DHP), bois moyen (BM) (14 à 20 cm au DHP) et gros bois (GB) (22 cm et plus au DHP), par période de 70 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.	- 74 -
Figure 13 : Volume par tige total récolté, par période de 70 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.	- 74 -

Figure 14 : Volume par hectare dans les bandes (entre les sentiers), à chaque rotation de 80 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.	- 74 -
Figure 15 : Volume récolté par hectare, à chaque rotation de 80 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.	- 74 -
Figure 16 : Nombre de tiges par hectare selon les catégories de petit bois (PB) (10 et 12 cm au DHP), bois moyen (BM) (14 à 20 cm au DHP) et gros bois (GB) (22 cm et plus au DHP), par période de 80 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.	- 75 -
Figure 17 : Volume par tige total récolté, par période de 80 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.	- 75 -
Figure 18 : Volume par hectare dans les bandes (entre les sentiers), à chaque rotation de 70 ans, pour les coupes de jardinage adaptées.....	- 76 -
Figure 19 : Volume récolté par hectare, à chaque rotation de 70 ans, pour les coupes de jardinage adaptées.	- 76 -
Figure 20 : Nombre de tiges par hectare selon les catégories de petit bois (PB) (10 et 12 cm au DHP), bois moyen (BM) (14 à 20 cm au DHP) et gros bois (GB) (22 cm et plus au DHP), par période de 70 ans, pour les coupes de jardinage adaptées.	- 77 -
Figure 21 : Volume par tige total récolté, par période de 70 ans, pour les coupes de jardinage adaptées.	- 77 -
Figure 22 : Volume à l’hectare, pour les CPRS à des rotations de 100 ans.....	- 78 -
Figure 23 : Volume par tige récolté, pour les CPRS à des rotations de 100 ans.....	- 78 -

1 Introduction

1.1 Mise en contexte

Le feu est la perturbation naturelle qui influence le plus le développement de la forêt boréale (Bergeron et al. 2001, Kneeshaw 2001, McCarthy 2001, Kneeshaw et Bergeron 1998, Kuuluvainen 1994, Johnson 1992, Morneau et Payette 1989). Jusqu'à tout récemment, il était reconnu que la forêt boréale du Québec était caractérisée par des cycles de feux courts, et par conséquent que cette forêt possède principalement une structure régulière (Bergeron et al. 2001, Johnson 1992). Cette généralisation a été utilisée pour justifier un mode d'aménagement forestier basé sur des coupes totales ayant des rotations de courte durée (Bergeron 2004, Bergeron et al. 2001). Plusieurs études ont par contre démontré que le régime des feux n'est pas constant dans toute la forêt boréale, et que ces différences conduisent à des structures et des compositions forestières différentes (Bouchard et al. 2008, Côté 2006, Bergeron 2004, Bergeron et al. 2001, Pham et al. 2004, Boucher et al. 2003).

L'étude de Bergeron et al. (2001) indique un gradient d'ouest en est dans le régime des feux, les feux étant moins fréquents dans l'est, cette région étant caractérisée par un climat plus humide. La dynamique forestière est alors influencée par des perturbations secondaires (chablis, insectes) ainsi que par la mortalité naturelle des arbres engendrant ainsi une dynamique de trouées (Bouchard et al. 2008, Pham et al. 2004, Boucher et al. 2003). Les forêts de la Côte-Nord, dans laquelle ce projet se déroule, seraient régies par des cycles de feux supérieurs à 500 ans (Bouchard et al. 2008, Pham et al. 2004). Cette particularité de la pessière de l'est engendre une grande proportion de peuplements irréguliers (Bouchard et al. 2008, Pham et al. 2004, Boucher et al. 2003, Bergeron et al. 2001, De Grandpré et al. 2000), qui peuvent se maintenir dans le temps par marcottage dans le cas de l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) (Bergeron 2004, De Grandpré et al. 2000), et par suite de différentes perturbations mineures dans le cas du sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.). À cet égard, la littérature souligne l'importance de mettre au point rapidement de nouvelles approches sylvicoles pour les peuplements irréguliers (Bouchard et al. 2008, Bergeron 2004, Pham et al. 2004, Boucher et al. 2003, Bergeron et al. 2001).

Depuis quelques années l'intérêt s'est ainsi largement accru concernant l'application d'un aménagement écosystémique basé sur la compréhension des écosystèmes et des perturbations naturelles (Bergeron et al. 2001). L'approche de l'aménagement écosystémique repose entre autre

sur le principe qu'un aménagement qui favorise le développement de peuplements et de paysages ayant des compositions et des structures semblables à celles des écosystèmes naturels, devrait permettre le maintien de la diversité biologique et des fonctions écologiques essentielles (Thorpe et al. 2008, Thorpe et Thomas 2007, Bergeron 2004, Boucher et al. 2003, Bergeron et al. 2001, Hunter 1999, Gauthier et al. 1996, Franklin 1993). La complexité structurale des peuplements irréguliers procurerait une plus grande variété d'habitats comparativement aux peuplements réguliers, accommodant ainsi davantage d'espèces animales et végétales (Boucher et al. 2003).

La structure irrégulière souvent rencontrée dans la forêt boréale de l'est suggère qu'une stratégie sylvicole basée sur les coupes partielles serait plus appropriée pour maintenir sa productivité et ses principaux attributs structuraux (Ruel et al. 2007, Bergeron 2004, Pham et al. 2004, Boucher et al. 2003, Bergeron et al. 2001). Une coupe totale, telle qu'une coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) appliquée dans un peuplement irrégulier aura pour effet d'en simplifier fortement la structure (Thorpe et Thomas 2007, McCarthy et Weetman 2006, Deal 2001), ce qui pourrait avoir des conséquences importantes pour le maintien de la biodiversité associée aux forêts anciennes, autant à l'échelle du peuplement qu'à celle du paysage (Ruel et al. 2007, Thorpe et al. 2008, Thorpe et Thomas 2007, Boucher et al. 2003, Kneeshaw et Gauthier 2003, Bergeron et al. 2001, McCarthy 2001).

Les méthodes actuelles d'exploitation forestière, basées essentiellement sur les coupes totales, tendent à faire diminuer la proportion de vieilles forêts, et à fragmenter le paysage forestier, ce qui peut causer des inconvénients à certains groupes d'espèces associés à ces habitats (Tremblay et al. 2007). Les résultats de l'impact des coupes partielles sur la biodiversité couvrent habituellement de courtes périodes de temps et il est difficile d'extrapoler ces résultats sur de longues périodes (Thorpe et Thomas 2007). Il est néanmoins largement accepté que les coupes partielles, en conservant notamment les structures initiales, peuvent permettre aux peuplements résiduels de conserver davantage d'attributs de biodiversité, notamment certains attributs de vieilles forêts, que les coupes totales auraient fait perdre (Thorpe et al. 2008, Thorpe et Thomas 2007, Fuller et al. 2004).

1.2 Problématique

La littérature indique clairement l'importance d'utiliser rapidement des scénarios alternatifs pour préserver la biodiversité des peuplements irréguliers (Bergeron 2004, Pham et al. 2004, Boucher et al. 2003, Bergeron et al. 2001). Bergeron (2004) indique que, malgré l'expérience limitée de l'aménagement forestier en peuplements irréguliers, ce serait une erreur d'attendre avant de procéder à la mise en place de nouvelles approches sylvicoles, mieux adaptées aux forêts irrégulières, considérant la vitesse de disparition des forêts vierges et des forêts surannées.

Pour être appliquées sur une base opérationnelle, ces nouvelles formes de coupes partielles doivent démontrer leurs avantages à maintenir la structure initiale et à conserver ou améliorer la productivité forestière. Elles doivent aussi permettre de préserver la qualité des habitats fauniques et la biodiversité en général. Cependant, pour être utilisées à grande échelle, il est très important que les nouvelles approches sylvicoles démontrent aussi leur rentabilité. La crise forestière actuelle nous rappelle que la préservation de la biodiversité est essentielle, mais que l'aspect rentabilité est le seul qui peut permettre à l'industrie forestière de survivre à long terme.

La présente étude est une analyse financière des coupes de jardinage adaptées à la forêt boréale irrégulière, et s'inscrit dans le cadre des travaux de la Chaire de recherche industrielle CRSNG-Université Laval en sylviculture et faune (Chaire). La Chaire est établie en forêt boréale, plus précisément dans la pessière noire irrégulière, dans la région de la Côte-Nord au Québec (Canada). L'objectif de la Chaire est de développer des approches adaptées à cette forêt et à sa faune. Les types de coupes de jardinage analysés sont de nouveaux traitements sylvicoles élaborés dans le cadre des activités de la Chaire (Ruel et al. 2007).

Liu et al. (2007) ont effectué une première étude économique sur ces nouveaux traitements, mais elle comporte certaines limites. D'abord, il s'agissait essentiellement d'une étude « bord de chemin », c'est-à-dire qui inclut principalement les coûts constatés dans le peuplement (notamment : abattage, débardage, supervision). En effet, bien que certains autres coûts aient été ajoutés, les coûts entre le peuplement et l'usine n'ont pas fait l'objet d'une étude approfondie. La majorité des éléments de spatialisation des coupes de jardinage n'ont pas été considérés, dont les coûts des chemins forestiers. Un autre élément qui n'a pas été pris en compte est l'horizon de croissance. Leur analyse ne considérait pas l'élément temporel. Elle incluait cependant l'aspect

des revenus et des coûts de transformation à l'usine. L'étude servait essentiellement à dresser un portrait de la faisabilité économique d'une première intervention en coupe de jardinage.

Les objectifs de cette étude sont importants, car ils vont permettre de préciser la rentabilité d'une nouvelle façon d'aménager la forêt résineuse irrégulière, soit par des coupes de jardinage. Comme il a déjà été mentionné, les coupes partielles, et à plus fortes raisons les coupes de jardinage qui permettent de maintenir un couvert résiduel constant, sont perçues comme pouvant maintenir la biodiversité et les paysages forestiers. Mais pour assurer la pérennité de l'industrie forestière, il est essentiel de s'assurer que ces nouvelles approches soient également économiquement acceptables. La présente étude consiste en une analyse financière de ces coupes de jardinage, et vise à identifier les éléments critiques influençant la rentabilité, en considérant les principaux coûts entre le peuplement et les produits finis, et un long horizon de temps.

Dans cette analyse financière, la gestion de l'incertitude et les analyses de sensibilité sont basées sur des simulations de type Monte Carlo. De telles simulations ont notamment été utilisées dans les analyses économiques forestières de Knoke et al. (2008, 2006, 2005, 2001), mais il semble que cette méthode n'ait été que peu répandue dans les analyses financières en foresterie. En ce sens, bien que les caractéristiques économiques des coupes de jardinage présentées dans ce mémoire soient pertinentes pour documenter ces nouveaux traitements, il demeure que l'élément le plus important est l'établissement d'une méthodologie d'analyse financière visant la comparaison de traitements sylvicoles différents (de coupes totales et partielles) basée sur des simulations Monte Carlo.

Les simulations Monte Carlo sont une méthode efficace pour tenir compte de l'incertitude dans les analyses économiques (Knoke et al. 2008), et la description de cette technique se trouve notamment dans Hertz (1964). Essentiellement, cette technique relativement simple et flexible (Boyle 1977) permet : de tenir compte de l'incertitude de certaines variables, de leurs interactions, de déterminer les éléments qui ont le plus d'influence sur les résultats, et de déterminer les probabilités d'occurrence des résultats. Suite à l'utilisation de cette méthode, les résultats des VAN seront caractérisés par des intervalles de confiance (Boyle 1977) plutôt que par une valeur unique.

1.3 Objectifs

L'objectif général de ce projet est d'effectuer l'étude exhaustive de la rentabilité financière des coupes de jardinage en forêt résineuse irrégulière, en considérant les aspects spatiaux et temporels et en utilisant des simulations de type Monte Carlo.

L'objectif général implique l'atteinte de quelques objectifs spécifiques :

1. Déterminer l'effet des traitements de coupe de jardinage sur la structure des coûts et des revenus, pour une scierie typique de la région de la Côte-Nord, en fonction d'une période d'évaluation donnée.
2. Déterminer les éléments critiques affectant la rentabilité des traitements de coupe de jardinage en forêt résineuse irrégulière.
3. Évaluer l'incertitude associée aux éléments critiques et à la rentabilité, en utilisant des simulations de type Monte Carlo.

L'hypothèse que nous voulons vérifier est que la réalisation de coupes de jardinage en peuplements résineux irréguliers peut être rentable, et par conséquent constituer une alternative pertinente et envisageable à court terme à la CPRS, traitement le plus souvent utilisé dans ces peuplements. Dans le cas contraire, nous serons en mesure de quantifier l'augmentation des coûts, et de déterminer les éléments critiques qui influencent cette augmentation.

2 Méthodologie

2.1 Localisation et description des sites à l'étude

Une partie des données utilisées dans cette étude provient d'un dispositif expérimental implanté au cours des étés 2004 et 2005 dans le cadre des activités de la Chaire. Ce dispositif est réparti en quatre blocs, dans la région de la Côte-Nord, dans l'est du Québec (Canada), dans le domaine bio-climatique de la pessière à mousses de l'est (Saucier et al. 2003). Les peuplements ont fait l'objet d'un choix a priori, parce qu'ils avaient une structure irrégulière (Liu et al. 2007). Les différents traitements ont été répartis aléatoirement, et appliqués sur des superficies variant de 12 à 24 hectares par unité expérimentale (Ruel et al. 2007). Ces peuplements naturels étaient composés principalement d'épinette noire, accompagnée de sapin baumier. Parfois, les

peuplements contenaient quelques individus d'autres essences, comme du bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.). En plus d'un témoin, tous les blocs ont été traités selon quatre traitements : CPRS, coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM), et deux types de coupes de jardinage.

Les quatre sites sont répartis sur le territoire de trois compagnies forestières : Produits forestiers Arbec, Kruger, et Abitibi-Bowater. La figure 1 indique la localisation des blocs du dispositif expérimental.

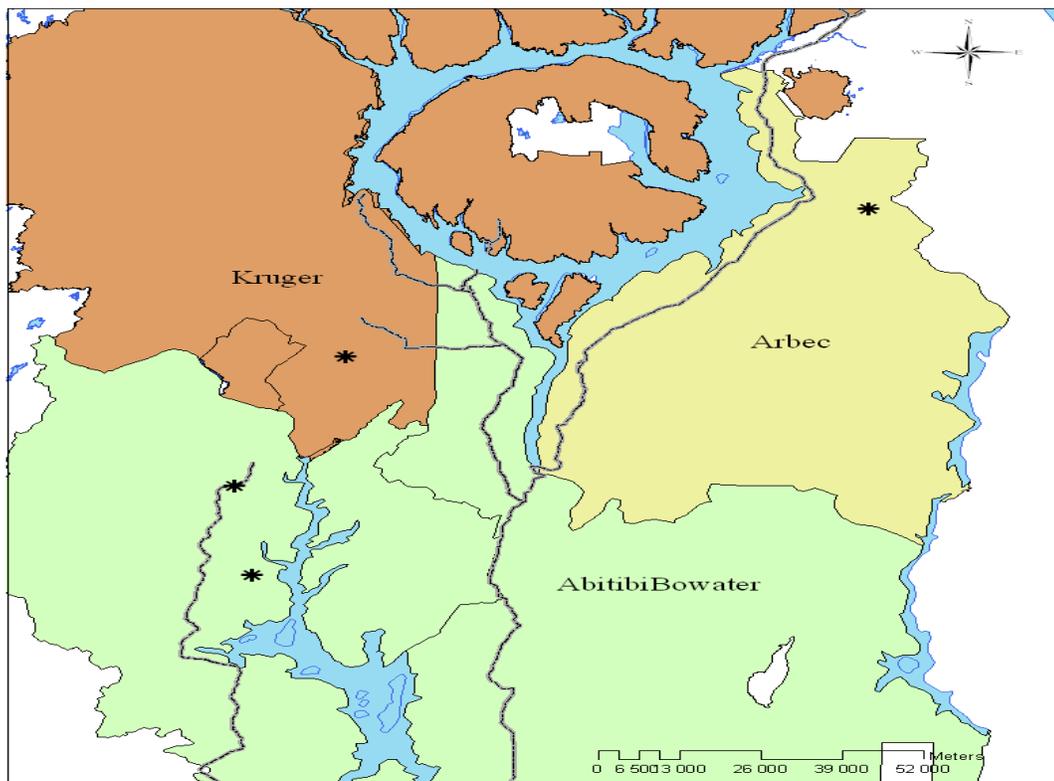


Figure 1 : Localisation des quatre blocs du dispositif expérimental (Source : Christine Casabon)

2.2 Description des traitements sylvicoles

La CPRS est le traitement le plus utilisé au Québec en forêt boréale, de sorte qu'il sert de point de référence pour comparer la rentabilité des nouveaux traitements. Les CPPTM ne sont pas incluses dans l'analyse, qui se concentre sur les deux types de coupes de jardinage. Les coupes de jardinage avec sentiers permanents sont incluses dans l'analyse, mais le jardinage avec sentiers

temporaires tel que décrit dans Ruel et al. (2007), n'a pas été retenu, car les outils disponibles se prêtaient mal à la simulation de la croissance sur plusieurs rotations. En conséquence, pour les fins de simulations, un troisième type de coupe de jardinage inspiré des sentiers temporaires, a été élaboré. Ce troisième type de coupe partielle possède exactement les mêmes caractéristiques que le jardinage avec sentiers temporaires lors du premier passage. Les changements sont dans la modélisation et la planification futures des interventions. Les observations des coupes de jardinage avec sentiers temporaires sont par conséquent utilisables pour ce troisième type.

2.2.1 Coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS)

Ce traitement sylvicole est le plus utilisé en forêt boréale québécoise (Ruel et al. 2007). La CPRS consiste en une coupe totale où la circulation de la machinerie est restreinte à des sentiers espacés de manière à limiter les superficies perturbées et à protéger la régénération préétablie (Hillman 2003). Lors d'une CPRS, tous les arbres de la classe de 10 cm et plus de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) doivent être récoltés.

2.2.2 Coupe de jardinage avec sentiers permanents

La description de ce traitement de jardinage est inspirée de Ruel et al. (2007). Pour le système de jardinage à sentiers permanents, les mêmes sentiers primaires d'une largeur de 5 mètres et espacés de 35 mètres, seront réutilisés à chaque intervention, d'où leur appellation de sentiers permanents. Des sentiers secondaires, orientés perpendiculairement aux sentiers permanents et espacés régulièrement le long des sentiers principaux, vont permettre de traiter l'ensemble du peuplement. La largeur des sentiers secondaires est de 5 mètres, et la distance entre chacun de ces sentiers est variable, selon le pourcentage total à récolter. Chacun des sentiers secondaires permet de traiter une bande de 10 mètres, selon des règles prédéfinies en fonction de la structure initiale. Ce faisant, la proportion des sentiers permanents est de 5 mètres sur 35 mètres, soit 14,3 %. Les sentiers primaires sont permanents, mais ce n'est pas le cas des sentiers secondaires, qui seront remplacés à chaque intervention, pour préserver la régénération qui s'y installera, et pour conserver une complexité dans la structure verticale du peuplement. La figure 2 illustre la coupe de jardinage avec sentiers permanents.

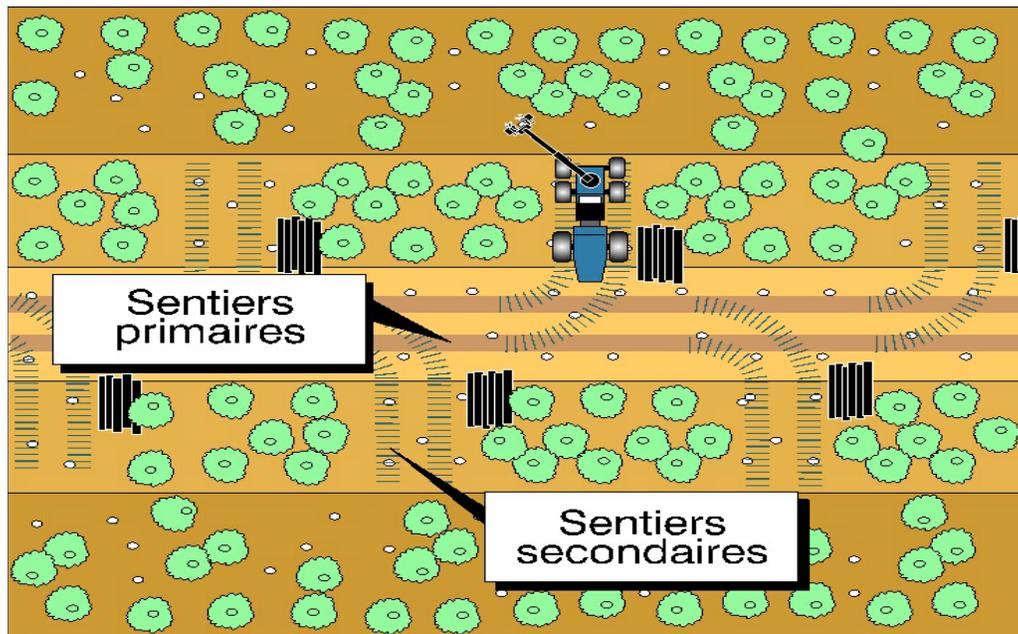


Figure 2 : Coupe de jardinage avec sentiers permanents (Ruel et al. 2007)

2.2.3 Coupe de jardinage avec sentiers temporaires

La description détaillée de ce traitement de jardinage se retrouve dans Ruel et al. (2007). Dans le système de jardinage avec sentiers temporaires, les sentiers de débardage sont disposés parallèlement et distancés de 30 mètres. La largeur moyenne des sentiers est de 5 mètres, et les 5 mètres de chaque côté du sentier sont traités de façon intensive, en appliquant une règle de sélection suggérée par la structure de la forêt entourant l'abatteuse, le choix final étant fait par l'opérateur de la machine. Une zone de 15 mètres de largeur doit être laissée entre deux zones traitées. Cette zone n'est pas traitée lors de la première intervention et consistera en une deuxième intervention. Ce traitement sylvicole considère également une troisième et une quatrième intervention, lors desquelles de nouveaux sentiers de débardage seront utilisés. La figure 3 illustre la coupe de jardinage avec sentiers temporaires.

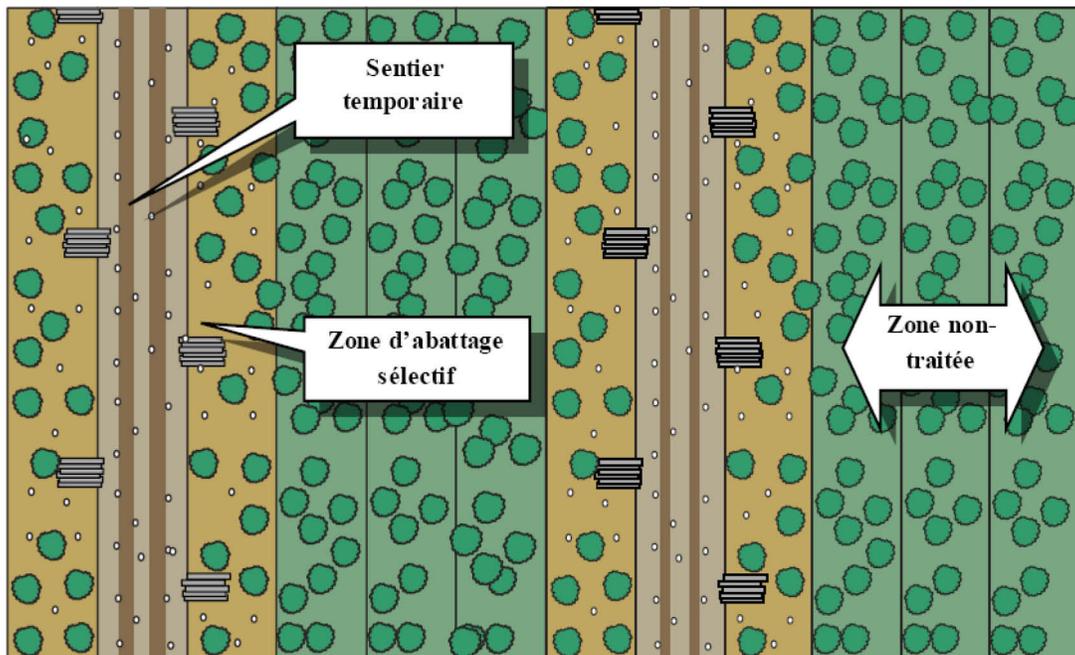


Figure 3 : Coupe de jardinage avec sentiers temporaires (Ruel et al. 2007). Chaque bande a 5 mètres, et la moitié du peuplement est traitée à chaque passage.

La figure 4 présente la séquence d'interventions initialement prévue (Roy et al. 2006). En considérant cette figure, nous constatons qu'il pourrait y avoir certaines difficultés aux troisième et quatrième passages. Le troisième passage prévoit qu'une partie de la zone d'abattage sélectif devra se réaliser dans une zone traitée par des sentiers temporaires lors du passage précédent, et il est difficile de prétendre qu'une quantité importante d'arbres marchands sera présente, et qu'un traitement de coupe partielle puisse s'y appliquer. De plus, nous pouvons constater que la proportion du peuplement qui sera éventuellement en sentier de débardage est importante (2/3).

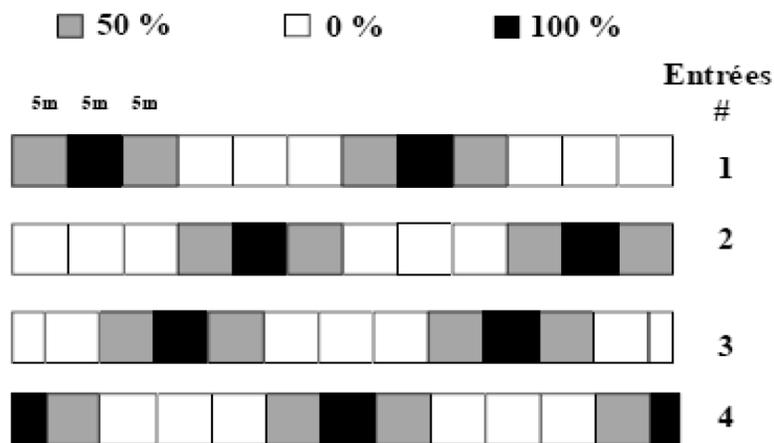


Figure 4 : Représentation schématique des coupes de jardinage avec sentiers temporaires dans le temps (Roy et al. 2006). Les entrées représentent la superposition des zones traitées et non-traitées. Les bandes blanches sont les sentiers de débardage, les pâles sont les bandes traitées, et les foncées celles non-traitées.

En plus de soulever certains questionnements sylvicoles, l'ensemble de ces inconvénients rend difficile la simulation réaliste de la croissance des peuplements résiduels à partir de ce troisième passage. Pour effectuer la simulation de ce traitement, il faudrait diviser le peuplement en plusieurs mini-bandes, d'environ 2,5 mètres de largeur, chaque bande ayant une croissance distincte des autres bandes, et croissant parfois suite à une coupe partielle, parfois suite à une coupe totale (sentier de débardage). Considérant une interaction sans doute importante entre chacune de ces mini-bandes, et une croissance résiduelle difficile à simuler, nous avons décidé de ne pas considérer ce traitement tel quel dans l'analyse, mais de le modifier.

2.2.4 Coupe de jardinage adaptée

Considérant les difficultés pour simuler les coupes de jardinage avec sentiers temporaires, nous avons apporté certaines modifications au traitement. Nous avons appelé ce nouveau traitement la coupe de jardinage adaptée. En fait, les deux premiers passages sont identiques à ceux de la coupe de jardinage avec sentiers temporaires, la différence s'effectuant seulement à partir du troisième passage. Notons aussi qu'étant donné que le premier passage est le même dans les deux cas, les mêmes données de productivité peuvent être utilisées (figure 5).

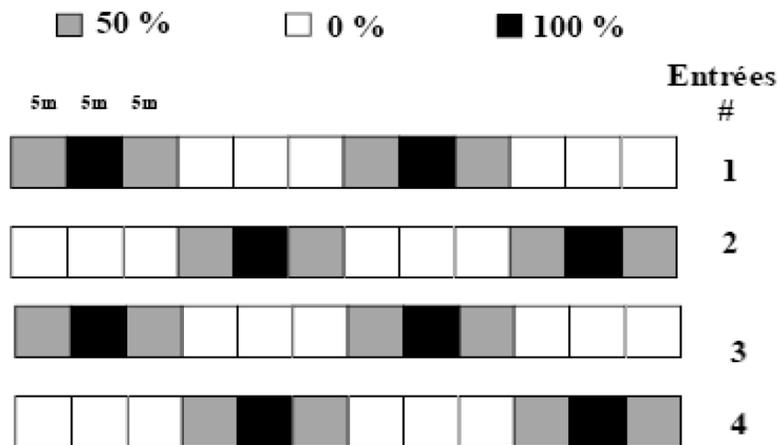


Figure 5 : Représentation schématique des coupes de jardinage adaptées dans le temps. Les deux premiers passages de la coupe avec sentiers temporaires se perpétuent, il n’y a donc pas de chevauchement. Les bandes blanches sont les sentiers de débardage, les pâles sont les bandes traitées, et les foncées celles non-traitées.

La coupe de jardinage adaptée implique que les 2 premiers passages s’effectueront à perpétuité, mais que l’espace dans le temps de ces passages ne sera pas le même. Par exemple, si la rotation de 60 ans proposée par Ruel et al. (2007) pour la variante avec sentiers temporaires était aussi utilisée pour la coupe de jardinage adaptée, cela impliquerait qu’à chaque 60 ans, la même partie de peuplement est traitée, mais que 30 ans après une intervention, c’est l’autre moitié du peuplement qui sera traité, et ainsi de suite. Puisqu’à chaque passage dans une même partie de peuplement les mêmes sentiers seront réutilisés, nous ne pouvons plus les considérer comme étant des sentiers temporaires.

2.3 Scénarios de comparaison

Afin de permettre la détermination de certains coûts et revenus, nous devons placer les coupes de jardinage à l’intérieur d’une stratégie de déploiement déterminée, car l’échelle du peuplement forestier n’est pas suffisante. À cet égard, Nadeau (2002) note que l’échelle d’évaluation doit correspondre à tout le territoire sous aménagement pour être en mesure de bien comprendre et expliquer la problématique de dispersion des coupes. Cette stratégie à plus grande échelle est essentielle notamment pour la planification des chemins forestiers, dont la vitesse de déploiement dépend en grande partie du volume de bois récolté par hectare. Ce volume à l’hectare change en

fonction des traitements sylvicoles, et en ce sens, il y a plus de volume de bois récolté à l'hectare suite à une CPRS que suite à une coupe de jardinage.

Nous avons donc posé certaines hypothèses. Nous avons d'abord considéré que tous les traitements sont regroupés dans un même secteur. Ainsi, un secteur sera traité avec 100 % de CPRS, un autre à 100% en coupe de jardinage avec sentiers permanents, et un autre sera traité exclusivement avec les coupes de jardinage adaptées. Une fois que les caractéristiques affectant la rentabilité de chacun des traitements seront mieux connues, il sera possible d'évaluer des scénarios différents.

Étant donné l'importance du coût des chemins, il serait probablement laborieux de planifier des coupes de jardinage à l'intérieur d'une planification différente. Par exemple, lors de l'établissement d'une mosaïque, on pourrait réaliser des coupes de jardinage à l'intérieur des blocs résiduels. Lorsque les passages en CPRS et en coupes de jardinage coïncident, cela pourrait être bénéfique, car cela permettrait d'augmenter la quantité de mètres cubes pour un même nombre de kilomètres de chemin. Nadeau (2002) mentionne qu'en augmentant le volume récolté par kilomètre de chemin, les coupes partielles effectuées dans les blocs résiduels permettraient de reporter la construction de certains tronçons de route. Cependant, étant donné que la durée entre les interventions n'est pas la même, au deuxième passage, seulement les coupes de jardinage feraient l'objet d'une récolte. Le volume de bois récolté par rapport au réseau de chemin requis serait sans doute inacceptable d'un point de vue économique. Le premier passage serait donc probablement plus intéressant, mais le deuxième le serait beaucoup moins.

Les coupes seront donc planifiées à l'intérieur d'un chantier virtuel, dans lequel 100% de la récolte s'effectue selon un traitement déterminé. Ce chantier est virtuel, car il n'a pas été planifié sur une carte ou sur le territoire, puisque la très grande variabilité entre les secteurs aurait fait en sorte de ne rendre valables les résultats que pour ce secteur. Pour obtenir des valeurs moyennes, il aurait alors fallu planifier plusieurs secteurs. Nous avons plutôt choisi d'utiliser des valeurs moyennes et de planifier les coupes à l'intérieur de ce secteur « type », représentatif de la région.

Nous posons aussi l'hypothèse que ces chantiers virtuels sont composés de peuplements semblables à ceux du dispositif expérimental. Les peuplements du dispositif ont été choisis a priori parce qu'ils avaient une structure irrégulière. Dans la réalité, en regroupant les coupes de

jardinage par secteur, il est inévitable que certains peuplements ne soient pas semblables à ceux du dispositif. Leurs structures pourraient être régulières et leurs indices de qualité de station (IQS) pourraient être différents. Pour éventuellement appliquer les coupes de jardinage dans des secteurs plus riches ou plus pauvres, il faudra réaliser de nouvelles études de productivité pour valider les performances économiques dans ces peuplements. En ce qui concerne les conversions d'une structure régulière à irrégulière, d'un point de vue sylvicole, de telles conversions ne causent aucun problème, mais impliqueraient potentiellement certains sacrifices (Nyland 2003). Les coûts associés et les rendements escomptés ne peuvent être présentement quantifiés pour ces traitements en particulier, mais des analyses économiques sur la conversion d'un aménagement équienné vers un aménagement inéquienné sont disponibles (Hanewinkel 2002, Knoke et Plusczyk 2001, Hanewinkel 2001). Rappelons que les CPRS pratiquées dans des peuplements ayant des structures irrégulières ont l'impact inverse, c'est-à-dire de régulariser la structure.

Le scénario de référence servant de comparaison aux coupes de jardinage dans l'analyse financière, est celui formé par les CPRS, et déployé selon le principe de la mosaïque. Ce chantier est représentatif de la situation actuelle. En fait, plusieurs éléments de ce chantier de comparaison sont basés sur les rapports d'interventions forestières annuels (RAIF) de 2005-2006 et 2006-2007. Le choix de ces deux RAIF vient du fait que le règlement sur les normes d'intervention en forêt publique (RNI - article 79) (MRNFQ 2009), exigeait à partir du 1^{er} avril 2005, que 60% de la récolte effectuée par CPRS s'effectue selon le principe de la mosaïque. L'obligation d'effectuer de la coupe mosaïque est en vigueur depuis le 1^{er} avril 2003, mais le % de coupe mosaïque obligatoire n'était pas constant. Il est constant à 60%, depuis le 1^{er} avril 2005, de sorte que cette proportion sera utilisée dans l'analyse.

La coupe mosaïque n'est pas un traitement sylvicole, mais plutôt une façon de déployer les CPRS sur le territoire. Le principe de la mosaïque est qu'une superficie non-coupée (résiduelle) équivalente à celle récoltée doit être conservée, jusqu'à ce que la régénération des secteurs récoltés ait atteint une hauteur de 3 mètres, ou qu'un délai de 10 ans se soit écoulé (MRNFQ 2009). Ce règlement est toujours en vigueur aujourd'hui, bien qu'en vertu de l'article 25,3 du RNI, la nouvelle manière de planifier sur la Côte-Nord soit désormais orientée vers les coupes par agglomération. Mais comme les agglomérations n'ont pas encore force de loi, et que très peu

de données sur les éléments de coûts sont disponibles, nous ne les avons pas considérées. En fait, évaluer financièrement les agglomérations de coupe serait une étude financière en soi. Notre objectif était de comparer les coupes de jardinage à un scénario connu et représentatif de la situation actuelle sur la Côte-Nord.

La coupe mosaïque implique qu'il y aura éventuellement une nouvelle récolte pour aller chercher les blocs résiduels non-coupés lors de la première intervention. Sur la base d'une comparaison axée sur la superficie, cette deuxième intervention devrait être modélisée. Mais puisque cette modélisation est une étude en soi, elle n'a pas été considérée dans l'analyse.

2.4 Simulation de la croissance

Nous avons vu à la section 2.2, la description des traitements qui font partie de l'analyse financière. Le premier passage en CPRS, dispersée selon le principe de la coupe mosaïque est l'élément de référence et de comparaison pour toute l'analyse financière. Il y a deux traitements de coupe de jardinage qui seront analysés, soit les coupes de jardinage avec sentiers permanents, et les coupes de jardinage adaptées.

La simulation de la croissance des peuplements résiduels est essentielle pour permettre de couvrir l'horizon économique de cette analyse financière, qui dépasse 200 ans. Des horizons infinis sont même parfois utilisés dans les analyses économiques en foresterie (Andreassen et Øyen (2002)). Les simulations de croissance des peuplements résiduels doivent être le plus réalistes possibles, et permettront de connaître les valeurs dendrométriques (volume récolté, volume par tige, etc.) des peuplements qui seront traités dans le futur, et ainsi permettre d'estimer les coûts et les revenus (flux monétaires) dans le futur.

Considérant l'état actuel des connaissances en termes de modélisation de la croissance, les CPRS et les coupes de jardinage ne seront pas simulées de la même manière. Les prochaines sous-sections décrivent la méthodologie employée pour chacun des types de coupe. Faute d'hypothèses raisonnables, aucune perturbation naturelle associée à la récolte n'est considérée dans les simulations de croissance. Les perturbations naturelles captées par les inventaires décennaux sont considérées.

2.4.1 CPRS

Les peuplements du dispositif expérimental ont été choisis a priori, parce qu'ils possédaient des structures irrégulières. Nous ne pouvons donc pas prétendre qu'ils représentent la moyenne du territoire. Pour simuler la croissance de ces peuplements résiduels issus des CPRS, nous avons ventilé les strates cartographiques représentées dans le dispositif. Seuls les peuplements traités en coupe de jardinage et en CPRS dans le dispositif ont été considérés. Rappelons que le dispositif expérimental couvre trois unités de compilation (8994, 3793 et 8990). Une fois que toutes les strates cartographiques représentées ont été ventilées, nous les avons associées à leurs strates d'aménagement correspondantes. Les strates d'aménagement nous ont permis de voir quels types écologiques sont représentés dans le dispositif. Connaissant quels types écologiques sont représentés, nous les avons rattachés aux courbes de croissance correspondantes. Ces courbes de croissance varient selon que le type écologique indique un indice de fertilité pauvre, moyen ou riche, et ces courbes sont différentes pour chaque unité de compilation. La procédure détaillée se trouve à l'annexe I.

En considérant l'âge d'exploitabilité des différentes courbes utilisées (l'âge d'exploitabilité est basé sur le volume des arbres de 13 cm et plus), qui varie de 85 à 105 ans, nous avons pondéré l'âge de chacune des courbes, et nous arrivons à un âge d'exploitabilité moyen de 98,1 ans pour nos courbes, mais pour faciliter l'analyse, nous avons considéré que l'âge d'exploitabilité moyen est de 100 ans. Nous connaissons maintenant la courbe de croissance qui semble représenter le mieux la croissance résiduelle des peuplements traités en CPRS dans le dispositif expérimental. Mais dans le but d'évaluer la rentabilité associée aux prochaines récoltes en CPRS, nous devons aussi être en mesure d'évaluer les revenus et les coûts. Pour déterminer ces éléments, l'idéal serait de pouvoir estimer la structure diamétrale du futur peuplement. Cependant, ces courbes ne prévoient pas de structure diamétrale, mais seulement un volume et une proportion d'essence.

Pour parvenir à estimer de la manière la plus crédible possible un diamètre moyen et un volume par tige, nous avons utilisé les tables de Pothier et Savard (1998). Ces tables sont utilisées dans la création des courbes de croissance, et estiment la croissance pour une espèce donnée, en peuplement pur, selon l'IQS, et selon la densité des tiges. Elles estiment également plusieurs valeurs dendrométriques, dont le diamètre moyen quadratique, le nombre de tiges et le volume

total. En connaissant le volume total et le nombre de tiges, nous pouvons déduire un volume par tige, variable importante de l'analyse financière.

Dans notre situation, nous sommes à environ 98,5 % en présence d'un IQS de 12, ce qui signifie que l'épinette noire a une hauteur de 12 mètres à l'âge de 50 ans. Seule une partie de notre dispositif était à un IQS de 15, de sorte que nous avons considéré que 100% de la superficie est représentée par un IQS de 12. En observant nos courbes de croissance, nous avons fait le lien avec les tables de Pothier et Savard (1998). Il s'agit des tables pour l'épinette noire pour un IQS de 12, ayant des densités moyennes et fortes. Ces 2 tables représentent le mieux nos courbes de croissance, selon le volume prédit et l'âge d'exploitabilité. En fait, 2 unités de compilation sont davantage représentées par la table « IQS 12 et densité moyenne », et l'autre unité de compilation est davantage représentée par la table « IQS 12 densité forte ». Nous avons conservé cette proportion pour pondérer une nouvelle table. Nous avons utilisé la même procédure pour l'épinette noire et pour le sapin baumier.

Pour pondérer une table de Pothier et Savard qui puisse nous servir de comparaison, nous avons considéré que la proportion de sapin est de 22%, et celle de l'épinette noire de 78%, qui sont les proportions observées dans la courbe unique, pour un âge de 100 ans (annexe I). La table adaptée de Pothier et Savard est présentée à l'annexe II.

La méthodologie présentée ci-dessus a été établie pour simuler la croissance des peuplements résiduels issus des CPRS suite à la première intervention. La récolte du premier passage a été simulée dans le modèle *Biolley* (voir section 2.4.2) comme pour les coupes de jardinage, puisque les mêmes valeurs dendrométriques sont utilisées pour décrire les peuplements initiaux. Lors de cette première intervention, c'est le pourcentage de prélèvement qui change par rapport aux coupes de jardinage, et par conséquent, les caractéristiques du peuplement résiduel. Suite à cette première intervention, la croissance en CPRS est simulée avec la procédure ci-dessus, et celle des coupes de jardinage se fera selon le modèle *Biolley*.

2.4.1.1 Reboisement et traitements d'éducation

Dans l'aménagement forestier actuel du territoire, il y a parfois des travaux de reboisement qui s'avèrent nécessaires lorsque la régénération naturelle est insuffisante. Il peut aussi y avoir des travaux d'éducation, par exemple des traitements d'éclaircie pré-commerciale. Une pondération

sommaire selon les unités de compilation et les types écologiques présents dans le dispositif expérimental, nous a montré que moins de 6% des strates de nos dispositifs seraient sujettes à un reboisement, et aucun traitement d'éducation ne serait appliqué.

Pour les passages subséquents, soit ceux qui seront réalisés dans une centaine d'années, la proportion de reboisement pourrait être plus importante, mais cette donnée est inconnue. Les travaux de reboisement et d'éducation engendreraient alors des coûts supplémentaires, mais aussi la possibilité d'engendrer des gains ou des rendements supérieurs plus tard. Les hypothèses de rendements et de revenus escomptés seraient plutôt arbitraires, de sorte que nous avons convenu de ne pas inclure de travaux de reboisement ou d'éducation de peuplement dans les simulations de croissance des traitements issus des CPRS dans cette analyse financière. L'équivalent est de considérer que si des traitements d'éducation et/ou de reboisement devaient être réalisés dans le futur, leur valeur actuelle nette serait de 0.

2.4.2 Coupes de jardinage

Pour planifier les volumes de bois futurs qui seront disponibles, les périodes entre les interventions et l'intensité des interventions, il faut être en mesure de bien modéliser la croissance des peuplements, dont celle des peuplements irréguliers (Groot 2002). Pour la simulation de la croissance des peuplements résiduels issus des coupes de jardinage, aucun modèle reconnu n'existe présentement pour simuler un tel traitement dans les peuplements irréguliers d'épinettes noires et de sapins baumiers. Actuellement, des modèles à l'échelle de l'arbre sont en confection, et pourraient être utilisés dans un avenir rapproché. Le recours à ces modèles pourrait permettre de compenser le manque de données empiriques disponibles, en simulant la croissance des tiges individuelles (Thorpe et al. 2008, Thorpe et Thomas 2007, Groot 2002). La documentation empirique des rendements des coupes partielles prendra des décennies. En réalité, il faudrait légitimement attendre au moins une rotation pour chaque type d'intervention, pour connaître avec une certaine précision les rendements de croissance et les effets des coupes partielles.

Le modèle *Biolley*, mis au point par Jean-Martin Lussier du Service Canadien des Forêts, a été utilisé dans cette étude. Ce modèle est basé sur les données des placettes permanentes du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec (MRNFQ), couvrant les 20

dernières années de croissance des peuplements naturels, et correspondent à la région de la Côte-Nord. Le principe de ce modèle est basé sur les travaux de Buongiorno et Gilles (2003). Ce modèle contient un simulateur de croissance (basé sur le réseau de placettes permanentes) et un processus d'optimisation par programmation linéaire. L'optimisation a permis d'orienter la prescription initiale et pourrait permettre, selon une fonction objectif déterminée et des contraintes pertinentes, de définir la croissance des peuplements résiduels vers une structure optimale. Cependant, dans cette étude, seul le simulateur de croissance a été utilisé, les caractéristiques d'une structure optimale et les contraintes à utiliser n'étant pas toutes connues. En utilisant seulement le simulateur de croissance, nous présumons que la structure cible à atteindre est celle où les volumes à l'hectare dans les bandes (entre les sentiers) sont semblables à ceux du peuplement initial. Ainsi, suite à l'analyse des résultats de croissance des placettes permanentes, des matrices de transition ont été établies et utilisées dans le simulateur de croissance, indiquant les probabilités qu'un arbre de diamètre donné reste dans la même classe 10 ans plus tard, croisse à la classe supérieure, croisse de deux classes supérieures, ou qu'il meurt.

En utilisant les données de croissance des forêts naturelles, l'hypothèse est que la croissance des peuplements traités en coupe de jardinage sera similaire à celle des forêts naturelles, donc qu'il n'y a pas d'effet de rendement. Notons que le choix des tiges s'effectue dans toutes les classes de diamètre, et que la gestion de la vigueur est un objectif important (Ruel et al. 2007). Une réduction de la mortalité et une meilleure croissance des tiges résiduelles pourraient éventuellement permettre une meilleure croissance des peuplements résiduels. L'état actuel des connaissances ne permettant pas de poser des hypothèses valables sur la croissance et sur la variation de la vulnérabilité aux perturbations naturelles des tiges résiduelles, l'hypothèse d'une croissance équivalente aux forêts naturelles est retenue.

La fonction de recrutement du modèle a été calibrée en fonction du nombre de tiges et de la surface terrière du peuplement. Cette calibration a été ajustée selon une ouverture de l'ordre de 35-40%, soit les ouvertures anticipées suite aux coupes de jardinage. Par comparaison, le modèle a été testé pour simuler la croissance des CPRS, et les résultats indiquaient un volume de 137 mètres cubes par hectare 120 ans après intervention, alors que les courbes du MRNFQ indiquent 107 mètres cubes à 100 ans. La différence devient cependant importante ensuite, étant donné que la fonction de recrutement continue d'engendrer du volume, alors que le peuplement est fermé.

Les coupes de jardinage adaptées impliquent que la moitié du peuplement initial n'est pas traité lors du premier passage, et ne le sera qu'au deuxième. Pour cette première période dans laquelle la forêt n'est pas traitée, nous avons posé l'hypothèse que cette partie de peuplement n'aura aucune croissance, de sorte que les valeurs dendrométriques des peuplements traités lors du deuxième passage seront les mêmes que celles du premier passage. Cette hypothèse s'appuie sur les rendements prévus des peuplements d'épinette noire, qui montrent d'abord une croissance, pour finalement atteindre une stabilité, ou un plateau, pour les peuplements matures (Garet et al 2009). La croissance de la partie non-traitée ne devrait donc pas être affectée, et la mortalité sera compensée par la régénération et le recrutement, puisque nous posons l'hypothèse que nous sommes dans cette phase « plateau ». En réalité, on peut penser que certains peuplements qui seront traités en coupes de jardinage adaptées seront en croissance, d'autres en perte de croissance (sénescence), et d'autres dans la phase « plateau », de sorte qu'en moyenne, la mortalité et la régénération devraient s'équilibrer, ce qui fait que notre hypothèse de considérer aucune croissance (ou perte de croissance) dans la partie qui ne sera traitée qu'à la deuxième intervention est raisonnable, en moyenne.

2.4.2.1 Durée des rotations

Il faut aussi être en mesure d'attribuer la période d'attente pertinente entre deux passages. Cette durée de rotation n'est pas une variable comme les autres, qu'il suffit de faire varier à l'intérieur d'une distribution de probabilité. En fait, une rotation différente est selon nous une alternative différente. En effet, attendre moins longtemps entre 2 passages de coupe de jardinage implique qu'il y aura du bois récolté plus vite, mais implique aussi que le volume par tige et le volume récolté seront plus faibles, que si nous avons attendu plus longtemps. À l'inverse, une attente trop longue signifie qu'il y aura plus de grosses tiges à récolter, que le volume récolté sera plus élevé, mais également que les revenus du bois surviendront plus tard dans le temps.

Il s'agit d'une décision à prendre, en déterminant principalement les paramètres dendrométriques. En effet, les périodes de rotations économiques et sylvicoles optimales ne sont pas nécessairement les mêmes. L'objectif principal des coupes de jardinage étant de conserver une structure, nous pouvons prétendre que la durée idéale des rotations est d'abord basée sur un choix sylvicole. L'hypothèse est que le peuplement jardiné sera de nouveau prêt à être jardiné, lorsqu'il aura atteint environ les mêmes valeurs dendrométriques que le peuplement initial, ou encore

atteint la structure souhaitée. Ce faisant, le volume disponible à la récolte sera à peu près constant, ce qui est un objectif des coupes de jardinage (Ruel et al. 2007).

Le modèle *Biolley* étant ajusté par période de 10 ans, nous avons effectué des simulations de croissance et économique, pour des périodes de 40, 50, 60, 70 et 80 ans. Les résultats sur les valeurs dendrométriques et économiques ont démontré, en considérant les objectifs cités au paragraphe précédent sur les coupes de jardinage, que la période de rotation optimale est de 70 ans pour les deux types de traitements de coupes de jardinage. La période utilisée dans Ruel et al. (2007) est de 60 ans.

Rappelons que dans le cas des coupes de jardinage adaptées, la rotation optimale est de 70 ans, mais que cette période concerne chacune des moitiés de peuplement. Ainsi, puisque seulement la moitié du peuplement est traitée à chaque passage, il y a donc des passages à tous les 35 ans, en alternant entre chaque moitié de peuplement.

2.4.2.2 Croissance dans les sentiers de débardage

Les deux types de coupes de jardinage impliquent la présence de sentier de débardage de 5 mètres de largeur. La croissance dans ces sentiers sera très différente de celle dans les bandes, puisqu'elle résulte de coupe totale. Pour simuler la croissance dans ces sentiers de débardage, nous avons utilisé la même courbe que celle pour les CPRS, mais à laquelle nous avons considéré un délai de croissance de 10 ans. Cette valeur de 10 ans est plus ou moins subjective, et devra être confirmée ou infirmée dans le futur. Nous avons inclus ce délai de croissance par rapport à la CPRS parce que l'ensoleillement ne sera pas aussi important que lors d'une ouverture complète du peuplement et qu'il peut y avoir présence de débris ligneux. Étant donné que la croissance optimale est de 70 ans pour les coupes de jardinage, la croissance dans les sentiers de débardage sera simulée comme une CPRS de 60 ans.

Cette croissance dans les sentiers de débardage affecte la densité, qui elle-même influence la fonction de recrutement du modèle *Biolley*. Dans le cas des coupes de jardinage adaptées, les sentiers représentent 33% de la superficie (5 mètres sur 15 mètres). La fonction de recrutement du modèle *Biolley* utilisée pour les parties ne constituant pas de sentiers, a par conséquent été ajustée pour tenir compte de la densité dans les sentiers. Pour la variante avec sentiers permanents, comme la superficie des sentiers de débardage est de 14,3 % environ (5 mètres sur

35 mètres), nous avons considéré que la fonction de recrutement n'est pas affectée par la densité dans le sentier. En réalité, elle l'est probablement, mais l'impact sur les premiers mètres en bordure du sentier n'est pas le même que l'impact à plusieurs mètres du sentier, alors n'ayant pas d'hypothèses raisonnables, nous avons préféré en faire abstraction.

2.4.2.3 Structure verticale des peuplements et prescriptions sylvicoles

Les peuplements résineux sur la Côte-Nord, ont souvent une structure irrégulière et très hétérogène. En ce sens, les peuplements irréguliers ont été subdivisés en quatre types sylvicoles (Ruel et al. 2007), soit : mono-étagé en régénération (type 1), mono-étagé avec bois moyen et gros bois (type 2), bi-étagé (type 3), et multi-étagé (type 4). À partir des données du dispositif expérimental, la structure verticale pondérée selon les quatre types sylvicoles est la suivante : type 1 = 3,25 %, type 2 = 13,75 %, type 3 = 56,83 %, type 4 = 26,17 %. La simulation de croissance des peuplements issus des coupes de jardinage tiendra compte de cette structure verticale. En effet, chacun des types sylvicoles est associé à une prescription de récolte basée sur une micro-typologie opérationnelle (Ruel et al. 2007). De plus, la grosseur des bois est répartie en trois catégories. La catégorie des petits bois (PB) regroupe les classes de diamètre de 10 et 12 cm, celle des moyens bois (MB) les classes de 14 à 20 cm, et celle des gros bois (GB), les classes de 22 cm et plus.

Tableau 1 : Prescription de récolte pour les deux variantes de coupes de jardinages (excluant les sentiers de débardage et les sentiers secondaires), en pourcentage de surface terrière. Les petits bois (BM) représentent les classes de diamètre de 10 et 12 cm, celle des bois moyen (MB) les classes de 14 à 20 cm, et celle des gros bois (GB), les classes de 22 cm et plus.

CJ sentiers permanents				CJ adaptée			
Type sylvicole	PB	MB	GB	Type sylvicole	PB	MB	GB
1	0	50	100	1	0	0	100
2	0	33	50	2	0	66,67	100
3	0	33	50	3	0	66,67	100
4	0	33	50	4	0	66,67	100

Les prescriptions présentées au tableau 1 ont servi pour chaque passage, dans les zones d'abattage sélectif (exclut les sentiers de débardage). En réalité, il serait possible de modifier les prescriptions, pour optimiser davantage la rentabilité et/ou les aspects sylvicoles, selon le nombre de tiges dans chacun des types.

Bien que cela aurait pu ne pas être le cas, la prescription est la même pour les types 2, 3 et 4, pour les deux traitements, et seule la prescription du type 1 diffère des autres. Comme le type 1 est celui « en régénération », et que le modèle *Biolley* n'inclut pas de perturbations naturelles autres que celles captées par les placettes permanentes, la proportion de type 1 devrait diminuer et même devenir nulle éventuellement. Un des objectifs des coupes de jardinage est d'ailleurs de conduire les peuplements vers des structures jardinées et complexes (Ruel et al. 2007).

Les simulations dans *Biolley* permettent de suivre l'évolution du type 1 dans le temps, jusqu'à ce qu'il change de type. À partir de ce moment, cette partie de peuplement sera traitée avec la même prescription que les types 2, 3 et 4, puisqu'elle ne sera plus en régénération. Pour connaître à quel moment le type 1 change, nous avons déterminé un seuil. Ainsi, nous avons déterminé que lorsque la quantité de bois moyen (BM) et de gros bois (GB) était supérieure à 575 tiges à l'hectare, il ne s'agit plus d'un type 1. Ce seuil a été déterminé en observant les courbes pondérées du nombre de tiges par hectare en fonction du DHP de chacun des quatre types. Ces courbes indiquent que les types 2, 3 et 4 sont très similaires, et que la courbe du type 1 est différente. Lorsque la quantité de bois moyen et de gros bois dépasse un seuil d'environ 575 tiges par hectare, le nombre de petites tiges diminue, et on se retrouve avec une courbe semblable à celles des types 2, 3 et 4.

Bien que nous connaissions à chaque tranche de 10 ans le nombre de tiges par classe de diamètre du peuplement en croissance pour chacun des types, il n'est pas possible en se basant sur cette seule donnée, de savoir dans quel type exactement nous sommes. Cependant, comme les prescriptions pour les types 2, 3 et 4 sont les mêmes, cela n'influence pas la récolte.

Il faut noter cependant que ces prescriptions sylvicoles ne s'appliquent que dans les zones d'abattage sélectif des traitements. La récolte dans les sentiers de débardage est de 100%. Dans les coupes de jardinage avec sentiers permanents, il y a aussi la zone des sentiers secondaires. Cette zone est non-négligeable, car elle représente 10/35 mètres (28,6%). Si on pose l'hypothèse, comme dans Roy et al. (2006) qu'il faut environ 240 ans pour produire du gros bois (plus de 22 cm de diamètre), alors nous pouvons déterminer le pourcentage de récolte dans cette zone. Évidemment, ce pourcentage variera selon la rotation choisie.

Par exemple, pour une rotation de 60 ans, nous savons qu'il y aura 5 passages $((240/60) + 1)$ sur cette période de 240 ans (le +1 fait référence au passage de l'an 0). S'il y a 5 passages, cela signifie qu'il faudra traiter 20% de la zone des sentiers secondaires à chaque passage, pour assurer une quantité constante de gros bois dans le temps. Selon cette hypothèse, le tableau 2 indique le pourcentage de récolte à effectuer selon la rotation choisie dans les zones de sentiers secondaires des coupes de jardinage avec sentiers permanents.

Tableau 2 : Pour la coupe de jardinage avec sentiers permanents, pourcentage de récolte (en surface terrière) dans la zone de sentiers secondaires, selon la rotation.

Rotation (années)	% récolte
40	14,3
50	17,2
60	20,0
70	22,6
80	25,0

Ces pourcentages de récolte dans les sentiers secondaires, supposent qu'ils sont suffisamment élevés pour permettre la récolte de toute la zone d'abattage sélectif. Aussi, en ce qui concerne cette zone de sentiers secondaires, étant donné qu'il serait laborieux de prévoir la croissance sur 240 ans de ces petites trouées, nous posons l'hypothèse que, dans cette zone, nous retrouvons les mêmes caractéristiques dendrométriques à chaque passage dans la portion récoltée. Les zones récoltées sont ensuite en croissance pendant 240 ans avant d'être récoltées à nouveau.

2.4.2.4 Proportion de sapin baumier et d'épinette noire

Dans le cas des CPRS, la proportion de sapin baumier est obtenue directement par les courbes de rendement du MRNFQ. En effet, chaque courbe utilisée prévoit une proportion en sapin baumier et en épinette noire. Les proportions ont donc été obtenues suivant la méthodologie de pondération des courbes.

En ce qui concerne les coupes de jardinage, le modèle de programmation linéaire *Biolley*, n'indique pas de proportion d'essence. Nous avons donc considéré la proportion d'essence des peuplements initiaux du dispositif expérimental, et nous posons l'hypothèse qu'elle sera la même à tous les passages. Au niveau de la régénération, particulièrement dans les trouées caractéristiques des forêts irrégulières, l'étude de Pham et al. (2004), indique que les sapins

baumiers se régénèrent majoritairement dans les peuplements dominés par les sapins baumiers, et que les épinettes noires se régénèrent majoritairement dans des peuplements dominés par l'épinette noire. Toutefois, ces deux essences se remplacent réciproquement dans les peuplements composés de ces deux essences, mais il ne semble pas y avoir d'invasion par le sapin baumier en forêt naturelle. En réalité, il est possible que cette proportion soit appelée à changer dans le temps, mais il n'est actuellement pas possible de poser d'hypothèses solides à cet égard.

La proportion de sapin baumier et d'épinette noire est basée sur les données d'inventaire du dispositif expérimental. L'étude de cet inventaire nous indique que la proportion de sapin baumier est de 43,2%, et celle en épinette noire est de 56,8%. Les quelques épinettes blanches présentes ont été considérées avec le sapin baumier, et les quelques feuillus ont été exclus.

3 Structure des coûts et des revenus

La principale difficulté lors de l'estimation des valeurs est de bien comprendre le projet à entreprendre, et à bien modéliser la structure des coûts et des revenus dans le temps. Une fois cette étape cruciale établie, l'application des techniques d'analyse telle que celle de la valeur actualisée nette (VAN) est simple, et ne constitue qu'une étape de mathématiques financières. L'établissement de la structure des coûts et des revenus, soit la détermination des flux monétaires anticipés de la période d'évaluation, consiste donc en une étape extrêmement importante (Brealey et al. 2006, Page 2005, Ross et al. 2005, Soucy et Yargeau 2002, Galibois 1997). Évidemment, si les données utilisées et les estimations des flux monétaires anticipés pour l'ensemble de la vie d'un projet ne sont pas représentatives de la réalité, aucune technique d'analyse financière, pas même la technique de la VAN, ne donnera de réponses satisfaisantes (Brealey et al. 2006). La participation des compagnies forestières, notamment pour fournir et valider bon nombre de données et d'hypothèses, a été essentielle. Cette participation rend plus crédibles les données et les hypothèses utilisées dans cette analyse.

3.1 Coûts

Cette section décrit chacun des éléments de coûts inclus dans l'analyse financière. Dans tous les cas, les équations de coûts qui concernent les coupes de jardinage sont les mêmes pour les deux variantes, bien que les valeurs des variables soient généralement différentes. Toutes les équations de coûts développées dans cette section sont présentées en dollar par mètre cube de bois (\$/m³). Pour connaître les coûts totaux, il suffit donc de multiplier ce coût par mètre cube par le volume récolté pour un traitement et une intervention données. Les différents coûts considérés dans cette analyse sont présentés au tableau 3.

Tableau 3 : Variables de coûts utilisées dans l'analyse financière.

Variables de coûts utilisées dans l'analyse	
Construction chemin d'accès	Camp forestier
Entretien chemin d'accès	Inventaire
Restauration chemin d'accès	Déchargement
Construction chemin récolte	Planification
Entretien chemin de récolte	Mesurage
Restauration chemin de récolte	Administration
Abattage	Communications
Débardage	Formation
Supervision	Surcharge essence
Déplacement machinerie	Protection (SOPFEU, SOPFIM)
Chargement	Coût transformation (usine)
Transport	

3.1.1 Hypothèses pour les coûts

Le fait de modéliser sur un long horizon de temps, plus de 200 ans dans le cas de cette analyse financière, nous amène à devoir modéliser chacun des éléments de coûts. Pour y parvenir, nous avons dû poser des hypothèses (Andreassen et Øyen 2002). Il faut rappeler que nous évaluons une situation représentative moyenne de la région de la Côte-Nord. Ainsi, nous avons tenté de demeurer assez généraux dans nos hypothèses, sans quoi l'étude serait devenue un cas particulier. La méthodologie développée pourra être reproduite dans d'autres types de peuplements ou de territoires.

Nous avons convenu que la superficie des chantiers est fixe entre les traitements. Ainsi, le volume récolté par chantier ne sera pas le même. La logique est de comprendre, sur une surface donnée, quelle est la meilleure option entre les deux traitements de jardinage et la CPRS. L'analyse aurait pu être basée selon un volume fixe, mais considérant la différence élevée que cela aurait engendré sur la taille des chantiers, il aurait fallu poser l'hypothèse que la superficie pouvant être traitée est plus ou moins illimitée, ce qui ne reflète certainement pas la réalité.

La superficie des chantiers utilisée dans les calculs est de 1000 hectares, mais étant donné que tous les éléments de coûts sont ramenés en dollars par mètre cube, les résultats sont indépendants de la superficie utilisée. Nous considérons que la superficie ciblée est réalisée entièrement la même année.

3.1.2 Coûts des chemins

Pour un territoire donné, il est implicite par le calcul de possibilité forestière annuelle, que tous les peuplements forestiers doivent être récoltés au cours de la période de calcul (Nadeau 2002). Alors, pour l'ensemble de cette révolution, tous les peuplements forestiers devront être accessibles par des chemins forestiers. Ce constat ne change pas en fonction des scénarios de planification ou en fonction des traitements. C'est le moment de l'implantation de ces chemins qui va varier, ainsi que les frais d'utilisation, d'entretien et de réparation.

Dans cette analyse financière, nous considérons que la superficie des chantiers est fixe, ce qui permet de vérifier de quelle manière il est possible de rentabiliser une superficie donnée, selon différents traitements. Étant donné que le déploiement du réseau de chemins est influencé par le volume récolté par unité de superficie, pour une superficie fixe, moins de volume sera récolté en coupes de jardinage, de sorte que le coût des chemins sera plus élevé. À long terme, les volumes de bois transités par kilomètre de chemin seront les mêmes, peu importe le scénario sylvicole retenu, puisque le réseau routier mis en place au premier passage servira lors des interventions futures (Nadeau 2002).

À grande échelle, la particularité d'un régime de coupes dispersées et/ou un scénario de planification basé sur des coupes partielles, correspond à l'horizon comprimé de construction où il y a devancement des dépenses qui autrement auraient été dégagées plus tard dans le temps

(Nadeau 2002). La réalisation plus rapide du réseau de chemins implique donc que les coûts de chemins surviendront plus rapidement dans la période d'évaluation économique, et qu'ils auront plus d'impacts sur la VAN, étant donné la valeur temporelle de l'argent (Brealey et al. 2006, Page 2005, Ross et al. 2005, Soucy et Yargeau 2002, Galibois 1997). Toutes choses étant égales par ailleurs, considérer qu'il faut plus de chemins pour un volume constant ou qu'il y a moins de volume récolté pour un réseau de chemin fixe, est équivalent pour déterminer le coût des chemins.

Pour les chemins forestiers, nous avons, comme Nadeau (2002), séparé les chemins d'accès et les chemins de récolte. Les compagnies forestières ont souvent leur propre classement des chemins, de sorte que l'utilisation de classes de chemin aurait été inutilement laborieuse. À noter cependant que dans notre cas, les chemins d'accès font référence à ce que les compagnies forestières classent souvent comme étant des chemins de classes 3 ou 4. Ainsi, aucun chemin de classes 1 et 2 n'est prévu dans cette analyse. Nous posons l'hypothèse que la quantité de chemin d'accès est fixe entre les chantiers, et que seulement la quantité de chemin de récolte est variable entre les périodes.

3.1.2.1 Coût de construction de chemin

3.1.2.1.1 Coût de construction chemins d'accès

L'équation du coût de construction des chemins d'accès est la même pour tous les traitements, étant donné que la quantité de chemin nécessaire est fixe (superficie fixe). Le ratio du nombre de kilomètres de chemins nécessaires par hectare de traitement de récolte, présent dans l'équation, est décrit à la section 3.3.2.1. Rappelons que ce ratio inclut les chemins de récolte et d'accès, de sorte que le pourcentage de chemin d'accès est aussi inclus dans l'équation. Le volume récolté par hectare selon chaque traitement au premier passage permet de ramener le coût en dollar par mètre cube. Enfin, on multiplie par le coût unitaire. Notons que, même si la quantité de chemins d'accès à construire est la même, comme le volume récolté par hectare n'est pas le même entre les traitements et entre les passages, le coût en dollar par mètre cube va varier.

L'équation pour le coût des chemins d'accès est la suivante :

$$CCCA = \left(\frac{Km}{ha} CPRS \times \% che. accès \times \frac{\$}{Km} const. accès \right) \div \frac{volume récolté}{ha}$$

Où :

CCCA : Coût de construction des chemins d'accès, en \$/m³

$\frac{km}{ha} CPRS$: Inverse mathématique du ratio ha/km. Pour les chemins d'accès, le ratio en CPRS est utilisé comme référence pour tous les traitements.

% *che. accès* : Proportion de chemins d'accès par rapport aux chemins totaux

$\frac{\$}{km}$ *const. accès* : Coût unitaire en \$/km pour la construction des chemins d'accès

$\frac{volume\ récolté}{ha}$: Volume récolté par hectare (m³/ha), pour le traitement de CPRS, de coupe de jardinage adaptée ou avec sentiers permanents.

3.1.2.1.2 Coût de construction chemins de récolte

3.1.2.1.2.1 Coût construction chemin récolte CPRS

La modélisation du coût de construction des chemins de récolte en CPRS tient compte : du ratio de kilomètres de chemins à construire par hectare à traiter, du pourcentage de chemins de récolte, du pourcentage de chemins d'hiver et d'été, du coût unitaire pour la construction des chemins de récolte d'hiver et d'été, et du volume par hectare récolté par traitement au premier passage.

L'équation pour la construction des chemins de récolte en CPRS est donc :

$$\begin{aligned} CCCR (CPRS) = & \left(\left(\% che. été \times \frac{\$}{Km} const. réc. été \right) \right. \\ & \left. + \left(\% che. hiver \times \frac{\$}{Km} const. réc. hiver \right) \right) \times \frac{Km}{ha} CPRS \times \% che. récolte \\ & \div \frac{volume\ récolté}{ha} CPRS \end{aligned}$$

Où :

CCCR (CPRS) : Coût de construction des chemins de récolte en CPRS, en \$/m³

% *che. été* : Proportion de chemins d'été par rapport aux chemins de récolte

% *che. hiver* : Proportion de chemins d'hiver par rapport aux chemins de récolte

$\frac{\$}{km}$ *const. réc. été* : Coût unitaire en \$/km pour la construction des chemins de récolte d'été

$\frac{\$}{km}$ *const. réc. hiver* : Coût unitaire en \$/km pour la construction des chemins de récolte d'hiver

$\frac{Km}{ha} CPRS$: Inverse mathématique du ratio ha/km, pour les CPRS

% *che. récolte* : Proportion de chemins de récolte par rapport aux chemins totaux

$\frac{volume\ récolté}{ha} CPRS$: Volume récolté par hectare (m³/ha), en CPRS.

3.1.2.1.2 Coût construction chemin récolte en coupe de jardinage

L'équation pour les coûts de chemins de récolte en coupe de jardinage tient compte essentiellement des mêmes éléments que pour les CPRS. Cependant, la même équation ne peut être utilisée, considérant l'hypothèse que la quantité de chemin d'accès est fixe. Il faut donc apporter une distinction entre les deux équations. Notons que si l'hypothèse des chemins d'accès fixe était enlevée, la même équation aurait été utilisée pour tous les traitements.

Pour simplifier l'équation de construction des chemins de récolte en coupe de jardinage, nous l'avons séparé en deux parties. La première sert à déterminer le nombre total de kilomètres de chemins de récolte à construire dans les chantiers de coupe de jardinage, et la deuxième détermine le coût au mètre cube.

$$Km\ récolte\ CJ = \left(Superficie\ tot.\ à\ traiter\ CJ \times \frac{Km}{ha} CJ \right) - Km\ accès$$

$$CCCR(CJ) = \left(\left(\% che. été \times \frac{\$}{Km} const. réc. été \right) + \left(\% che. hiver \times \frac{\$}{Km} const. réc. hiver \right) \right) \times Km\ récolte\ CJ \\ \div volume\ tot.\ récolté\ CJ$$

Où :

Km récolte CJ : Le nombre total de kilomètres de chemins de récolte en coupe de jardinage.

Superficie tot. à traiter CJ : Superficie totale à traiter pour un traitement de coupe de jardinage.

$\frac{Km}{ha} CJ$: Inverse mathématique du ratio ha/km, pour les coupes de jardinage

Km che. accès : Le nombre total de kilomètres en chemin d'accès

CCCR (CJ) : Coût de construction des chemins de récolte en coupe de jardinage, en \$/m³

% *che. été* : Proportion de chemins d'été par rapport aux chemins de récolte

% *che. hiver* : Proportion de chemins d'hiver par rapport aux chemins de récolte

$\frac{\$}{Km}$ *const. réc. été* : Coût unitaire en \$/km pour la construction des chemins de récolte d'été

$\frac{\$}{Km}$ *const. réc. hiver* : Coût unitaire en \$/km pour la construction des chemins de récolte d'hiver

volume tot. récolté CJ : Volume total récolté pour un traitement de coupe de jardinage, en \$/m³

3.1.2.2 Coût d'entretien des chemins

L'entretien des chemins comprend l'entretien d'été (nivelage, réparation, etc.) et d'hiver (dénivelage, sablage, etc.). Dans tous les cas, nous considérons que 100% des chemins sont entretenus l'année de leur construction ou de restauration, autant les chemins d'accès que les chemins de récolte. Suite à une intervention selon un des traitements, nous ne considérons plus d'entretien de chemin, puisqu'il n'y a plus de récolte. Évidemment, les chemins construits pourraient servir à d'autres chantiers de récolte ou à d'autres fins, mais le coût d'entretien des chemins serait alors associé à cette nouvelle activité, et ne doit donc pas être considéré.

Pour le coût d'entretien des chemins d'accès et de récolte, la même équation est utilisée. C'est aussi la même équation pour les CPRS et les coupes de jardinage, et elle est utilisée suite à la construction ou à la restauration des chemins.

Cette équation est la suivante :

$$CEC = \left(Km \text{ che. accès ou récolte} \times \frac{\$}{Km} \text{ entretien che. accès ou récolte} \right) \div \text{volume tot. récolté}$$

Où :

CEC : Coût d'entretien des chemins d'accès ou de récolte, en \$/m³

Km che. accès ou récolte : Le nombre total de kilomètres en chemin d'accès ou de récolte

$\frac{\$}{Km}$ *entretien che. accès ou récolte* : Coût unitaire en \$/km pour l'entretien des chemins d'accès ou de récolte

volume tot. récolté : Volume total récolté, en \$/m³, pour le traitement de CPRS, de coupe de jardinage adaptée ou avec sentiers permanents.

3.1.2.3 Coût de restauration des chemins

La construction des chemins ne se fera que lors de la première intervention pour chacun des traitements. Pour les interventions suivantes, les chemins seront restaurés. Comme il a déjà été mentionné, nous considérons la superficie du chantier fixe, de sorte qu'à chaque intervention dans le temps pour un traitement donné, la même surface sera traitée, mais le volume généré ne sera pas nécessairement identique. La quantité de chemins nécessaires cependant, sera identique. Les mêmes équations utilisées pour la construction des chemins d'accès et de récolte (CPRS et coupes de jardinage) s'appliquent donc pour évaluer le coût de la restauration des chemins. Il ne s'agit que d'ajouter à chacune de ces équations la variable « % du coût de restauration vs construction de chemin ». En fait, le coût de la restauration est une estimation de ce qu'il devrait en coûter de restaurer un chemin plutôt que de le construire. La section 3.3.2.2 décrit plus en détails cette variable.

Pour les chemins de récolte, à chaque intervention, des chemins d'été et des chemins d'hiver sont nécessaires. Dans notre analyse financière, nous ne faisons pas de distinction entre restaurer un chemin d'hiver ou un chemin d'été. L'idée est qu'au passage subséquent, nous ferons aussi des chemins d'hiver et d'été. Nous posons donc implicitement l'hypothèse que les chemins d'été seront restaurés dans les anciens chemins d'été, et que les chemins d'hiver seront restaurés dans les anciens chemins d'hiver. Comme la proportion de chemin d'hiver versus la proportion de chemin d'été est semblable, cette hypothèse est valable.

3.1.3 Coûts de récolte

Les coûts de récolte sont les coûts : d'abattage, de débardage et de supervision. La description de ces paramètres, ainsi que les équations utilisées sont présentées dans les sous-sections suivantes.

3.1.3.1 Coût d'abattage

Le coût de l'abattage est basé sur les observations de la productivité des abatteuses façonneuses utilisées lors de la réalisation des blocs expérimentaux. La productivité des abatteuses façonneuses a d'abord été évaluée en CPRS. La productivité pour chacun des traitements de

coupe de jardinage représente le pourcentage de perte de productivité par rapport à cette observation en CPRS. Cette productivité à la phase d'abattage est intimement liée au volume par tige. Ainsi, pour un peuplement donné, la réalisation de coupe de jardinage contribue à la récolte de tiges plus grosses (Liu et al. 2007, Ruel et al. 2007). Ce dernier élément contribue à diminuer l'impact de la perte de productivité de l'abattage en coupe de jardinage.

Les études de productivité en coupes de jardinage observées dans le dispositif expérimental sont comparées à la productivité en CPRS (Roy et al. 2006), et sont par conséquent exprimées en pourcentage. Ainsi, pour établir la productivité moyenne de la phase d'abattage par des abatteuses façonneuses sur la Côte-Nord, nous avons utilisé le logiciel PROVUE (Favreau 2005), développé par FP Innovations – division FERIC. Ce logiciel nous permet, en établissant certains paramètres, d'obtenir une courbe de productivité. Le coefficient de détermination (R^2) de cette équation est de 52%.

La même équation est utilisée pour tous les traitements, à tous les passages. Évidemment, selon le traitement et selon le passage, le volume par tige sera différent. En se basant sur la courbe de productivité obtenue du logiciel PROVUE, nous obtenons l'équation suivante pour le coût de l'abattage :

$$CA_{ti} = \frac{\frac{\$}{HMP} multi}{51,39 \times Volume\ par\ tige^{0,62} \times (1 + u)}$$

Où :

CA_{ti} : Coût de la phase d'abattage, en \$/m³, pour le traitement t , et lors de l'intervention i .

$\frac{\$}{HMP} multi$: Coût par heure machine productive de l'abatteuse façonneuse.

$51,39 \times Volume\ par\ tige^{0,62}$: Courbe de productivité obtenue par le logiciel PROVUE, en m³/HMP. Le volume par tige est en m³/tige.

u : Pour un volume par tige donné, perte de productivité en coupe de jardinage par rapport à la CPRS, en %.

La variable u représente, pour un volume par tige donné, la perte de productivité en coupe de jardinage par rapport à la CPRS. Les valeurs de cette variable sont tirées de Ruel et al. (2007). Évidemment, pour la CPRS, la valeur de u est de 0.

3.1.3.2 Coût du débardage

La productivité de la phase de débardage a été obtenue à partir des observations et des analyses réalisées lors de la mise en place des blocs expérimentaux. Ces observations indiquent une perte de productivité du débardage en coupe de jardinage par rapport à la CPRS. Contrairement à la phase d'abattage, où il nous a été possible d'obtenir une courbe de productivité, cela n'a pas été possible pour la phase de débardage. Le logiciel PROVUE est en mesure de produire quelques courbes de productivité, mais ou elles sont basées sur des distances de débardage fixes, ou bien le coefficient de corrélation (R^2) est très faible. Donc, comme nous ne disposons pas d'une courbe de productivité fiable de la phase de débardage pour les conditions de la Côte-Nord, nous nous sommes basés sur le coût au mètre cube de la phase de débardage, tel que fourni et validé par les compagnies forestières impliquées dans le projet.

Pour le coût du débardage en CPRS, le coût au mètre cube est simplement la valeur obtenue des compagnies forestières. En coupe de jardinage, il faut ajouter la variable w , qui correspond à la perte de productivité de la phase de débardage en coupe de jardinage par rapport à la CPRS, exprimé en pourcentage. La valeur de cette variable est obtenue de Roy et al. (2006). Évidemment, en CPRS, la valeur de la variable w est de 0.

Ainsi l'équation du coût du débardage est la suivante :

$$CD = \frac{\$}{m^3} \text{débardage} \times (1 + w)$$

Où :

CD : Coût de la phase de débardage en CJ, en $\$/m^3$.

$\frac{\$}{m^3} \text{débardage}$: Coût unitaire du débardage, en $\$/m^3$

w : Perte de productivité du débardage en coupe de jardinage, par rapport à la CPRS (en %)

3.1.3.3 Supervision

Les coûts de supervision incluent plusieurs éléments, notamment la supervision des équipements, le respect de la prescription, l'inventaire et le suivi après traitement, et le rubannage. Le coût de supervision est indiqué en dollars par mètre cube, mais il est quand même lié à la superficie. En

effet, si le même volume de bois à récolter nécessite plus de superficie, le coût de supervision va augmenter. Il faudra plus de temps pour récolter le volume cible, il faudra un plus grand effort de rubannage, et l'inventaire et le suivi après traitement seront aussi plus importants, de sorte que le coût de supervision en dollars par mètre cube va augmenter, si le volume disponible sur la superficie fixée initialement diminue.

Concernant le coût du rubannage inclus dans le coût de supervision, notons qu'il correspond à la délimitation des contours des blocs de coupe pour les CPRS. Pour les coupes de jardinage, en plus des contours, il faut aussi rubanner les sentiers de débardage, ce qui n'est pas nécessaire pour les CPRS. Pour la délimitation des contours, nous posons l'hypothèse que la forme et la taille des blocs sont les mêmes dans les deux chantiers, de sorte que seule la proportion de volume par hectare aura un impact sur le coût du rubannage. Il faut cependant noter que, contrairement à la CPRS, il n'y a pas de limite de superficie des blocs de coupe en coupe partielle.

Les sentiers de débardage doivent présentement être rubannés. Il est possible cependant que dans un avenir rapproché, ces sentiers de débardage soient placés sur le terrain selon une navigation par satellites. Le coût du rubannage des sentiers pourrait alors diminuer en coupe de jardinage, ce qui ferait réduire le coût en supervision.

Aussi, avec une expérience accrue de la part des opérateurs, il est bien possible que l'effort de supervision des équipements diminue dans le temps, et par conséquent, que le coût de supervision diminue pour les coupes de jardinage. Cependant, nous avons considéré le coût de supervision constant dans le temps.

3.1.3.3.1 Coût de la supervision CPRS

Pour les récoltes en CPRS, l'équation pour le coût de la supervision est la suivante :

$$CS (CPRS) = \frac{\$}{m^3} supervision \times \frac{Volume\ par\ hectare\ CPRS\ 1}{Volume\ par\ hectare\ CPRS\ i}$$

Où :

$CS (CPRS)$: Coût de la supervision en CPRS, en \$/m³

$\frac{\$}{m^3} supervision$: Coût unitaire de la supervision, en \$/m³

$\frac{\text{Volume par hectare CPRS } 1}{\text{Volume par hectare CPRS } i}$: Rapport du volume par hectare du premier passage en CPRS, qui sert de référence, par le volume par hectare des passages i (1, 2 ou 3) en CPRS

Au premier passage, le dernier élément de l'équation $\frac{\text{Volume par hectare CPRS } 1}{\text{Volume par hectare CPRS } i}$, s'annule. Pour les passages suivants, étant donné que le volume par hectare sera différent, le coût de la supervision va changer.

3.1.3.3.2 Coût de la supervision en coupe de jardinage

L'équation du coût de la supervision en coupe de jardinage est différente de celle en CPRS. Le coût supplémentaire s inclus dans l'équation du coût de la supervision en coupe de jardinage est exprimé en dollar par mètre cube, mais tient compte implicitement de la variation du volume par hectare récolté en coupe de jardinage par rapport à la CPRS. La section 3.3.2.3 donne davantage de détails concernant la variable s .

L'équation du coût de la supervision pour les CJ est donc simplement :

$$CS (CJ) = \frac{\$}{m^3} supervision + s$$

Où :

$CS (CJ)$: Coût de la supervision en coupe de jardinage, en $\$/m^3$

$\frac{\$}{m^3} supervision$: Coût unitaire de la supervision, en $\$/m^3$

s : Coût supplémentaire associé à la supervision en coupe de jardinage, en $\$/m^3$

3.1.4 Autres coûts d'opérations forestières

3.1.4.1 Coût du déplacement de la machinerie

Pour les déplacements de la machinerie, nous faisons la distinction, comme Nadeau (2002), entre les déplacements par fardier et les déplacements autotractés. Les déplacements par fardier sont ceux qui couvrent les plus longues distances. Les déplacements autotractés sont de courtes distances, et ne requièrent aucun fardier. La machine concernée se déplace alors par son propre

pouvoir. Le coût des déplacements par fardier est beaucoup plus important que celui des déplacements autotractés (Nadeau 2002).

Nous posons l'hypothèse que la proportion du $\$/m^3$ associé aux déplacements par fardier sera la même dans les deux chantiers. En fait, nous considérons que le fardier est nécessaire pour transporter les équipements jusqu'au chantier, mais qu'une fois rendu, il n'y aura que des déplacements autotractés. Les équipements seront ensuite transportés de nouveau par fardier vers un autre chantier. Ainsi, les déplacements par fardier sont fixes entre les chantiers. Par contre, le coût au mètre cube relié aux déplacements autotractés va varier d'un chantier à l'autre, étant donné que pour une même superficie traitée, un volume différent sera récolté.

Selon Nadeau (2002), la dispersion des aires de coupe a un impact important sur le coût du déplacement de la machinerie. Notons, qu'il n'y a aucune dispersion dans le cas du chantier en coupe de jardinage, mais qu'il y a une dispersion dans le chantier de CPRS, puisque au moins 60% des coupes doivent être réalisées selon le principe de la mosaïque. En fait, la dispersion des blocs pourrait aussi avoir un impact sur le déplacement de la main-d'œuvre (Nadeau 2002), mais dans notre analyse, le déplacement de la main d'œuvre n'est pas considéré. La dispersion a toutefois un impact important sur le déplacement de la machinerie si le morcellement des blocs de coupe rend nécessaire l'utilisation accrue d'un fardier, ce qui n'est pas le cas dans cette analyse. Par conséquent, puisque les déplacements supplémentaires associés à la dispersion peuvent se faire de manière autotractée, l'impact sur le coût est moins important (Nadeau 2002).

Considérant que la quantité de déplacement par fardier est la même entre les deux chantiers, et que l'impact du déplacement autotracté est beaucoup moins important que l'impact du déplacement par fardier, nous avons convenu que le coût de déplacement de la machinerie est le même pour tous les traitements. En réalité, il y a probablement un impact, négligeable cependant, dû à la dispersion des coupes dans le chantier CPRS, associée à la dispersion en mosaïque. Par conséquent, l'équation du coût du déplacement de la machinerie en CPRS et en coupe de jardinage est la même, et tient compte du déplacement autotracté et du déplacement par fardier.

L'équation est la suivante :

$$CDM = \left(\% \text{ dép. auto} \times \frac{\$}{m^3} \text{ dép. machinerie} \right) + \left(\% \text{ dép. fardier} \times \frac{\$}{m^3} \text{ dép. machinerie} \right)$$

Où :

CDM : Coût du déplacement de la machinerie, en \$/m³

$\frac{\$}{m^3} \text{ dép. machinerie}$: Coût unitaire du déplacement de la machinerie, en \$/m³

% *dép. auto* : Proportion du déplacement qui est effectué de manière autotractée

% *dép. fardier* : Proportion du déplacement qui est effectué par fardier.

3.1.4.2 Chargement

Ce coût ne devrait pas être affecté par la diminution du volume disponible en coupe de jardinage. Il est possible cependant que le nombre d'empilements ne soit pas le même en coupes partielles, ce qui pourrait influencer le coût du chargement. Nous considérons cependant que le coût de transport est différent en coupe partielle, mais que le coût du chargement sera le même, pour tous les traitements et à toutes les interventions. La valeur du coût de chargement en dollar par mètre cube correspond donc à celle fournie par les compagnies forestières.

3.1.4.3 Transport

Étant donné que nous considérons que la quantité de chemin d'accès est fixe, nous considérons que le coût de transport relié aux chemins d'accès sera le même pour tous les traitements. Cependant, le volume de bois récolté dans les chemins de récolte étant différent, le coût de transport associé aux chemins de récolte ne sera pas le même selon les traitements et entre les interventions. Par contre, seule la partie du cycle total de transport associée aux chemins de récolte est responsable de cette différence selon nos hypothèses.

3.1.4.3.1 Coût de transport en CPRS

Concernant le coût de transport, lorsqu'il est question de chemin d'accès, cela inclut tous les chemins d'accès, c'est-à-dire ceux du chantier, mais également ceux menant jusqu'à l'usine de

transformation. La partie du cycle de transport s'effectuant dans les chemins de récolte fait référence aux chemins de récolte du chantier concerné.

L'équation du coût de transport en CPRS est :

$$CT (CPRS i) = \left(\% \text{ coût trans. che. accès} \times \frac{\$}{m^3} \text{ transport} \right) + \left(\% \text{ coût trans. che. récolte} \times \frac{\$}{m^3} \text{ transport} \right) \times \frac{\frac{\text{volume récolté CPRS 1}}{ha}}{\frac{\text{volume récolté CPRS } i}{ha}}$$

Où :

$CT (CPRS i)$: Coût du transport en CPRS, en $\$/m^3$, lors de l'intervention i .

$\frac{\$}{m^3} \text{ transport}$: Coût unitaire au mètre cube du transport

$\% \text{ coût trans. che. accès}$: Proportion du cycle de transport qui s'effectue dans les chemins d'accès

$\% \text{ coût trans. che. récolte}$: Proportion du cycle de transport qui s'effectue dans les chemins de récolte

$\frac{\text{Volume par hectare CPRS 1}}{\text{Volume par hectare CPRS } i}$: Rapport du volume par hectare du premier passage en CPRS, qui sert de référence, par le volume par hectare des passages i (1, 2 ou 3) en CPRS

Lors du premier passage, la variable $\frac{\frac{\text{volume récolté CPRS 1}}{ha}}{\frac{\text{volume récolté CPRS } i}{ha}}$ s'annule. Pour les passages 2 et 3, étant donné que le volume de bois récolté sera différent pour une même superficie et un même réseau de chemins, cette variable permettra de tenir compte de la différence sur le coût au mètre cube.

3.1.4.3.2 Coût de transport en coupe de jardinage

L'équation utilisée pour le coût du transport dans les coupes de jardinage est différente de celle

utilisée en CPRS. Le terme $\frac{\frac{Km}{ha} \text{ CPRS}}{\frac{Km}{ha} \text{ CJ}}$ prend en considération qu'il n'y a pas de dispersion nécessaire dans les coupes de jardinage. Pour récolter un même volume, il faut plus de superficie en coupe partielle, de sorte que les coupes partielles couvrent un plus grand territoire. Cependant, il n'y a pas de dispersion nécessaire entre les blocs de coupe. Le coût supplémentaire associé à

une plus faible récolte de bois par hectare est considéré dans d'autres coûts, en particulier par le coût d'abattage.

Le terme $\frac{\frac{vol.réc.CPRS\ 1}{ha}}{\frac{vol.réc.CJ\ i}{ha}}$ implique que le coût au mètre cube tel qu'obtenu des compagnies forestières est basé sur les conditions prévalant lors du premier passage en CPRS, mais que pour une même superficie, on récolte moins de volume de bois en coupe de jardinage.

En fait, cette équation considère qu'on transporte moins de bois par kilomètre de chemin de récolte construit en coupe de jardinage, que pour un kilomètre de chemin de récolte construit dans un chantier de CPRS, et également qu'en coupe de jardinage, il n'y a pas de dispersion.

L'équation du coût de transport pour les coupes de jardinage est donc la suivante :

$$CT(CJ) = \left(\% \text{ coût trans. che. accès} \times \frac{\$}{m^3} \text{ transport} \right) + \left(\% \text{ coût trans. che. récolte} \times \frac{\$}{m^3} \text{ transport} \times \frac{\frac{Km}{ha} CPRS}{\frac{Km}{ha} CJ} \times \frac{\frac{vol.réc.CPRS\ 1}{ha}}{\frac{vol.réc.CJ\ i}{ha}} \right)$$

Où :

$CT(CJ)$: Coût du transport en coupe de jardinage, en \$/m³

$\frac{\$}{m^3} \text{ transport}$: Coût unitaire du transport, en \$/m³

$\% \text{ coût trans. che. accès}$: Proportion du cycle de transport qui s'effectue dans les chemins d'accès

$\% \text{ coût trans. che. récolte}$: Proportion du cycle de transport qui s'effectue dans les chemins de récolte

$\frac{\frac{Km}{ha} CPRS}{\frac{Km}{ha} CJ}$: Rapport du ratio km/ha en CPRS par le ratio km/ha en coupe de jardinage.

$\frac{\frac{vol.réc.CPRS\ 1}{ha}}{\frac{vol.réc.CJ\ i}{ha}}$: Rapport du volume récolté par hectare au premier passage en CPRS (qui sert de référence), par le volume récolté par hectare en coupe de jardinage, lors de l'intervention i .

3.1.4.4 Camp forestier

Il est important de tenir compte du coût des camps forestiers dans l'analyse financière, car la baisse de productivité observée pour plusieurs paramètres fait réaliser que les coupes de jardinage devraient avoir une influence à la hausse sur le coût des camps forestiers. À cet effet, nous ne considérons dans notre analyse que le coût d'opération des camps forestiers. Le coût de déplacement des camps n'est pas inclus, et nous considérons que ce coût est fixe entre les deux chantiers. Si les coupes de jardinage devaient éventuellement être réalisées en assez forte proportion, il est possible que les camps doivent être déplacés plus fréquemment. Cet élément ne sera cependant pas considéré dans cette étude.

Cependant, le coût d'opération des camps ne sera pas le même à l'échelle de nos chantiers de comparaison. Pour un même volume de bois, comme il y a des pertes de productivité dans les coupes de jardinage, notamment au niveau de la récolte, des chemins, du transport et de la supervision, le camp devra être ouvert plus longtemps, ou plus vraisemblablement accueillir plus de travailleurs durant sa période d'opération, pour pallier aux baisses de productivité. Le coût des camps forestiers devrait donc être plus élevé dans le cas des chantiers traités en jardinage.

Pour tous les traitements, la même équation est utilisée. Nous posons l'hypothèse que le coût des camps forestiers lors du premier passage en CPRS correspond à la situation de référence. Ainsi, le coût des camps forestier en CPRS lors du premier passage est simplement le coût obtenu à partir des différentes valeurs fournies par les compagnies forestières. Dans les passages futurs, la perte de productivité de certains éléments entraînera une hausse du nombre d'employés nécessaire au camp, ce qui en fera augmenter le coût.

Pour déterminer le nombre d'employés supplémentaires relié aux pertes de productivité, nous devons connaître le nombre d'employés en situation normale (sans perte de productivité). Le tableau 4 montre le nombre d'employés nécessaire selon le volume de bois annuel à récolter, sans perte de productivité et le tableau 5 indique la répartition en pourcentage de ces employés au camp, selon les différents secteurs d'activités. Ces données ont été obtenues des compagnies forestières.

Tableau 4 : Nombre d'employés présents au camp forestier, selon le volume annuel à récolter. Le m³/employé est le rapport du volume annuel sur le nombre d'employés.

Volume	#	
annuel n (m³)	d'employés	m³/employé
325 000	90	3611
800 000	150	5333
1 250 000	190	6579

À partir du tableau 4, nous constatons que le nombre d'employés requis au camp n'est pas une fonction linéaire du volume annuel. Nous avons finalement décidé, pour ne pas compliquer inutilement l'analyse, de considérer la valeur médiane entre les minimums (3611) et maximums (6579). Une valeur de 5095 m³/employé sera donc considérée dans les calculs. Cette valeur moyenne réfère à un volume annuel n de 787 500 mètres cubes et à 140 employés requis au camp.

Tableau 5 : Répartition des employés au camp (pourcentage) selon les catégories d'activités.

Catégories d'activités	% des employés
Récolte	30
Supervision	5
Chemins	20
Transport	40
Autre	5

Les différents éléments pouvant être affectés par les pertes de productivité ont été répartis dans les catégories suivantes : autres (e), supervision (f), chemins (g), transport (h) et récolte (i). La catégorie « autre » comprend les employés du camp, exemple ; commis, concierge, gardien, cuisinier, etc. Celle des chemins inclut la construction, la restauration et l'entretien des chemins de récolte (les chemins d'accès étant fixe, ils n'impliquent pas de pertes de productivité). La catégorie de récolte inclut l'abattage et le débardage, et celle de transport, uniquement le transport. Pour chacune des catégories, la lettre entre parenthèses sera utilisée dans l'équation, pour l'alléger.

Les éléments qui sont fixes entre les chantiers n'influencent pas la productivité, de sorte qu'ils n'ont pas à être considérés dans le coût d'opération des camps. Pour ces éléments fixes, le même nombre d'employés sera nécessaire, pour tous les traitements, et à tous les passages.

Rappelons que nous avons convenu que le nombre d'employés total au camp, sans perte de productivité, est de 140. Pour parvenir à déterminer le nombre d'employés supplémentaires nécessaire suite aux différentes pertes (ou gains) de productivité, et ultimement déterminer le coût pour les camps forestiers, nous avons utilisé le système d'équations suivant :

$$\# \text{ employés "autres" sans perte prod.} = \# \text{ employés total au camp} \times e$$

$$\# \text{ employés "supervision" sans perte prod.} = \# \text{ employés total au camp} \times f$$

$$\# \text{ employés "chemin" sans perte prod.} = \# \text{ employés total au camp} \times g$$

$$\# \text{ employés "transport" sans perte prod.} = \# \text{ employés total au camp} \times h$$

$$\# \text{ employés "récolte" sans perte prod.} = \# \text{ employés total au camp} \times i$$

$$\# \text{ employés "autres" avec perte prod.}$$

$$= \# \text{ employés "autres" sans perte prod.} + (\# \text{ employés "autres" sans perte prod.} \times ee)$$

$$\# \text{ employés "supervision" avec perte prod.}$$

$$= \# \text{ employés "supervision" sans perte prod.} + (\# \text{ employés "supervision" sans perte prod.} \times ff)$$

$$\# \text{ employés "chemin" avec perte prod.}$$

$$= \# \text{ employés "chemin" sans perte prod.} + (\# \text{ employés "chemin" sans perte prod.} \times gg)$$

$$\# \text{ employés "transport" avec perte prod.}$$

$$= \# \text{ employés "transport" sans perte prod.} + (\# \text{ employés "transport" sans perte prod.} \times hh)$$

$$\# \text{ employés "récolte" avec perte prod.}$$

$$= \# \text{ employés "récolte" sans perte prod.} + (\# \text{ employés "récolte" sans perte prod.} \times ii)$$

employés "total" avec perte prod.

= # employés "supervision" avec perte prod. + # employés "chemin" avec perte prod.

+ # employés "récolte" avec CJ

+ # employés "transport" avec perte prod. + # employés "autre" avec perte prod.

Coût opération camp CPF

$$= \# \text{employés total avec perte prod.} \times \frac{\$}{\text{employés} \times \text{jours}} \times \# \text{ jours camp}$$

$$CC(CJ) = \left(\frac{\text{Coût opération camp CPF}}{n} \times \text{volume total récolté} \right)$$

Où :

employés " " sans perte prod. : Nombre d'employés d'une catégorie requis au camp, lorsqu'il n'y a pas de perte de productivité.

employés total au camp : Nombre d'employés total au camp, incluant toutes les catégories

e : Proportion d'employés de la catégorie « autres » au camp

f : Proportion d'employés de la catégorie « supervision » au camp

g : Proportion d'employés de la catégorie « chemin » au camp

h : Proportion d'employés de la catégorie « transport » au camp

i : Proportion d'employés de la catégorie « récolte » au camp

employés " " avec perte prod. : Nombre total d'employés d'une catégorie requis au camp, lorsqu'il y a une perte de productivité.

ee : Proportion d'employés supplémentaire nécessaire au camp de la catégorie « autres », lorsqu'il y a une perte de productivité

ff : Proportion d'employés supplémentaire nécessaire au camp de la catégorie « supervision », lorsqu'il y a une perte de productivité

gg : Proportion d'employés supplémentaire nécessaire au camp de la catégorie « chemin », lorsqu'il y a une perte de productivité

hh : Proportion d'employés supplémentaire nécessaire au camp de la catégorie « transport », lorsqu'il y a une perte de productivité

ii : Proportion d'employés supplémentaire nécessaire au camp de la catégorie « récolte », lorsqu'il y a une perte de productivité

employés total avec perte prod. : Nombre total d'employés, incluant toutes les catégories, requis au camp, lorsqu'il y a une perte de productivité.

Coût opération camp CPF : Coût total du camp, en référence au volume n

n : Volume annuel prévu (m³/année). Tel que décrit précédemment, ce volume est de 787 500 mètres cubes dans cette analyse.

$\frac{\$}{\text{employés} \times \text{jours}}$: Coût d'un employé par jour au camp (\$/employé)

jours camp : Nombre de jours pendant lequel le camp est ouvert pendant l'année

volume total récolté : Volume total (m³) récolté dans le chantier

CC (CJ) : Coût du camp forestier, en CJ, en \$/m³

Les paramètres *ff*, *gg*, *hh*, *ii*, sont en fait le ratio du coût au mètre cube de cet élément particulier à un moment déterminé, divisé par le coût au mètre cube de ce même élément lors du premier passage en CPRS. Les valeurs de la première récolte en CPRS servent de référence pour mesurer les différences de productivité, car les valeurs obtenues et validées par les compagnies forestières, sont associées à ces productivités. Nous posons l'hypothèse que la variation du coût au mètre cube indique la baisse de productivité d'un élément, et que cette baisse de productivité doit être compensée par des employés supplémentaires au camp, ce qui fait augmenter le coût des camps. Implicitement, nous considérons que chacun des employés est déjà utilisé complètement, et que la moindre perte de productivité engendre le besoin d'employés supplémentaires. À noter qu'à chaque passage les coûts des éléments concernés changent, de sorte que les pertes de productivité changent aussi. Les équations sont donc recalculées à chaque passage, pour les traitements de coupe de jardinage et pour les CPRS, sauf au premier passage en CPRS, où le coût est directement la valeur obtenue des compagnies forestières.

Pour l'élément *ee*, nous avons considéré que la proportion d'employés supplémentaires nécessaire était la même que celle totale. Par exemple, si la proportion d'employés supplémentaire totale pour les catégories de supervision, de chemins, de transport et de récolte est de 20%, alors nous avons considéré que la proportion supplémentaire de l'élément « autre » est aussi de 20%.

3.1.4.5 Inventaire

La tendance actuelle est de trouver des façons de diminuer le coût de l'inventaire forestier, sans perdre de précision. Il est donc peu probable que le coût de l'inventaire soit voué à augmenter. En pratique cependant, comme il faut plus de superficie pour obtenir le même volume en coupe de

jardinage, le coût de l'inventaire devrait augmenter. Cependant, dans un contexte où on veut faire de l'aménagement écosystémique, diversifier les traitements sylvicoles, et faire davantage d'aménagement intensif, le coût de l'inventaire n'est plus seulement fonction d'un traitement, mais plutôt fonction d'objectifs d'aménagement différents. Il est donc peu réaliste d'associer une hausse du coût de l'inventaire aux coupes de jardinages. En fait, pour être en mesure d'établir quels traitements vont au bon endroit, il a fallu inventorier plus précisément toute la superficie. Donc, s'il y a un coût d'inventaire supplémentaire, ce n'est pas dû à un traitement en particulier et ce coût devra être divisé sur l'ensemble des traitements, de sorte que ce coût sera fixe. À noter cependant, que l'inventaire nécessaire au suivi et au respect de la prescription sera plus élevé en coupe de jardinage, mais ce coût additionnel est déjà inclus dans le coût de supervision.

En ce qui concerne la tendance à diminuer les coûts d'inventaire, nous ne sommes pas en mesure de poser des hypothèses satisfaisantes sur l'évolution de ce coût dans le temps. Nous devons donc nous baser sur le coût d'inventaire actuel, basé sur les valeurs obtenues des compagnies forestières, pour prévoir le coût futur.

3.1.5 Coûts divers

Les coûts inclus dans cette section sont des coûts généraux, et sont considérés fixes, peu importe le traitement et le moment de l'intervention. Les coûts inclus dans cette section sont les coûts de : déchargement, planification, mesurage, administration, communication, formation, surcharge essence, et la protection (SOPFEU et SOPFIM). Ces coûts ont été obtenus des compagnies forestières. À noter que le coût de déchargement du bois à l'usine est parfois intégré au coût de transformation, ce qui n'est pas le cas dans cette analyse.

3.1.6 Coût de la transformation

Le coût de la transformation du bois inclut les différents éléments suivants : le sciage, le séchage, le rabotage, les coûts fixes reliés au fonctionnement des différentes installations, ainsi que les coûts de consommation d'électricité (Zhang et Chauret 2001). Les coûts de transformation sont obtenus à partir d'équations produites par FP Innovations – division Forintek. Il nous a été possible d'utiliser ces équations pour déterminer les coûts de la phase de transformation, mais

elles ne seront pas présentées dans ce document, puisqu'elles demeurent la propriété de FP Innovations – division Forintek, de sorte que seul les résultats sont présentés.

Ces équations indiquent le coût unitaire de transformation en fonction de chaque classe de diamètre (DHP) des tiges entrant dans une usine de sciage (Zhang et Chauret 2001). Comme pour les coûts d'abattage, les coûts de transformation diminuent avec l'augmentation du diamètre des tiges (Liu et al. 2007, Tong et al. 2005). Ces équations ont été utilisées dans quelques articles (Liu et al. 2007, Tong et al. 2005), et sont selon nos observations, les plus adéquates présentement pour estimer les coûts de transformation en fonction du diamètre des tiges. Ces équations datent du début des années 2000, mais les coûts de transformation n'ont pas changé énormément dans les dernières années, contrairement au prix du bois (S.Y. Zhang - communication personnelle).

Pour les coupes de jardinage, le coût de la transformation considère évidemment toutes les tiges récoltées, donc également celles prélevées dans le sentier. Ces tiges récoltées dans le sentier sont de plus faibles dimensions, ce qui affecte à la hausse le coût de la transformation. Le coût total de transformation est la pondération des tiges du peuplement et des sentiers.

3.1.7 Coûts non considérés dans l'étude

Cette section présente quelques éléments de coûts qui ont été volontairement exclus de l'analyse financière, et les raisons pour lesquelles ils ont été exclus.

Droits de coupe et crédits sylvicole :

Les compagnies forestières doivent payer des droits au MRNF sur le volume de bois récolté en forêt publique. Ce taux est connu, mais il peut varier dans le temps. De plus, une partie de ce qui est payé en droits de coupe est remise aux compagnies forestières sous forme de crédits sylvicoles. Étant donné la difficulté de connaître dans le temps comment fluctueront les droits de coupe et les crédits sylvicoles, et que les droits de coupe sont les mêmes peu importe le traitement, nous avons décidé de ne pas considérer cet élément dans l'analyse financière. Il est d'ailleurs fort probable que des crédits sylvicoles seront disponibles pour la réalisation de coupes de jardinage, ce qui n'est pas le cas pour les CPRS.

Pour incorporer adéquatement les droits de coupe, il aurait fallu porter l'analyse sur une plus grande échelle, par exemple sur une unité d'aménagement au complet. L'évaluation d'un chantier de coupe de jardinage comparé à un chantier en CPRS ne permet pas de préciser adéquatement cet élément.

Amortissement :

On retrouve souvent dans la littérature sur les coûts reliés aux opérations forestières, un coût d'amortissement (Consultants JP Grenon inc. 2002, Consultants forestiers DGR inc. 2004). Ce coût considère des dépenses importantes qui sont amorties sur plus d'une année. Dans cette étude, nous ne considérons que les coûts qui sont propres aux chantiers analysés. Ces coûts d'amortissement sont indépendants des traitements, et une prise en compte adéquate de ces éléments devrait se faire sur une plus grande échelle. Les principaux coûts inclus dans cette section sont : réseau primaire de chemin, déplacement des camps forestiers, infrastructures importantes (ponts), etc. Ces différents coûts ne sont pas considérés dans cette analyse.

3.2 Revenus

Pour les coûts, plusieurs éléments sont pris en compte. À l'inverse, pour les revenus, il n'y a que quelques éléments, de sorte que l'importance relative de ces quelques éléments est élevée.

Pour déterminer les revenus, nous avons besoin de connaître le volume par classe de diamètre des arbres qui seront récoltés pour tous les traitements et à chaque passage. Cela est possible dans le cas des coupes de jardinage grâce au modèle *Biolley* que nous avons utilisé. Pour le premier passage en CPRS, cela est aussi possible, puisque nous connaissons les valeurs dendrométriques, telle que la structure diamétrale, suite aux inventaires effectués avant traitement.

Pour les passages 2 et 3 en CPRS, nous ne connaissons pas la structure diamétrale des arbres qui seront récoltés, puisque les courbes utilisées ne permettent pas d'obtenir cette structure diamétrale. Nous avons donc utilisé le diamètre quadratique moyen et le volume total par hectare. Sachant que pour une CPRS, tout le volume est récolté, et connaissant le diamètre quadratique moyen, nous posons l'hypothèse que la proportion du volume de sciage et de copeaux du peuplement correspond à la proportion reliée au diamètre quadratique moyen.

Connaissant la proportion du volume de sciage et de copeaux qui sera récoltée pour chaque traitement et à chaque passage, et connaissant le volume total à récolter, nous pourrions multiplier ces valeurs par les prix appropriés. En plus des volumes de sciages et de copeaux, nous considérons aussi dans cette étude, la proportion de volume de sciures. Les mêmes éléments ont été considérés dans Liu et al. (2007), pour l'établissement des revenus. Cette proportion est considérée fixe, à 5% du volume de chaque tige.

3.2.1 Proportion de sciage et de copeaux (épinette noire)

Les équations utilisées pour prédire les proportions de volume de sciage et de copeaux pour l'épinette noire sont celles de Liu et Zhang (2005a, 2005b), et sont les suivantes :

Pour le volume de sciage :

$$\frac{dm^3}{tige} = 34,78616 - 10,83211D + 0,85120D^2$$

Pour le volume de copeaux :

$$\frac{dm^3}{tige} = -11,44109 + 2,40615D + 0,19409D^2$$

Où :

$\frac{dm^3}{tige}$: Volume par tige, exprimé en décimètre cubes par tige

D : Diamètre des arbres à 1,30 mètre au dessus du sol (DHP), exprimé en centimètre

Ces équations ont été établies pour les épinettes noires. À noter que, dans les deux parutions (Liu et Zhang 2005a, 2005b), il y avait une erreur dans l'équation pour le volume des copeaux. Le deuxième terme (2,40615D) est indiqué avec un signe positif, mais il doit être négatif (C. Liu - communication personnelle).

3.2.2 Proportion de sciage et de copeaux (sapin baumier)

Au moment de rédiger ce mémoire, aucune équation pour prédire les volumes pour le sapin baumier n'était disponible pour nos conditions, mais des travaux sont présentement en cours pour cette essence (C. Liu – communication personnelle).

Dans cette étude, étant donné que la proportion de sapin est non-négligeable, nous avons décidé d'utiliser une relation hauteur-diamètre propre au sapin baumier, et d'appliquer les équations pour l'épinette noire, mais celles qui considèrent à la fois le diamètre et la hauteur (Liu et Zhang 2005a, 2005b). Cette relation hauteur-diamètre provient directement des échantillons prélevés dans le dispositif expérimental, et a été publiée dans Liu et al. (2007). Nous posons ainsi l'hypothèse que les équations pour prédire les volumes de sciage et de copeaux basées sur le diamètre et la hauteur sont une approximation raisonnable pour le sapin baumier, considérant la relation hauteur-diamètre utilisée.

Cette relation hauteur-diamètre pour le sapin baumier est la suivante :

$$Hauteur = 1,3 + 25,0993(1 - e^{-0,0715D})^{2,0036}$$

Où :

Hauteur : Hauteur des sapins baumiers, exprimée en mètres

D : Diamètre des arbres à 1,30 mètre au dessus du sol (DHP), exprimé en centimètres

Une erreur s'est glissée dans la publication de Liu et al (2007) concernant cette équation. Dans l'article, le signe négatif devant le terme 0,0715 n'apparaît pas (C. Liu - communication personnelle).

En connaissant la hauteur et le diamètre pour chacune des tiges de sapin baumier, nous avons utilisé les équations suivantes (Liu et Zhang 2005a et 2005b), développées pour les épinettes noires pour déterminer la proportion de sciages et de copeaux pour les sapins baumiers de différentes classes de diamètre :

Pour le volume de sciage :

$$\frac{dm^3}{tige} = -17,83773 + 0,02242D^2H$$

Pour le volume de copeaux :

$$\frac{dm^3}{tige} = -0,08684 + 0,15139DH + 0,13731D^2$$

Où :

$\frac{dm^3}{tige}$: Volume par tige, exprimé en décimètres cubes par tige

D : Diamètre des arbres à 1,30 mètre au dessus du sol (DHP), exprimé en centimètres

H : Hauteur des arbres, exprimée en mètres

3.2.3 Détermination des prix et des revenus

Initialement, nous désirions obtenir un prix de bois pour chaque classe de diamètre. Nous aurions ensuite tenté d'établir le panier de produits optimum pour chacune de ces classes. L'hypothèse à laquelle nous pensions est que, plus un arbre est en mesure de produire des gros produits, plus sa valeur est élevée. Par exemple, nous aurions considéré qu'un 2x8 de dimension donnée vaut plus que deux 2x4. Cependant, suivant les prix du marché, cela n'est pas toujours le cas. De plus, la résistance mécanique n'est pas la même selon les produits, et bien qu'un arbre de plus forte dimension ait la possibilité de produire des produits de sciages de plus grosses dimensions, ce n'est pas nécessairement la réalité qui se produit, car les prix ne sont que peu influencés par la grosseur des produits. En fait, ce sont ; la demande du marché, la dimension, le grade et la résistance mécanique qui déterminent les prix du bois (S.Y. Zhang – communication personnelle).

En situation normale, ce qui est le plus important dans la détermination des revenus, c'est la proportion du volume de sciage. Plus une tige est de forte dimension, plus sa proportion de sciage est élevée, de sorte que la production de plus grosses tiges fera augmenter la proportion de sciage, et donc les revenus (Liu et al. 2007, Aubry et al. 1998).

Comme mentionné, les revenus sont basés sur les volumes de sciages, copeaux et sciures. Connaissant ces volumes pour chaque traitement et à chaque intervention, il suffit de multiplier par les prix appropriés et nous avons le revenu total de cette intervention. Il suffit ensuite de soustraire les coûts de cette même intervention, et nous obtenons la rentabilité de l'intervention.

3.2.3.1 Prix et revenus de sciage

Le prix du sciage est déterminé par les listes des prix de PRIBEC des 10 dernières années. La valeur moyenne des 10 dernières années, en dollars constants du mois de juillet 2008 est de 480,19 \$/Mpmp (mille pieds mesure de planche).

L'équation pour la détermination des revenus du sciage est la suivante :

$$Sciage\ ti = \frac{volume\ total\ récolté\ ti}{\frac{2,36\ m^3/Mpmp}{prop.\ sciage\ ti}} \times prix\ sciage$$

Où :

Sciage ti : Revenu (\$) résultant du volume de sciage pour le traitement *t*, à l'intervention *i*.

volume total récolté ti : Volume total récolté, en mètre cubes (m³), pour le traitement *t*, à l'intervention *i*.

2,36 m³/Mpmp : Facteur pour convertir les mètres cubes de bois (m³) en mille pieds mesure de planche (Mpmp).

prop. sciage ti : Proportion du volume de sciage sur le volume total, pour le traitement *t*, à l'intervention *i*.

prix sciage : Prix du sciage, en \$/Mpmp.

Le facteur *2,36 m³/Mpmp* implique que si 100% du volume livré à l'usine était du sciage, ce taux de conversion serait de 2,36 m³/Mpmp (ou encore 1 Mpmp = 2,36 m³). Comme cela n'est pas le cas, on doit diviser par la proportion réelle de sciage, d'un traitement donné, à une intervention donnée, pour trouver le facteur de conversion approprié.

3.2.3.2 Prix et revenus des copeaux

Le prix des copeaux est basé sur la liste des prix de copeaux du MRNF (direction du développement de l'industrie des produits forestiers). Ils couvrent la période depuis le 1^{er} janvier 1999, soit une période de 9 années et demi. En dollar constants du mois de juillet 2008, le prix moyen pour les copeaux est de 138,05 \$/tma (tonne métrique anhydre).

L'équation pour déterminer les revenus des copeaux est la suivante :

$$\text{Copeaux } ti = \text{volume copeaux récolté } ti \times \text{facteur conv. copeaux} \times \text{prix copeaux}$$

Où :

Copeaux ti : Revenu (\$) résultant du volume de copeaux pour le traitement *x*, à l'intervention *y*.

volume copeaux récolté ti : Volume de copeaux récolté, en mètre cubes (m³), pour le traitement *t*, à l'intervention *i*.

facteur conv. copeaux : Facteur de conversion (tma/m³).

prix copeaux : Prix des copeaux, en \$/tma.

Le facteur de conversion utilisé pour convertir les mètres cubes en tonnes métriques anhydres est obtenu en considérant une densité basale de 0,406 tma/m³ pour l'épinette noire, et de 0,335 tma/m³ pour le sapin baumier (Jessome 1977). Comme la proportion initiale de sapin baumier est de 43,2%, nous avons considéré une densité basale anhydre pondérée de 0,375 tma/m³. Le même facteur est utilisé pour les sciures.

3.2.3.3 Prix et revenus des sciures

Comme le prix des sciures semble avoir varié dans les dernières années, nous nous sommes basés sur l'avis du directeur général de l'association des producteurs de copeaux du Québec pour avoir une valeur cohérente pour cette variable (Xavier Robidas – communication personnelle). Ce prix est de 42,50 \$/tma (en date d'octobre 2008). Rappelons que nous considérons fixe le volume de sciures par tige, à 5%. L'importance des sciures dans les revenus est faible, puisque seulement 5% du volume est en sciures, et que le prix est relativement bas, soit moins du tiers du prix des copeaux.

L'équation pour déterminer les revenus des sciures est semblable à celle des copeaux :

$$\text{Sciures } ti = \text{volume sciures récolté } ti \times \text{facteur conv. copeaux} \times \text{prix sciures}$$

Où :

Sciures ti : Revenu (\$) résultant du volume de sciures pour le traitement *t*, à l'intervention *i*.

volume sciures récolté ti : Volume de sciures récolté, en mètre cubes (m³), pour le traitement *x*, à l'intervention *y*.

facteur conv. copeaux : Facteur de conversion (tma/m³). Ce facteur est le même pour les copeaux et les sciures.

prix copeaux : Prix des copeaux, en \$/tma.

3.3 Variables utilisées dans l'étude

Plusieurs données ont été nécessaires pour réaliser cette étude. Ces données proviennent de différentes sources, dont les principales sont brièvement présentées dans cette section. Une partie des nombreuses variables utilisées et leurs valeurs correspondantes est présentée à l'annexe III.

3.3.1 Valeurs de référence

3.3.1.1 Modèle *Biolley* et courbes de rendement du MRNF

Plusieurs valeurs dendrométriques nécessaires à la compréhension des coupes de jardinage viennent du modèle *Biolley* qui a été utilisé pour simuler la croissance des peuplements issus des coupes de jardinage. Plusieurs valeurs viennent de ce modèle, dont : le volume récolté, le volume total par hectare, le volume par tige des tiges récoltées, le pourcentage de récolte, et les structures diamétrales résiduelles. Pour les valeurs dendrométriques des peuplements de seconde venue issus des CPRS, nous avons utilisé les courbes de rendement du MRNF.

Au premier passage en coupe de jardinage, nous avons simulé la récolte dans le modèle *Biolley*. Nous aurions pu tenir compte des valeurs dendrométriques du dispositif expérimental (exemple : volume récolté, volume par tige, pourcentage de récolte, etc.), mais le dispositif étant de taille réduite, les prescriptions prévues n'ont pas été parfaitement respectées. Nous présumons que si les coupes de jardinage étaient réalisées à plus grande échelle, les prescriptions réalisées correspondraient en moyenne, aux prescriptions prévues. Nous avons donc convenu que les simulations de récolte, y compris la récolte du premier passage, devait refléter qu'en moyenne, les prescriptions sont respectées. Les valeurs du dispositif ont servi à déterminer les écarts potentiels, et ainsi attribuer des distributions de probabilités qui ont été utilisées dans les simulations Monte Carlo.

3.3.1.2 *Compagnies forestières*

Dans cette étude, la collaboration des compagnies forestières a été excellente. Plusieurs valeurs unitaires concernant les coûts peuvent être inspirées de la littérature, mais la participation active

des compagnies forestières a permis de rendre très réalistes les valeurs de coûts et les différentes hypothèses utilisées. Plus précisément trois compagnies forestières ont été impliquées : *Produits forestiers Arbec inc.*, *AbitibiBowater inc.*, et *Kruger inc.* Cette participation a aussi permis d'établir des distributions de probabilité pour plusieurs éléments de coûts, utilisées dans les simulations Monte Carlo.

Étant donné la nature confidentielle de ces données, les valeurs des coûts unitaires par compagnie ne sont pas présentées. La compilation des valeurs obtenues des industriels a été réalisée dans le but d'être représentative de la réalité, sans qu'il soit possible d'identifier directement une compagnie en particulier. Cette compilation a ensuite été validée par les compagnies forestières, et confirme qu'il s'agit de données représentatives de la situation moyenne de la Côte-Nord.

Aussi, il est important de mentionner que les valeurs obtenues de ces compagnies forestières ont été considérées dans les calculs comme étant des moyennes. Il se peut cependant que dans la réalité, ces valeurs soient davantage des médianes ou des modes. Les valeurs minimums et maximums obtenues et qui ont permis de déterminer des écarts qui ont été considérés dans les simulations Monte Carlo, ont été ajustées pour que les écarts soient symétriques par rapport à la valeur moyenne. Nous considérons que ces valeurs minimums et maximums sont davantage subjectives que les valeurs moyennes de références obtenues, et qu'ainsi elles peuvent être ajustées. À l'inverse, considérer fixes les minimums et les maximums aurait fait varier la valeur moyenne.

3.3.1.3 FP Innovation – division FERIC

Les données de productivité à l'abattage et au débardage ont été obtenues lors de la réalisation des blocs du dispositif expérimental. Ces données sont le résultat d'une collaboration entre la chaire de recherche industrielle CRSNG-Université Laval en sylviculture et faune et certains chercheurs de FERIC (Ruel et al. 2007, Roy et al. 2006).

3.3.1.4 Dispositif expérimental

Quelques valeurs de nature dendrométrique proviennent du dispositif expérimental, comme par exemple : la proportion en surface terrière de sapin et d'épinette noire, la proportion de chaque type sylvicole, les structures diamétrales initiales, etc. Cependant, les données du dispositif expérimental ont surtout servi à déterminer plusieurs distributions de probabilité sur des éléments

de nature dendrométrique, et sur des éléments de productivité, distributions qui ont alimenté les simulations Monte Carlo.

3.3.1.5 Revue de littérature

La littérature concernant la variabilité des éléments de coûts des opérations forestières est à peu près inexistante, mais il existe certaines références sur les valeurs de référence, ou les valeurs unitaires. À cet égard, les principaux ouvrages consultés sont : le rapport Grenon (Consultants JP Grenon inc. 2002), et le rapport Livernoche (Comité de travail sur la transformation du bois sur la Côte-Nord 2007), deux études très pertinentes sur l'industrie du sciage sur la Côte-Nord, ainsi que l'enquête publique de 2003 (Consultants forestiers DGR inc. 2004) sur les coûts des opérations forestières au Québec. Ces ouvrages ont été consultés pour valider et compléter certains éléments manquants.

3.3.2 Notes supplémentaires sur certaines variables

Certaines variables utilisées doivent faire l'objet d'une description particulière. Ces variables sont décrites dans cette section.

3.3.2.1 Ratio ha/km

Nous devons prévoir la quantité de chemins qui devront être construits pour chacun des traitements, ou plutôt tenir compte du volume par kilomètre de chemin pour chacun des traitements. Pour obtenir ces informations, nous avons analysé la proportion de superficies de coupe par kilomètre de chemin (ha/km), qui sera nécessaire pour les CPRS et pour les coupes de jardinage.

3.3.2.1.1 CPRS

Pour les CPRS, nous avons analysé les rapports annuels d'interventions forestières (RAIF) des années 2005 à 2007, pour les aires communes concernées. Rappelons que ce chantier de CPRS doit représenter l'aménagement forestier actuel, ou du moins celui qui se faisait jusqu'à tout récemment et qui a encore force de loi. Depuis le 1^{er} avril 2005, les compagnies forestières doivent réaliser 60% de leur aménagement forestier planifié en CPRS, sous la forme de la coupe en mosaïque (RNI – article 79). Les RAIF 2005-2006 et 2006-2007 sont les plus représentatifs de cette réalité, puisque le RAIF 2007-2008 sera caractérisé par un nouveau type d'aménagement

forestier, soit celui des agglomérations de coupe. La coupe en mosaïque est obligatoire au Québec depuis 2003. Entre le 1^{er} avril 2003 et le 1^{er} avril 2004, le pourcentage obligatoire de mosaïque était de 25%. Il était de 40% en 2004-2005. Comme ces années marquaient une transition entre le modèle « traditionnel » et celui de la mosaïque, nous ne les avons pas considérées. Ainsi, il est implicite dans la détermination du ratio ha/km du chantier en CPRS, qu'un minimum de 60% de coupe mosaïque est réalisé.

Les RAIF considérés contiennent la superficie récoltée selon le type de traitement. Ils contiennent aussi le nombre de kilomètres de chemins construits durant l'année. En connaissant le nombre d'hectares de coupe et le nombre de kilomètres de chemin, nous pouvons déterminer le ratio de la superficie de coupe en fonction du nombre de kilomètres de chemin (ha/km). Les RAIF utilisés sont ceux des aires communes : 9301, 9302, 9320 et 9420A-B-C. Nous nous sommes concentrés sur les données concernant les compagnies forestières impliquées dans la Chaire. Les valeurs compilées sont présentées au tableau 6.

Tableau 6 : Synthèse des valeurs des RAIF 2005-2006 et 2006-2007. Les CPRS inclut tout les types de coupes totales (CT) et de coupes à rétention variables (CRV). CP : coupes partielles.

Type de coupe		Total récolte	Total chemin	Ratio
CPRS (ha)	CP (ha)	(ha)	(km)	(ha/km)
45823,36	35,79	45859,15	1520,35	30,16

Le traitement CPRS inclut aussi le déboisement de l'emprise des chemins et les aires d'empilement, qui parfois étaient présentés séparément, ainsi que les autres types de coupes totales. Les coupes totales (CPRS et CPHRS) représentent 93,02 % de toute la récolte. Les coupes à rétention variable (CPPTM, CPTDV, CRB) représentent 6,9 %. Les coupes partielles sont très négligeables, à 0,08 %.

La superficie totale récoltée sur le territoire sous analyse et pour la période déterminée, est de 45 859,15 hectares, pour 1 520,35 kilomètres de chemins forestiers. Connaissant la superficie totale et la longueur totale des chemins, nous trouvons un ratio de 30,16 ha/km, ce qui signifie que pour chaque kilomètre de chemin construit, 30,16 hectares de coupe ont été traités.

Pour l'établissement de ce ratio, nous avons considéré toutes les coupes réalisées. Il aurait été laborieux de séparer certains traitement de l'étude, car le réseau de chemin est planifié et optimisé pour l'ensemble des traitements. En enlevant certains traitements, il aurait alors fallu enlever les chemins correspondants. Le ratio ha/km établi pour le chantier de comparaison, inclut donc implicitement, en plus d'un 60% de coupe en mosaïque, tous les traitements de récolte qui ont été effectués. À cet égard, rappelons que plus de 93% de la récolte a été effectué en coupe totale. Pour le 6,9% de coupe en rétention variable, nous considérons que ce type de coupe n'a que peu d'impact sur le développement du réseau routier, car la différence de volume prélevé est négligeable par rapport à une coupe totale. À 0,08%, les coupes partielles n'ont pas d'impact sur le ratio ha/km. De plus, les valeurs fournies par les industriels sur les coûts de chaque élément, considèrent aussi implicitement qu'un pourcentage de leur activité est effectué en coupe à rétention variable et qu'un minimum de 60% de coupe en mosaïque est obligatoire. Le ratio ha/km obtenu correspond donc à ce qu'on cherche, c'est-à-dire représenter le plus fidèlement possible un scénario de récolte en CPRS, tel que réalisé sur la Côte-Nord.

Pour effectuer les simulations de type Monte Carlo, nous avons besoin de connaître la variabilité du ratio ha/km. En ce sens, nous avons pu observer une valeur de 21,30 ha/km, associée à une superficie de coupe de 6 916 hectares. La valeur la plus élevée observée est de 45,44 ha/km, correspondant à une superficie de 5 385 hectares. Ces valeurs ne sont pas exactement celles que nous avons utilisées dans les simulations Monte Carlo. En effet, pour conserver exactement ces valeurs minimums et maximums, il aurait fallu de plus, leur associer une probabilité d'occurrence, car ces valeurs ne sont pas symétriques par rapport à la valeur moyenne. Nous considérons que d'associer de telle probabilité n'est pas nécessaire, puisque notre véritable valeur importante, est la valeur moyenne. Ainsi, la variabilité observée nous a servi à poser un pourcentage de variation à associer à la valeur moyenne. Ce pourcentage est de 25%. Une fois ce pourcentage appliqué à la valeur moyenne, nous sommes en mesure d'appliquer une distribution triangulaire à cette variable, qui variera de 22,62 ha/km à 37,70 ha/km. Une distribution triangulaire est utilisée plutôt qu'une distribution uniforme par exemple, car la détermination de la valeur moyenne repose sur méthodologie supérieure à celle des valeurs minimums et maximums. En ce sens, nous préférons donner plus d'importance à la valeur moyenne.

3.3.2.1.2 Coupe de jardinage

Contrairement au chantier de CPRS, qui inclut un élément de dispersion avec la mosaïque, aucune dispersion des coupes n'est nécessaire en coupe de jardinage. Par conséquent, même si on sait qu'il faut plus de kilomètres de chemins en coupes partielles pour récolter un même volume de bois qu'en CPRS, l'absence de contraintes de dispersion diminue cet impact. Par contre, l'élément de la dimension des blocs de coupe n'a pas été considéré dans cette étude, puisque la dimension des blocs de coupe ne dépend pas seulement des normes, mais aussi des contraintes physiques et opérationnelles.

Pour déterminer le ratio de superficie de coupe de jardinage par kilomètre de chemin, nous nous sommes basés sur le ratio qui existait avant l'arrivée d'un règlement obligeant la dispersion des coupes. Avant 2003, aucune réglementation n'encadrait la dispersion des coupes. Les règlements ne visaient que la dimension des blocs. L'objectif économique de l'époque était de maximiser le volume de bois récolté par kilomètre de chemin, ce qui équivalait à maximiser la superficie de traitement de récolte par kilomètre, car en CPRS, tout le volume est récolté. Nous posons donc l'hypothèse que cette maximisation de la superficie traitée par kilomètre de chemin sera la même pour notre chantier de coupe en jardinage. Nous avons donc analysé les anciennes coupes, et les chemins qui leur sont associés, pour le même territoire que celui du chantier en CPRS. La grande majorité des coupes concernées datent des années 90 et début 2000. Toutes les coupes sont considérées comme étant des CPRS, puisqu'à cette époque, très peu d'autres traitements ont été appliqués, et si c'était le cas, il n'y aurait sans doute aucun impact sur le déploiement des chemins.

Il faut mentionner que pour cette période, les compagnies forestières n'étaient pas tenues de fournir les données numérisées des coupes et des chemins dans les RAIF. De plus, les chemins étaient parfois considérés en superficie plutôt qu'en kilomètres. Ces coupes et ces chemins ont cependant été numérisés par la suite, ce qui fait que nous pouvons avoir ces données numérisées aujourd'hui, bien que cela soit plus laborieux. Dans les fichiers que nous avons analysés, et qui proviennent du MRNF, il y avait parfois des chemins qui n'étaient pas associés à des coupes, et des coupes qui n'étaient pas associées à des chemins. Il a donc fallu procéder manuellement pour faire le ménage de ces fichiers.

La superficie analysée pour la détermination de cette variable est considérable, soit 147 570 hectares. La valeur obtenue est donc représentative d'un aménagement forestier sans dispersion des blocs. Pour cette superficie récoltée, 4 086 kilomètres de chemins ont été nécessaires. Le ratio de superficie de traitement par kilomètre de chemin, en absence de contraintes de dispersion est donc de 36,12 ha/km. Ce ratio implique qu'il est possible, en moyenne, de traiter près de 6 hectares de plus par kilomètre de chemin, lorsque nous sommes en absence de dispersion, ou en coupes de jardinage.

La valeur minimale observée est de 23,72 ha/km, et est reliée à une superficie de 1830,13 hectares, et à 77,16 kilomètres de chemins. Le ratio maximal obtenu est de 45,58 ha/km. Cette valeur maximale est très proche de la valeur maximale du chantier de comparaison (45,44 ha/km), ce qui est dû au fait que l'obligation de dispersion n'est que de 60%. Le maximum obtenu selon la méthodologie pour déterminer le ratio ha/km du chantier de CPRS a été observé dans un secteur sans dispersion. La valeur maximale a été obtenue dans un secteur de 761,15 hectares et ayant 16,70 kilomètres de chemins.

Cependant, pour les mêmes raisons que celles mentionnées à la sous-section précédente, ce ne sont pas ces valeurs qui seront utilisés dans les analyses de sensibilité. Le même pourcentage que pour le ratio ha/km en CPRS a été appliqué pour déterminer les valeurs maximums et minimums à utiliser, c'est-à-dire un pourcentage de 25 %. Une distribution triangulaire a aussi été appliquée à cette variable, de sorte que les valeurs vont varier entre 27,09 ha/km et 45,15 ha/km.

3.3.2.2 Coût de restauration vs construction des chemins

Nous avons considéré que le coût de la restauration des chemins est un pourcentage de celui de la construction, puisque nous conserverons une même technologie pour la construction des chemins, une même distance de débardage, ainsi qu'une même proportion d'hectare traité par kilomètre (ha/km) de chemin. Cependant, il ne nous a pas été possible de déterminer à partir de la littérature, quelle proportion du coût de construction utiliser pour estimer le coût de restauration d'un chemin, lorsque celui-ci sera restauré dans un grand nombre d'années. Pour déterminer cette proportion, des experts en opérations forestières ont été consultés. Ce qui résulte de ces discussions, c'est que des délais aussi longs entre deux utilisations (100 ans pour les CPRS, 70 ans pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents et 35 ans pour les coupes de jardinage

adaptées), feront en sorte que le coût de restauration devrait être pratiquement le même, toutes choses étant égales par ailleurs, que le coût de construction.

Nous sommes d'avis qu'un chemin abandonné pendant une aussi longue période sera recouvert de végétation. L'action des racines et du gel-dégel aura un impact sur l'infrastructure. Ce faisant, il faudra reconstruire le chemin et refaire toutes les traverses de cours d'eau. Considérant ces éléments, une proportion de 95% de celui du coût de construction est utilisée pour le coût de restauration. Ce pourcentage aurait pu être de 100%, mais nous estimons qu'une certaine économie pourrait être faite, étant donné que du matériel est déjà sur place, qu'une partie de l'infrastructure pourrait servir, et que le tracé de la route est déjà établi. Nous ferons varier ce pourcentage de plus ou moins 5% pour les analyses de sensibilité. Nous prévoyons donc que dans le pire des cas, le coût de restauration des chemins sera le même que celui de la construction, et que dans le meilleur des cas, une économie de 10% peut être réalisée.

Nous considérons également que ce pourcentage est le même pour tous les traitements, donc que la période de rotation n'a pas d'impact sur le pourcentage. Un délai de 35 ans (coupes de jardinage adaptées) ou de 100 ans (CPRS) entre deux utilisations d'un même tronçon de chemin, est considéré, selon nos hypothèses, avoir les mêmes exigences en restauration, bien qu'en réalité, il puisse y avoir de légères différences. Le même pourcentage (95%) est utilisé pour la restauration des chemins d'accès et des chemins de récolte.

3.3.2.3 Coût additionnel en supervision pour les coupes de jardinage

Le coût de la supervision en coupe de jardinage implique un coût supplémentaire « s ». Ce coût a été établi principalement selon des observations et hypothèses de FP Innovation – division FERIC. D'abord, selon leurs propres observations réalisées dans le dispositif expérimental, et selon l'expérience acquise dans d'autres secteurs, les chercheurs de cet organisme estiment que le coût supplémentaire variera selon l'intensité de : supervision, d'inventaire et de suivi requis par le MRNF pour s'assurer du respect de la prescription. L'augmentation du coût dépend aussi de ce que les sentiers de débardage sont rubannés ou que la navigation de l'abatteuse se fasse par navigation satellite. Selon ces hypothèses, ce coût supplémentaire sera de l'ordre de 1 à 4 \$/m³, mais avec une moyenne estimée de 2 \$/m³ (P. Meek – communication personnelle).

Une des trois compagnies forestières impliquées dans ce projet, a réalisé environ 270 hectares de coupes de jardinage avec sentiers temporaires sur son territoire, ce qui lui a permis d'estimer certains coûts. Évidemment, ces coûts représentent une superficie relativement faible, mais il s'agit néanmoins d'un coût estimé sur une base opérationnelle. Ces chiffres ne sont pas présentés ici, mais montrent que ces coûts pourraient potentiellement être moins élevés que ceux anticipés en termes de supervision. Nous utiliserons donc une moyenne de 2 \$/m³, mais nous le ferons varier de plus ou moins 1 \$/m³, l'intérêt étant aussi de conserver une distribution symétrique par rapport à la moyenne.

L'intensité de supervision et la qualité des travaux pourraient varier avec l'expérience des opérateurs et selon les exigences du MRNF à l'égard de ce traitement. Cependant, faute d'hypothèses raisonnables, le coût de supervision futur est considéré comme étant le même que celui d'aujourd'hui.

4 Structure de l'analyse financière

4.1 Détermination du point de vue

Différents points de vue pourraient être adoptés pour l'évaluation financière de ce projet, notamment ceux de l'État (public) et de l'industrie forestière (privée). Les objectifs ne sont pas exactement les mêmes selon le point de vue que l'on adopte. Une compagnie forestière n'a pas vraiment d'intérêt à faire des analyses économiques sur un horizon de 200 ans. Notons aussi qu'en plus du long horizon économique, le choix d'un point de vue privé aurait été difficile, à cause de la manière dont le bois est attribué au Québec. En effet, le bois est attribué par des contrats d'aménagement et d'approvisionnement forestier (CAAF), et selon ces contrats, l'État garantit un volume de bois récoltable à une compagnie forestière. L'État est propriétaire de la forêt, et réglemente les interventions et l'aménagement forestier en forêt publique. Les éléments de coûts et les scénarios d'aménagement utilisés dans cette analyse reflètent l'aménagement forestier d'une scierie moyenne typique de la région de la Côte-Nord, mais l'analyse s'effectue du point de vue de l'État. Différents éléments découleront de ce choix, principalement le choix d'un taux d'actualisation approprié.

La finance d'entreprise consiste en l'évaluation et l'analyse de l'impact financier de toutes les décisions financières vues de l'intérieur de l'entreprise, c'est à dire par les gestionnaires, ayant comme principal objectif la maximisation de la richesse de ses actionnaires par une utilisation optimale des ressources disponibles (Brealey et al. 2006, Page 2005). L'évaluation de traitements sylvicoles dépasse largement l'aspect financier, car comme mentionné en introduction, plusieurs éléments de biodiversité dépendent aussi des choix sylvicoles. En ce sens, les objectifs de l'État ne se situent pas uniquement au plan de la rentabilité financière (Page 2005). Faire plus ou moins de coupes partielles impliquera des décisions économiques certes, mais également sociales et environnementales.

Le choix du point de vue de l'État implique de considérer l'ensemble des avantages et des coûts supportés par la population, ce qui inclus des éléments intangibles comme la biodiversité, l'équité intergénérationnelle, l'accès à la forêt pour les loisirs, le développement durable, et autres. Ces divers éléments sont généralement considérés comme étant des retombés ou des effets indirects, car ils ne constituent pas l'objet du projet. Ces éléments, bien qu'ils puissent être importants, ne sont pas considérés dans cette analyse. Toutefois, l'élément de l'équité intergénérationnelle est considéré par l'entremise du taux d'actualisation car les objectifs des coupes de jardinage, qui consistent notamment à maintenir un couvert permanent et une structure semblable à celle initiale, sont cohérents avec ce concept.

4.2 Technique d'analyse : valeur actualisée nette (VAN)

Toute forme d'évaluation financière implique que l'on essaie de déterminer la valeur marchande d'un bien ou d'un projet, et l'élément fondamental de la valeur est qu'elle est énoncée en termes de flux monétaires (Page 2005), c'est-à-dire qu'elle considère tous les revenus et les coûts qui seront engendrés par le projet au cours de son horizon économique. La valeur intrinsèque d'un projet est déterminée par sa capacité à générer des flux monétaires positifs. Dans un marché financier de concurrence, c'est-à-dire dans un marché libre de contraintes, où l'information nécessaire aux investisseurs est disponible et est la même pour tous, la valeur intrinsèque devient une bonne approximation de la valeur marchande (Page 2005). Pour déterminer la valeur de nos traitements sylvicoles, nous avons donc estimé tous les coûts (section 3.1) et les revenus (section 3.2) formant le flux monétaire, et déterminé le taux de rendement exigé (section 4.3.1). Avec ces

paramètres, nous sommes en mesure de déterminer la valeur de chacun des traitements sylvicoles. Ce concept est fondamental, et est à la base du calcul de la valeur actuelle nette ou valeur présente nette (VAN), qui sera utilisée dans cette analyse financière.

De tous les concepts utilisés en finance, le plus important est celui de la valeur temporelle de l'argent, et l'évaluation des flux monétaires d'un projet s'échelonnant dans le temps nécessite de tenir compte de ce concept (Brealey et al. 2006, Page 2005, Ross et al. 2005, Soucy et Yargeau 2002, Galibois 1997). Ce concept peut facilement être expliqué par le fait qu'un dollar aujourd'hui vaut plus qu'un dollar demain, car ce dollar peut être investi et rapporter de l'intérêt immédiatement (Brealey et al. 2006). La technique d'analyse à utiliser doit donc considérer ce concept fondamental.

La valeur de n'importe quel actif ou projet est donnée par la valeur présente de tous les flux financiers espérés que ce projet générera (Williams 1938), et la VAN permet de comparer ces différents montants d'argent dans le temps, en les ramenant à une même date (Brealey et al. 2006, Page 2005, Ross et al. 2005, Soucy et Yargeau 2002, Galibois 1997), généralement au temps 0 (moment présent). La VAN représente l'augmentation actuelle de la richesse suite à l'acceptation d'un projet (Brealey et al. 2006, Page 2005).

La VAN de projets d'investissements comme ceux de cette analyse financière s'évalue en projetant dans le temps tous les coûts et revenus inhérents au projet au cours de sa vie économique, en soustrayant ensuite la valeur actuelle des coûts de la valeur actuelle des revenus, actualisée à un taux approprié (Brealey et al. 2006). Si ce résultat est plus grand ou égal à 0, on peut accepter le projet. Le taux d'actualisation utilisé dans le calcul de la VAN correspond à un taux de rendement exigé (coût d'opportunité) établi selon le niveau de risque du projet, et représente la compensation demandée par les investisseurs pour accepter un retour financier différé (Brealey et al. 2006, Page 2005, Ross et al. 2005). La notion du taux de rendement exigé est expliquée à la section 4.4.1.

L'équation de la VAN est :

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Rt}{(1+k)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{Ct}{(1+k)^t}$$

Où :

Rt = Revenus anticipés du projet à l'année t .

Ct = Coûts anticipés du projet à l'année t .

k = Taux d'actualisation

Pour que la VAN soit un critère adéquat de prise de décision, il faut nécessairement qu'elle puisse mesurer l'augmentation ou la diminution de la valeur au marché de l'entité économique, compte tenu de l'acceptation du projet (Brealey et al. 2006, Page 2005). Pour augmenter cette richesse, l'objectif est donc de développer et de choisir des projets dont la VAN est la plus élevée possible. La méthode de la VAN est la plus adéquate pour mesurer l'augmentation de cette richesse, la plus recommandée dans la littérature, et la plus utilisée par les gestionnaires (Brealey et al. 2006, Page 2005, Ross et al. 2005, Soucy et Yargeau 2002, Galibois 1997).

Il est important de mentionner que la technique de la VAN, comme toutes les autres techniques d'analyse financière, ne tient compte que des intrants économiques du projet (Page 2005), c'est-à-dire les éléments auxquels on peut associer une valeur monétaire. Ainsi, les avantages ou inconvénients qualitatifs inhérents à un projet, comme par exemple la biodiversité, ne peuvent être inclus directement, à moins de les quantifier monétairement, ce qui n'a pas été le cas dans cette analyse.

4.2.1 Trois calculs de rentabilité réalisés

Trois calculs différents ont été utilisés pour décrire la rentabilité des traitements, et pour chacun de ces calculs, des valeurs en dollar par mètre cube ($\$/m^3$) et en dollar par hectare ($\$/ha$) sont utilisées.

- 1) VAN de tous les coûts et les revenus prévus au cours de l'horizon économique. Cet horizon économique est de 200 ans pour les CPRS et de 210 ans pour les coupes de jardinage.
- 2) VAN sans le 1^{er} passage : C'est le même calcul de VAN que le précédent, mais dans lequel nous avons exclu tous les coûts et les revenus attribuables à la première intervention. Ainsi, ce calcul représente seulement la rentabilité future anticipée, sans tenir compte de la première récolte.
- 3) Revenus nets 1^{er} passage : C'est l'inverse du calcul précédent, puisque dans ce calcul, nous ne considérons que les coûts et les revenus de la première intervention. La rentabilité future anticipée des traitements n'est pas considérée. Puisque nous considérons que la première intervention se fait à l'an 0, pour ce calcul, il n'y a pas d'actualisation de montant d'argent.

L'addition des résultats du 2^{ème} et du 3^{ème} calcul donne les résultats du premier. La séparation du calcul de la VAN en 2 parties (rentabilité future et rentabilité de la première intervention) sera expliquée dans la section sur les résultats (section 5). Des éléments importants ont été observés, et ont entraîné cette distinction.

4.2.2 Dollar par mètre cube vs dollar par hectare

L'utilisation des résultats de VAN en dollar mètres cubes de bois, suppose implicitement que le volume de bois récolté sera le même pour tous les traitements, peu importe la superficie. En ce sens, si un traitement nécessite plus de superficie pour engendrer un même volume, on suppose que cette superficie sera disponible ailleurs, et que par conséquent, le même volume pourra être récolté.

Dans le contexte forestier québécois actuel, cette supposition est certainement difficile à faire. La pression sur les forêts fait qu'il y a de moins en moins de superficie disponible pour la récolte. La superficie forestière pouvant être aménagée devient par conséquent une ressource rare et limitée, qu'on ne peut pas remplacer facilement. Il semble donc que l'utilisation des dollars par hectare est plus adéquate pour effectuer les comparaisons. Les dollars par hectare indiquent la rentabilité anticipée d'une certaine surface de forêt, selon les différents traitements, sans égard au volume

qui sera produit. Ainsi, certains traitements produiront moins de bois que d'autres par unité de surface. Cette analyse financière ne vise pas à déterminer quel traitement produit le plus de bois par période de temps, mais à comparer la rentabilité de ces traitements, et cette rentabilité n'est pas liée exclusivement au volume produit. Néanmoins, les résultats en dollar par mètre cube en plus des résultats en dollar par hectare sont présentés dans la section (5) sur les résultats.

4.2.3 Hypothèse du taux de réinvestissement

Lorsque nous utilisons des techniques d'analyse financière, comme la VAN, pour résoudre des problèmes d'évaluation de projets, nous utilisons la technique de l'intérêt composé, c'est-à-dire que les intérêts rapportent des intérêts. Cette technique de l'intérêt composé pose l'hypothèse du taux de réinvestissement, c'est-à-dire que tous calculs de rendement de montants survenant dans le temps et utilisant des intérêts composés, suppose que les montants reçus sont réinvestis au même taux d'actualisation que celui ayant servi au calcul (Page 2005). En fait, nous devons considérer que le capital et les intérêts générés au cours de la période d'évaluation sont réinvestis au taux k durant n périodes, et selon le taux d'intérêt déterminé, et ce jusqu'à la fin de la période d'évaluation (Page 2005).

4.3 Risque

Le risque est un paramètre fondamental à toute prise de décision financière. Un dollar sans risque vaut plus qu'un dollar incertain (Brealey et al. 2006). Une situation est risquée lorsqu'il y a plusieurs événements possibles et qu'on ne peut savoir d'avance celui qui se réalisera. En condition réelle, dans laquelle il y a de l'incertitude, deux projets peuvent avoir les mêmes flux monétaires espérés, situés aux mêmes moments dans le temps, mais malgré tout avoir des VAN très différentes. Cette situation résulte de l'évaluation du risque. En fait, ce qui caractérise le risque est la possibilité qu'une VAN autre que celle espérée soit obtenue (Brealey et al. 2006). En fait, la technique de la VAN est invalide, n'a aucune signification théorique et n'est d'aucune aide pour la prise de décision financière, si l'élément de risque n'y est pas incorporé (Brealey et al. 2006, Page 2005). Il est donc essentiel de considérer le risque de chaque projet, pour que la

technique de la VAN soit valide. Communément, le risque est pris en compte par le choix d'un taux d'actualisation utilisé.

4.3.1 Taux d'actualisation

Étant donné que les coûts et les revenus surviennent en différents moments dans le temps, il faut considérer la valeur temporelle de l'argent. Ce processus s'effectue par l'actualisation, qui tient compte aussi du fait que l'argent rapporte des intérêts. Pour calculer les VAN, nous devons actualiser les flux monétaires avec le taux approprié. La détermination de ce taux est un élément très important, puisque c'est basé sur ce taux que nous pouvons évaluer l'effet du temps sur la valeur de l'argent (Brealey et al. 2006, Page 2005, Ross et al. 2005, Soucy et Yargeau 2002, Weitzman 2001, Galibois 1997). La détermination du taux d'actualisation approprié est un sujet controversé et compliqué en finance, et constitue un élément majeur de l'analyse financière, étant donné que toute prise de décision est basée sur ce taux, et qu'une mauvaise estimation peut modifier la décision finale (Brealey et al. 2006, Page 2005, Ross et al. 2005, Soucy et Yargeau 2002, Weitzman 2001, Galibois 1997). Pour la majorité des études économiques publiques, l'élément le plus critique est le taux d'actualisation lui-même (Weitzman 2001). Le choix du taux d'actualisation approprié pour les projets forestiers est aussi controversé, et ne fait pas l'unanimité (Hepburn et Koundouri 2007, Price 1997). Le choix d'un type de critère actualisé ne suffit pas pour traiter le problème de l'optimisation économique de la gestion sylvicole des peuplements forestiers, il faut être en mesure d'utiliser un taux adéquat d'actualisation (Calvet et al. 1997).

Ce taux d'actualisation est considéré comme un coût d'opportunité, car il représente ce qu'aurait rapporté un autre projet ou investissement d'un niveau de risque équivalent sur le marché, et auquel on renonce pour accepter le projet proposé (Brealey et al. 2006, Page 2005). Par conséquent, nous devons accepter les projets ayant des VAN positives ou égales à 0, puisque ces projets sont générateurs de richesses. Lorsque nous comparons des projets mutuellement exclusifs comme c'est le cas dans cette étude, et que plus d'un projet possède une VAN positive, nous devons choisir celui ayant la plus haute valeur (Brealey et al. 2006, Page 2005, Soucy et Yargeau 2002, Galibois 1997), si seulement l'aspect économique est considéré.

Dans le contexte de cette étude, nous avons opté pour un point de vue de l'État, qui assume une partie du risque financier relié au choix des scénarios sylvicoles. Par ailleurs, l'État a un rôle social que l'entreprise privée n'a pas, par exemple en ce qui concerne la biodiversité, la conservation des paysages, la protection de la ressource, etc., de sorte que pour l'État, le choix du scénario sylvicole dépasse largement le point de vue uniquement financier. Notons aussi qu'un taux d'actualisation élevé aura tendance à favoriser les projets à court terme, comme par exemple la ligniculture, et les taux d'actualisation faibles vont favoriser les projets à long terme, comme par exemple le reboisement et les éclaircies pré-commerciales. Le choix du taux d'actualisation doit refléter ces réalités.

Pour cette analyse financière, un taux d'actualisation réel de 4% a été utilisé. Ce taux est le taux moyen observé dans Weitzman (2001) pour des projets environnementaux de longue durée, correspond à un taux souvent utilisé dans des projets forestiers (Davis et Johnson 1987), et a été utilisé récemment dans Legault (2006) et Valéria (2004). Plus récemment encore, Jenkins et Kuo (2007) concluent que le taux de préférence pour au Canada est de 4%. Le choix de ce taux tient compte de plusieurs éléments, entre autres : le taux de préférence des gens pour le présent, de la longueur de l'horizon économique, du taux de rendement domestique de l'épargne et de l'équité intergénérationnelle. Le taux d'actualisation ne fait pas partie de l'analyse de sensibilité, car il est toujours critique, de sorte qu'un taux différent implique une analyse différente et indépendante.

4.3.1.1 Taux dégressif

Bien que l'ensemble des analyses et des résultats de cette étude soient basées sur un taux d'actualisation réel de 4%, nous avons aussi effectué une analyse basée sur un taux dégressif, semblable à celui établi par Weitzman (2001), mais adapté pour les projets sylvicoles au Québec (Lapointe 2008). Selon Hepburn et Koundouri (2007), les théories économiques récentes suggèrent que le taux d'actualisation dans les analyses économiques en foresterie devrait être dégressif, considérant l'incertitude de ce taux futur, les longues périodes d'évaluation et l'importance du taux d'actualisation. Aussi, un taux dégressif peut permettre de réduire les tensions sur l'équité intergénérationnelle (Hepburn et Koundouri 2007).

Tableau 7 : Taux d'actualisation réel dégressif proposé pour les projets sylvicoles au Québec (Lapointe 2008).

Années	Taux d'actualisation (%)
0 à 30	4
31 à 80	3
81 à 130	2
131 à 180	1
Plus de 180	0

Les taux présentés au tableau 7 sont suggérés. Il faudra éventuellement valider les intervalles de temps proposés, qui sont différents de ceux de Weitzman (2001), et valider le taux minimum utilisé. Ce taux minimum pourrait être différent de 0%, par exemple être basé sur le taux de croissance de l'économie. Notons qu'un taux de 0% implique que la notion temporelle de l'argent n'a pas d'impact. À ce taux, un montant reçu aujourd'hui ou dans 200 ans ont exactement la même valeur. L'utilisation d'un taux dégressif accorde davantage d'importance aux projets à long terme, car les taux deviennent très bas dans le futur, jusqu'à atteindre potentiellement 0%.

4.4 Simulations Monte Carlo

Les valeurs des différents paramètres utilisés pour évaluer la rentabilité financière des traitements sylvicoles sont les plus proches possibles de la réalité. Il y a cependant des incertitudes et des risques inhérents à ces nombreux paramètres. Ces incertitudes ont été évaluées pour être en mesure de déterminer leurs influences sur la VAN. Les paramètres ayant le plus d'influence sur la VAN sont les éléments critiques.

Sans tenir compte de la sensibilité et de l'incertitude associée aux variables entrant dans les calculs, c'est-à-dire en ne considérant que les valeurs de référence, les résultats des VAN ne seraient applicables que pour les valeurs utilisées, sans qu'on puisse cerner les éléments critiques. L'exportation et la mise à jour des résultats seraient aussi plutôt difficiles. Au fur et à mesure que de nouvelles connaissances permettront de préciser la valeur des variables, les résultats des VAN pourraient changer, mais les éléments critiques devraient être les mêmes.

Ainsi, comme mentionné à la section 1.2, des simulations Monte Carlo ont été effectuées. La méthode Monte Carlo offre l'avantage d'utiliser pour une variable donnée, une distribution de

probabilités plutôt qu'une valeur de référence (Boyle 1977). À cet égard, une distribution de probabilités a été attribuée à plusieurs variables. Par exemple, la majorité des éléments de coûts obtenus par les compagnies forestières ont été associés à une distribution de probabilité triangulaire, puisque nous avons également obtenu des valeurs minimums et maximums. L'utilisation des distributions triangulaires a permis de compenser le fait qu'on ne connaît généralement pas l'écart-type des distributions, élément important des courbes de distribution normale.

Cependant, des distributions normales ont aussi été utilisées, principalement pour les valeurs de nature dendrométrique. Nous avons estimé à partir des valeurs du dispositif expérimental, le pourcentage de variation de certaines données. Nous avons estimé que ce pourcentage devait refléter la réalité dans 99% des cas, soit à trois écart-types. Donc, si une valeur peut varier de plus ou moins 15% par rapport à la moyenne, nous avons estimé que l'écart-type de la distribution de probabilité de cette variable est de 5 (15% divisé par 3 écart-types). L'annexe III indique les variables pour lesquelles nous avons attribué une distribution de probabilité, le type de distribution utilisée, et la source de l'hypothèse concernant cette distribution utilisée.

Les distributions de probabilité ont été associées à une variable uniquement si une hypothèse raisonnable pour le faire existe. Lorsque ce n'est pas le cas, aucune distribution n'a été appliquée, et seule la valeur moyenne est considérée. Chaque simulation est constituée de 10 000 itérations, et à chaque itération, chaque variable est susceptible de prendre une valeur différente, qu'elle ait ou non une distribution de probabilité qui lui soit associée. En effet, la plupart des variables sont liés par des équations, de sorte que si quelques-unes de ces variables changent, d'autres changeront également selon les équations. Le logiciel utilisé pour réaliser les simulations Monte Carlo est le logiciel *@risk 5.0 version professionnelle*, développé par Palisade Corp. Rappelons que suite à l'utilisation de simulations Monte Carlo, les résultats des VAN seront caractérisés par des intervalles de confiance (Boyle 1977).

4.5 Traitement de l'inflation

Il n'est pas facile de comparer des valeurs monétaires survenant à différents moments dans le temps, puisque la monnaie n'achète pas la même quantité de biens chaque année étant donné que

le pouvoir d'achat de la monnaie dépend du taux d'inflation dans le temps (Brealey et al. 2006, Page 2005, Ross et al. 2005, Soucy et Yargeau 2002, Galibois 1997). En fait, toute analyse de rentabilité de projets serait incomplète sans la prise en compte de l'inflation (Page 2005).

Le principe fondamental réside dans l'importance d'être constant dans le traitement de l'inflation. Les flux monétaires et le taux d'actualisation utilisés doivent toujours être exprimés sur la même base (Page 2005). Si le taux d'actualisation est indiqué en terme nominal, les flux monétaires doivent être en termes nominaux. De plus, si tous les intrants du flux monétaires doivent être en terme nominaux, ou en dollars courants, il ne suffit pas d'appliquer un taux d'inflation égal pour tous ces intrants, car dans la réalité, les différents éléments du flux monétaire ne seront pas également influencés par l'inflation. Par exemple, la valeur des produits du bois n'aura sans doute pas le même niveau d'inflation que le coût des opérations forestières, et ces taux d'inflations seraient très difficiles à estimer sur une longue période.

Page (2005) suggère que plutôt que de tenter d'ajuster tous les intrants des flux monétaires pour l'inflation, il est moins laborieux d'enlever l'inflation du taux d'actualisation choisi, et actualiser ces flux monétaires avec ce taux réel ainsi estimé. Pour cette étude, nous avons opté pour l'établissement d'un taux d'actualisation réel, qui tient compte de l'inflation, et donc pour une évaluation des flux monétaires en dollar constant plutôt qu'en dollar courant. L'évaluation en dollar constant avec un taux d'actualisation réel est pratique courante dans l'évaluation des projets publics.

5 Résultats et discussion

5.1 Simulations de croissance

Dans cette étude, les CPRS sont toujours évaluées à des rotations de 100 ans. Les coupes de jardinage ont d'abord été évaluées pour des rotations de 40, 50, 60, 70 et 80 ans, sans égard à leurs performances dendrométriques. Rappelons que le modèle *Biolley* a servi à la simulation de croissance des traitements de coupes de jardinage, car aucun modèle reconnu n'existe présentement pour ce type de traitement en forêt résineuse, malgré quelques projets en cours. Après avoir analysé les résultats obtenus par le modèle *Biolley*, il est apparu évident que la

période de rotation optimale pour les deux types de coupe de jardinage est de 70 ans. Cette période a été fixée à 60 ans dans Ruel et al. (2007).

Notons que les valeurs reflètent les hypothèses utilisées dans cette étude, et que les valeurs dendrométriques projetées sont des estimations. Le délai optimal est selon nous celui qui permettra aux peuplements traités une première fois en coupe de jardinage, de reproduire des caractéristiques dendrométriques semblables dans le futur. Ainsi, en plus d'assurer le maintien de la biodiversité, cela devrait permettre le maintien de l'activité économique. Évidemment, les suivis d'inventaires qui seront effectués suite aux interventions, permettront de déterminer avec plus de précision quand ces caractéristiques dendrométriques seront effectivement atteintes, et par conséquent, le meilleur moment d'effectuer les interventions de coupes de jardinage.

5.1.1 Coupes de jardinage avec sentiers permanents

Les figures suivantes présentent certaines données obtenues pour des rotations de 60, 70 et 80 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents. Pour alléger le texte, les graphiques pour les rotations de 40 et 50 ans ne sont pas présentés.

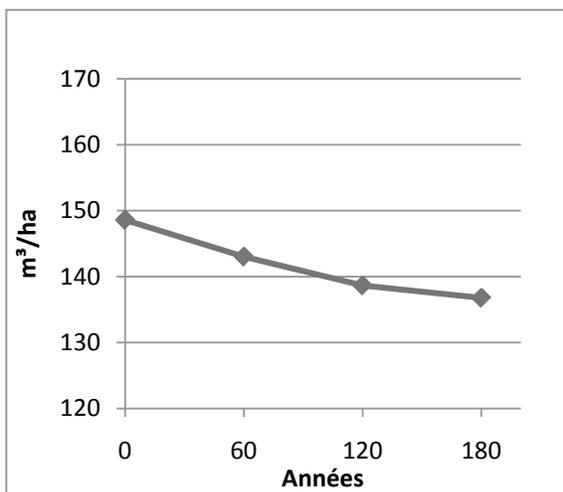


Figure 6 : Volume par hectare dans les bandes (entre les sentiers), à chaque rotation de 60 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.

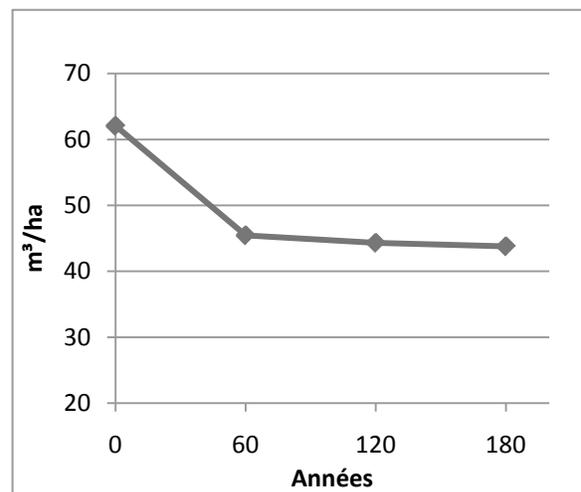


Figure 7 : Volume récolté par hectare, à chaque rotation de 60 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.

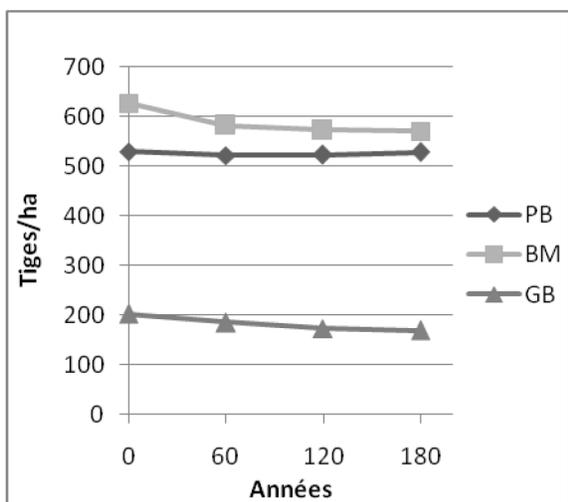


Figure 8 : Nombre de tiges par hectare selon les catégories de petit bois (PB) (10 et 12 cm au DHP), bois moyen (BM) (14 à 20 cm au DHP) et gros bois (GB) (22 cm et plus au DHP), par période de 60 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.

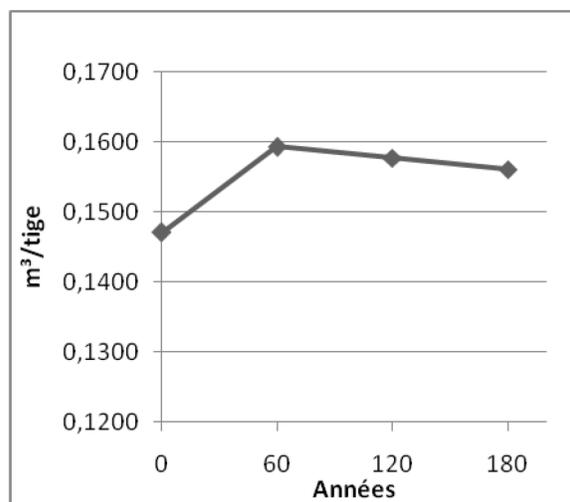


Figure 9 : Volume par tige total récolté, par période de 60 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.

Les graphiques pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents avec rotation de 60 ans indiquent des baisses en volume par hectare dans les bandes (figure 6) et en volume récolté par hectare (figure 7). Les quantités de bois moyen et de gros bois diminuent aussi légèrement, celle de petit bois étant stable (figure 8). Une rotation de 60 ans permettrait cependant une hausse du volume moyen par tige total (figure 9).

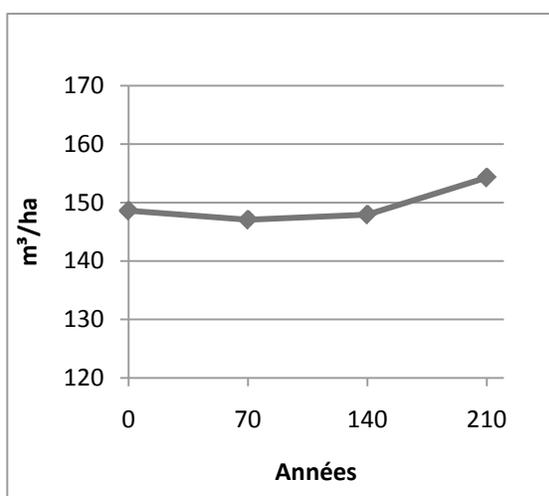


Figure 10 : Volume par hectare dans les bandes (entre les sentiers), à chaque rotation de 70 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.

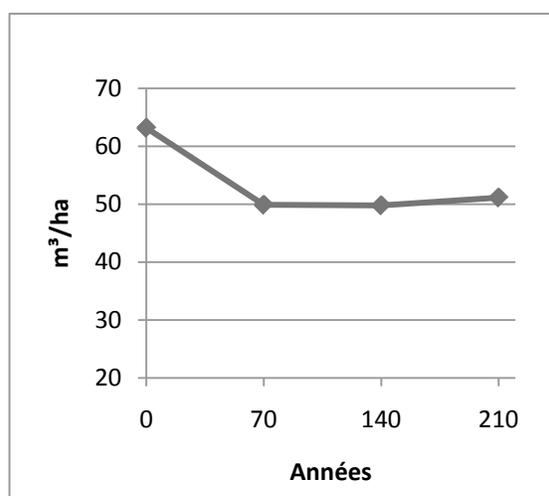


Figure 11 : Volume récolté par hectare, à chaque rotation de 70 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.

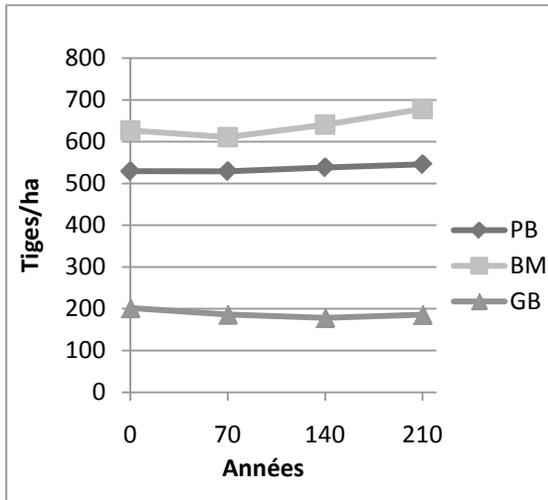


Figure 12 : Nombre de tiges par hectare selon les catégories de petit bois (PB) (10 et 12 cm au DHP), bois moyen (BM) (14 à 20 cm au DHP) et gros bois (GB) (22 cm et plus au DHP), par période de 70 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.

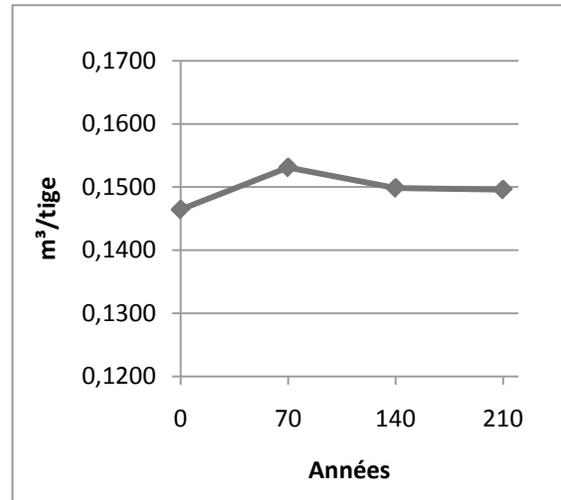


Figure 13 : Volume par tige total récolté, par période de 70 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.

Concernant les rotations de 70 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents, on remarque que le volume dans les bandes est constant (figure 10), variant de 148,6 à 154,3 m³/ha sur un horizon de 210 ans. Le volume récolté diminue suite au premier passage, mais est constant par la suite (figure 11), se situant autour de 50 m³/ha. La production de bois selon les différentes catégories est aussi relativement stable dans le temps (figure 12), ainsi que le volume moyen par tige total (figure 13), qui varie de 0,14643 à 0,15310 m³/tige sur un horizon de 210 ans.



Figure 14 : Volume par hectare dans les bandes (entre les sentiers), à chaque rotation de 80 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.

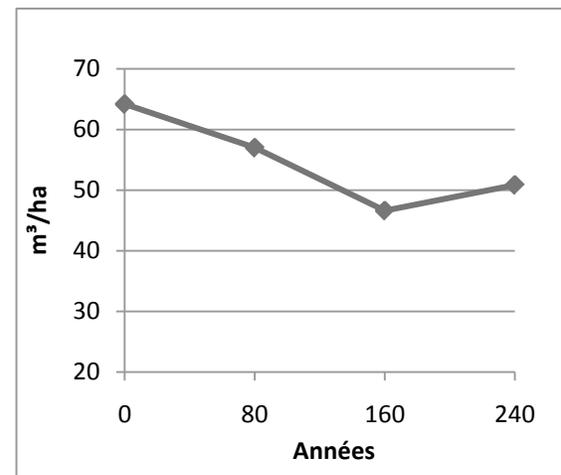


Figure 15 : Volume récolté par hectare, à chaque rotation de 80 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.

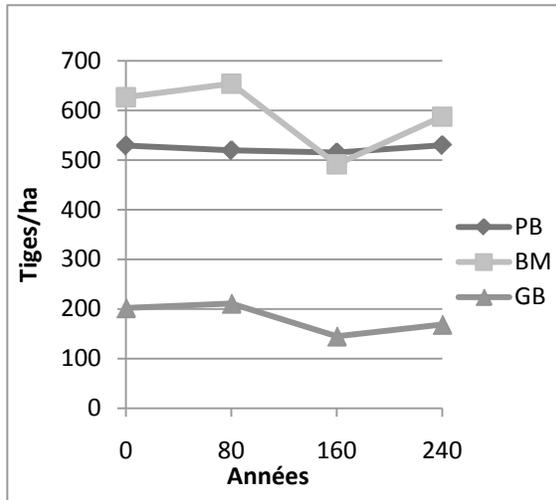


Figure 16 : Nombre de tiges par hectare selon les catégories de petit bois (PB) (10 et 12 cm au DHP), bois moyen (BM) (14 à 20 cm au DHP) et gros bois (GB) (22 cm et plus au DHP), par période de 80 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.

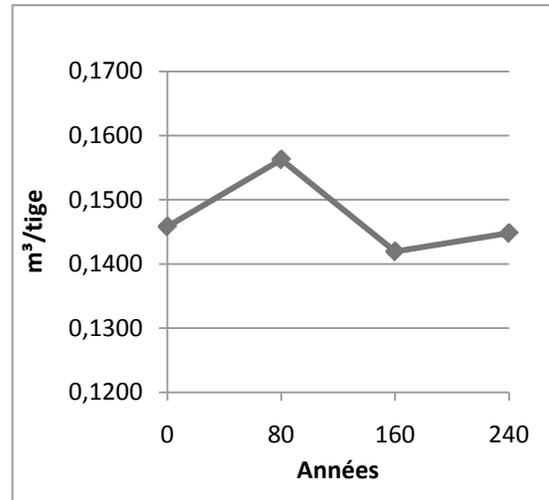


Figure 17 : Volume par tige total récolté, par période de 80 ans, pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents.

Pour ce qui est des graphiques pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents avec des rotations de 80 ans, on remarque des fluctuations dans le volume par hectare, soit d'abord une hausse, et ensuite une forte baisse (figure 14). Le volume récolté par hectare diminue plus lentement que pour les rotations de 70 ans, mais semble se maintenir ensuite à un niveau comparable, autour de 50 mètres cube par hectare (figure 15). On remarque aussi des fluctuations dans les bois moyens et les gros bois (figure 16), ainsi que dans le volume par tige récolté (figure 17). Ces variations sont expliquées par la perte de précision de la fonction de recrutement pour les forêts fermées. La fonction est calibrée pour une certaine ouverture du couvert, mais devient optimiste et incertaine lorsque celui-ci se referme. Une rotation de 80 ans dépasse donc les capacités de prédiction de la fonction de recrutement. La rotation de 70 ans est la rotation qui semble répondre le mieux aux objectifs du jardinage en termes sylvicoles, notamment en ce qui a trait à reproduire un volume et une structure semblables à ceux du peuplement initial.

Le volume par hectare total après une première intervention ne sera plus équivalent au volume initial, c'est pour cette raison que les figures 6, 10 et 14 présentent le volume dans les bandes, qui excluent les zones de sentiers permanents. Cette baisse de volume est attribuable à la surface occupée par les sentiers permanents, et dans lesquels la production de bois sera plus faible que dans le reste du peuplement. La récolte dans les sentiers de débardage au premier passage permet

la récolte de bois équivalent à celui de l'ensemble du peuplement, ce qui ne sera plus le cas dans le futur. C'est la même raison qui explique que le volume récolté par hectare diminue aussi après la première intervention (figures 7, 11, 15).

Dans le cas des rotations plus courtes de 40 et 50 ans, les graphiques présentent d'importantes baisses en termes de volume par hectare dans les bandes, de volume récolté et de volume par tige, ainsi qu'une baisse de la production de gros bois et une hausse de la production de petit bois. Ces rotations plus courtes ne permettent donc pas d'assurer le rétablissement de la forêt, selon des caractéristiques semblables à celles prévalant initialement, et ne répondent donc pas aux objectifs du jardinage. Pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents, une rotation de 70 ans est retenue.

5.1.2 Coupe de jardinage adaptées

Dans le cas des coupes de jardinage adaptées, les mêmes constatations que celles observées pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents sont observées, et une rotation de 70 ans est aussi retenue. Pour alléger le texte, seulement les graphiques pour une rotation de 70 ans sont présentés.

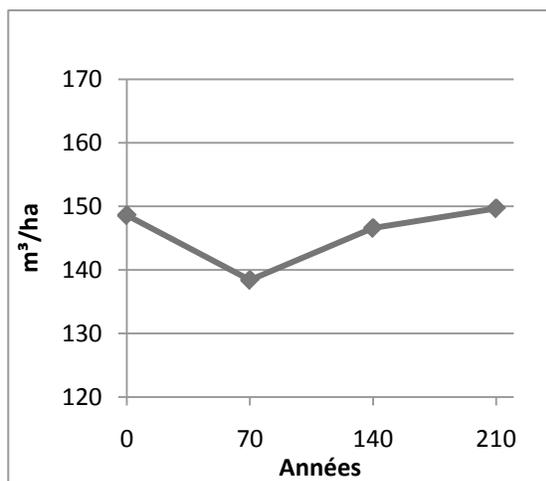


Figure 18 : Volume par hectare dans les bandes (entre les sentiers), à chaque rotation de 70 ans, pour les coupes de jardinage adaptées.

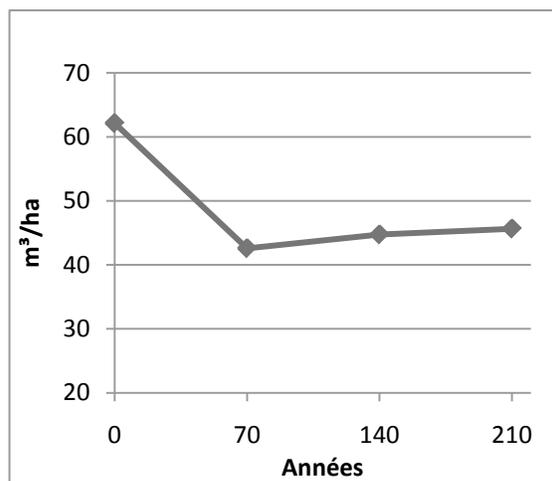


Figure 19 : Volume récolté par hectare, à chaque rotation de 70 ans, pour les coupes de jardinage adaptées.

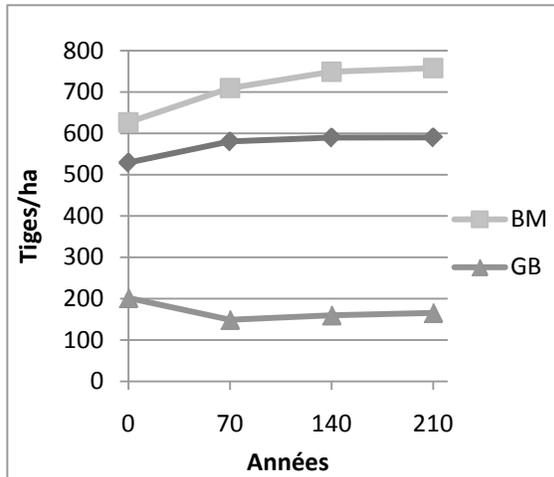


Figure 20 : Nombre de tiges par hectare selon les catégories de petit bois (PB) (10 et 12 cm au DHP), bois moyen (BM) (14 à 20 cm au DHP) et gros bois (GB) (22 cm et plus au DHP), par période de 70 ans, pour les coupes de jardinage adaptées.

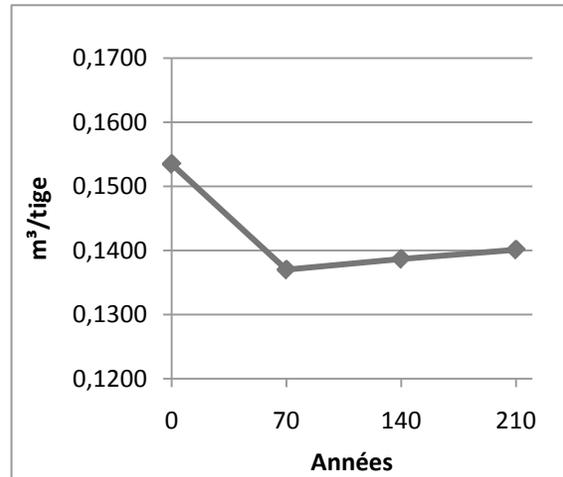


Figure 21 : Volume par tige total récolté, par période de 70 ans, pour les coupes de jardinage adaptées.

La figure 18 indique que le volume par hectare dans les bandes sera relativement constant pour les coupes de jardinage adaptées malgré une baisse suivant la première intervention. Le volume par hectare initial est de 148,6 m³/ha, et celui de la deuxième intervention devrait être de 138,4 m³/ha. Il nous est difficile de cibler exactement la cause de cette baisse, qui n'apparaît qu'à la deuxième intervention. Mais en comparaison avec les données des autres rotations (40, 50, 60, 80), les données à 70 ans sont celles s'approchant le plus des données initiales.

Comme dans le cas des coupes de jardinage avec sentiers permanents, le volume récolté sera constant dans le temps, mais sera plus faible que lors de la première intervention (figure 19), à cause de la proportion des sentiers. Notons qu'étant donné que la proportion des sentiers est plus élevée dans le cas des coupes de jardinages adaptées, l'impact sur le volume récolté est plus important. Ce volume récolté se situera autour de 45 m³/ha à partir de la deuxième intervention.

La quantité de gros bois diminuera légèrement (figure 20), et celle des petits bois et des bois moyens va augmenter dans le futur. Étant donné que la quantité de gros bois va diminuer, le volume par tige total (incluant les sentiers de débardage) pouvant être récolté diminuera également (figure 21), pour se stabiliser près de 0,14 m³/tige.

5.1.3 CPRS

À l'opposé des coupes de jardinage, l'objectif de rétablir les caractéristiques du peuplement initial ne sera pas atteint en CPRS. Les deux tableaux suivants montrent ce constat. Notons que pour les CPRS, des rotations de 100 ans sont retenues, selon la méthodologie de la section 2.4.1.

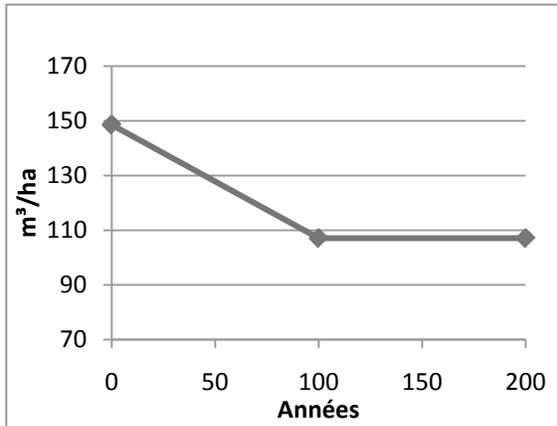


Figure 22 : Volume à l'hectare, pour les CPRS à des rotations de 100 ans.

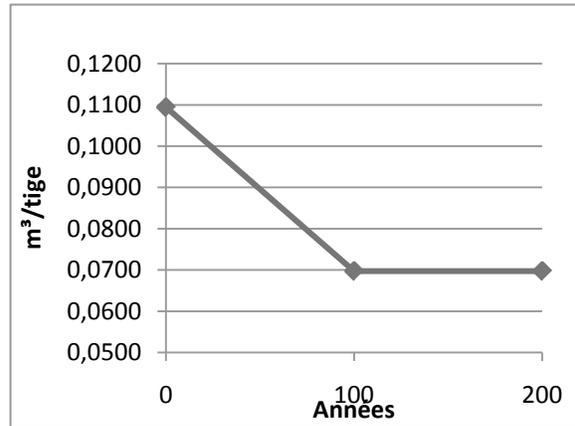


Figure 23 : Volume par tige récolté, pour les CPRS à des rotations de 100 ans.

Le graphique du volume à l'hectare (figure 22) indique une baisse sévère de volume par hectare dans le cas de la CPRS, suite à la première intervention. D'un volume tout près de 150 mètres cubes à l'hectare initialement (148,6 m³/ha) dans le dispositif expérimental, les prochaines rotations ne permettront la récolte que de 107,1 m³/ha en CPRS. Le volume par tige (figure 23), initialement de près de 0,11 m³/tige, sera inférieur à 0,07 m³/tige dans le futur, comparativement à environ 0,15 m³/tige en coupe de jardinage avec sentiers permanents, et à environ 0,14 m³/tige en coupe de jardinage adaptée.

Les figures 22 et 23 indiquent qu'une rotation de 100 ans pour les CPRS ne semble pas permettre de reproduire, dans le futur, des caractéristiques dendrométriques semblables à celles des peuplements initiaux. Les CPRS produiront moins de bois, et le bois produit sera de plus faible dimension.

5.2 Résultats de l'analyse financière : sans simulation Monte Carlo

Dans cette section, les résultats sont ceux obtenus sans effectuer les simulations de type Monte Carlo. Nous avons déjà établi que la durée de rotation optimale pour les coupes de jardinage est de 70 ans. Ainsi, uniquement les résultats pour cette rotation optimale seront présentés. Selon le taux d'actualisation utilisé, il est arrivé que les rotations plus courtes indiquent des rentabilités supérieures, mais puisque les objectifs sylvicoles ne sont pas atteints, l'utilisation de ces rotations courtes semble injustifiable. Les résultats des trois différents calculs, sans simulation Monte Carlo, sont présentés au tableau 8.

Tableau 8 : Résultats de la rentabilité selon trois calculs différents sans simulation Monte Carlo, en dollars par mètre cube (\$/m³) et en dollar par hectare (\$/ha), pour les traitements de CPRS, de coupes de jardinages adaptée et avec sentiers permanents.

	CPRS	CJ perm (70)	CJ adaptée (70)
VAN (\$/m ³)	32,66	26,14	36,54
VAN (\$/ha)	4850,28	1630,59	2251,85
VAN (\$/m ³) sans le 1er passage	0,06	1,54	8,26
VAN (\$/ha) sans le 1er passage	6,19	76,75	494,22
Revenus nets (\$/m ³) 1er passage	32,60	24,60	28,29
Revenus nets (\$/ha) 1er passage	4844,09	1553,84	1757,63

VAN (\$/m³) : Le tableau 8 indique que les 3 traitements comparés présentent des VAN positives. Les trois traitements sont donc rentables, selon les conditions de cette analyse. La coupe de jardinage adaptée présente la VAN la plus élevée, en considérant les dollars par mètre cube, c'est-à-dire, en prenant pour acquis que la superficie n'est pas limitative. En fait, si on actualise tous les revenus et les coûts qui devraient être générés par ce traitement au cours des 210 prochaines années à un taux de 4%, nous pouvons nous attendre à une rentabilité de 36,54 \$/m³. Cette rentabilité est de 3,88 \$/m³ supérieure à la VAN anticipée des CPRS, et de 10,40 \$/m³ supérieure à la VAN des coupes de jardinage avec sentiers permanents.

VAN (\$/ha) : Comme pour les VAN en dollar par mètre cube, les VAN des trois traitements sont positives aussi lorsque les dollars par hectare sont utilisés. Sur la base des dollars par hectare, le traitement de CPRS est de loin le plus rentable, avec une VAN de 4850,28 \$/ha, qui est plus de deux fois plus élevée que celle des coupes de jardinage adaptées, qui pourtant offrent la meilleure

performance selon les dollars par mètre cube. En effet, sur une surface donnée, le volume de bois généré par les CPRS sera plus élevé, et ce particulièrement à la première intervention, de sorte que les revenus seront plus élevés. Considérant la valeur temporelle de l'argent, il est donc normal que la VAN des CPRS soit la plus élevée, sur une base de dollar par hectare.

VAN sans le 1^{er} passage : La distinction entre la rentabilité à court terme (premier passage seulement) et à long terme (sans le premier passage) permet de montrer un élément important, c'est-à-dire que la rentabilité des CPRS est intimement liée au premier passage, alors que celle des coupes de jardinage est plus stable dans le temps. Sans considérer la première intervention, la VAN des CPRS en dollar par mètre cube, s'approche de 0 (0,06 \$/m³), c'est-à-dire que la rentabilité de ce traitement est à peine positive. Les coupes de jardinage avec sentiers permanents présentent une VAN future de 1,54 \$/m³, et les coupes de jardinage adaptées, une VAN de 8,26 \$/m³. Rappelons cependant que les prochains revenus des CPRS seront 100 ans après la première intervention, ceux des coupes de jardinage avec sentiers permanents seront 70 ans après, et ceux des coupes de jardinage adaptées seront seulement 35 ans après la première intervention, considérant que seulement la moitié du traitement est traité à chaque passage, et donc qu'il faut deux fois plus de passages. Les mêmes constatations s'appliquent sur la base des dollars par hectare.

Revenus nets 1^{er} passage : Avec la distinction entre la rentabilité du premier passage et des passages futurs, il est intéressant de constater que la rentabilité positive des CPRS est attribuable presque exclusivement à la première intervention. La VAN des CPRS est de 32,66 \$/m³, mais de cette VAN, 32,60 \$/m³ est attribuable à la première intervention, et 0,06 \$/m³ aux interventions futures. Évidemment, l'actualisation des montants d'argent futurs a un impact, dû à la valeur temporelle de l'argent, mais cela n'explique qu'une partie du problème. Les constats dendrométriques exprimés à la section 5.1.3 sur les CPRS, montrent que la rentabilité future des CPRS pourrait être sérieusement compromise, toutes choses étant égales par ailleurs. Le même constat est fait sur la base des dollars par hectare.

La baisse du volume à l'hectare et du volume par tige implique que les prochaines CPRS seront moins rentables que les CPRS d'aujourd'hui. C'est ce que la distinction entre la rentabilité à court terme (1^{er} passage) et celle à long terme (passages futurs) permet de montrer. Comme nous

le verrons aussi dans les sections suivantes, la rentabilité des coupes de jardinages est beaucoup plus stable dans le temps.

5.3 Résultats : avec simulation Monte Carlo

Les résultats sans simulation Monte Carlo sont intéressants, car ils permettent de faire plusieurs constatations importantes. Cependant, une contribution importante de ce mémoire est l'utilisation des simulations de type Monte Carlo dans une analyse financière visant la comparaison de traitements sylvicoles. Les résultats présentés dans cette section sont ceux résultant de ces simulations. Les sous-sections suivantes présenteront ensuite trois types d'analyses qui complètent l'analyse financière.

Tableau 9 : VAN, en dollar par mètre cube (\$/m³), avec simulation Monte Carlo, pour les traitements de CPRS (rotation de 100 ans), de coupes de jardinage adaptées et avec sentiers permanents (rotation de 70 ans).

	CPRS	CJ perm (70)	CJ adaptée (70)
Moyenne	32,53	25,64	35,92
Min	-19,51	-31,30	-35,55
Max	86,76	89,19	115,74
Écart-type	20,37	22,36	28,16

Tableau 10 : VAN, en dollar par hectare (\$/ha), avec simulation Monte Carlo, pour les traitements de CPRS (rotation de 100 ans), de coupes de jardinage adaptées et avec sentiers permanents (rotation de 70 ans).

	CPRS	CJ perm (70)	CJ adaptée (70)
Moyenne	4834,92	1610,76	2227,83
Min	-2831,61	-1842,32	-2032,71
Max	12913,05	6007,82	7749,57
Écart-type	3021,66	1410,07	1739,92

D'abord, nous pouvons constater aux tableaux 9 et 10, que les valeurs moyennes obtenues après avoir effectué des simulations Monte Carlo, sont toutes légèrement inférieures à celles obtenues sans simulation. Cela s'explique simplement parce que la distribution de probabilité de certaines variables, comme celles du prix du sciage et du prix des copeaux (2 éléments critiques) ne sont pas symétriques. La probabilité d'obtenir une valeur pour ces variables n'étant pas symétrique

par rapport à leur moyenne respective, la valeur moyenne obtenue après 10 000 itérations est légèrement différente de celle obtenue à partir des valeurs moyennes initiales. Les résultats les plus fiables sont ceux obtenus suite aux 10 000 itérations, puisque les distributions de probabilités de toutes les variables sont considérées simultanément. Malgré une légère différence, le classement entre les traitements à l'égard de leur rentabilité n'est pas modifié.

Les simulations Monte Carlo permettent d'obtenir les valeurs minimums et maximums observées lors des 10 000 itérations, en plus des écart-types. Nous sommes ainsi en mesure de reproduire la distribution de probabilité de la VAN de chaque traitement. Ces distributions de probabilités tendent vers des distributions normales. De manière relative, les écart-types associés aux coupes de jardinage sont plus élevés que pour les CPRS, signifiant que les VAN des coupes de jardinage sont un peu plus variables.

VAN (\$/m³) : Pour tous les traitements, bien que les VAN moyennes soient positives, nous remarquons (tableau 9) que les valeurs minimums pouvant être obtenues sont toutes négatives. Dans tous les cas, il existe donc des probabilités que les traitements ne soient pas rentables. Nous pouvons aussi remarquer que la valeur maximum de la VAN des coupes de jardinage avec sentiers permanents est plus élevée que celle des CPRS (89,19 \$/m³ vs 86,76 \$/m³). Il existe donc une certaine probabilité que les coupes de jardinage avec sentiers permanents soient plus rentables que les CPRS, sur une base de comparaison en dollar par mètre cube.

Les coupes de jardinage adaptées possèdent la valeur maximale la plus élevée (115,74 \$/m³), mais aussi la valeur minimale la plus faible (-35,55 \$/m³). Considérant aussi l'écart-type, la coupe de jardinage adaptée semble un choix un peu plus risqué, mais qui offre également un meilleur rendement potentiel.

VAN (\$/ha) : En termes de dollar par hectare, les CPRS ont la VAN et la valeur maximale les plus élevées (Andreassen et Øyen 2002), mais aussi, la valeur minimum la plus basse. Il y a donc une certaine possibilité que les CPRS offrent le moins bon rendement économique entre les traitements, sur la base des dollars par hectare.

Les tableaux 11 à 14 présentent les résultats pour les deux autres calculs de rentabilité après simulations Monte Carlo, soit la VAN sans le 1^{er} passage (rentabilité future) et les revenus nets du premier passage, en dollars par hectare et en dollars par mètre cube.

Tableau 11 : VAN sans le premier passage, en dollar par mètre cube (\$/m³), avec simulation Monte Carlo, pour les traitements de CPRS (rotation de 100 ans), de coupes de jardinage adaptées et avec sentiers permanents (rotation de 70 ans).

	CPRS	CJ perm (70)	CJ adaptée (70)
Moyenne	0,05	1,51	8,10
Min	-0,82	-2,07	-9,79
Max	0,96	5,54	28,08
Écart-type	0,34	1,41	7,05

Tableau 12 : VAN sans le premier passage, en dollar par hectare (\$/ha), avec simulation Monte Carlo, pour les traitements de CPRS (rotation de 100 ans), de coupes de jardinage adaptées et avec sentiers permanents (rotation de 70 ans).

	CPRS	CJ perm (70)	CJ adaptée (70)
Moyenne	5,87	75,65	488,38
Min	-88,33	-98,50	-514,32
Max	102,46	297,40	1781,99
Écart-type	36,07	70,83	409,72

VAN sans le 1^{er} passage : Concernant les VAN futures, aux tableaux 11 et 12, les mêmes constatations que celles observées sans les simulations (section 5.2), peuvent être faites. En ce sens, ces VAN futures sont les plus faibles pour les CPRS en dollars par hectare et en dollars par mètre cube. Cette VAN est d'ailleurs à peine supérieure à 0 dans le cas des dollars par mètre cube. Les valeurs maximales espérées en CPRS sont également les plus faibles. Par contre, les valeurs minimales les moins négatives pouvant être atteintes sont en CPRS.

Les meilleures VAN sont obtenues pour les coupes de jardinage adaptées, mais rappelons que les flux monétaires sont engendrés à chaque 35 ans, puisque à chaque 35 ans, la moitié du peuplement est traitée (donc une même moitié est traitée aux 70 ans). Les valeurs minimums les plus faibles sont cependant aussi obtenues en coupes de jardinage adaptées, qui ont aussi les valeurs maximales les plus élevées. Le rendement des coupes de jardinage avec sentiers permanents se situe entre ceux des CPRS et ceux des coupes de jardinage adaptées.

Sur la base des VAN futures, les coupes de jardinage adaptées sont le meilleur choix économique, et les CPRS représentent le moins bon choix.

Tableau 13 : Revenus nets du 1^{er} passage seulement, en dollar par mètre cube (\$/m³), avec simulation Monte Carlo, pour les traitements de CPRS (rotation 100 ans), de coupes de jardinage adaptées et avec sentiers permanents (rotation 70 ans).

	CPRS	CJ perm (70)	CJ adaptée (70)
Moyenne	32,47	24,13	27,82
Min	-18,69	-29,22	-25,76
Max	85,80	83,65	87,66
Écart-type	20,03	20,96	21,11

Tableau 14 : Revenus nets du 1^{er} passage seulement, en dollar par hectare (\$/ha), avec simulation Monte Carlo, pour les traitements de CPRS (rotation 100 ans), de coupes de jardinage adaptées et avec sentiers permanents (rotation 70 ans).

	CPRS	CJ perm (70)	CJ adaptée (70)
Moyenne	4829,05	1535,11	1739,44
Min	-2743,28	-1743,81	-1518,39
Max	12817,03	5710,42	5967,59
Écart-type	2985,75	1339,33	1330,30

Revenus nets 1^{er} passage : Les tableaux 13 et 14 indiquent les résultats des revenus nets du premier passage seulement, suite aux simulations Monte Carlo. En dollars par mètre cube et en dollars par hectare, les CPRS ont les meilleures performances économiques, suivies des coupes de jardinage adaptées et des coupes de jardinages avec sentiers permanents. On peut aussi noter qu'en dollar par mètre cube, les coupes de jardinages adaptées ont le maximum le plus élevé.

Sur la base des revenus nets du premier passage seulement, les CPRS sont le meilleur choix économique. Les coupes de jardinage adaptées sont le meilleur choix entre les deux types de coupes de jardinage, considérant la valeur moyenne la plus élevée, les valeurs minimums les moins faibles et les valeurs maximums les plus élevées.

Il est difficile de conclure quel traitement devrait être privilégié d'un point de vue strictement économique. Globalement, les mêmes observations générales que celles obtenues à la section 5.2, sans simulations Monte Carlo, peuvent être constatées. En ce sens, les CPRS offrent les meilleurs revenus nets au premier passage, et ces revenus nets sont responsables en très grande partie des résultats des VAN globales pour les CPRS, les revenus futurs étant considérablement moins intéressants. Les VAN futures avantagent les coupes de jardinage, particulièrement les coupes de

jardinage adaptées. Les coupes de jardinage adaptées, qui sont une modification des coupe de jardinage avec sentiers temporaires, semblent plus intéressantes économiquement que la variante avec sentiers permanents, ce qui a aussi été observé dans Liu et al. (2007) et Ruel et al. (2007).

Selon McCarthy et Weetman (2006), les méthodes classiques de jardinage sont réalisables dans les forêts résineuses irrégulières, mais le faible taux de croissance, les coûts de récolte élevés, les faibles volumes initiaux, et la proportion élevée de copeaux produite, les rendent peu applicables et attirantes d'un point de vue économique. Ce constat amène à développer des méthodes flexibles et mieux adaptées, pour contrôler ces éléments (Ruel et al. 2007). Les coupes de jardinage évaluées dans cette étude sont de telles méthodes, et les rentabilités observées au tableau 8 (sans simulation Monte Carlo), et aux tableaux 9 à 14 (avec simulations Monte Carlo), montrent que les coupes de jardinage adaptées (modification de la variante avec sentiers temporaires) et avec sentiers permanents ont un potentiel économique intéressant (Liu et al. 2007, Ruel et al. 2007), puisque les VAN moyennes sont toujours positives, autant en dollars par mètre cube qu'en dollars par hectare.

Bien qu'il n'existe que très peu de données économiques sur les coupes partielles en forêts résineuses irrégulières (Liu et al. 2007, Price et Price 2006, Andreassen et Øyen 2002, Knoke et Plusczyk 2001), les résultats que nous avons obtenus sur la rentabilité des coupes de jardinage, concordent avec Bruciamacchie et De Turckheim (2005), qui mentionnent que l'aspect économique de l'aménagement irrégulier des forêts résineuses va de pair avec l'écologie, et que le respect des exigences écologiques est la condition d'assurer la rentabilité des forêts, et que celle-ci peut même être augmentée par un aménagement adapté. Il est cependant difficile, à partir des quelques études disponibles actuellement sur l'aménagement inéquienne (ou irrégulier) et sur la réalisation de coupes partielles, de conclure sur la supériorité économique d'un tel aménagement en forêt résineuse (Price et Price 2006, Hanewinkel 2002, Andreassen et Øyen 2002, Hanewinkel 2001, Knoke et Plusczyk 2001, Howard et Temesgen 1997).

5.3.1 Analyse de sensibilité

Les analyses de sensibilité que nous avons réalisées permettent de quantifier le niveau de sensibilité des différentes VAN (*outputs*), avec les nombreuses variables (*inputs*), utilisées dans

l'analyse. Le logiciel *@risk* utilisé pour effectuer les simulations, utilise la méthode des régressions par étapes (*Multivariate Stepwise Regression*) pour déterminer le niveau de sensibilité entre les *outputs* et les *inputs*. Considérant le nombre élevé de variables impliquées dans l'analyse, cette méthode est la plus adéquate. Les coefficients de régression utilisés ont été normalisés pour chacune des variables. Une valeur de 0 indique qu'il n'y a pas de relation significative entre la variable et la VAN. Une valeur de -1 ou 1 indique une relation parfaite positive ou négative entre les deux.

Nous présentons dans cette section les éléments critiques pour chacun des traitements, selon les dollars par hectare et les dollars par mètre cube, mais uniquement pour les VAN globales. Le classement des variables a été établi selon les dollars par hectare. La dernière colonne du tableau indique la position des variables selon les dollars par mètre cube. On remarque que le classement est généralement le même, mais qu'il y a néanmoins quelques différences. Notons aussi, que lorsque le signe du coefficient de régression est positif, nous avons intérêt à augmenter la valeur de la variable concernée, pour augmenter la VAN. Lorsque la valeur est négative, il faut réduire la valeur de la variable concernée, pour augmenter la VAN.

Tableau 15 : Éléments critiques pour les CPRS, suite à l'analyse de sensibilité. La sensibilité de chaque variable sur la VAN est déterminée par un coefficient de régression (Coef. Rég.). Les variables sont placées en ordre d'importance, sur la base des VAN en dollars par hectare mais la dernière colonne indique le classement des variables sur la base des dollars par mètre cube.

Variables	Coef. Rég.		
	\$/ha	\$/m ³	
Prix du sciage	0,989	0,992	1
Prix des copeaux	0,098	0,099	2
Coût de transport	-0,051	-0,051	3
Variation # tiges initiales dans la classe de 23 cm (DHP)	0,046	0,019	5
Ratio de chemin (ha/km) CPRS	0,028	0,028	4
Variation # tiges initiales dans la classe de 19 cm (DHP)	0,026	0,005	16
Variation # tiges initiales dans la classe de 27 cm (DHP)	0,026	0,014	9
Coût des chemins de récolte (été)	-0,018	-0,018	6
Ratio du volume par employé au camp (m ³ /employé)	0,018	0,018	6
Variation proportion de sapin baumier (coupes jardinages et 1 ^{er} passage en CPRS)	-0,016	-0,014	9
Variation # tiges initiales dans la classe de 31 cm (DHP)	0,014	0,008	12
Coût du débardage	-0,01	-0,01	11

Variation # tiges initiales dans la classe de 11 cm (DHP)	-0,009	-0,016	8
Coût des chemins d'accès	-0,007	-0,007	14
Variation # tiges initiales dans la classe de 15 cm (DHP)	0,007	-0,008	12
Coût de la supervision	-0,005	-0,005	16
Pourcentage de chemin de récolte d'été	-0,005	-0,006	15
Variation # tiges initiales dans la classe de 35 cm (DHP)	0,005	0,003	20
Coût des chemins de récolte (hiver)	-0,004	-0,004	19
Coût d'entretien des chemins de récolte	-0,004	-0,005	16
Coût du chargement	-0,003	-0,003	20
Coût déplacement de la machinerie	-0,002	-0,002	22
Coût du déchargement	-0,002	-0,002	22
Coût quotidien d'un employé au camp	-0,002	-0,002	22
Pourcentage de déplacement autotracté	-0,001	0	27
Coût d'entretien des chemins d'accès	-0,001	-0,001	25
Pourcentage du coût de restauration vs construction (accès)	0,001	0	27
Prix des sciures	0,001	0,001	25
Pourcentage du coût de restauration vs construction (récolte)	0	0	27
Pourcentage du cycle transport dans les chemins de récolte	0	0	27

Tableau 16 : Éléments critiques pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents, suite à l'analyse de sensibilité. La sensibilité de chaque variable sur la VAN est déterminée par un coefficient de régression (Coef. Rég.). Les variables sont placées en ordre d'importance, sur la base des VAN en dollars par hectare mais la dernière colonne indique le classement des variables sur la base des dollars par mètre cube. CJ : coupe de jardinage.

Variables	Coef Rég.		
	\$/ha	\$/m ³	
Prix du sciage	0,97	0,983	1
Variation du volume récolté par hectare en CJ	0,204	0,132	2
Prix des copeaux	0,088	0,09	3
Ratio de chemin (ha/km) CJ	0,063	0,065	4
Coût de transport	-0,052	-0,054	5
Coût des chemins de récolte (été)	-0,033	-0,033	6
Ratio du volume par employé au camp (m ³ /employé)	0,023	0,024	7
Coût additionnel pour la supervision en CJ	-0,022	-0,021	8
Variation du volume par tige récolté en CJ	0,017	0,017	9
Coût des chemins d'accès	-0,016	-0,016	10
Variation proportion de sapin baumier (coupes jardinages et 1 ^{er} passage en CPRS)	-0,014	-0,012	11
Pourcentage de chemin de récolte d'été	-0,011	-0,01	12
Coût d'entretien des chemins de récolte	-0,009	-0,009	15

Coût du débardage	-0,009	-0,01	12
Ratio de chemin (ha/km) CPRS	-0,009	-0,01	12
Pourcentage du cycle transport dans les chemins de récolte	-0,008	-0,009	15
Coût des chemins de récolte (hiver)	-0,007	-0,007	17
Proportion des sentiers permanents	0,007	0	34
Variation de la proportion du type 3	0,006	0,002	23
Coût de la supervision	-0,004	-0,003	21
Variation de la proportion du type 1	-0,004	-0,005	18
Variation # tiges initiales dans la classe de 11 cm (DHP)	-0,003	-0,002	23
Coût déplacement de la machinerie	-0,003	-0,002	23
Coût quotidien d'un employé au camp	-0,003	-0,003	21
Coût du chargement	-0,003	-0,004	20
Variation # tiges initiales dans la classe de 15 cm (DHP)	-0,003	-0,005	18
Variation # tiges initiales dans la classe de 23 cm (DHP)	0,003	0	34
Coût d'entretien des chemins d'accès	-0,002	-0,002	23
Variation # tiges initiales dans la classe de 31 cm (DHP)	0,002	0,001	30
Variation # tiges initiales dans la classe de 27 cm (DHP)	0,002	0,001	30
Pourcentage du coût de restauration vs construction (récolte)	-0,001	-0,001	30
Variation de la proportion du type 2	0	0	34
Prix des sciures	0	0	34
Coût du déchargement	0	0,001	30
Variation # tiges initiales dans la classe de 35 cm (DHP)	0	-0,002	23
Pourcentage du coût de restauration vs construction (accès)	0	-0,002	23
Variation # tiges initiales dans la classe de 19 cm (DHP)	0	-0,002	23

Tableau 17 : Éléments critiques pour les coupes de jardinage adaptées, suite à l'analyse de sensibilité. La sensibilité de chaque variable sur la VAN est déterminée par un coefficient de régression (Coef. Rég.). Les variables sont placées en ordre d'importance, sur la base des VAN en dollars par hectare mais la dernière colonne indique le classement des variables sur la base des dollars par mètre cube. CJ : coupe de jardinage.

Variables	Coef Rég.		
	\$/ha	\$/m ³	
Prix du sciage	0,967	0,983	1
Variation du volume récolté par hectare en CJ	0,216	0,134	2
Prix des copeaux	0,087	0,089	3
Ratio de chemin (ha/km) CJ	0,063	0,066	4
Coût de transport	-0,052	-0,054	5
Coût des chemins de récolte (été)	-0,033	-0,034	6
Coût additionnel pour la supervision en CJ	-0,022	-0,021	8
Ratio du volume par employé au camp (m ³ /employé)	0,022	0,023	7
Coût des chemins d'accès	-0,016	-0,016	9

Variation proportion de sapin baumier (coupes jardinages et 1 ^{er} passage en CPRS)	-0,014	-0,012	11
Variation du volume par tige récolté en CJ	0,014	0,015	10
Pourcentage de chemin de récolte d'été	-0,011	-0,01	12
Ratio de chemin (ha/km) CPRS	-0,009	-0,01	12
Coût du débardage	-0,009	-0,01	12
Coût d'entretien des chemins de récolte	-0,009	-0,009	15
Pourcentage du cycle transport dans les chemins de récolte	-0,008	-0,009	15
Coût des chemins de récolte (hiver)	-0,007	-0,008	17
Variation de la proportion du type 3	0,006	0,002	25
Variation de la proportion du type 1	-0,005	-0,002	25
Coût de la supervision	-0,004	-0,005	19
Variation # tiges initiales dans la classe de 19 cm (DHP)	-0,003	-0,003	20
Variation # tiges initiales dans la classe de 23 cm (DHP)	-0,003	-0,003	20
Variation # tiges initiales dans la classe de 15 cm (DHP)	-0,003	-0,003	20
Coût du chargement	-0,003	-0,003	20
Coût quotidien d'un employé au camp	-0,003	-0,002	25
Coût déplacement de la machinerie	-0,003	-0,002	25
Pourcentage du coût de restauration vs construction (accès)	-0,002	-0,001	34
Pourcentage du coût de restauration vs construction (récolte)	-0,002	-0,002	25
Variation # tiges initiales dans la classe de 27 cm (DHP)	-0,002	-0,002	25
Coût d'entretien des chemins d'accès	-0,002	-0,003	20
Variation # tiges initiales dans la classe de 11 cm (DHP)	-0,001	-0,002	25
Proportion de la zone d'abattage sélectif CJ adaptée	0	0,007	18
Coût du déchargement	0	-0,002	25
Variation de la proportion du type 2	0	-0,002	25
Prix des sciures	0	0,001	34
Variation # tiges initiales dans la classe de 35 cm (DHP)	0	0	37
Variation # tiges initiales dans la classe de 31 cm (DHP)	0	-0,001	34

Dans tous les cas, l'élément de loin le plus critique observé dans les tableaux 15 à 17, est celui du prix du sciage, la valeur du coefficient de régression de cet élément étant toujours près de 1 (relation presque parfaite). Un changement dans le prix du sciage engendre un changement presque similaire sur la VAN. Un prix de sciage qui augmente implique une VAN plus élevée, et inversement. Malheureusement, nous n'avons que très peu de contrôle sur le prix du sciage, et celui est très variable et incertain. Un gestionnaire aura cependant intérêt à porter attention à des éléments tels que : le volume récolté, la composition en essence, le volume par tige, et à tous autres éléments pouvant influencer le volume de sciage produit, puisque n'ayant pas de contrôle

sur le prix du sciage, nous pouvons cependant favoriser les éléments qui contribuent à augmenter le volume de sciage disponible. À cet égard, plus le volume par hectare est élevé, plus le volume pouvant être récolté sera élevé, ce qui favorisera directement la quantité de volume de sciage produit. De même, plus une tige est de grosse dimension, plus la proportion de son volume utilisable pour le sciage est élevée (Liu et al. 2007, Aubry et al. 1998), et la valeur d'un arbre est principalement fonction de sa taille (diamètre), puisque que celle-ci détermine la proportion de sciage (Liu et Zhang 2005b, Zhang et Chauret 2001). À défaut d'influencer le prix du sciage, ces différents éléments, et tous autres éléments qui pourraient favoriser la production de sciage auront un effet bénéfique sur les VAN. Hanewinkel (2002), indique que la supériorité économique des forêts aménagées sous un système inéquienne repose notamment sur une proportion de sciage plus élevée et une meilleure production de gros bois.

De la même manière, le prix des copeaux a aussi un impact important. Cet élément arrive en deuxième position parmi les éléments critiques des CPRS, et en troisième position pour les deux coupes de jardinage. Comme pour le prix du sciage, nous ne pouvons pas directement influencer les prix des copeaux. Un prix élevé est cependant souhaitable. Étant donné la sensibilité beaucoup plus élevée du prix du sciage (plus de 10 fois plus sensible que le prix des copeaux), il est beaucoup plus avantageux de produire plus de sciage, au détriment des copeaux. Néanmoins, toutes choses étant égales par ailleurs, pour le volume de copeaux produit, un prix élevé fera augmenter la VAN des traitements.

Le coefficient de régression du coût unitaire de transport est presque le même pour tous les traitements, et il est en troisième place pour les CPRS, et en cinquième place pour les coupes de jardinage. Le coût du transport du bois sur la Côte-Nord est le plus élevé au Québec (Comité de travail sur la transformation du bois sur la Côte-Nord 2007, Consultants JP Grenon inc. 2002). Bien que la sensibilité de cet élément ne soit pas réellement reliée aux traitements, il s'agit d'un des coûts d'opérations les plus élevés, et une réduction de ce coût serait bénéfique pour la VAN de tous les traitements.

Plusieurs éléments de coûts sont influencés à différents niveaux par la superficie. Parmi ces éléments, on retrouve : les chemins (construction, restauration, entretien), le transport, la supervision et l'opération des camps forestiers. Pour une superficie donnée, un volume récolté plus élevé permettra donc de faire diminuer tous ces éléments de coûts. À cet égard, le deuxième

élément étant le plus sensible pour les coupes de jardinage est celui du volume récolté par hectare. Le choix d'un peuplement ayant un volume initial élevé et les rendements de croissance des peuplements sont parmi les éléments qui peuvent influencer le volume récolté par hectare pour les coupes de jardinage. Le volume par tige a aussi un impact sur le volume récolté par hectare, puisque pour un nombre de tige égal, un volume par tige plus élevé permettra la récolte d'un volume plus élevé. Le pourcentage de récolte a aussi un impact sur le volume récolté, mais si ce pourcentage varie, les rotations optimales aussi peuvent varier. Un prélèvement plus fort retardera la prochaine récolte, et reportera à plus tard les prochains revenus. Ce taux de prélèvement doit permettre d'optimiser la rentabilité des opérations et de la biodiversité simultanément (Thorpe et Thomas 2007). Dans le dispositif expérimental et dans nos simulations, le taux de prélèvement est cependant constant.

Le ratio de chemin en fonction de la superficie (ha/km) est aussi un élément important. Cet élément est le quatrième plus sensible pour les coupes de jardinage, et le cinquième pour les CPRS. Le coût des chemins est un coût important, et il est directement relié à la superficie nécessaire, et par conséquent, au volume récolté par hectare. La capacité de traiter plus d'hectares de forêts par kilomètre de chemin permettrait de réduire l'impact du coût des chemins forestiers. Ce constat ne s'applique pas seulement à cette analyse, mais à tous les traitements sylvicoles. Les distances de débardage et le volume récolté par hectare (et implicitement le volume par hectare) sont des éléments qui peuvent faire varier ce ratio.

Concernant les CPRS, on remarque que les variations du nombre de tiges dans les différentes classes de grosseur sont plus importantes que pour les coupes de jardinage. Ceci peut s'expliquer par le fait que les coupes de jardinage ont une meilleure capacité à produire du bois de grosses dimensions. Cet élément n'est donc pas très sensible (coefficients de régression presque nul) pour les coupes de jardinage. Cependant, comme nous l'avons déjà vu, les CPRS ne permettront pas la production de gros bois dans le futur. Ces éléments deviennent donc relativement sensibles pour les CPRS. Des analyses financières sur la réalisation de travaux d'éducation ou de reboisement pourraient être réalisées. Ces travaux nécessitent un investissement initial, mais pourraient permettre d'augmenter la production de plus grosses tiges. Concernant cet élément, on sait implicitement que nous avons toujours intérêt à augmenter la production de grosses tiges, peu importe le traitement. Mais n'oublions pas que la sensibilité est relative à ce que nous avons

initialement. Ainsi, la production de tiges de 35 cm n'apparaît pas comme très sensible, parce qu'il n'y en avait que très peu au départ. Une variation estimée en pourcentage ne peut donc pas faire apparaître cet élément comme étant très sensible.

Le coût de construction des chemins de récolte d'été est en huitième position de sensibilité pour les CPRS, et en sixième pour les coupes de jardinage. Le coût de construction des chemins est important, et les classements de sensibilité nous montrent que l'impact de la proportion de chemin de récolte est plus importante que celle des chemins d'accès, et que l'impact de la proportion des chemins d'été est plus importante que celle des chemins d'hiver.

On sait que les coupes de jardinage nécessitent plus de chemins que les CPRS pour un même volume récolté. Conséquemment, pour chaque kilomètre de chemin en coupe de jardinage, le volume de bois transité sera plus faible. Éventuellement, dans l'optimisation des coûts pour les coupes de jardinage, il pourrait arriver que des classes de chemins plus faibles soient utilisées, ce qui permettrait une économie au niveau du coût des chemins. Évidemment, une classe inférieure de chemin permettrait une économie au niveau de la construction et de la restauration des chemins, mais ferait augmenter le coût de transport. Ces éléments, et plusieurs autres, seront précisés lorsque les coupes de jardinage seront réalisées dans un contexte opérationnel et à plus grande échelle. Il sera alors possible d'apporter des ajustements aux valeurs utilisées dans cette analyse financière.

La variable « ratio du volume par employé au camp ($m^3/employé$) », est fonction de la proportion d'employés requise au camp pour un certain volume, de sorte que si le camp est utilisé pour un volume plus important, la proportion d'employés requis au camp va diminuer. En fait, plus cette proportion est faible, meilleure sera la VAN. Selon les hypothèses obtenues des compagnies forestières, plus le volume annuel à être récolté est élevé, plus faible est cette proportion d'employés. Cet élément a essentiellement servi à compléter l'équation pour le coût d'opération des camps, et n'est pas d'un grand intérêt dans l'analyse de sensibilité.

Les autres éléments de l'analyse de sensibilité ne seront pas décrits, car ils ne sont pas très sensibles. Notons cependant que la variation du volume par tige joue un rôle important, car elle influence plusieurs autres éléments, par exemple : le volume récolté, le coût d'abattage et le coût de la transformation (Liu et al. 2007), qui sont eux-mêmes des éléments importants. Or, nous

n'avons pas posé de distribution de probabilité au tarif de cubage utilisé, faute d'hypothèses raisonnables. La seule variation appliquée au volume par tige est celle observée dans le dispositif expérimental. De plus, les peuplements du dispositif expérimental montrent peu de variabilité au niveau du volume par tige, et par conséquent, cette variable est peu sensible. Pour ces raisons, la variation du volume par tige n'apparaît pas comme étant sensible. Ainsi, malgré les coefficients de régression observés dans l'analyse de sensibilité, il faut constamment garder à l'esprit comment chaque variable a été mesurée dans l'analyse de sensibilité. Ainsi, on sait que le volume par tige est un élément très important pour le rendement en sciage et la valeur des produits (Liu et al. 2007, Zhang et Liu 2006, Meek et Cormier 2004, Zhang et Chauret 2001, Aubry et al. 1998), peu importe le traitement, considérant tous les éléments qui sont directement ou indirectement influencés par cette variable, de sorte que dans le cadre d'un déploiement à grande échelle des coupes de jardinages, la sensibilité de cette variable sera certainement plus élevée.

5.3.2 Analyse de probabilité

5.3.2.1 VAN

Le logiciel *@risk* permet aussi d'effectuer des analyses de probabilités. Pour chaque *input* (variables) ou *output* (VAN), il est possible de calculer la probabilité reliée à une certaine valeur ou, à l'inverse, de connaître la valeur associée à une certaine probabilité. Par exemple, quelle est la valeur pour laquelle la probabilité d'occurrence est de 75% ? Ou quelle est la probabilité d'obtenir une valeur de 0 \$? Une quantité illimitée d'information peut être obtenue par ces analyses de probabilités. Dans cette étude, nous nous sommes restreints à quelques éléments qui nous semblent les plus pertinents.

Tableau 18 : Comparaison entre les trois traitements (CPRS, coupe de jardinage avec sentier permanents (CJ perm) et coupe de jardinage adaptée), de certaines probabilités, basées sur les valeurs actuelles nettes (VAN) en dollars par hectare.

Probabilité d'obtenir :	Probabilités (%)		
	CPRS	CJ perm	CJ adaptée
VAN positive (> à 0)	94,9%	86,6%	89,6%
VAN supérieure à la moyenne des CPRS	48,0%	1,0%	8,0%
VAN supérieure à la moyenne des CJ perm	84,6%	47,9%	61,7%
VAN supérieure à la moyenne des CJ adaptée	79,2%	32,6%	48,0%
VAN inférieure à -50 \$/ha	4,6%	11,8%	9,4%

VAN inférieure à -500 \$/ha	3,0%	6,4%	5,4%
VAN supérieure à 500 \$/ha	92,4%	77,1%	82,9%
VAN supérieure à 2000 \$/ha	81,1%	38,2%	52,9%
VAN supérieure à 3000 \$/ha	71,1%	18,1%	32,4%
VAN supérieure à 5000 \$/ha	45,6%	0,6%	6,7%
VAN supérieure à 7500 \$/ha	20,6%	0,0%	0,0%
VAN supérieure à 10 000 \$/ha	5,3%	0,0%	0,0%

Tableau 19 : Comparaison entre les trois traitements (CPRS, coupe de jardinage avec sentier permanents (CJ perm) et coupe de jardinage adaptée), de certaines probabilités, basées sur les valeurs actuelles nettes (VAN) en dollars par mètre cube.

Probabilité d'obtenir :	Probabilités (%)		
	CPRS	CJ perm	CJ adaptée
VAN positive (> à 0)	94,8%	86,6%	89,4%
VAN supérieure à la moyenne des CPRS	48,1%	37,3%	52,6%
VAN supérieure à la moyenne des CJ perm	61,2%	48,4%	62,3%
VAN supérieure à la moyenne des CJ adaptée	42,2%	32,3%	48,2%
VAN inférieure à -5 \$/m ³	2,3%	9,0%	7,5%
VAN inférieure à -10 \$/m ³	0,6%	5,4%	4,8%
VAN supérieure à 10 \$/m ³	85,4%	74,2%	80,9%
VAN supérieure à 50 \$/m ³	21,2%	15,8%	31,1%
VAN supérieure à 80 \$/m ³	0,4%	0,2%	7,1%

Les tableaux 18 et 19 indiquent que les probabilités d'obtenir des VAN positives (supérieures à 0), sont très élevées pour tous les traitements, et ce selon les dollars par hectare et les dollars par mètre cube. Cette probabilité est toujours supérieure à 86,6 %. La probabilité la plus élevée est obtenue par les CPRS, suivi par les coupes de jardinage adaptées, et enfin par les coupes de jardinage avec sentiers permanents.

Dans les deux tableaux, nous retrouvons les comparaisons des moyennes des traitements. D'abord, quelle est la probabilité que la VAN obtenue pour un traitement, soit supérieure à la moyenne des CPRS qui est de 4834,92 \$/ha? Nous pouvons rappeler que normalement, la probabilité d'obtenir une VAN supérieure à 4834,92 \$/ha dans le cas des CPRS, devrait être intuitivement de 50%. Mais comme il a déjà été mentionné, la densité de probabilité des VAN n'est pas symétrique, puisque deux des plus importantes variables (prix du sciage et des copeaux), ne sont pas symétriques. Sur la base des dollars par hectare, il n'y a que 1,0 % de

chance que la VAN des coupes de jardinage avec sentiers permanents soit supérieure à celle des CPRS. Cette probabilité est de 8,0 % dans le cas des coupes de jardinage adaptées. Sur cette base de comparaison, il est donc très probable que les CPRS soient toujours plus rentables. En considérant plutôt les dollars par mètre cube, dont la moyenne des CPRS est de 32,53 \$/m³, on constate qu'il y a plus de 37,3 % des chances que les coupes de jardinage avec sentiers permanents aient une VAN supérieure à celle des CPRS. Cette probabilité est de 52,6 % pour les coupes de jardinage adaptées. En termes de probabilité, il y a donc légèrement plus de chance que la VAN des coupes de jardinage adaptées soit supérieure à celle des CPRS.

En comparaison avec la moyenne des coupes de jardinage avec sentiers permanents, on remarque qu'il y a 84,6 % des chances que les CPRS aient une VAN supérieure, sur la base des dollars par hectare. Cette probabilité est de 61,7 % pour les coupes de jardinage adaptées. En dollar par mètre cube, cette probabilité est pratiquement la même pour les CPRS et les coupes de jardinage adaptées (61,2 % et 62,3 % respectivement).

En comparant avec les coupes de jardinage adaptées, il y a près de 80 % de chances que les CPRS aient une VAN supérieure, et cette probabilité est de 32,6 % pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents, sur la base des dollars par hectare. En considérant plutôt les dollars par mètres cubes, ces probabilités ne sont que de 42,2 % pour les CPRS, et de 32,3 % pour les sentiers permanents.

Les deux éléments suivants de chaque tableau montrent les probabilités que les VAN offrent de mauvaises performances économiques. Pour les dollars par hectare, nous avons montré les probabilités que les VAN soient inférieures à -50 \$/ha et à -500 \$/ha. On remarque que les probabilités sont faibles pour tous les traitements. Les CPRS offrent le moins grand risque d'avoir des VAN inférieures à ces valeurs (4,6% et 3,0% respectivement), suivies par les coupes de jardinage adaptées (9,4% et 5,4% respectivement), et enfin, par les coupes de jardinage avec sentiers permanents (11,8% et 6,4% respectivement). En ce qui concerne la comparaison en dollars par mètre cube, les probabilités évaluées sont que les VAN soient inférieures à -5 \$/m³ et à -10 \$/m³. Le classement est le même, c'est-à-dire que les CPRS offrent le moins de possibilités que les VAN soient inférieures à ces deux valeurs (2,3% et 0,6% respectivement), suivies par les coupes de jardinage adaptées (7,5% et 4,8% respectivement) et par les coupes de jardinage avec sentiers permanents (9,0% et 5,4% respectivement).

Les éléments suivants montrent les probabilités que les VAN des traitements offrent des performances économiques supérieures à certaines valeurs. Concernant les dollars par hectare, le classement pour chacune de ces valeurs est toujours le même, soit les CPRS, suivies par les coupes de jardinage adaptées et par les coupes de jardinages avec sentiers permanents. Ce constat n'est pas le même pour les dollars par mètre cube. En effet, les probabilités d'obtenir des VAN élevées, par exemple supérieures à 50 \$/m³ ou à 80 \$/m³, sont plus élevées pour les coupes de jardinage adaptées (31,1% et 7,1% respectivement), suivies par les CPRS (21,2% et 0,4% respectivement), et par les coupes de jardinage avec sentiers permanents (15,8% et 0,2% respectivement).

Bien que de nombreuses autres probabilités puissent être évaluées, ces quelques exemples montrent que les trois traitements ont un potentiel intéressant, puisque les probabilités que leurs VAN soient positives sont élevées, et que les probabilités d'un échec économique important sont faibles, selon les hypothèses utilisées dans cette étude. Selon qu'on opte pour une comparaison en dollars par hectare ou en dollars par mètres cubes, les CPRS ou les coupes de jardinage adaptées, offrent les meilleures performances économiques.

5.3.2.2 VAN sans le 1^{er} passage et revenus nets au premier passage

Les tableaux suivants montrent les résultats des analyses de probabilités, pour les deux autres calculs, soit les VAN sans le premier passage (rentabilité future), et les revenus nets du premier passage seulement.

Tableau 20 : Comparaison entre les trois traitements (CPRS, coupe de jardinage avec sentier permanents (CJ perm) et coupe de jardinage adaptée), de certaines probabilités, basées sur les valeurs actuelles nettes (VAN) sans le premier passage, en dollars par hectare.

Probabilité d'obtenir :	Probabilités (%)		
	CPRS	CJ perm	CJ adaptée
VAN positive (> à 0)	54,2%	84,9%	87,6%
VAN supérieure à la moyenne des CPRS	48,2%	83,8%	86,5%
VAN supérieure à la moyenne des CJ perm	0,0%	48,4%	81,3%
VAN supérieure à la moyenne des CJ adaptée	0,0%	0,0%	48,3%
VAN inférieure à -20 \$/ha	25,4%	9,3%	11,5%
VAN inférieure à -50 \$/ha	5,9%	2,8%	10,0%
VAN supérieure à 20 \$/ha	34,5%	76,8%	86,6%
VAN supérieure à 50 \$/ha	13,0%	62,1%	84,9%

VAN supérieure à 100 \$/ha	0,0%	35,8%	81,7%
VAN supérieure à 1000 \$/ha	0,0%	0,0%	12,5%

Tableau 21 : Comparaison entre les trois traitements (CPRS, coupe de jardinage avec sentier permanents (CJ perm) et coupe de jardinage adaptée), de certaines probabilités, basées sur les valeurs actuelles nettes (VAN) sans le premier passage, en dollars par mètre cube.

Probabilité d'obtenir :	Probabilités (%)		
	CPRS	CJ perm	CJ adaptée
VAN positive (> à 0)	54,2%	84,9%	86,6%
VAN supérieure à la moyenne des CPRS	48,2%	82,7%	87,3%
VAN supérieure à la moyenne des CJ perm	2,7%	48,1%	83,2%
VAN supérieure à la moyenne des CJ adaptée	0,0%	0,0%	47,9%
VAN inférieure à -1 \$/m ³	0,0%	3,0%	10,4%
VAN supérieure à 1 \$/m ³	0,0%	62,3%	83,3%
VAN supérieure à 2 \$/m ³	0,0%	35,8%	79,4%
VAN supérieure à 5 \$/m ³	0,0%	0,2%	65,1%
VAN supérieure à 20 \$/m ³	0,0%	0,0%	5,4%

Tableau 22 : Comparaison entre les trois traitements (CPRS, coupe de jardinage avec sentier permanents (CJ perm) et coupe de jardinage adaptée), de certaines probabilités, basées sur les revenus nets du premier passage, en dollars par hectare.

Probabilité d'obtenir :	Probabilités (%)		
	CPRS	CJ perm	CJ adaptée
Revenus nets positifs (> à 0)	95,2%	86,7%	90,0%
Revenus nets supérieurs à la moyenne des CPRS	48,0%	0,4%	0,9%
Revenus nets supérieurs à la moyenne des CJ perm	85,4%	47,9%	53,7%
Revenus nets supérieurs à la moyenne des CJ adaptée	83,6%	42,4%	48,0%
Revenus nets inférieurs à -250 \$/ha	3,8%	9,6%	6,4%
Revenus nets inférieurs à -500 \$/ha	2,8%	6,1%	3,8%
Revenus nets supérieurs à 250 \$/ha	94,0%	82,1%	86,1%
Revenus nets supérieurs à 1500 \$/ha	85,7%	49,0%	54,8%
Revenus nets supérieurs à 3000 \$/ha	71,3%	15,6%	18,9%
Revenus nets supérieurs à 5000 \$/ha	45,9%	0,5%	0,5%
Revenus nets supérieurs à 10000 \$/ha	5,0%	0,0%	0,0%

Tableau 23 : Comparaison entre les trois traitements (CPRS, coupe de jardinage avec sentier permanents (CJ perm) et coupe de jardinage adaptée), de certaines probabilités, basées sur les revenus nets du premier passage, en dollars par mètre cube.

Probabilité d'obtenir :	Probabilités (%)		
	CPRS	CJ perm	CJ adaptée
Revenus nets positifs (> à 0)	95,2%	86,7%	90,0%
Revenus nets supérieurs à la moyenne des CPRS	48,1%	34,3%	40,7%
Revenus nets supérieurs à la moyenne des CJ perm	64,2%	48,3%	54,8%
Revenus nets supérieurs à la moyenne des CJ adaptée	56,9%	42,0%	48,3%
Revenus nets inférieurs à -5 \$/m ³	2,1%	8,6%	5,9%
Revenus nets supérieurs à 10 \$/m ³	85,8%	73,3%	78,8%
Revenus nets supérieurs à 30 \$/m ³	52,6%	38,4%	44,5%
Revenus nets supérieurs à 50 \$/m ³	20,8%	13,0%	16,4%
Revenus nets supérieurs à 70 \$/m ³	3,3%	1,0%	2,0%

Il est d'abord important de remarquer, qu'en faisant abstraction du premier passage, les probabilités que les VAN des coupes de jardinage soient positives sont semblables à celles des VAN incluant ce premier passage. La légère différence à la baisse vient du fait que les sentiers de débardage n'auront pas le même potentiel économique après la première intervention. Néanmoins, les probabilités sont dans un même ordre de grandeur, signifiant que les revenus actuels et futurs, pour les coupes de jardinage, devraient être constants. Pour les CPRS, le constat est différent. Comme nous l'avons déjà souligné, les CPRS n'auront pas les mêmes valeurs dendrométriques dans le futur, ce qui fait que le rendement économique sera aussi inférieur. À cet égard, on remarque que les probabilités que les VAN du futur (sans le premier passage) soient positives, ne sont que de 54,2 % pour les CPRS. À l'opposé, les probabilités que les revenus nets du premier passage soient positifs sont de 95,2 % pour les CPRS.

Étant donné que la rentabilité future des CPRS sera moins élevée, plusieurs autres éléments sont différents d'après les tableaux 20 à 23. Les probabilités que la VAN future (sans le 1^{er} passage) des deux coupes de jardinage soit supérieure à celle des CPRS est supérieure à 82,7 %, que l'évaluation se fasse en dollar par hectare ou par mètre cube. Les probabilités que la VAN du futur des CPRS soit supérieure à celles des coupes de jardinage est de 0 %, sauf en comparaison avec les coupes de jardinage avec sentiers permanents, sur la base des dollars par hectare, où la probabilité n'est que de 2,7 %.

En ne considérant que le premier passage, les CPRS ont évidemment une meilleure performance en comparaison avec les coupes de jardinage. Sur la base des dollars par hectare, les probabilités que les revenus nets des coupes de jardinage soient supérieurs à la moyenne des CPRS sont inférieures à 1 %. Ces probabilités sont entre 34,3 % et 40,7 % sur la base des dollars par mètre cube. Les revenus nets des CPRS pour le premier passage, seront à plus de 83,6 % supérieurs aux moyennes des coupes de jardinage sur la base des dollars par hectare. En dollar par mètre cube, cette probabilité variera entre 56,9 % et 64,2 %.

Les autres éléments de ces tableaux montrent les probabilités des performances économiques des traitements pour certaines valeurs négatives et positives. L'évaluation de ces éléments montre encore une fois que, dans le futur, les coupes de jardinage auront de meilleures performances économiques que les CPRS, mais qu'au premier passage, les meilleures performances sont atteintes par les CPRS. Entre les deux types de coupe de jardinage, les coupes de jardinage adaptées ont de meilleurs résultats au premier passage et dans le futur, que les coupes de jardinage avec sentiers permanents.

5.3.3 Analyse de scénarios

Un autre type d'analyse qu'il est possible d'effectuer avec le logiciel *@risk*, consiste en l'analyse de scénarios. Les divers scénarios peuvent être appliqués aux *outputs*, c'est-à-dire aux VAN dans ce cas-ci. Les analyses de scénario permettent de déterminer quelles variables contribuent significativement à l'atteinte d'un objectif, par exemple de déterminer quelle(s) variable(s) contribuent significativement à l'obtention d'une VAN positive pour un traitement en particulier.

Encore une fois, une grande quantité d'information pourrait être présentée et discutée. Notons cependant que contrairement aux analyses de probabilités, pour lesquelles il est toujours possible de déterminer quelle valeur est reliée à une certaine probabilité, ce n'est pas nécessairement le cas pour tous les scénarios, considérant le grand nombre de variables et leurs nombreuses interactions. Lorsque le logiciel *@risk* n'identifie aucune variable significative pour un scénario donné, cela signifie que le scénario cible est en dehors de l'étendue des possibilités ou encore que la valeur de l'input ne s'écarte pas significativement de la moyenne de la distribution de probabilité pour cet input. Considérant les résultats déjà obtenus dans les autres types d'analyses,

et considérant que pour plusieurs scénarios, aucune variable, ou seulement la variable du prix du sciage a été jugée significative, nous ne présenterons qu'un seul scénario.

Il est évident, suite à nos analyses, que la variable ayant à elle seule potentiellement le plus d'influence sur les VAN, est celle du prix du sciage. À elle seule, cette variable peut dans certains cas, compenser pour l'ensemble des autres variables pour l'atteinte de certains objectifs. Parallèlement, cette variable a aussi été déclarée de loin la plus sensible par les analyses de sensibilité, avec un coefficient de régression de près de 1. Une variation dans le prix du sciage amène une variation presque aussi importante dans les VAN.

Les prochains tableaux indiquent les variables significativement importantes pour un scénario, soit celui d'obtenir des VAN négatives. Pour ce scénario, seul le prix du sciage est considéré par le logiciel *@risk* comme étant significativement important.

Tableau 24 : Valeur du prix du sciage (\$/Mmpm) impliquant significativement l'obtention d'une VAN négative, pour chaque traitement (CPRS, coupe de jardinage avec sentiers permanents (CJ perm) et adaptée), sur la base des dollars par hectare (\$/ha) et de dollars par mètre cube (\$/m³).

Variables significatives	(\$/ha)			(\$/m ³)		
	CPRS	CJ perm	CJ adaptée	CPRS	CJ perm	CJ adaptée
Prix du sciage (\$/Mmpm)	314,54	343,62	334,88	314,94	343,71	335,46

Le tableau 24 considère le scénario selon le calcul des VAN globales, en dollar par hectare et en dollar par mètre cube. Concernant d'abord les dollars par hectare, on remarque qu'un prix de sciage inférieur à 314,54 \$/Mmpm, augmentera de façon significative les chances que les CPRS aient une VAN négative. Ce prix de sciage est de 334,88 \$/Mmpm pour les coupes de jardinage adaptées, et de 343,62 \$/Mmpm pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents. En dollars par mètre cube, les prix de sciage requis sont pratiquement identiques à ceux obtenus en dollars par hectare.

Il est impossible de savoir quel sera le prix du sciage à moyen et à long terme, et celui-ci peut varier considérablement (Knoke et Wurm 2006, Brazee et Mendelsohn 1988). Considérant que cette analyse financière s'étend sur plus de 200 ans, une estimation de prix de bois futur serait laborieuse. Cependant, une analyse de scénario comme celle-ci permet de répondre efficacement à plusieurs interrogations. On ne peut pas savoir quel sera le prix dans le futur, mais pouvons-

nous nous attendre à ce que ce prix soit supérieur aux valeurs présentées dans ce tableau? Si dans le futur, un prix supérieur à 343,62 \$/Mpmp est obtenu en moyenne, alors tous les traitements ont aujourd'hui, une VAN positive. Notons que le prix moyen du sciage des 10 dernières années selon l'indice PRIBEC, en dollars constants de juillet 2008, est de 480,19 \$/Mpmp. Cette moyenne depuis janvier 2006 est cependant de 348,89 \$/Mpmp, et elle était inférieure à 300 \$/Mpmp (283,74\$/Mpmp) pour les 7 premiers mois de 2008.

Le tableau 25 représente les VAN sans le premier passage, et le tableau 26, les revenus nets du premier passage.

Tableau 25 : Valeur du prix du sciage (\$/Mpmp) impliquant significativement l'obtention d'une VAN sans le premier passage négative, pour chaque traitement (CPRS, coupe de jardinage avec sentiers permanents (CJ perm) et adaptée), sur la base des dollars par hectare (\$/ha) et de dollars par mètre cube (\$/m³).

Variables significatives	(\$/ha)			(\$/m ³)		
	CPRS	CJ perm	CJ adaptée	CPRS	CJ perm	CJ adaptée
Prix du sciage (\$/Mpmp)	407,56	348,18	340,76	407,56	348,18	343,62

Tableau 26 : Valeur du prix du sciage (\$/Mpmp) impliquant significativement l'obtention de revenus nets au premier passage négatifs, pour chaque traitement (CPRS, coupe de jardinage avec sentiers permanents (CJ perm) et adaptée), sur la base des dollars par hectare (\$/ha) et de dollars par mètre cube (\$/m³).

Variables significatives	(\$/ha)			(\$/m ³)		
	CPRS	CJ perm	CJ adaptée	CPRS	CJ perm	CJ adaptée
Prix du sciage (\$/Mpmp)	313,48	343,47	333,89	313,48	343,47	333,89

Les trois tableaux (24 à 26) présentés pour ce scénario, permettent encore une fois de distinguer que la rentabilité des CPRS repose en grande partie sur le premier passage, alors que la rentabilité des coupes de jardinage est beaucoup plus constante dans le temps. Dans les trois tableaux, le prix moyen de sciage requis pour que les VAN des coupes de jardinage soient négatives est passablement constant. Ce prix devra être légèrement plus élevé dans le futur, considérant la baisse de production de bois dans les sentiers de débardage. Pour les CPRS, le prix du sciage doit être d'au moins 313,48 \$/Mpmp lors du premier passage, mais devra être de 407,56 \$/Mpmp pour les passages futurs. Cette différence est considérable. De plus, ce prix « cible » sera alors beaucoup plus élevé que celui requis pour les coupes de jardinage.

5.4 Éléments de coûts

Les résultats et les analyses présentées dans les sections précédentes, découlent des simulations Monte Carlo effectués sur les VAN (*outputs*). Ces simulations et analyses peuvent aussi s'appliquer aux *inputs* (variables), représentées en grande partie par les éléments de coûts. Cependant, seuls les résultats des simulations sur les valeurs des éléments de coûts sont présentés, et il n'y a pas d'analyses supplémentaires. Les tableaux suivants ne considèrent que les éléments de coûts qui sont variables selon les passages et/ou selon les traitements. Certains autres coûts sont fixes, et ne sont donc pas influencés par le traitement et/ou le passage concerné. Contrairement aux VAN, qui ont été présentées en dollar par mètre cube et en dollar par hectare, dans le cas des coûts, seuls les dollars par mètre cube sont présentés.

Tableau 27 : Valeurs moyennes, minimums et maximums en dollars constants par mètre cube (\$/m³), obtenues suite à une simulation Monte Carlo, pour différents éléments de coûts, pour le traitement de CPRS.

Éléments de coûts	Valeurs (\$/m ³)		
	Minimum	Moyenne	Maximum
Construction chemin accès / An 0	0,99	1,52	2,39
Construction chemin récolte / An 0	1,72	3,05	5,07
Entretien chemin accès / An 0	0,08	0,14	0,24
Entretien chemin accès / An 100 et 200	0,11	0,20	0,34
Entretien chemin récolte / An 0	0,33	0,62	1,09
Entretien chemin récolte / An 100 et 200	0,46	0,86	1,53
Restauration chemin accès / An 100 et 200	1,24	2,01	3,06
Restauration chemin récolte / An 100 et 200	2,31	4,02	6,59
Abattage / An 0	10,48	10,97	11,55
Abattage / An 100 et 200	14,51	14,51	14,51
Débardage / An 0, 100 et 200	7,76	8,25	8,75
Supervision / An 0	2,15	2,40	2,65
Supervision / An 100 et 200	2,75	3,33	3,90
Déplacement machinerie / An 0, 100 et 200	0,58	0,68	0,78
Chargement / An 0, 100 et 200	1,15	1,30	1,45
Déchargement / An 0, 100 et 200	0,70	0,80	0,90
Transport / An 0	15,12	17,60	20,08
Transport / An 100 et 200	15,65	18,28	20,93
Camp forestier / An 0	1,53	2,12	3,00
Camp forestier / An 100 et 200	1,76	2,47	3,52
Coût transformation (usine) / An 0	34,82	35,39	36,06
Coût transformation (usine) / An 100 et 200	45,56	45,56	45,56

Tableau 28 : Valeurs moyennes, minimums et maximums en dollars constants par mètre cube (\$/m³), obtenues suite à une simulation Monte Carlo, pour différents éléments de coûts, pour le traitement de coupe de jardinage avec sentiers permanents.

Éléments de coûts	Valeurs (\$/m ³)		
	Minimum	Moyenne	Maximum
Construction chemin accès / An 0	2,16	3,60	6,04
Construction chemin récolte / An 0	2,75	5,81	11,43
Entretien chemin accès / An 0	0,17	0,34	0,63
Entretien chemin accès / An 70	0,22	0,43	0,77
Entretien chemin accès / An 140	0,22	0,43	0,77
Entretien chemin accès / An 210	0,22	0,42	0,75
Entretien chemin récolte / An 0	0,53	1,19	2,38
Entretien chemin récolte / An 70	0,70	1,50	2,86
Entretien chemin récolte / An 140	0,70	1,50	2,86
Entretien chemin récolte / An 210	0,68	1,46	2,79
Restauration chemin accès / An 70	2,56	4,32	7,30
Restauration chemin accès / An 140	2,57	4,33	7,31
Restauration chemin accès / An 210	2,49	4,22	7,12
Restauration chemin récolte / An 70	3,30	6,97	13,22
Restauration chemin récolte / An 140	3,31	6,99	13,24
Restauration chemin récolte / An 210	3,22	6,81	12,89
Abattage / An 0	10,72	12,90	15,37
Abattage / An 70	10,56	12,56	15,13
Abattage / An 140	10,71	12,73	15,33
Abattage / An 210	10,71	12,74	15,38
Débardage / An 0, 70, 140 et 210	8,14	8,66	9,18
Supervision / An 0	3,28	4,40	5,54
Supervision / An 70	4,08	5,57	7,11
Supervision / An 140	4,08	5,58	7,13
Supervision / An 210	3,98	5,43	6,95
Déplacement machinerie / An 0, 70, 140 et 210	0,58	0,68	0,78
Chargement / An 0, 70, 140 et 210	1,15	1,30	1,45
Déchargement / An 0, 70, 140 et 210	0,70	0,80	0,90
Transport / An 0	15,81	19,35	23,44
Transport / An 70	16,37	20,28	24,82
Transport / An 140	16,37	20,29	24,82
Transport / An 210	16,30	20,17	24,63
Camp forestier / An 0	1,90	2,86	4,48
Camp forestier / An 70	2,07	3,14	4,99
Camp forestier / An 140	2,08	3,15	5,01
Camp forestier / An 210	2,05	3,10	4,94

Coût transformation (usine) / An 0	26,93	34,17	45,67
Coût transformation (usine) / An 70	25,50	30,38	36,95
Coût transformation (usine) / An 140	25,59	30,48	37,07
Coût transformation (usine) / An 210	25,66	30,60	37,29

Tableau 29 : Valeurs moyennes, minimums et maximums en dollars constants par mètre cube (\$/m³), obtenues suite à une simulation Monte Carlo, pour différents éléments de coûts, pour le traitement de coupe de jardinage adaptée.

Éléments de coûts	Valeurs (\$/m ³)		
	Minimum	Moyenne	Maximum
Construction chemin accès / An 0	2,26	3,66	6,04
Construction chemin récolte / An 0	3,01	5,90	11,21
Entretien chemin accès / An 0 et 35	0,19	0,35	0,64
Entretien chemin accès / An 70 et 105	0,27	0,50	0,91
Entretien chemin accès / An 140 et 175	0,26	0,48	0,87
Entretien chemin accès / An 210	0,25	0,47	0,81
Entretien chemin récolte / An 0 et 35	0,52	1,21	2,37
Entretien chemin récolte / An 70 et 105	0,79	1,76	3,32
Entretien chemin récolte / An 140 et 175	0,75	1,67	3,17
Entretien chemin récolte / An 210	0,80	1,63	2,90
Restauration chemin accès / An 35	2,15	3,47	5,83
Restauration chemin accès / An 70 et 105	3,13	5,06	8,29
Restauration chemin accès / An 140 et 175	2,98	4,82	7,91
Restauration chemin accès / An 210	3,00	4,71	7,44
Restauration chemin récolte / An 35	2,90	5,61	10,80
Restauration chemin récolte / An 70 et 105	4,25	8,17	15,31
Restauration chemin récolte / An 140 et 175	4,05	7,78	14,57
Restauration chemin récolte / An 210	4,13	7,60	13,70
Abattage / An 0 et 35	7,76	9,89	11,94
Abattage / An 70 et 105	9,37	10,63	12,62
Abattage / An 140 et 175	9,31	10,55	12,54
Abattage / An 210	8,58	10,50	13,14
Débardage / An 0 à 210	8,14	8,66	9,18
Supervision / An 0 et 35	3,28	4,40	5,52
Supervision / An 70 et 105	4,66	6,42	8,26
Supervision / An 140 et 175	4,44	6,11	7,85
Supervision / An 210	3,87	5,99	8,38
Déplacement machinerie / An 0 à 210	0,58	0,68	0,78
Chargement / An 0 à 210	1,15	1,30	1,45
Déchargement / An 0 à 210	0,70	0,80	0,90
Transport / An 0 et 35	15,83	19,41	24,31

Transport / An 70 et 105	16,75	21,04	27,23
Transport / An 140 et 175	16,64	20,79	26,76
Transport / An 210	16,76	20,68	26,27
Camp forestier / An 0 et 35	1,82	2,77	4,46
Camp forestier / An 70 et 105	2,13	3,33	5,50
Camp forestier / An 140 et 175	2,07	3,24	5,34
Camp forestier / An 210	2,06	3,20	5,06
Coût transformation (usine) / An 0 et 35	26,57	33,89	45,10
Coût transformation (usine) / An 70 et 105	36,18	36,90	37,79
Coût transformation (usine) / An 140 et 175	36,05	36,74	37,59
Coût transformation (usine) / An 210	34,06	36,61	39,25

Les tableaux 27 à 29 permettent de constater que chacun des éléments de coûts peut varier passablement. Évidemment, un gestionnaire aura intérêt à optimiser les opérations forestières, de telle sorte de se situer le plus près possible des valeurs minimums, pour diminuer les coûts d'intervention, et ainsi en augmenter la rentabilité. Évidemment, il existe plusieurs interactions entre les variables, et plusieurs contraintes, qui font qu'il est peu probable de réduire tous les éléments de coûts à leur valeur minimum. Par exemple, on pourrait augmenter la proportion de chemin d'hiver pour les coupes de jardinage, ce qui en réduirait les coûts de chemin. Mais à l'inverse, il faudrait compenser en faisant plus de chemin d'été ailleurs, ce qui biaise les comparaisons. Aussi, une augmentation totale des chemins d'hiver, implique qu'il faut beaucoup d'entrepreneurs de chemins durant l'hiver, mais peu durant l'été. Ce serait la même chose pour la disponibilité des camions forestiers, par exemple, c'est-à-dire qu'il faudrait plusieurs camions l'hiver, mais peu l'été, ce qui est peu réaliste. Ces quelques exemples montrent que l'optimisation des coûts se fera graduellement, mais qu'il est peu envisageable d'obtenir toutes les valeurs minimums des éléments de coûts présentés ci-haut.

Les tableaux montrent aussi que le coût le plus élevé est celui de la transformation. Ce coût est principalement influencé par le volume par tige (Liu et al. 2007, Ruel et al. 2007, Zhang et Liu 2006, Zhang et Chauret 2001). Sur ce point, nous avons déjà mentionné que le volume par tige des CPRS futures sera plus faible que celui d'aujourd'hui. Cela fait en sorte que le coût de la transformation pour les prochaines CPRS, passera d'une moyenne de 35,39 \$/m³, à une moyenne de 45,56 \$/m³, soit une augmentation de plus de 10 \$/m³. Cette diminution du volume par tige entrainera aussi une augmentation du coût de la phase d'abattage de 3,54 \$/m³ en moyenne pour

les CPRS. La baisse du volume à l'hectare, et par conséquent le volume récolté à l'hectare, dans le cas des CPRS, amènera aussi une hausse constante des coûts de restauration et d'entretien des chemins. Les coûts de supervision, de transport et d'opération des camps forestiers, vont aussi augmenter.

Considérant le territoire de la Côte-Nord, des coûts comme celui du transport seront difficiles à réduire. Mais d'autres coûts pourraient diminuer avec le temps et l'expérience, comme le coût d'abattage et le besoin en supervision, qui sont importants en coupe de jardinage (Ruel et al. 2007). En plus de l'expérience qui pourrait réduire le coût de l'abattage et les coûts de supervision, en plus d'augmenter la qualité des travaux, il est possible qu'éventuellement, des machines mieux adaptées aux coupes partielles soient utilisées.

À l'inverse des CPRS, les coupes de jardinage dans le futur devraient avoir des caractéristiques semblables à celles des peuplements initiaux, de sorte que les coûts et les revenus devraient être constants. Les légères hausses de coûts observées sont reliées à la perte de volume récolté et de volume par tige dans les sentiers de débardage. Bien que les tableaux concernant les passages futurs ne soient pas présentés, il a été constaté que, comme dans le cas de la rentabilité, les valeurs des différents éléments de coût pour les coupes de jardinage seront relativement stables dans le temps, comparativement à ceux des CPRS.

5.5 Utilisation d'un taux d'actualisation dégressif

Comme mentionné à la section 4.3.1.1., nous avons réalisé une simulation Monte Carlo en utilisant des taux d'actualisation dégressifs, tel que proposé par Weitzman (2001) pour les projets de très longue durée. Rappelons que selon Hepburn et Koundouri (2007), le taux d'actualisation dans les analyses économiques en foresterie devrait être dégressif, considérant l'incertitude de ce taux futur, les longues périodes d'évaluation et l'importance du taux d'actualisation et qu'un tel taux peut permettre de réduire les conflits intergénérationnels.

Ces taux dégressifs ont été adaptés aux projets sylvicoles réalisés dans un contexte Québécois (Lapointe 2008). Cette proposition de taux dégressif est présentée au tableau 7, de la section 4.3.1.1. L'utilisation de ces taux dégressifs permet de compenser pour l'aspect temporel de l'argent, en mettant plus d'importance aux résultats à long terme (Weitzman 2001).

Dans cette étude, nous allons présenter les résultats obtenus suite aux simulations Monte Carlo, avec l'utilisation des taux dégressifs présentés au tableau 7. Nous ne présenterons cependant pas d'analyse de probabilité, de sensibilité et de scénarios.

Tableau 30 : Résultats en dollars par mètre cube, des VAN obtenus suite à une simulation Monte Carlo avec l'utilisation de taux d'actualisation dégressifs. CJ perm : coupe de jardinage avec sentiers permanents.

	VAN (\$/m ³)		
	CPRS	CJ perm (70)	CJ adaptée (70)
Moyenne	35,56	54,25	59,54
Min	-59,98	-70,17	-94,66
Max	138,92	186,22	223,91
Écart-type	38,91	48,87	61,60

Tableau 31 : Résultats en dollars par hectare, des VAN obtenus suite à une simulation Monte Carlo avec l'utilisation de taux d'actualisation dégressifs. CJ perm : coupe de jardinage avec sentiers permanents.

	VAN (\$/ha)		
	CPRS	CJ perm (70)	CJ adaptée (70)
Moyenne	5157,23	3070,19	3344,74
Min	-7079,34	-3700,55	-4673,63
Max	18596,91	11572,05	13006,60
Écart-type	5000,39	2766,89	3276,63

Les résultats obtenus suite à l'utilisation de taux d'actualisation dégressifs sont très différents de ceux obtenus avec un taux unique de 4 %. D'abord, sur la base de comparaison en dollar par hectare (tableau 31), les trois traitements ont une VAN plus élevée. Dans le cas des CPRS, la nouvelle VAN est de 5 157,23 \$/ha en moyenne, alors qu'elle était de 4 834,92 \$/ha avec un taux de 4 %. Pour les CPRS, la différence n'est pas majeure, car comme nous l'avons mentionné à plusieurs reprises, la rentabilité des CPRS repose d'abord sur le premier passage, et ce premier passage, ayant lieu immédiatement, n'est pas influencé par l'aspect temporel de l'argent, et par conséquent par un taux d'actualisation. En dollar par mètre cube (tableau 30), l'observation est la même, puisque la VAN moyenne qui était de 32,53 \$/m³ est maintenant de 35,56 \$/m³.

À l'opposé, les coupes de jardinage auront des revenus et des coûts plutôt constants dans le temps, comme nous l'avons déjà observé. L'impact de l'actualisation est donc plus prononcé

pour les coupes de jardinage. Sur la base des dollars par hectare, les VAN sont beaucoup plus élevées maintenant qu'elles ne l'étaient suite à l'utilisation d'un taux d'actualisation unique. Pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents, la VAN obtenue est de 3 070,19 \$/ha, soit près du double de la VAN obtenue avec un taux unique de 4%, qui était de 1 610,76 \$/ha. En dollar par mètre cube, cette nouvelle VAN est plus du double que ce qu'elle était (54,25 \$/m³ par rapport à 25,64 \$/m³). En fait, l'impact est tellement grand que, sur la base des dollars par mètre cube, la VAN des coupes de jardinage avec sentiers permanents, suite à l'utilisation de taux dégressifs, est maintenant supérieure à celle des CPRS de 18,69 \$/m³. En dollar par hectare, la VAN des CPRS demeure cependant la plus élevée parmi les trois traitements, malgré que l'écart avec les coupes de jardinage se soit particulièrement réduit.

L'utilisation de taux d'actualisation dégressifs a aussi un impact très important sur les VAN des coupes de jardinage adaptées, bien que cet impact soit légèrement moins important que sur les coupes de jardinage avec sentiers permanents. Rappelons que les coupes de jardinage adaptées impliquent deux fois plus de passages que celles avec sentiers permanents, puisqu'à chaque passage, seulement la moitié du peuplement est traitée. Les revenus du deuxième passage sont donc à 35 ans plutôt qu'à 70 ans, comme c'est le cas pour les sentiers permanents. Cependant, en dollar par hectare, la VAN obtenue est de 3 344,74 \$/ha, comparativement à 2 227,83 \$/ha obtenue avec un taux d'actualisation unique de 4 %. Sur la base des dollars par mètre cube, la VAN est de 59,54 \$/m³, comparativement à 35,92 \$/m³. Les coupes de jardinage adaptées sont donc encore les plus rentables selon leur VAN, en considérant les dollars par mètre cube.

Dans les deux cas (dollar par hectare et dollar par mètre cube), l'écart avec les coupes de jardinage avec sentiers permanents a été réduit. En considérant les valeurs minimales et maximales pouvant être atteintes par les deux types de coupe de jardinage, ainsi que les écarts-types, on remarque que le potentiel de rendement économique est supérieur pour les coupes de jardinage adaptées, mais que le risque associé à ce rendement est plus grand. En ce sens, si un taux d'actualisation dégressif est utilisé, le choix entre les deux types de coupe de jardinage semble équivalent, d'un point de vue économique. Les deux coupes de jardinage sont plus rentables que les CPRS sur la base des dollars par mètre cube mais, bien que l'écart soit réduit sur la base des dollars par hectare, les CPRS sont encore plus rentables sur cette base, dû au premier passage.

Les tableaux suivants considèrent les VAN futures (sans le 1^{er} passage), présentées en dollar par hectare et en dollar par mètre cube, et avec l'utilisation de taux d'actualisation dégressifs. Les résultats des revenus nets du premier passage ne sont pas présentés, car l'actualisation n'ayant pas d'impact sur les revenus nets du premier passage, les résultats sont les mêmes, indépendamment du taux d'actualisation utilisé.

Tableau 32 : Résultats en dollars par hectare, des VAN futures (sans le 1^{er} passage), obtenus suite à une simulation Monte Carlo avec l'utilisation de taux d'actualisation dégressifs. CJ perm : coupe de jardinage avec sentiers permanents.

	CPRS	CJ perm (70)	CJ adaptée (70)
Moyenne	330,85	1536,33	1606,34
Min	-4718,36	-1994,12	-3215,08
Max	5746,41	5900,94	7164,46
Écart-type	2028,64	1434,41	1959,28

Tableau 33 : Résultats en dollars par mètre cube, des VAN futures (sans le 1^{er} passage), obtenus suite à une simulation Monte Carlo avec l'utilisation de taux d'actualisation dégressifs. CJ perm : coupe de jardinage avec sentiers permanents.

	CPRS	CJ perm (70)	CJ adaptée (70)
Moyenne	3,09	30,12	31,72
Min	-44,06	-41,43	-69,27
Max	53,65	105,88	140,86
Écart-type	18,94	28,02	40,64

Les VAN du futur sont plus élevées avec l'utilisation des taux dégressifs. Dans le futur, les VAN des coupes de jardinage seront supérieures à celle des CPRS. Dans les deux tableaux (32 et 33), les coupes de jardinage adaptées ont les meilleures VAN, mais l'écart par rapport à l'utilisation d'un taux d'actualisation unique de 4% a été considérablement réduit. De plus, en considérant les valeurs minimums et maximums, ainsi que les écart-types, on remarque que les coupes de jardinage avec sentiers permanents semblent moins risquées. Sur la base des VAN du futur, les deux variantes de coupes de jardinage semblent équivalentes, et représentent un meilleur choix, d'un point de vue économique, que les CPRS.

L'augmentation des VAN observée suite à l'utilisation d'un taux dégressif mesure en quelque sorte la valeur que la société accorde ou attribut à la conservation des caractéristiques des peuplements forestiers grâce aux coupes de jardinage, ce qui permet aux générations futures de

jouir de peuplements forestiers semblables à ceux que nous avons présentement. Dans ce contexte, les CPRS ne devraient pas être actualisées avec un taux dégressif si l'aspect de l'équité intergénérationnelle qui est de fournir des peuplements semblables aux nôtres aux générations futures n'est pas assuré par le traitement.

5.6 Hypothèse pour les crédits sylvicoles

L'estimation des crédits sylvicoles pour les traitements de coupes partielles est principalement une estimation « bord de chemin », de sorte que seuls les coûts inclus dans le peuplement, c'est-à-dire entre l'arbre et le chemin, sont considérés, l'aspect spatio-temporel des traitements n'étant pas impliqué. Ces coûts sont : les coûts d'abattage, de débardage et de supervision, et ce uniquement au premier passage. Nous avons déterminé les différences de coûts à l'hectare pour les deux types de jardinage, par rapport aux CPRS. Les résultats présentés (tableau 34) sont exprimés en dollar par hectare, avec les valeurs minimums et maximums déterminées, et sont issus d'une simulation Monte Carlo indépendante.

Tableau 34 : Différences en dollars par hectare (\$/ha), pour les deux traitements de coupes de jardinage, par rapport aux CPRS, pour les coûts « bord de chemins » (abattage, débardage et supervision).

	Valeurs en \$/ha			
	Minimum	Moyenne	Maximum	σ
CJ sentiers permanents	-27,14	275,74	638,59	109,9
CJ adaptées	-218,60	82,66	383,43	100,6

Selon les hypothèses de coûts posées dans cette étude, en moyenne, il en coûte 275,74 \$/ha de plus pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents par rapport aux CPRS, et 82,66 \$/ha de plus pour les coupes de jardinage adaptées. Considérant que, dans le futur, les CPRS seront moins rentables, ces valeurs ne sont valides que pour le premier passage. Ces moyennes pourraient potentiellement servir à établir les crédits sylvicoles pour chacun de ces traitements, mais devront être précisées lorsque davantage de données seront disponibles pour confirmer les hypothèses des trois coûts impliqués (abattage, débardage et supervision). En comparaison, dans Ruel et al. (2007), ces différences étaient de 290 \$/ha pour les sentiers permanents, et de 130 \$/ha pour les sentiers temporaires, ce qui est assez semblable à nos résultats, surtout pour la variante

avec sentiers permanents. Rappelons que, pour le premier passage, les coûts et les revenus des coupes de jardinage avec sentiers temporaires sont identiques à ceux des coupes de jardinage adaptées.

Nous pouvons aussi constater, à partir des valeurs minimums, qu'il pourrait arriver que les coûts « bord de chemin » soient plus bas pour les coupes de jardinage, que pour les CPRS. Suite à une analyse de probabilité effectuée dans le logiciel *@risk*, nous savons que cette possibilité est de seulement 0,1 % pour les coupes de jardinage avec sentiers permanents, mais de 21,7 % pour les coupes de jardinage adaptées.

6 Conclusion

Cette étude permet de constater qu'économiquement, la coupe de jardinage avec sentiers permanents et la coupe de jardinage adaptée semblent des alternatives envisageables à la CPRS à court terme, dans des peuplements semblables à ceux de notre dispositif expérimental. À partir des hypothèses et données de cette étude, les résultats de l'analyse financière indiquent que, dans le futur, les coupes de jardinage seront plus rentables que les CPRS, mais qu'elles seront moins rentables que les CPRS effectuées aujourd'hui. En fait, comme nous l'avons déterminé, les peuplements traités par les coupes de jardinage auront des caractéristiques dendrométriques relativement stables dans le temps, de sorte que les revenus et les coûts anticipés seront aussi relativement constants. Le scénario impliquant les coupes partielles est donc potentiellement plus avantageux à long terme, sur la base d'une évaluation en dollar par hectare, lorsque le point de vue de l'état est adopté. En fait, selon qu'on opte pour une comparaison en dollars par hectare ou en dollars par mètres cubes, les CPRS ou les coupes de jardinage adaptées offrent les meilleures performances économiques.

À l'opposé, selon les courbes de rendement utilisées, les peuplements traités en CPRS n'auront pas les mêmes caractéristiques lors de la prochaine intervention. Le volume par hectare, et incidemment le volume récoltable, ainsi que le volume par tige, seront nettement moins élevés. Les revenus seront donc plus bas dans le futur, car il y aura moins de bois récolté par unité de superficie. Comme le volume récolté sera plus faible, et les tiges de moindre dimension, la

majorité des éléments de coûts seront affectés à la hausse, particulièrement parce que la proportion de volume de sciage produite sera plus faible. La rentabilité future des CPRS sera donc beaucoup moins intéressante que celle d'aujourd'hui, toutes choses étant égales par ailleurs, selon nos hypothèses. Dans un contexte d'aménagement durable, où ce qui est laissé pour les générations futures a de plus en plus d'importance, les coupes de jardinage offrent un potentiel économique intéressant, selon nos hypothèses, particulièrement si un taux d'actualisation dégressif est utilisé, et qu'aucune perturbation naturelle induite par les traitements n'est considérée.

La taille du dispositif expérimental ne permet pas une extrapolation à grande échelle des résultats de la rentabilité économique des coupes de jardinage en forêt résineuse irrégulière. Dans le futur, une utilisation accrue des coupes de jardinage permettra de préciser les données économiques et de croissance utilisées et par conséquent, de préciser les VAN pour chacun des traitements. Notons aussi que les peuplements analysés ont été choisis a priori parce qu'ils avaient une structure irrégulière. Les résultats pourraient être différents si on applique ces traitements à des peuplements de structure ou d'IQS différent, ce qui serait probablement inévitable à l'échelle d'un chantier d'opération.

L'aménagement forestier écosystémique amènera de nouvelles façons d'aménager les forêts, notamment avec une augmentation de la proportion de coupes partielles, et l'utilisation de nouveaux traitements, comme ceux analysés dans cette étude. L'impact de ces nouvelles façons de faire devra être étudié sur différents éléments, dont sur l'aspect de la faisabilité économique. Dans un avenir rapproché, les analyses financières seront par conséquent probablement de plus en plus utilisées en aménagement forestier. Dans ces futures analyses financières, une approche par simulation Monte Carlo, comme celle utilisée dans cette étude, pourra être favorisée, car cette méthode permet de tenir compte de l'incertitude des nombreuses variables impliquées, de leurs interactions, et de leur impact sur la rentabilité. Les VAN obtenues sont ainsi associées à une distribution de probabilité, et deviennent plus pertinentes dans le choix de l'aménagement et des traitements à préconiser.

Bibliographie

Andreassen, K., Øyen, B.-H., 2002. Economic consequences of three silvicultural methods in uneven-aged mature coastal spruce forests of central Norway. *Forestry*, 75(4): 483-488.

Aubry, C.A., Adams, W.T., Fahey, T.D., 1998. Determination of relative economic weights for multitrait selection in coastal Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 28: 1164-1170.

Bergeron, Y., 2004. Is regulated even-aged management the right strategy for the Canadian boreal forest? *For. Chron.* 80(4): 458-462.

Bergeron, Y., Gauthier, S., Kafka, V., Lefort, P., Lesieur, D., 2001. Natural fire frequency for the eastern Canadian boreal forest: consequences for sustainable forestry. *Can. J. For. Res.* 31: 384-391.

Bouchard, M., Pothier, D., Gauthier, S., 2008. Fire return intervals and tree species succession in the North Shore region of eastern Quebec. *Can. J. For. Res.* 38: 1621-1633.

Boucher, D., De Grandpré, L., Gauthier, S., 2003. Développement d'un outil de classification de la structure des peuplements et comparaison de deux territoires de la pessière à mousses du Québec. *For. Chron.* 79(2): 318-328.

Boyle, P.P., 1977. Options: A Monte Carlo Approach. *Journal of Financial Economics*, 4: 323-338.

Braze, R., Mendelsohn, R., 1988. Timber Harvesting with Fluctuating Prices. *For. Sc.* 34(2): 359-372.

Brealey, R.A., Myers, S.C., Allen, F., 2006. *Principles of Corporate Finance ; Eight Edition.* McGraw-Hill/Irwin. New-York. 1028 p.

Bruciamacchie, M., De Turckheim, B., 2005. *La futaie irrégulière : Théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature.* Éditions Édisud. France. 288 p.

Buongiorno, J., Gillies, J.K., 2003. *Decision Methods for Forest Resource Management.* Academic Press, Elsevier Science, Californie, USA, 439 p.

Calvet, P., Lemoine, B., Peyron, J.-L., 1997. Taux d'actualisation et conduite sylvicole des peuplements forestiers : un exemple dans le cas du pin maritime en France. *Can. J. For. Res.* 27 : 1268-1275.

Comité de travail sur la transformation du bois sur la Côte-Nord, 2007. *Rapport.* 37 p.

Consultants forestiers DGR inc., 2004. *Coûts d'approvisionnement des bois au Québec – résultats de l'enquête 2003 pour les essences résineuses SEPM.* MRNFPQ, 40 p.

Consultants JP Grenon inc., 2002. Étude sur les réalités de l'industrie du sciage sur la Côte-Nord. 150 p.

Côté, G. 2006. Élaboration d'une typologie forestière adaptée à la forêt boréale irrégulière. Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval. 72 p.

Davis, L.S., Johnson, K.N., 1987. Forest Management ; 3rd Edition. McGraw-Hill/Irwin. New-York. 790 p.

Deal, R.L., 2001. The effects of partial cutting on forest plant communities of western hemlock – Sitka spruce stands in southeast Alaska. *Can. J. For. Res.* 31: 2067-2079.

De Grandpré, L., Morissette, J., Gauthier, S., 2000. Long term post-fire changes in the northeastern boreal forest of Quebec. *J. Veg. Sci.* 11: 791-800.

Favreau, J., 2005. Provue (programme de base de données), FPInnovations-Feric, Pointe-Claire, Québec.

Franklin, J.F., 1993. Preserving biodiversity: species, ecosystems or landscapes. *Ecol. Appl.* 3: 202-205.

Fuller, A. K., Harrison, D. J., Lachowski, H. J., 2004. Stand scale effects of partial harvesting and clearcutting on small mammals and forest structure. *For. Ecol. Manage.* 191: 373-386.

Galibois, A. 1997. Analyse économique pour ingénieurs. Éditions AGA inc. Québec. 937 p.

Garet, J., Pothier, D., Bouchard, M., 2009. Predicting the long-term yield trajectory of black spruce stands using time since fire. *For. Ecol. Manage.* 257: 2189-2197.

Gauthier, S., Leduc, A., Bergeron, Y., 1996. Forest dynamics modelling under a natural fire cycle: a tool to define natural mosaic diversity in forest management. *Environ. Monit. Assess.* 39: 417-434.

Groot, A., 2002. Is uneven-aged silviculture applicable to peatland black spruce (*Picea mariana*) in Ontario, Canada? *Forestry*, 75(4): 437-442.

Hanewinkel, M., 2002. Comparative economic investigations of even-aged and uneven-aged silvicultural systems: a critical analysis of different methods. *Forestry*, 75(4): 473-481.

Hanewinkel, M., 2001. Economic aspects of the transformation from even-aged pure stands of Norway spruce to uneven-aged mixed stands of Norway spruce and beech. *For. Ecol. Manage.* 151: 181-193.

Hepburn, C.J., Koundouri, P., 2007. Recent advances in discounting: Implications for forest economics. *J. For. Economics.* 13: 169-189.

- Hertz, D.A., 1964. Risk Analysis in Capital Investment. *Harvard Business Review*. 95-106.
- Hillman, D., 2003. La coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) : coûts et mise en application. *Inst. Can. Rech. genie for. (FERIC), Pointe-Claire, QC, Avantage* 4(17). 6 p.
- Howard, A.F., Temesgen, H., 1997. Potential returns from alternative silvicultural prescriptions in second-growth stands of coastal British Columbia. *Can. J. For. Res.* 27: 1483-1495.
- Hunter, M.L. Jr., 1999. *Maintaining biodiversity in forest ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, England. 698 p.
- Jenkins, G.P., Kuo, C.-Y., 2007. The Economic Opportunity Cost of Capital for Canada – An Empirical Update. Working Papers #1133. Queen's University, Department of Economics, Canada. 25 p.
- Jessome, A.P., 1977. Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada. Laboratoires des Produits Forestiers de l'Est, Rapport Technique de Foresterie 21, Ottawa, Canada.
- Johnson, E.A., 1992. Fire and vegetation dynamics – studies from the North American boreal forest. *Cambridge studies in ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Kneeshaw, D., Gauthier, S., 2003. Old growth in the boreal forest: A dynamic perspective at the stand and landscape level. *Environ. Rev.* 11: 99-114.
- Kneeshaw, D., 2001. Are non-fire gap disturbances important to boreal forest dynamics? *Recent Res. Dev. Ecol.* 1: 43-58.
- Kneeshaw, D., Bergeron, Y., 1998. Canopy gap characteristics and tree replacement in the southeastern boreal forest. *Ecology*, 79: 783-794.
- Knoke, T., Hildebrandt, P., Klein, D., Mujica, R., Moog, M., Mosandl, R., 2008. Financial compensation and uncertainty: using mean-variance rule and stochastic dominance to derive conservation payments for secondary forests. *Can. J. For. Res.* 38: 3033-3046.
- Knoke, T., Wurm, J., 2006. Mixed forests and a flexible harvest policy: a problem for conventional risk analysis? *Eur. J. Forest Res.* 125: 303-315.
- Knoke, T., Stimm, B., Ammer, C., Moog, M., 2005. Mixed forests reconsidered: A forest economics contribution on an ecological concept. *For. Ecol. Manage.* 213: 102-116.
- Knoke, T., Moog, M., Plusczyk, N., 2001. On the effect of volatile stumpage prices on the economic attractiveness of a silvicultural transformation strategy. *Forest Policy and Economics* 2: 229-240.

- Knoke, T., Plusczyk, N., 2001. On economic consequences of transformation of a spruce (*Picea abies* (L.) Karst) dominated stand from regular into irregular age structure. *For. Ecol. Manage.* 151: 163-179
- Kuuluvainen, T., 1994. Gap disturbance, ground microtopography, and the regeneration dynamics of boreal coniferous forests in Finland: a review. *Ann. Zool. Fenn.* 31: 35-51.
- Lapointe, M.-A., 2008. Évaluation des travaux sylvicoles : Le choix du taux d'actualisation. Rapport scientifique déposé au Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune.
- Legault, I., 2006. Analyse financière de scénarios sylvicoles visant la production de bois d'œuvre de bouleaux jaune et à papier. Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval. 88 p.
- Liu, C., Zhang, S.Y., 2005a. Models for predicting product recovery using selected tree characteristics of black spruce. *Can. J. For. Res.* 35: 930-937.
- Liu, C., Zhang, S.Y., 2005b. Equations for predicting tree height, total volume, and product recovery for black spruce (*Picea mariana*) plantations in northeastern Quebec. *For. Chron.* 81: 808-814.
- Liu, C., Ruel, J.-C., Zhang, S.Y., 2007. Immediate impacts of partial cutting strategies on stand characteristics and value. *For. Ecol. Manage.* 250: 148-155.
- McCarthy, J.W., Weetman, G., 2006. Age and size structure of gap-dynamic, old-growth boreal forest stands in Newfoundland. *Silva Fennica*, 40: 209-230.
- McCarthy, J.W., 2001. Gap dynamics of forest trees: a review with particular attention to boreal forests. *Environ. Rev.* 9: 1-59.
- Meek, P., Cormier, D., 2004. Études de premières interventions d'un système de coupes progressives. *Revue Avantage (FERIC)*. Vol. 5 no 43.
- Ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec, 2009. Règlement sur les normes d'intervention dans les forêts du domaine de l'État. Éditeur officiel du Québec. Gouvernement du Québec.
- Morneau, C., Payette, S., 1989. Postfire lichen – spruce woodland recovery at the limit of the boreal forest in northern Quebec. *Can. J. Bot.* 67: 2770-2782.
- Nadeau, F.-R., 2002. Analyse de l'impact de la dispersion des aires de coupe sur les coûts d'approvisionnement en matière ligneuse à la Forêt Montmorency. Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval. 133 p.

- Nyland, R.D., 2003. Even to uneven-aged: the challenges of conversion. *For. Ecol. Manage.* 172: 291-300.
- Page, J.-P., 2005. *Gestion financière et création de valeur ajoutée*. 1ère édition. Les Éditions DTR, Sherbrooke. QC.
- Pham, A.T., De Grandpré, L., Gauthier, S., Bergeron, Y., 2004. Gap dynamics and replacement patterns in gaps of the northeastern boreal forest of Quebec. *Can. J. For. Res.* 34: 353-364.
- Pothier, D., Savard, F., 1998. *Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec*. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Québec. 183 p.
- Price, M., Price, C., 2006. Creaming the best, or creatively transforming? Might felling the biggest trees be a win-win strategy? *For. Ecol. Manage.* 224: 297-303.
- Price, C., 1997. A critical note on a long-running debate in forests economics. *Forestry*, 70(4): 389-397.
- Ross, S.A., Westerfield, R.W., Jordan, B.D., Roberts, G.S., 2005. *Gestion financière : 2ème édition*. Les Éditions de la Chenelière inc., Québec, Canada. 598 p.
- Roy, V., Meek, P., Lussier, J.-M., 2006. *Recherche opérationnelle pour la mise au point de systèmes sylvicoles adaptés à la forêt boréale irrégulière*. Chaire sylviculture et faune – projet 2.1, Rapport de projet. 70 p.
- Ruel, J.-C., Roy, V., Lussier, J.-M., Pothier, D., Meek, P., Fortin, D., 2007. Mise au point d'une sylviculture adaptée à la forêt boréale irrégulière. *For. Chron.* 83(3): 367-374.
- Soucy, G., Yargeau, V., 2002. *Analyse économique en ingénierie: Une approche contemporaine*. Adaptation française. Éditions du nouveau pédagogique. Québec. 972 p.
- Saucier, J.-P., Grondin, P., Robitaille, A., Bergeron, J.-F., 2003. *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*. Ministère des Ressources Naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec, QC.
- Thorpe, H.C., Thomas, S.C., Caspersen, J. P., 2008. Tree mortality following partial harvests is determined by skidding proximity. *Ecol. Appl.* 18(7): 1652-1663.
- Thorpe, H.C., Thomas, S.C., 2007. Partial harvesting in the Canadian boreal: Success will depend on stand dynamic responses. *For. Chron.* 83(3): 319-325.
- Tong, Q.J., Zhang, S.Y., Thompson, M., 2005. Evaluation of growth response, stand value and financial return for pre-commercially thinned jack pine stands in Northwestern Ontario. *For. Ecol. Manage.* 209: 225-235.

Tremblay, J.A., Bélanger, L., Despôts, M., Brunet, G., 2007. La restauration passive des sapinières mixtes de seconde venue: une alternative pour la conservation des sapinières mixtes anciennes. *Can. J. For. Res.* 37: 825-839.

Valéria, O., 2004. Outil spatial d'aide à la planification forestière basé sur la comparaison d'indicateurs financiers, fauniques et sociaux pour diverses stratégies de dispersion de coupe. Thèse de doctorat. Université Laval. Canada, Québec. 252 p.

Weitzman, M.L., 2001. Gamma Discounting. *The American Economic Review.* 91(1): 260-271.

Williams, J.B., 1938. *The Theory of Investment Value.* Cambridge, Mass. Harvard University Press.

Zhang, S.Y., Liu, C., 2006. Predicting the lumber volume recovery of *Picea mariana* using parametric and non-parametric regression methods. *Scand. J. For. Res.* 21: 158-166.

Zhang, S.Y., Chauret, G., 2001. Impact of initial spacing on tree and wood characteristics, product quality and value recovery in black spruce (*Picea mariana*). CFS Rep. No 35, Forintek Canada Corp. Québec.

ANNEXES

ANNEXE I

Courbe de croissance (unique) pour les CPRS

Cette annexe présente une partie de la méthodologie pour établir les courbes de croissance utilisées pour simuler la croissance des peuplements résiduels issus des CPRS. Pour l'unité de compilation 8994, la répartition par type écologique nous indique que 86,1 % du territoire couvert par nos dispositifs ont un indice de fertilité moyen, et que 13,9 % du territoire a un indice de fertilité pauvre (tableau 35).

Tableau 35 : Superficie en hectare (ha), associée aux types écologiques et indices de fertilité correspondants, pour l'unité de compilation 8994.

Unité de compilation 8994		
Type écologique	Superficie (ha)	Indice de fertilité
RS22	19,74	Moyen
RS2A	25,22	Moyen
RS25	5,26	Pauvre
RS20	0,65	Pauvre
RE25	1,32	Pauvre

Pour l'unité de compilation 3793, seulement deux types écologiques sont représentés par le dispositif, et dans les deux cas, l'indice de fertilité est moyen (tableau 36).

Tableau 36 : Superficie en hectare (ha), associée aux types écologiques et indices de fertilité correspondants, pour l'unité de compilation 3793.

Unité de compilation 3793		
Type écologique	Superficie (ha)	Indice de fertilité
RS22	47,34	Moyen
RS25	5,07	Moyen

L'unité de compilation 8990 (tableau 37), qui comportait deux blocs du dispositif expérimental, est représentée par 6 types écologiques. Dans ce cas, on remarque la très forte dominance de l'indice de fertilité moyen, qui correspond à 95,1 % de la superficie. 4,6 % de la superficie est caractérisé par un indice de fertilité riche. Aussi, notons que le type écologique RS40, qui représente 0,3 % de territoire, est considéré très pauvre, et est exclue du calcul de la possibilité forestière.

Tableau 37 : Superficie en hectare (ha), associée aux types écologiques et indices de fertilité correspondants, pour l'unité de compilation 8990.

Unité de compilation 8990		
Type écologique	Superficie (ha)	Indice de fertilité
RS22	93,49	Moyen
MS22	5,08	Riche
RS20	5,26	Moyen
RS2B	2,34	Moyen
RS25	3,57	Moyen
RS40	0,35	Exclue

Une fois la ventilation des strates complétées selon les indices de fertilité, nous avons obtenu cinq courbes pour les trois unités de compilation. Lorsque plus d'une courbe était nécessaire dans une unité de compilation, elles ont été pondérées, pour qu'il n'y ait finalement qu'une seule courbe par unité de compilation.

Nous avons ensuite associé un poids égal à ces trois courbes, et nous avons considéré la moyenne de ces trois courbes, pour avoir à la fin une courbe unique, représentative de la situation de nos dispositifs expérimentaux (tableau 38). La quantité d'épinette blanche est toujours inférieure à 2 mètres cubes par hectare, de sorte que cette quantité négligeable a été ajoutée au sapin baumier.

Tableau 38 : Courbe unique représentant la croissance anticipée des peuplements issus des CPRS. Le volume (vol) par essence (SAB : sapin baumier, EPB : épinette blanche, EPN : épinette noire) est exprimé en mètre cube (m³), par intervalle de 5 ans. La proportion du volume en SAB et EPN est aussi présentée, en pourcentage (%).

Courbe unique (volume en m³)							
	SAB	EPB	EPN	Total		% SAB	% EPN
Âge	Vol	Vol	Vol	Vol			
0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,00	0,00
5	0,0	0,0	0,0	0,0		0,00	0,00
10	0,0	0,0	0,0	0,0		0,00	0,00
15	0,0	0,0	0,0	0,0		0,00	0,00
20	0,0	0,0	0,0	0,0		0,00	0,00
25	0,6	0,2	2,9	3,7		20,70	79,30
30	1,5	0,4	6,6	8,5		22,27	77,73
35	2,9	0,5	11,6	15,0		22,65	77,35
40	4,4	0,7	17,4	22,5		22,40	77,60

45	6,2	0,9	23,7	30,8		22,97	77,03
50	8,0	1,0	30,7	39,7		22,74	77,26
55	9,8	1,1	37,5	48,4		22,50	77,50
60	11,6	1,2	44,4	57,2		22,40	77,60
65	13,3	1,3	49,9	64,5		22,64	77,36
70	14,9	1,4	56,4	72,7		22,43	77,57
75	16,4	1,5	61,0	78,9		22,70	77,30
80	17,8	1,5	66,4	85,7		22,57	77,43
85	19,1	1,6	71,1	91,8		22,59	77,41
90	20,4	1,6	75,5	97,5		22,62	77,38
95	21,5	1,7	79,4	102,6		22,57	77,43
100	22,0	1,7	83,4	107,1		22,18	77,82
105	22,5	1,8	85,0	109,3		22,18	77,82
110	22,7	1,8	86,7	111,2		22,06	77,94
115	22,7	1,8	88,0	112,5		21,84	78,16
120	22,7	1,8	88,7	113,3		21,66	78,34
125	22,2	1,8	88,0	112,0		21,43	78,57
130	22,1	1,8	86,0	109,9		21,73	78,27
135	21,6	1,8	84,2	107,6		21,74	78,26
140	20,9	1,7	81,5	104,0		21,67	78,33

ANNEXE II

Table adaptée de Pothier et Savard, pour la croissance des CPRS

Tableau 39 : Table pondérée, adaptée de Pothier et Savard (1998), selon la méthodologie décrite à la section 2.4.1. Différentes données dendrométriques sont présentées selon des intervalles de temps de 5 ans. Hd : hauteur dominante, Dq : diamètre quadratique, N : nombre de tiges par hectare, G : surface terrière, V : volume, Vol/tige : volume par tige (m³/tige).

Âge	Hd	Dq	N	G	V	Vol/tige
0	0,0	0,0	0	0,0	0	0,000000
5	0,0	0,0	0	0,0	0	0,000000
10	0,0	0,0	0	0,0	0	0,000000
15	0,0	0,0	0	0,0	0	0,000000
20	7,7	11,4	150	1,5	5	0,039695
25	8,8	11,7	280	2,9	10	0,041417
30	9,6	12,0	424	4,7	17	0,042755
35	10,3	12,2	568	6,6	25	0,046445
40	11,0	12,5	703	8,6	34	0,049031
45	11,5	12,7	825	10,5	42	0,052362
50	12,0	12,9	934	12,3	51	0,055093
55	12,4	13,1	1030	13,9	59	0,057614
60	12,7	13,3	1115	15,4	66	0,059446
65	12,9	13,4	1190	16,8	73	0,061792
70	13,2	13,5	1256	18,1	79	0,062902
75	13,4	13,6	1316	19,3	85	0,064730
80	13,6	13,7	1369	20,3	90	0,065959
85	13,7	13,8	1416	21,3	95	0,067246
90	13,8	13,8	1459	22,2	99	0,068030
95	14,0	13,9	1499	22,9	104	0,069382
100	14,0	13,9	1535	23,7	107	0,069730
105	14,1	14,0	1568	24,3	111	0,070508
110	14,1	14,1	1596	24,9	114	0,071082
115	14,2	14,1	1614	25,3	116	0,071651
120	14,2	14,2	1626	25,6	117	0,072256
125	14,3	14,2	1629	25,8	118	0,072691
130	14,3	14,2	1624	25,8	119	0,073599

Tableau 40 : Comparaison du volume prédit en fonction de l'âge entre la courbe unique (annexe I) et la table adaptée de Pothier et Savard (1998) (tableau 39). Les valeurs présentées sont des volumes exprimés en mètre cube (m³).

Âge	Volume en m ³	
	Courbe CPRS unique	Table adaptée
40	22,5	34
45	30,8	42
50	39,7	51
55	48,4	59
60	57,2	66
65	64,5	73
70	72,7	79
75	78,9	85
80	85,7	90
85	91,8	94
90	97,5	98
95	102,6	103
100	107,1	106
105	109,3	110
110	111,2	113
115	112,5	115
120	113,3	117

En comparant le volume prédit en fonction de l'âge entre la courbe unique et la table adaptée de Pothier et Savard (tableau 40), nous constatons qu'il n'y a que peu de différence, particulièrement autour de l'âge d'exploitabilité de 100 ans que nous avons utilisé comme rotation pour les CPRS. À noter que la valeur à 60 ans a aussi été utilisée dans cette étude, pour la simulation de croissance dans les sentiers de débardage des coupes de jardinage (voir section 2.4.2.2).

Considérant les faibles écarts observés, nous pouvons considérer que notre méthodologie est réaliste pour estimer les valeurs dendrométriques des peuplements issus des CPRS, c'est-à-dire utiliser le volume prédit selon les courbes de rendement fournies par le MRNF (courbe unique), et le volume par tige prédit par la pondération des tables de Pothier et Savard (table adaptée).

ANNEXE III

Différentes variables utilisées dans l'analyse financière

Cette annexe présente quelques tableaux, contenant plusieurs des variables utilisées dans l'analyse financière, et indiquent pour chacune d'elles certaines caractéristiques. Certaines des variables déjà présentées dans le document, et qui n'ont pas nécessitées de distribution de probabilités, ne sont pas reprises dans ces tableaux. Les variables présentées et résultant de calculs, n'ont évidemment pas de distribution de probabilités associées, puisqu'elles varient déjà selon les données incluses dans les calculs (et qui sont susceptibles de changer). Dans le cas des coupes de jardinage, seules les valeurs des variables pour les rotations de 70 ans sont présentées.

Tableau 41 : Liste de variables générales, avec certaines caractéristiques. Les valeurs indiquent les minimums (min) et les maximums (max) qu'une variable peut prendre. Les unités des valeurs pour chacune des variables sont présentées. La colonne « source » indique d'où proviennent principalement les données. La colonne « S. Dist. » indique d'où provient l'hypothèse ayant conduit au choix approprié de distribution de probabilité pour une variable donnée, et la colonne « Dist. » indique la distribution utilisée. Ind. : industrie (compagnie forestière), Hyp. : hypothèses, Comm. : communication personnelle (experts), RL : revue de littérature, Dispo. : dispositif expérimental. Pour les distributions : fixe : aucune distribution pour cette variable, Triang. : triangulaire, Norm. : normale, uni : uniforme. SAB : sapin baumier, CJ : coupe de jardinage, CJP : coupe de jardinage avec sentiers permanents, CJa : coupe de jardinage adaptée. Dans le cas des distributions normales, les pourcentages (%) présentées sont pour 3 écarts-types (99% des cas).

Variables	Valeurs			Unités	Source	S. Dits.	Dist.
	Min	Moyenne	Max				
Proportion chemin accès		0,15		%	Ind.		Fixe
Coût chemins accès	35000	45000,00	55000	\$/km	Ind.	Ind.	Triang
Proportion chemin de récolte (été)	0,48	0,58	0,68	%	Ind.	Ind.	Triang
Coût chemin récolte (été)	14000	22000,00	30000	\$/km	Ind.	Ind.	Triang
Coût chemin récolte (hiver)	5000	7500,00	10000	\$/km	Ind.	Ind.	Triang
Coût entretien chemins accès	2750	4250,00	5750	\$/km	Ind.	Ind.	Triang
Coût entretien chemins récolte	2000	3250,00	4500	\$/km	Ind.	Ind.	Triang
Prop. coût restauration vs construction	0,90	0,95	1,00	%	Comm	Hyp	Triang
Taux horaire abatteuse		143		\$/HMP	FERIC		Fixe
Coût débardage	7,75	8,25	8,75	\$/m ³	Ind.	Ind.	Triang
Coût supervision	2,15	2,40	2,65	\$/m ³	Ind.	Ind.	Triang
Coût déplacement machinerie	0,58	0,68	0,78	\$/m ³	Ind.	Ind.	Triang
Proportion déplacement autotracté	0,80	0,85	0,90	%	Ind.	Ind.	Triang
Coût chargement	1,15	1,30	1,45	\$/m ³	Ind.	Ind.	Triang
Coût déchargement	0,70	0,80	0,90	\$/m ³	Ind.	Ind.	Triang
Coût transport	15,10	17,60	20,10	\$/m ³	Ind.	Ind.	Triang
Proportion transport dans chemins récolte	0,075	0,10	0,125	%	Ind.	Ind.	Triang

Taux quotidien employé au camp	50	52,50	55	\$/emp-jr	Ind.	Ind.	Triang
Jour d'ouverture camp		200		# jour	Ind.		Fixe
Coût d'inventaire		1,05		\$/m³	Ind/RL		Fixe
Coût planification		0,67		\$/m³	Ind/RL		Fixe
Coût du mesurage		0,40		\$/m³	Ind/RL		Fixe
Coût administration		2,35		\$/m³	Ind/RL		Fixe
Coût des communications		0,30		\$/m³	Ind/RL		Fixe
Coût formation		0,15		\$/m³	Ind/RL		Fixe
Coût surcharge essence		4,90		\$/m³	Ind/RL		Fixe
Coût protection		0,65		\$/m³	Ind/RL		Fixe
Densité basale SAB		0,335		tma/m³	RL		Fixe
Densité basale EPN		0,406		tma/m³	RL		Fixe
Facteur conversion copeau (pondéré)		0,375		tma/m³	Calcul		Fixe
Prix sciage	268,14	480,19	714,25	\$/Mpmp	PRIBEC	PRIBEC	Triang
Prix copeaux	104,07	138,05	156,07	\$/tma	MRNF	MRNF	Triang
Prix sciures	40,00	42,50	45,00	\$/tma	Comm	Comm	Triang
Taux d'actualisation		0,04		%	Hyp/RL		Fixe
Proportion SAB pour CJ et CPRS 1		0,432		%	Dispo		
Variation prop SAB (CJ et CPRS1)		+/- 25 %		%	Dispo	Dispo	Norm
Proportion sciures		0,05		%	RL		Fixe
Variation # tiges initiales classe 11 cm		+/- 15 %		%	Dispo	Dispo	Norm
Variation # tiges initiales classe 15 cm		+/- 15 %		%	Dispo	Dispo	Norm
Variation # tiges initiales classe 19 cm		+/- 15 %		%	Dispo	Dispo	Norm
Variation # tiges initiales classe 23 cm		+/- 20 %		%	Dispo	Dispo	Norm
Variation # tiges initiales classe 27 cm		+/- 20 %		%	Dispo	Dispo	Norm
Variation # tiges initiales classe 31 cm		+/- 20 %		%	Dispo	Dispo	Norm
Variation # tiges initiales classe 35 cm		+/- 20 %		%	Dispo	Dispo	Norm
Volume total récolté CPRS (200 ans)		362803		m³	Calcul		Fixe
Volume total récolté CJp (70) (210 ans)		213987		m³	Calcul		Fixe
Volume total récolté CJa (70) (210 ans)		344566		m³	Calcul		Fixe

Tableau 42 : Liste de variables propres aux CPRS, avec certaines caractéristiques. Les valeurs indiquent les minimums (min) et les maximums (max) qu'une variable peut prendre. Les unités des valeurs pour chacune des variables sont présentées. La colonne « source » indique d'où proviennent principalement les données. La colonne « S. Dist. » indique d'où provient l'hypothèse ayant conduit au choix approprié de distribution de probabilité pour une variable donnée, et la colonne « Dist. » indique la distribution utilisée. Ind. : industrie (compagnie forestière), Hyp. : hypothèses, Comm. : communication personnelle (experts), RL : revue de littérature, Dispo. : dispositif expérimental. Pour les distributions : fixe : aucune distribution pour cette variable, Triang. : triangulaire, Norm. : normale, uni : uniforme. SAB : sapin baumier, CJ : coupe de jardinage, CJp : coupe de jardinage avec sentiers permanents, CJa : coupe de jardinage adaptée. Dans le cas des distributions normales, les pourcentages (%) présentées sont pour 3 écarts-types (99% des cas). Prop. : proportion, emp. : employés, sup. : supplémentaire, pass. : passage.

Variables	Valeurs			Unités	Source	S. Dits.	Dist.
	Min	Moyenne	Max				
Superficie pour ratio (ha/km) CPRS	22,62	30,16	37,70	ha/km	RAIF	RAIF	Triang
Ratio (km/ha) CPRS (pour les calculs)	0,044209	0,033156	0,026525	km/ha			
Prop. emp. sup. « autres » 2 ^{ème} pass.		0,163		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « supervision » 2 ^{ème} pass.		0,388		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « chemin » 2 ^{ème} pass.		0,328		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « transport » 2 ^{ème} pass.		0,036		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « récolte » 2 ^{ème} pass.		0,184		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « autres » 3 ^{ème} pass.		0,163		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « supervision » 3 ^{ème} pass.		0,388		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « chemin » 3 ^{ème} pass.		0,328		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « transport » 3 ^{ème} pass.		0,036		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « récolte » 3 ^{ème} pass.		0,184		%	Calcul		
Rotation pour les CPRS		100		années	Calcul		
Volume récolté 1 ^{er} pass.		148,6		m ³ /ha	Dispo		Fixe
Volume récolté 2 ^{ème} et 3 ^{ème} pass.		107,1		m ³ /ha	Calcul		
Volume par tige 1 ^{er} pass.		0,10944		m ³ /tiges	Dispo		Fixe
Volume par tige 2 ^{ème} pass.		0,06973		m ³ /tiges	Calcul		
Volume par tige 3 ^{ème} pass.		0,06973		m ³ /tiges	Calcul		
Coût transformation 1 ^{er} pass.		35,39		\$/m ³	Calcul		
Coût transformation 2 ^{ème} pass.		45,56		\$/m ³	Calcul		
Coût transformation 3 ^{ème} pass.		45,56		\$/m ³	Calcul		
Facteur conversion sciage 1 ^{er} pass.		4,60		m ³ /Mppm	Calcul		
Facteur conversion sciage 2 ^{ème} et 3 ^{ème} pass		5,56		m ³ /Mppm	Calcul		
Volume sciage total 1 ^{er} pass.		76235,76		m ³	Calcul		
Volume copeau total 1 ^{er} pass.		64936,99		m ³	Calcul		
Volume sciures total 1 ^{er} pass.		7430,14		m ³	Calcul		
Volume sciage total 2 ^{ème} et 3 ^{ème} pass		43176,95		m ³	Calcul		
Volume copeau total 2 ^{ème} et 3 ^{ème} pass		58568,05		m ³	Calcul		
Volume sciures total 2 ^{ème} et 3 ^{ème} pass		5355,00		m ³	Calcul		
Proportion SAB 2 ^{ème} et 3 ^{ème} pass		0,2218		%	MRNF		Fixe

Tableau 43 : Liste de variables propres aux CJ (rotations 70 ans), avec certaines caractéristiques. Les valeurs indiquent les minimums (min) et les maximums (max) qu'une variable peut prendre. Les unités des valeurs pour chacune des variables sont présentées. La colonne « source » indique d'où proviennent principalement les données. La colonne « S. Dist. » indique d'où provient l'hypothèse ayant conduit au choix approprié de distribution de probabilité pour une variable donnée, et la colonne « Dist. » indique la distribution utilisée. Ind. : industrie (compagnie forestière), Hyp. : hypothèses, Comm. : communication personnelle (experts), RL : revue de littérature, Dispo. : dispositif expérimental. Pour les distributions : fixe : aucune distribution pour cette variable, Triang. : triangulaire, Norm. : normale, uni : uniforme. SAB : sapin baumier, CJ : coupe de jardinage, CJp : coupe de jardinage avec sentiers permanents, CJa : coupe de jardinage adaptée. Dans le cas des distributions normales, les pourcentages (%) présentées sont pour 3 écarts-types (99% des cas). Prop. : proportion, emp. : employés, sup. : supplémentaire, pass. : passage.

Variables	Valeurs			Unités	Source	S. Dits.	Dist.
	Min	Moyenne	Max				
Superficie pour ratio (ha/km) CJ	27,09	36,12	45,15	ha/km	RAIF	RAIF	Triang
Ratio (km/ha) CJ (pour les calculs)	0,03691	0,02769	0,02215	km/ha			
Coût additionnel pour la supervision en CJ	1,00	2,00	3,00	\$/m ³	FERIC/Ind	FERIC/Ind	Triang
Perte de productivité «u» (abattage) CJp		0,29		%	RL/FERIC		Fixe
Perte de productivité «u» (abattage) CJa		0,10		m ³	RL/FERIC		Fixe
Perte de productivité «w» (débardage) CJ		0,05		%	FERIC		Fixe
Proportion zone abattage sélectif CJp		0,571497		%	Dispo		Fixe
Proportion sentier permanents CJp	0,130435	0,142788	0,154930	%	Hyp.		Triang
Proportion sentier secondaire CJp		0,2857		%	Dispo		Fixe
% récolte sentier secondaire CJp (70)		0,2258		%	Calcul		Fixe
Proportion zone abattage sélectif CJa	0,645161	0,667613	0,709677	%	Hyp.		Triang
Variation volume par tige récolté en CJ		+/- 20 %		%	Dispo	Dispo	Norm
Variation volume récolté en CJ		+/- 20 %		%	Dispo	Dispo	Norm
Proportion type végétation 1		0,03250		%	Dispo	Dispo	
Proportion type végétation 2		0,13750		%	Dispo	Dispo	
Proportion type végétation 3		0,56830		%	Dispo	Dispo	
Proportion type végétation 4		0,26170		%	Dispo	Dispo	
Variation proportion type végétation 1		+/- 30 %		%		Dispo	Norm
Variation proportion type végétation 2		+/- 30 %		%		Dispo	Norm
Variation proportion type végétation 3		+/- 30 %		%		Dispo	Norm
Variation proportion type végétation 4		+/- 30 %		%		Dispo	Norm

Tableau 44 : Liste de variables propres aux CJ avec sentiers permanents (rotation 70 ans), avec certaines caractéristiques. Les valeurs indiquent les minimums (min) et les maximums (max) qu'une variable peut prendre. Les unités des valeurs pour chacune des variables sont présentées. La colonne « source » indique d'où proviennent principalement les données. La colonne « S. Dist. » indique d'où provient l'hypothèse ayant conduit au choix approprié de distribution de probabilité pour une variable donnée, et la colonne « Dist. » indique la distribution utilisée. Ind. : industrie (compagnie forestière), Hyp. : hypothèses, Comm. : communication personnelle (experts), RL : revue de littérature, Dispo. : dispositif expérimental. Pour les distributions : fixe : aucune distribution pour cette variable, Triang. : triangulaire, Norm. : normale, uni : uniforme. SAB : sapin baumier, CJ : coupe de jardinage, CJ perm : coupe de jardinage avec sentiers permanents. Dans le cas des distributions normales, les pourcentages (%) présentées sont pour 3 écarts-types (99% des cas). Prop. : proportion, emp. : employés, sup. : supplémentaire, pass. : passage.

Variables	Valeurs			Unités	Source	S. Dits.	Dist.
	Min	Moyenne	Max				
Prop. emp. sup. « autres » 1 ^{er} pass.		0,347		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « supervision » 1 ^{er} pass.		0,833		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « chemin » 1 ^{er} pass.		1,039		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « transport » 1 ^{er} pass.		0,090		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « récolte » 1 ^{er} pass.		0,122		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « autres » 2 ^{ème} pass.		0,484		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « supervision » 2 ^{ème} pass.		1,321		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « chemin » 2 ^{ème} pass.		1,469		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « transport » 2 ^{ème} pass.		0,138		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « récolte » 2 ^{ème} pass.		0,104		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « autres » 3 ^{ème} pass.		0,488		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « supervision » 3 ^{ème} pass.		1,326		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « chemin » 3 ^{ème} pass.		1,475		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « transport » 3 ^{ème} pass.		0,139		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « récolte » 3 ^{ème} pass.		0,112		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « autres » 4 ^{ème} pass.		0,468		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « supervision » 4 ^{ème} pass.		1,264		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « chemin » 4 ^{ème} pass.		1,410		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « transport » 4 ^{ème} pass.		0,133		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « récolte » 4 ^{ème} pass.		0,113		%	Calcul		
Rotation pour les CJ perm		70		années	Hyp.		Fixe
Volume récolté 1 ^{er} pass.		63,16		m ³ /ha	Dispo		Fixe
Volume récolté 2 ^{ème} pass.		49,90		m ³ /ha	Calcul		
Volume récolté 3 ^{ème} pass.		49,79		m ³ /ha	Calcul		
Volume récolté 4 ^{ème} pass.		51,14		m ³ /ha	Calcul		
Volume par tige 1 ^{er} pass.		0,14643		m ³ /tiges	Dispo		Fixe
Volume par tige 2 ^{ème} pass.		0,15310		m ³ /tiges	Calcul		
Volume par tige 3 ^{ème} pass.		0,14985		m ³ /tiges	Calcul		
Volume par tige 4 ^{ème} pass.		0,14959		m ³ /tiges	Calcul		

Coût transformation 1 ^{er} pass.	34,02	\$/m ³	Calcul
Coût transformation 2 ^{ème} pass.	30,31	\$/m ³	Calcul
Coût transformation 3 ^{ème} pass.	30,41	\$/m ³	Calcul
Coût transformation 4 ^{ème} pass.	30,53	\$/m ³	Calcul
Facteur conversion sciage 1 ^{er} pass.	4,44	m ³ /Mmpm	Calcul
Facteur conversion sciage 2 ^{ème} pass.	4,53	m ³ /Mmpm	Calcul
Facteur conversion sciage 3 ^{ème} pass.	4,54	m ³ /Mmpm	Calcul
Facteur conversion sciage 4 ^{ème} pass.	4,54	m ³ /Mmpm	Calcul
Volume sciage total 1 ^{er} pass.	33589,57	m ³	Calcul
Volume copeau total 1 ^{er} pass.	26415,13	m ³	Calcul
Volume sciures total 1 ^{er} pass.	3158,14	m ³	Calcul
Volume sciage total 2 ^{ème} pass.	26020,26	m ³	Calcul
Volume copeau total 2 ^{ème} pass.	21381,56	m ³	Calcul
Volume sciures total 2 ^{ème} pass.	2494,83	m ³	Calcul
Volume sciage total 3 ^{ème} pass.	25896,43	m ³	Calcul
Volume copeau total 3 ^{ème} pass.	21403,37	m ³	Calcul
Volume sciures total 3 ^{ème} pass.	2489,46	m ³	Calcul
Volume sciage total 4 ^{ème} pass.	26598,84	m ³	Calcul
Volume copeau total 4 ^{ème} pass.	21982,79	m ³	Calcul
Volume sciures total 4 ^{ème} pass.	2556,93	m ³	Calcul

Tableau 45 : Liste de variables propres aux CJ adaptées (rotation 70 ans), avec certaines caractéristiques. Les valeurs indiquent les minimums (min) et les maximums (max) qu'une variable peut prendre. Les unités des valeurs pour chacune des variables sont présentées. La colonne « source » indique d'où proviennent principalement les données. La colonne « S. Dist. » indique d'où provient l'hypothèse ayant conduit au choix approprié de distribution de probabilité pour une variable donnée, et la colonne « Dist. » indique la distribution utilisée. Ind. : industrie (compagnie forestière), Hyp. : hypothèses, Comm. : communication personnelle (experts), RL : revue de littérature, Dispo. : dispositif expérimental. Pour les distributions : fixe : aucune distribution pour cette variable, Triang. : triangulaire, Norm. : normale, uni : uniforme. SAB : sapin baumier, CJ : coupe de jardinage, CJa : coupe de jardinage adaptée. Dans le cas des distributions normales, les pourcentages (%) présentées sont pour 3 écarts-types (99% des cas). Prop. : proportion, emp. : employés, sup. : supplémentaire, pass. : passage.

Variables	Valeurs			Unités	Source	S. Dits.	Dist.
	Min	Moyenne	Max				
Prop. emp. sup. « autres » 1 ^{er} pass.		0,298		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « supervision » 1 ^{er} pass.		0,833		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « chemin » 1 ^{er} pass.		1,072		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « transport » 1 ^{er} pass.		0,093		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « récolte » 1 ^{er} pass.		-0,035		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « autres » 2 ^{ème} pass.		0,563		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « supervision » 2 ^{ème} pass.		1,675		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « chemin » 2 ^{ème} pass.		1,893		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « transport » 2 ^{ème} pass.		0,178		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « récolte » 2 ^{ème} pass.		0,002		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « autres » 3 ^{ème} pass.		0,520		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « supervision » 3 ^{ème} pass.		1,547		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « chemin » 3 ^{ème} pass.		1,754		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « transport » 3 ^{ème} pass.		0,165		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « récolte » 3 ^{ème} pass.		-0,002		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « autres » 4 ^{ème} pass.		0,502		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « supervision » 4 ^{ème} pass.		1,496		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « chemin » 4 ^{ème} pass.		1,699		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « transport » 4 ^{ème} pass.		0,160		%	Calcul		
Prop. emp. sup. « récolte » 4 ^{ème} pass.		-0,005		%	Calcul		
Rotation pour les CJa		70		années	Hyp.		Fixe
Volume récolté 1 ^{er} pass.		62,14		m ³ /ha	Dispo		Fixe
Volume récolté 2 ^{ème} pass.		42,59		m ³ /ha	Calcul		
Volume récolté 3 ^{ème} pass.		44,73		m ³ /ha	Calcul		
Volume récolté 4 ^{ème} pass.		45,65		m ³ /ha	Calcul		
Volume par tige 1 ^{er} pass.		0,15349		m ³ /tiges	Dispo		Fixe
Volume par tige 2 ^{ème} pass.		0,13700		m ³ /tiges	Calcul		
Volume par tige 3 ^{ème} pass.		0,13867		m ³ /tiges	Calcul		
Volume par tige 4 ^{ème} pass.		0,14012		m ³ /tiges	Calcul		

Coût transformation 1 ^{er} pass.	33,74	\$/m ³	Calcul
Coût transformation 2 ^{ème} pass.	36,89	\$/m ³	Calcul
Coût transformation 3 ^{ème} pass.	36,74	\$/m ³	Calcul
Coût transformation 4 ^{ème} pass.	36,61	\$/m ³	Calcul
Facteur conversion sciage 1 ^{er} pass.	4,41	m ³ /Mppm	Calcul
Facteur conversion sciage 2 ^{ème} pass.	4,68	m ³ /Mppm	Calcul
Facteur conversion sciage 3 ^{ème} pass.	4,66	m ³ /Mppm	Calcul
Facteur conversion sciage 4 ^{ème} pass.	4,65	m ³ /Mppm	Calcul
Volume sciage total 1 ^{er} pass.	33268,51	m ³	Calcul
Volume copeau total 1 ^{er} pass.	25763,92	m ³	Calcul
Volume sciures total 1 ^{er} pass.	3106,97	m ³	Calcul
Volume sciage total 2 ^{ème} pass.	21466,89	m ³	Calcul
Volume copeau total 2 ^{ème} pass.	18990,29	m ³	Calcul
Volume sciures total 2 ^{ème} pass.	2129,33	m ³	Calcul
Volume sciage total 3 ^{ème} pass.	22632,77	m ³	Calcul
Volume copeau total 3 ^{ème} pass.	19864,70	m ³	Calcul
Volume sciures total 3 ^{ème} pass.	2236,71	m ³	Calcul
Volume sciage total 4 ^{ème} pass.	23153,88	m ³	Calcul
Volume copeau total 4 ^{ème} pass.	20209,27	m ³	Calcul
Volume sciures total 4 ^{ème} pass.	2282,27	m ³	Calcul