

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	II
AVANT-PROPOS	III
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES FIGURES EN ANNEXES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES TABLEAUX EN ANNEXES.....	XI
RÉSUMÉ DU MÉMOIRE.....	XII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
 EFFETS DE L'ESTIMATION	
DE LA DISTANCE DE DÉBARDAGE ET DE LA DISTRIBUTION DU	
VOLUME SUR LES COÛTS DE RÉCOLTE..... 3	
1. Introduction.....	3
1.1 La distance de débardage.....	3
1.2 Le volume à récolter	4
1.3 La distance de débardage combinée (distance-volume)	4
1.4 Le coût de récolte forestière	5
1.5 Objectifs et hypothèses de recherche.....	6
2. Revue de la littérature	8
2.1 Estimation de la distance de débardage	8
2.2 Estimation du volume.....	12
2.3 Estimation de la productivité des machines lors de la récolte	13
2.4 Les coûts de récolte forestière	19
3. Matériels et méthodes.....	20
3.1 Aire d'étude	20
3.2 Estimation de la distance de débardage	22
3.3 Analyse du volume à récolter	27
3.4 Analyse combinée de la distance de débardage moyenne et le volume moyen à l'hectare.....	30
3.5 Analyse des coûts de débardage et récolte.....	32
4. Résultats.....	34
4.1 La distance moyenne de débardage	34
4.1.1 Distance moyenne de débardage selon les trois méthodes utilisées	34

4.1.2	Comparaison des méthodes d'estimation de la distance moyenne de débardage.....	37
4.1.3	Identification des variables ayant un impact dans l'estimation de la distance de débardage.....	38
4.1.4	Analyse multi-modèles de l'effet des variables identifiées sur l'estimation de la distance de débardage	41
4.2	Estimation du volume à récolter	43
4.2.1	Analyse de la répartition spatiale des volumes dans le bloc de récolte ...	43
4.2.2	Comparaison des méthodes d'estimation du volume moyen	45
4.3	Analyse combinée distance-volume	46
4.4	Analyses des coûts de débardage et de récolte	47
4.4.1	Productivité de l'abattage et du débardage	47
4.4.2	Analyse des coûts de débardage par mode d'évaluation de la distance de débardage.....	47
4.4.3	Analyse des coûts de débardage par traitement.....	48
4.4.4	Analyse des machines de débardage	49
4.4.5	Analyse des coûts de récolte.....	50
5.	Discussion	52
5.1	La distance moyenne de débardage	52
5.2	Autres variables pouvant affecter la distance de débardage	53
5.3	La distribution du volume.....	54
5.4	La distance combinée	55
5.5	Les coûts de débardage.....	55
5.6	Les coûts de récolte	57
5.7	Limites de l'étude	57
6.	Conclusion	58
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	60
	LISTE DE RÉFÉRENCES	62
	ANNEXE I : ÉTUDE DE CAS.....	69
	EFFETS DE DIFFÉRENTS NIVEAUX DE RÉTENTION ET DE LA POSITION DU VOLUME SUR LA DISTANCE DE DÉBARDAGE COMBINÉE	69
A.1.1	Introduction	69
A.1.2	Revue de la littérature.....	70
A.1.3	Objectifs	71
A.1.4	Matériels et méthodes	71
A.1.5	Résultats	74

A.1.5.1 Distances moyennes de débardage combinées : analyses du volume au niveau du bloc entier et des différents types de rétention; bloc de 500 m de profondeur.....	75
A.1.5.2 Distances moyennes de débardage combinées : analyse du volume cumulé et séquentiel par type de rétention	77
A.1.5.3 Analyse des effets du type de débardeur sur la distance de débardage combinée, le coût de débardage et les coûts de récolte	89
A.1.6 Discussion.....	90
A.1.6.1 Blocs sans rétention.....	90
A.1.6.2 Blocs à rétention dispersée.....	92
A.1.6.3 Blocs à rétention agglomérée	93
A.1.6.4 Limitations de l'étude	95
A.1.7 Conclusion.....	96
ANNEXE II	98
ANNEXE III	100
ANNEXE IV	101
ANNEXE V	103

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Distance de débardage moyenne (L/2) estimée dans les blocs de récolte de forme géométrique régulière et débardage en bordure de la route.	11
Figure 2 Distance de débardage moyenne (m) estimée dans les blocs de récolte de forme géométrique irrégulière et débardage en bordure de la route. (a) et (b) exemples de blocs de forme irrégulière.	11
Figure 3 Distance de débardage moyenne (m) estimée dans les blocs de récolte de forme irrégulière, par combinaison format raster-centroïde et débardage en bordure de la route. (1) bloc de forme irrégulière, (2) représentation de la distance raster à partir de la route et (3) combinaison de (1) et (2) pour le calcul de la distance moyenne de débardage.	11
Figure 4 Courbe de productivité des opérations de récolte forestière (m^3/hmp) en fonction de la distance de débardage (m).	15
Figure 5 Productivité du porteur (m^3/hmp) en fonction de la distance de débardage (m).	15
Figure 6 Variation des coûts de débardage ($$/m^3$) en fonction de la productivité (m^3/hmp). DD(-) indique une diminution de la distance de débardage et DD(+) indique une augmentation de celle-ci.	16
Figure 7 Productivité d'une abatteuse-façonneuse (m^3/hmp) en fonction du volume moyen par tige (m^3).	18
Figure 8 Nombre de tiges récoltées (coupes/ ha traités) en fonction de la production (ha tot/hp) et les coûts de récolte ($$/ha$ tot). (A) nombre de tiges en fonction de la productivité (B) pourcentage de tiges en fonction de la productivité (C) coûts de récolte en fonction de la productivité.	18
Figure 9 Carte de l'emplacement des secteurs d'étude du Réseau de coupes partielles de l'Abitibi-Témiscamingue (RCPA).	21
Figure 10 Illustration des subdivisions des blocs en sous-blocs de récolte, selon le sens des sentiers de débardage effectués par la machinerie, pendant la récolte forestière.	23
Figure 11 Représentation graphique des méthodes d'estimation de la distance de débardage moyenne : (a) traditionnelle (DIST_A), (b) numérisée ou référence (DIST_B) et (c) raster (DIST_C).	24
Figure 12 Illustration de la numérisation des sentiers de débardage et visualisation, dans la photographie aérienne, d'obstacles considérés dans l'estimation du nombre d'obstacles (forêt résiduelle et/ou obstacles majeurs).	25
Figure 13 Représentation graphique des méthodes d'estimation du volume moyen à l'hectare : (a) traditionnelle (Moyen_trad), (b) par photo-interprétation (Moyen_photo) et (c) par polygones de Thiessen (Moyen_thiess).	30
Figure 14 Représentation graphique d'estimation de la distance de débardage moyenne combinée (DIST_COMB) par l'intégration de la distance de débardage raster (DIST_C) et l'assignation du volume par la méthode des polygones de Thiessen.....	32

Figure 15 Distance de débardage DIST_A moyenne par secteur d'étude : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux ; et erreur type	35
Figure 16 Distance de débardage DIST_A moyenne par type de traitement : CPPTM, CPRS et CPRV ; et erreur type	35
Figure 17 Distance de débardage DIST_B moyenne par secteur d'étude : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux ; et erreur type.....	36
Figure 18 Distance de débardage DIST_B moyenne pour les traitements : CPPTM, CPRS et CPRV ; et erreur type.....	36
Figure 19 Distance de débardage DIST_C moyenne par secteur d'étude : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux ; et erreur type.....	37
Figure 20 Distance de débardage DIST_C moyenne pour les traitements : CPPTM, CPRS et CPRV ; et erreur type.....	37
Figure 21 Nombre moyen d'obstacles par secteur d'étude : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux ; et erreur type	39
Figure 22 Nombre moyen d'obstacles par type de traitement : CPPTM, CPRS et CPRV ; et erreur type.....	39
Figure 23 Aires moyennes des sous-blocs (ha) par secteur d'étude : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux ; et erreur type	40
Figure 24 Aires moyennes des sous-blocs (ha) par type de traitement : CPPTM, CPRS et CPRV ; et erreur type	40
Figure 25 Indices de forme moyens des sous-blocs par secteur d'étude : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux ; et erreur type	41
Figure 26 Indices de forme moyens des sous-blocs par type de traitement : CPPTM, CPRS et CPRV ; et erreur type.....	41
Figure 27 Volume moyen des essences d'intérêt commercial SEPM par secteur d'étude : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux ; et erreur type.....	44
Figure 28 Distribution des volumes des essences d'intérêt commercial SEPM dans les secteurs : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi, et Puiseaux (médiane, minimums, maximums et quartiles par bloc de récolte).Les blocs 1 à 5 sont situés dans les secteurs Dufay, 6 et 7 dans Fénelon, 8 à 10 dans Gaudet, 11 à 24 dans Maskuchi et 25 et 26 dans le secteur Puiseaux.....	45
Figure 29 Coûts moyens de débardage (\$/m ³) estimés par distance de débardage : DIST_A, DIST_B, DIST_C et DIST_COMB pour un porteur.	48
Figure 30 Coûts moyens de débardage (\$/m ³) par traitement : CPRS, CPRV et CPPTM dans les secteurs d'étude ; et erreur type	49
Figure 31 Coûts moyens de débardage (\$/m ³) selon le type de machine de débardage utilisé : Semi-porteur, Grappin, Câble et Porteur ; distance de débardage DIST_C.....	50

LISTE DES FIGURES EN ANNEXES

Figure A.1.1 Bloc de taille moyen (62 ha), 500 m de profondeur et subdivisé dans 10 sections de 50 m.	72
Figure A.1.2 Représentation des niveaux de rétention variable (gris), tirée de Maguire et al. 2006. (A) rétention agglomérée et (D) rétention dispersée.	72
Figure A.1.3 Représentation de la structure des données et des variables analysées pour la rétention agglomérée (RA) tant pour l'analyse cumulée comme séquentielle.	74
Figure A.1.4 Distance moyenne de débardage combinée en fonction de la concentration du volume à extraire : VM, VM+1EC, VM+ 2EC et VM+3EC (volume moyen et volume moyen plus un, deux et trois écarts-type) et type de configuration de la rétention : RD75, RD60, RD40 et RD15. (RD) rétention dispersée, (75, 60, 40 et 15) pourcentages de rétention ; au niveau du bloc entier.	75
Figure A.1.5 Distance moyenne de débardage combinée en fonction du volume à extraire : VM, VM+1EC, VM+ 2EC et VM+3EC (volume moyen et volume moyen plus un, deux et trois écarts-type) et types de configuration de la rétention : (a) RA75A, RA75B et RA75C, (b) RA60A, RA60B, RA60C, RA60D et RA60E, (c) RA40A, RA40B, RA40C et RA40D et (d) RA15A, RA15B et RA15C. (RA) rétention agglomérée, (75, 60, 40 et 15) pourcentages de rétention et (A, B, C, D ou E) configurations de la rétention.	77
Figure A.1.6 Coûts moyens de débardage (\$/m ³) par type de débardeur utilisé : Semi-porteur, Grappin, Câble et Porteur, selon la distance de débardage combinée considérant différents niveaux de rétention (pourcentage et configuration), position et concentration du volume.	89
Figure A.2.1 Illustration de la méthode et équation de calcul de la distance moyenne de débardage de Suddarth (1952) pour une bloc de récolte de forme régulière (circulaire) et débardage à jetée.	Erreur ! Signet non défini.
Figure A.2.2 Illustration de la méthode et équation de calcul de la distance moyenne de débardage de Suddarth (1952) pour une bloc de récolte de forme régulière (segment circulaire) et débardage à jetée.	Erreur ! Signet non défini.
Figure A.2.3 Illustration de la méthode et équation de calcul de la distance moyenne de débardage de Suddarth (1952) pour une bloc de récolte de forme régulière (triangle rectangle) et débardage à jetée.	Erreur ! Signet non défini.
Figure A.2.4 Illustration de la méthode et équation de calcul de la distance moyenne de débardage de Peters (1978) pour une bloc de récolte de forme régulière (n'importe quel triangle) et débardage à jetée.	Erreur ! Signet non défini.
Figure A.2.5 Illustration de la méthode et équation de calcul de la distance moyenne de débardage de Peters (1978) pour une bloc de récolte de forme régulière (rectangle) et débardage à jetée.	Erreur ! Signet non défini.
Figure A.2.6 Illustration de la méthode du centroïde de calcul de la distance moyenne de débardage (Koger et Webster, 1984) pour une bloc de récolte de forme irrégulière et débardage à jetée.	Erreur ! Signet non défini.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Fonctions génériques d'estimation des coûts de récolte selon l'opération et la machine de récolte et le procédé de récolte : bois court ou bois long 19
Tableau 2 Description des secteurs d'étude du Réseau de coupes partielles de l'Abitibi (RCPA) présentée par secteur, type de traitement de récolte appliqué, superficie totale par traitement et nombre de placettes d'inventaire effectuées lors de l'établissement du site..... 22
Tableau 3 Modèles candidats permettant d'expliquer la distance de débardage de référence (DIST_B) à partir de la méthode traditionnelle (DIST_A) et raster (DIST_C) selon le traitement de récolte (TRAIT) et les variables considérées: nombre d'obstacles (OBSTACLES), aire du polygone (AIRE_POLYG) et indice de forme du polygone (FORME_POLYG) 26
Tableau 4 Analyse de variance simple de distances de débardage moyennes évaluées à partir des méthodes DIST_A, DIST_B et DIST_C 37
Tableau 5 Résultats de la comparaison des modèles d'estimation de la distance de débardage moyenne DIST_B dans cinq secteurs du RCPA pour 95 sous-blocs de récolte. Chaque modèle est présenté selon les Critères d'information d'Akaike : le nombre de paramètres (K), le critère d'information d'Akaike de second ordre (AICc), la distance du modèle le plus parcimonieux (Δ AICc) et leur poids d'Akaike (wi)..... 42
Tableau 6 Intervalles de confiance (95%) obtenus à la suite de l'inférence multi-modèles des paramètres retenus dans les modèles expliquant la distance de débardage moyenne de référence ou DIST_B, dans cinq secteurs de la RCPA et 95 sous-blocs de récolte..... 43
Tableau 7 Analyse de variance simple du volume moyen obtenu selon la méthode d'assignation de superficie : photo-interprétation (Moyen_photo), Thiessen (Moyen_thiess) et la méthode traditionnelle (Moyen_trad) 45
Tableau 8 Analyse de variance simple de la distance de débardage moyenne obtenue selon la méthode distance raster (DIST_C) et la distance combinée (DIST_COMB)..... 46
Tableau 9 Coûts moyens (\$/m ³) par secteur, traitement, type de distance de débardage et opération forestière 51

LISTE DES TABLEAUX EN ANNEXES

Tableau A.1.1 Codification de la répartition de simulations de blocs de récolte selon le pourcentage de rétention, le type de rétention (agglomérée ou dispersée) et sa configuration (position de la rétention à l'intérieur du bloc) pour un polygone de taille moyenne de 62 ha	73
Tableau A.1.2 Distances moyennes de débardage combinées \bar{D}^c, simulées (analyse cumulée) selon le type et configuration de la rétention, la position et la concentration du volume à récolter, pour un bloc de récolte de 500 m de profondeur. L'estimation de \bar{D}^c considère l'augmentation du volume entre les sections (S_{x-y}) tandis que le reste du bloc présente le volume moyen.....	78
Tableau A.1.3 Distances moyennes de débardage combinées \bar{D}^c, simulées (analyse séquentielle) selon le type et configuration de la rétention, la position et la concentration du volume à récolter, pour un bloc de récolte de 500 m de profondeur. L'estimation de \bar{D}^c considère l'augmentation de la concentration du volume par section (S_{x-y}) tandis que le reste du bloc présente le volume moyen	79
Tableau A.1.4 Analyse de variance des moyennes des distances de débardage combinées (\bar{D}^c), selon la variation du volume cumulé et séquentiel par type et par la configuration de la rétention, la position et la concentration du volume à extraire dans le bloc de récolte	80
Tableau A.1.5 Rétention agglomérée, analyse détaillée des variations significatives des valeurs de \bar{D}^c selon la source de variation : concentration du volume et position (section) à l'intérieur du bloc pour les analyses cumulée et séquentielle.....	81
Tableau A.1.6 Rétention agglomérée, analyse détaillée des variations significatives des valeurs de \bar{D}^c selon la source de variation : concentration du volume et configuration de la rétention à l'intérieur du bloc pour les analyses cumulée et séquentielle	81
Tableau A.1.7 Rétention agglomérée, analyse détaillée des variations significatives des valeurs de \bar{D}^c selon la source de variation : configuration de la rétention et position (section) à l'intérieur du bloc pour les analyses cumulée et séquentielle	82
Tableau A.1.8 Valeurs des distances moyennes de débardage combinée \bar{D}^c par les volumes cumulés selon le code de rétention pour chaque concentration du volume et leur position dans le bloc de récolte (S_{x-y})	83
Tableau A.1.9 Valeurs des distances moyennes de débardage combinée \bar{D}^c par les volumes séquentiels selon le code de rétention pour chaque concentration du volume et leur position dans le bloc de récolte (S_{x-y})	86
Tableau A.5.1 Liste des photos aériennes, avant et après coupe, utilisées pour les analyses des secteurs : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux, du réseau de coupes partielles de l'Abitibi-Témiscamingue (RCPA)	103

RÉSUMÉ DU MÉMOIRE

Les opérations de récolte forestière en forêt boréale québécoise se caractérisent par la présence de sentiers de débardage parallèles entre eux et alignés perpendiculairement aux chemins. Ceci facilite les déplacements de la machinerie pour amener le bois coupé en bordure de la route d'où il sera transporté aux usines de transformation. Les coûts afférents de cette opération de débardage sont tenus en compte dans l'évaluation des coûts de récolte forestière. Les modèles utilisés pour estimer les coûts de récolte sont généralement basés sur la récolte en coupe totale, ainsi la distance de débardage a rarement été mise en question et la méthode traditionnelle proposée par Matthews (1942) continue à être appliquée. Cependant, quand la récolte intègre des éléments de rétention, la distribution variable du volume dans le bloc de récolte, les coûts de débardage et, par le fait même, les coûts de récolte estimés risquent d'incorporer de biais importants. De plus, il est admis que les coûts de récolte d'une coupe partielle sont plus importants que la coupe totale ou la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS). Cette prémissse limite certainement la pratique de la coupe partielle en forêt boréale et empêche l'obtention des avantages d'une foresterie plus fine qui répondrait à des objectifs de conservation tout en réduisant les coûts de récolte.

Afin de tenir compte des variantes de la coupe partielle et de l'intégration de la rétention des attributs dans les blocs de récolte, des ajustements au calcul des coûts de récolte ont été proposés. Ceci implique de considérer différents éléments tels que la distribution des volumes dans les blocs de récolte, le prélèvement variable, la distribution et la position des obstacles et l'influence de ces variables sur la distance de débardage. Ces éléments spatiaux et structuraux associés aux coupes partielles peuvent devenir très complexes, dépendamment des objectifs de la rétention variable, et avoir pour conséquence une estimation des coûts très onéreuse.

Nous avons réalisé l'étude à partir des données issues du Réseau de coupes partielles de l'Abitibi (RCPA). Les sites sont situés au sud de Rouyn-Noranda et au nord de La Sarre. Les traitements sylvicoles appliqués ont été la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS), la coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) et /ou la coupe partielle à rétention variable (CPRV).

Dans cette étude les variables telles que la distance de débardage, la distribution du volume et les coûts de récolte ont été analysées. D'abord, la distance de débardage a été estimée et comparée selon trois méthodes : la numérisation des sentiers de débardage sur les photos aériennes après récolte, le format raster et la méthode traditionnelle. L'analyse a permis de déterminer que les méthodes sont comparables, mais que la méthode raster est plus efficace pour intégrer la distribution et le prélèvement variable dans le contexte de coupes partielles. L'analyse des volumes du réseau RCPA a démontré que les volumes ne se distribuaient pas de façon homogène à l'intérieur des blocs de récolte comme prévu dans l'ensemble des modèles d'estimation des coûts. En effet, 67,71% de la variation du volume s'explique par la variation à l'intérieur des blocs. Alors, afin d'intégrer cette variabilité, nous avons incorporé la distribution du volume dans les blocs de récolte selon deux méthodes d'assignation. Cette

incorporation a été réalisée à partir du volume obtenu des placettes d'échantillon permanentes, assignés selon la photo-interprétation ou la méthode d'interpolation de Thiessen, afin d'obtenir un volume pondéré par leur zone d'influence. Nos résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre les méthodes d'assignation.

Ensuite, la distance raster et l'assignation des volumes avec l'interpolation de Thiessen ont été combinées afin d'ajuster la distance de débardage qui tient compte de la forme et de la distribution du volume dans les blocs de récolte. Les résultats de cette analyse combinée ont montré que la distance de débardage était sensible aux changements de la distribution et du taux de prélèvement. Ainsi, l'analyse de la distance de débardage combinée a été intégrée à l'estimation des coûts de débardage et des coûts de récolte forestière. Les coûts de débardage ($$/m^3$) des secteurs d'étude varient de l'ordre de 10% en CPRS selon la distance de débardage utilisée et peuvent varier d'environ 15% en CPPTM si les éléments de rétention sont bien identifiés.

L'estimation de distance de débardage combinée a été incorporée à la création de modèles simulés de récolte considérant différentes positions et concentrations du volume à l'intérieur d'un bloc de récolte, ainsi que différents pourcentages et configurations de la rétention, pour un bloc de forme régulière, de 500 mètres de profondeur et de taille moyenne de 62 ha. Nos résultats montrent que la distance de débardage considérant tous ces éléments (volume, position, rétention) peut varier considérablement. La variation majeure s'a observé lorsque s'a réalisé une rétention agglomérée de 40%. La position de la rétention a affecté davantage la distance de débardage si elle est disposée dans les 250 mètres les plus proches du chemin. La variation de la distance de débardage selon la position et la concentration du volume, ainsi que la configuration et le pourcentage de rétention affecteront aussi le type de machine de débardage à utiliser. Ainsi, il a été possible d'observer une variation maximale des coûts d'opération de l'ordre de 5 $$/m^3$ pour un débardeur à grappin, 3 $$/m^3$ pour un semi-porteur, 2 $$/m^3$ pour un débardeur à câble et 2 $$/m^3$ pour un porteur.

Finalement, notre proposition d'estimation de la distance de débardage combinée permet de manière explicite l'incorporation des éléments de rétention spatiale (forme, taille et volume) et le prélèvement variable *à priori* dans la planification de la récolte. Ainsi, dans un contexte de coupe partielle, la nouvelle estimation de la distance de débardage permettrait d'atteindre les objectifs de structure et de composition d'un aménagement forestier écosystémique, tout en tenant compte des conséquences économiques de cette pratique.

Mots clés : Coupe partielle, rétention variable, distance de débardage, coût de récolte, modélisation spatiale, productivité des opérations, aménagement écosystémique.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les traitements sylvicoles s'appliquent à plusieurs stades de développement de la forêt. Celui ayant le plus d'impact sur le paysage et l'écosystème est sans contredit la coupe totale et ses variantes (Annexe IV). La récolte totale des tiges marchandes, plus spécifiquement la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS), est le mode de coupe le plus répandu au Québec. Cependant, elle n'est pas nécessairement applicable à tous les types de peuplements forestiers (MRN, 2003). Certains types de récoltes permettent l'extraction partielle des tiges et reçoivent le nom de coupes partielles (CP). Cette appellation fait référence à plusieurs types de coupes comme l'éclaircie commerciale, la coupe de jardinage, la coupe progressive et la coupe partielle à rétention variable (CPRV). Les CP visent différentes objectifs, par exemple, d'enlever les tiges malades (MRN, 2003), de maintenir des habitats de plusieurs espèces d'oiseaux (Drapeau et al., 2003), de maintenir des éléments fauniques (Courtois, 2003), de maintenir des éléments floristiques (Fenton, 2005) et, dans certains cas, devancer la récolte des volumes dans le temps (MRN, 2003).

D'autres mécanismes visent non seulement l'extraction partielle des tiges, mais aussi la préservation des éléments structuraux dans le paysage : c'est le cas des coupes à rétention variable (CRV). La rétention variable vise le maintien, pendant au moins une rotation complète, des éléments structuraux particuliers du peuplement récolté comme des îlots boisés, des arbres vivants, des chicots, des débris ligneux au sol ou même des épaisseurs de couverture morte ou des espèces de sous-étages (Pentassuglia, 2003). Les coupes partielles produisent des bénéfices à long terme et sont plus acceptées par le public général (Hassler et Grushecky, 2000). En effet, considérant le contexte forestier actuel, les coupes partielles et la rétention variable deviennent des alternatives à la CPRS très intéressantes. Du point de vue écologique, plusieurs études ont démontré que la biodiversité dans les blocs de coupe présente une relation positive avec le nombre d'éléments structuraux retenus (Sougavinski et Doyon, 2002). Ainsi, les CP et CRV pourraient potentiellement contribuer à diminuer l'effet de rupture de stock des bois matures. Elles permettent d'avoir plus d'options de récolte pour obtenir les volumes recherchés. Malgré ceci, elles ne sont pas encore très répandues. Au

Québec, en forêt publique sous CAAF¹, 116 665 ha ont été récoltés en CPRS alors que seulement 24 013 ha (soit 17 %) l'ont été avec les différents types de coupes partielles pendant la période 2008-2009 (MRNF, 2010). Une des causes pouvant expliquer la faible utilisation de ces traitements est sans doute le coût plus élevé lors de l'abattage et du façonnage, comparativement à une CPRS (Pentassuglia et Meek, 2004). En ce sens, le volume prélevé apparaît comme un facteur important qui diminue dans les CP et affecte directement les coûts de récolte (Meek et Simard, 2000). Parmi les autres causes qui expliquent les coûts de récolte plus élevés, notons entre autres, le fait que les coupes partielles requièrent des équipements adaptés, ainsi que des opérateurs spécialisés. D'autre part, l'équipement requis n'est pas toujours disponible (Meek, 2001).

Cependant, Holmes et al. (2010) ont démontré que le volume de bois extrait par unité d'effort (c.-à-d. la productivité), peut être plus élevé dans les bandes riveraines (en coupe partielle) que dans les coupes à blanc. Ceci, fait de la coupe partielle un traitement de plus en plus envisageable lorsqu'il est bien ciblé. C'est pourquoi il devient très intéressant d'incorporer dans les calculs des coûts de récolte les variables telles que le volume et la distance de débardage ajustées, afin de produire des estimations plus réalistes que les résultats obtenus par les modèles traditionnels (Matthews, 1942), étant donné que les coûts de récolte sont un des facteurs qui influencent la décision d'application des coupes partielles pour les entreprises forestières.

¹ Contrat d'approvisionnement et d'aménagement forestier.

**EFFETS DE L'ESTIMATION
DE LA DISTANCE DE DÉBARDAGE ET DE LA DISTRIBUTION DU VOLUME
SUR LES COÛTS DE RÉCOLTE**

1. Introduction

1.1 La distance de débardage

La récolte d'arbres en forêt nécessite des efforts humains et matériels considérables, ainsi que des machines spécialisées. Dans un système de récolte de bois en longueur, une abatteuse coupe les arbres et les dépose par terre. Puis, un débardeur tire les tiges coupées pour les amener en bordure de la route où leurs branches seront enlevées par une ébrancheuse avant d'être empilées. Dans le système de bois tronçonné, une machine multifonctionnelle abat, coupe et ébranche les arbres et les dépose par terre et un porteur les transporte en bordure de la route où elles sont empilées. Dans les deux cas, le débardage (transport du bois du parterre de coupe au chemin) amène la machinerie à circuler sur des sentiers où elle doit faire plusieurs allers et retours. L'utilisation plus ou moins intensive de ces sentiers est la résultante de la profondeur du bloc de récolte (distance) combinée au volume transporté.

Dans les modèles de production et les fonctions de coûts de récolte, cette distance parcourue pour amener le bois en bordure de route, appelée la distance de débardage, est généralement calculée comme la distance maximale du bloc divisée par deux. Cette méthode a été proposée par Matthews (1942). Cependant, lorsque les éléments structuraux doivent être conservés (forêt résiduelle : coupe à rétention variable), la présence d'obstacles et les niveaux de rétention peuvent influencer les distances de débardage. Par conséquent, incorporer les valeurs des volumes et des distances de débardage ajustées peut amener des impacts significatifs dans le calcul des coûts de récolte, lorsque comparés aux modèles conventionnels utilisés, par exemple, par l'Institut canadien de recherches en génie forestier du Canada (FERIC).

1.2 Le volume à récolter

Les forêts exploitables du Québec constituent le quart d'un territoire de 1 667 441 km². Depuis la réforme forestière de 1986, la valeur de la forêt est principalement chiffrée en volume, soit en mètres cubes de bois (L.Q. 1986 c. 108). C'est la possibilité forestière qui permet de quantifier le volume disponible à la récolte selon la Loi sur les forêts (L.R.Q., c. F-4.1). En 2010, la possibilité forestière en forêt publique était de 32 196 500 m³ (MRNF, 2010), dont, 67,6% correspondent au groupe SEPM (Sapin, Épinette, Pin gris et Mélèze). Cette possibilité étant attribuée sur un territoire sous contrat d'aménagement de près de 35 millions d'hectares. Compte tenu des variations climatiques et édaphiques sur le territoire et de l'ensemble des facteurs abiotiques et biotiques ayant un impact sur la productivité des essences forestières (perturbations naturelles, types de dépôts, compétition, etc.), il est clair que des variations importantes du volume peuvent être observées au sein d'un peuplement forestier. Ainsi, il n'est pas rare de trouver des trouées, des ouvertures et des concentrations de volume à l'intérieur du peuplement.

C'est donc la variable volume qui a le plus d'impact sur la productivité de la récolte. Cette productivité est affectée autant pour la taille individuelle des tiges (abattage – façonnage) que pour le volume de charge sur les équipements de débardage. À titre d'exemple, la productivité d'une abatteuse-façonneuse (m³/hmp) peut tripler, passant de 9 m³/hmp pour un volume par tige de 0,05 m³ à 32 m³/hmp pour un volume par tige de 0,30 m³ (OIFQ, 2009). Ainsi, le volume moyen par arbre influence la sélection des machines et affectera aussi leur productivité (Jirousek et al., 2007).

1.3 La distance de débardage combinée (distance-volume)

Lors de la récolte forestière, deux informations nous apparaissent essentielles dans la planification du débardage : le volume individuel et le volume total disponible dans le parterre de coupe (Richardson et Makkonen, 1994 ; Holtzscher et Lanford, 1997 ; Kluender *et al.*, 1998 et Renzie et Han, 2000). Nonobstant, d'autres informations ayant un impact sur la rentabilité des opérations doivent aussi être considérées, telles l'essence, la qualité, la

traficabilité, etc. La considération du volume individuel des tiges est importante dans le choix des machines, ainsi que dans la productivité de ces dernières. Le volume total, de son côté, permettrait d'évaluer le nombre de machines par secteur de récolte et la durée des opérations. Ainsi, lors de la planification forestière, la considération de ces deux informations permettrait de rendre les opérations plus rentables.

Une combinaison de l'emplacement de la concentration des volumes et de la distance de débardage permettrait de pondérer l'effort de débardage en fonction de la localisation du volume. Ainsi, si des volumes élevés sont concentrés à une grande distance du chemin, davantage de voyages seront nécessaires afin d'acheminer ces volumes en bordure de la route, donc une distance de débardage plus élevée devrait être obtenue.

Une analyse du comportement des deux variables ensemble (distance-volume) implique l'utilisation d'une méthode combinant la position et concentration des volumes et la distance de débardage. Une méthode appelée « raster-centroïde » (Valeria, 2003), serait une méthode qui permettrait de réaliser ce type d'analyse, car elle permet de travailler (l'information d'intérêt) au niveau des pixels, soit la distance de chaque pixel au bord de la route ou la valeur du volume à chaque position à l'intérieur du bloc ou sous-bloc de récolte. Cette méthode sera analysée en profondeur dans les sections suivantes.

1.4 Le coût de récolte forestière

Indépendamment du type de coupe forestière à pratiquer, les opérations réalisées génèrent des coûts d'approvisionnement forestier. Ces coûts incluent les coûts de gestion, le coût du réseau routier, le coût de récolte et le coût de transport (Palander, 1997 ; Valeria, 2003).

Tous ces coûts sont affectés d'abord par la dispersion des aires de coupe, la taille des tiges, la dimension des assiettes de coupe, le réseau routier existant et à construire, la distance de l'usine, les machines utilisées et le type de coupe. Cependant, concernant ces facteurs, certains ont plus d'influence que d'autres sur les coûts. Dans le cas des coupes partielles, par

exemple, les coûts d'implantation sont supérieurs à ceux des coupes totales de 115% à 185% en bordure de route. Cela est principalement dû aux frais de supervision additionnels, l'encombrement créé par les tiges résiduelles et les effets des variations du volume par tige (Meek, 2004). La planification de la récolte est aussi un facteur qui requiert plus d'attention dans la dispersion des coupes par rapport aux coupes totales (Hedin, 1995 ; Nadeau et al., 2002).

Le coût de récolte comprend donc toutes les activités qui sont réalisées pendant l'extraction du bois d'un bloc de récolte au bord de la route où les variables les plus importantes sont le volume par tige, la distance de débardage et la proportion d'arbres à abattre (Tufts, 1997).

1.5 Objectifs et hypothèses de recherche

Objectifs de recherche

L'objectif général de ce projet est d'élaborer un modèle spatial capable d'estimer les coûts de récolte en considérant les obstacles majeurs, la forêt résiduelle (réception) ainsi qu'une distribution variable des volumes à prélever en forêt boréale québécoise.

Les objectifs spécifiques visent à :

- (1) Sélectionner une méthode efficace d'estimation de la distance de débardage à partir d'un plan de récolte forestière en forêt boréale québécoise.
- (2) Déterminer les effets de l'estimation du volume et de sa distribution dans le bloc de récolte sur la distance de débardage.
- (3) Déterminer les effets de la distance de débardage et la distribution variable des volumes à prélever sur le coût de récolte de ces deux variables.
- (4) Proposer un modèle capable d'estimer les effets de la distance de débardage et la distribution variable des volumes à prélever sur le coût de récolte de la coupe partielle et à réception variable en forêt boréale.

Hypothèses de travail

Puisqu'au Québec la récolte forestière se réalise via des sentiers de débardage parallèles entre eux et perpendiculaires aux chemins, nous posons comme première hypothèse que l'estimation de la distance de débardage à l'aide des photos aériennes (méthode de référence) ne diffère pas significativement de la méthode format raster (Valeria, 2003). Ceci, permettrait de proposer la méthode format raster comme une alternative au calcul traditionnel de la distance moyenne de débardage en forêt boréale, parce que cette méthode facilite l'intégration des obstacles et de la rétention forestière, contrairement à la méthode de Matthews (méthode traditionnelle d'estimation de la distance de débardage).

En coupe totale, les fonctions traditionnelles d'estimation des coûts de récolte n'intègrent pas l'effet de la distribution des volumes dans le bloc à récolter (Ref. FERIC INTERFACE et interface MAP). Toutefois, l'effet de cette variable peut différer en contexte de coupe partielle et à rétention variable et alors notre deuxième hypothèse propose que les valeurs ajustées du volume récolté qui tiennent compte de leur distribution dans le bloc de récolte auront des effets significatifs sur la distance de débardage et sur les coûts de récolte.

Finalement, nous posons comme troisième hypothèse que l'intégration de la distribution du volume dans le bloc de récolte et de la méthode raster d'estimation de la distance de débardage aura des effets significatifs sur le coût de récolte selon le niveau de rétention sélectionnée.

2. Revue de la littérature

2.1 Estimation de la distance de débardage

Le débardage est défini comme étant l'opération qui consiste à transporter les arbres abattus entiers, les troncs ou les billes, de l'aire de coupe jusqu'en bordure de la route (OIFQ, 1996). Pour transporter les arbres abattus, il faut que la machinerie se déplace à travers des sentiers de débardage. Au Québec, les sentiers de débardage sont généralement parallèles entre eux et perpendiculaires à la route. De plus, ils ne doivent pas occuper plus de 25 % des superficies des aires de coupe (Anonyme, 2006). Dans les coupes traditionnelles, les sentiers de débardage sont espacés d'environ 20 mètres. Cependant, dans les coupes partielles, cette distance pourrait être plus grande pour faciliter les opérations de récolte et diminuer la quantité de blessures lors du débardage (Meek, 2006).

La méthode d'estimation de la distance de débardage à utiliser dépend de la forme du bloc de récolte, de l'installation de jetées (voir Annexe II) ou du débardage direct en bordure de la route. Les différentes façons d'estimer la distance de débardage sont liées au développement de la théorie du transport dans la récolte forestière. Elle est un des critères de base pour la planification du transport et du réseau de chemins (Tu ek et Pacola, 1999). Greulich (2002) décrit la théorie du transport ainsi que l'évolution des calculs de la distance de débardage et les différents éléments (forme du bloc de récolte, installation de jetées ou le débardage direct en bordure de route). Ces éléments ont été incorporés par quelques études afin de mieux estimer la distance de débardage : «... Greulich (2002) considère à Launhardt (1900) comme étant le premier ayant intégré le calcul de la distance de débardage dans son analyse du coût de transport des produits : celui-ci la considère de façon uniforme dans une région circulaire vers son point central. Ensuite, Krueger (1929) publie les courbes économiques de la distance de débardage sous certaines conditions opérationnelles, notamment la distance en ligne droite. Plus tard, Matthews (1942), avec la publication de son livre *Cost control in the logging industry*, a marqué le design et l'analyse du réseau de chemins forestiers. En effet, de son livre sont tirées plusieurs formules de calcul encore utilisées. Ensuite, Greulich (2002)

présente à Sundberg (1952), qui attribue à Almqvist sa contribution sur le calcul de la distance de débardage à une jetée située dans le vertex d'un rectangle. Plus tard, Suddarth et Herrich (1964) ont corrigé certaines formules proposées par Matthews et ont proposé aussi le calcul de la distance moyenne de débardage à un vertex d'un triangle rectangle. Après, Peters (1978) a déterminé la distance moyenne de débardage au vertex de n'importe quel triangle. Pour sa part, Donelly (1978) a déterminé la distance moyenne de débardage dans un polygone de forme irrégulière sur un terrain plat. Enfin, Garner (1979), a étendu la procédure de Donelly aux terrains avec pente... ».

D'autres chercheurs, incluant Greulich, ont aussi développé des formules intégrant d'autres paramètres tels qu'une distribution variable du volume et les obstacles (Contreras et Chung, 2007), pour le design des chemins et l'estimation de la distance de débardage. De même, beaucoup de modèles incluent la localisation des chemins, soit par procédures heuristiques ou par l'utilisation des technologies disponibles depuis quelques années pour optimiser, tel que ArcGIS™.

Matthews est un des chercheurs les plus cités dans la littérature en ce qui concerne la distance de débardage. Encore aujourd'hui, de nombreux systèmes de débardage utilisés dans le monde emploient les formules proposées dans son livre. Dans le cas de la forêt publique du Québec, par exemple, le système de débardage correspond à la méthode de calcul en bordure de route qu'il a proposée.

(a) Débardage direct en bordure de la route dans les blocs de récolte de forme géométrique régulière

Lorsque le débardage se réalise directement en bordure de route dans un bloc de récolte de forme régulière, la distance de débardage moyenne (DD) est calculée comme la distance maximale du bloc (largeur) divisée par deux (Matthews (1942) dans Rojas, 2004). Cette méthode (Fig. 1), est la façon la plus courante d'estimer la distance de débardage où le volume à l'intérieur du bloc est présumé être distribué uniformément.

(b) Débardage direct en bordure de la route dans les blocs de récolte de forme géométrique irrégulière

Quand les polygones présentent une forme irrégulière (Fig. 2), la méthode du centroïde (Koger et Webster, 1984) peut être utilisée afin d'estimer la distance de débardage. Elle consiste à la décomposition d'un polygone en quelques formes connues afin de trouver le centre de masse. À l'aide des systèmes d'information géographique (SIG), cette valeur peut être obtenue facilement. Cependant, des erreurs de surestimation ou de sous-estimation sont fréquentes selon la forme du bloc et la position du chemin par rapport au bloc.

(c) Débardage direct en bordure de la route dans les blocs de récolte de forme géométrique irrégulière : format raster

D'autres solutions peuvent être plus performantes dans le cas des formes de blocs irrégulières. C'est le cas de la combinaison de l'utilisation du format raster² pour la représentation spatiale et de la distance en ligne droite obtenue avec la méthode centroïde au bord du chemin (Valeria, 2003). Afin d'estimer la distance de débardage, Valeria (2003) utilise l'outil d'analyse spatiale d'ArcGis™ et procède en trois étapes (Fig. 3). La première étape consiste à la sélection des chemins par rapport au bloc à évaluer. Ensuite, il effectue la transformation en format raster des distances par rapport au chemin sélectionné. La taille des pixels pour le format raster est déterminée en fonction de la précision voulue, des machines à utiliser et du volume à extraire, une taille de pixels de 10 x 10 m a été recommandée en forêt boréale par Valeria (2003). La troisième étape comporte la superposition du bloc de récolte au format raster contenant les distances par rapport au chemin. Finalement, une fonction de sommation est appliquée pour obtenir la distance moyenne de débardage. Cette méthode permet d'obtenir les valeurs de la distance de chaque pixel, donc de chaque position, jusqu'à la route.

² Le format raster utilise des cellules ou pixels comme unités spatiales et peut être représenté par une matrice rectangulaire de numéros. S'utilise pour les images digitales et sa résolution spatiale est la taille des pixels (Bonham-Carter, 1994).

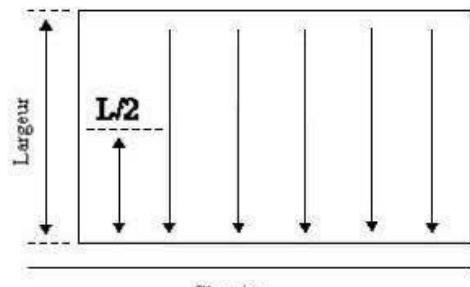


Figure 1 Distance de débardage moyenne ($L/2$) estimée dans les blocs de récolte de forme géométrique régulière et débardage en bordure de la route.

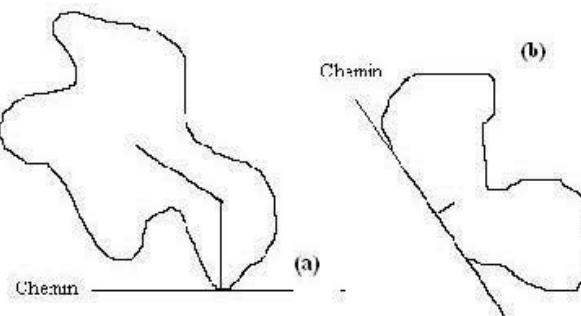


Figure 2 Distance de débardage moyenne (m) estimée dans les blocs de récolte de forme géométrique irrégulière et débardage en bordure de la route. (a) et (b) exemples de blocs de forme irrégulière.

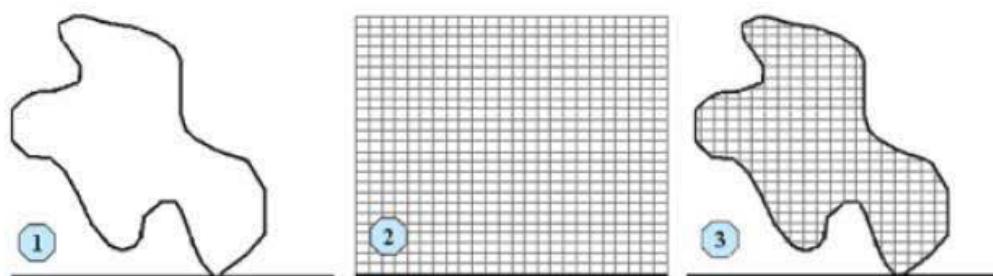


Figure 3 Distance de débardage moyenne (m) estimée dans les blocs de récolte de forme irrégulière, par combinaison format raster-centroïde et débardage en bordure de la route. (1) bloc de forme irrégulière, (2) représentation de la distance raster à partir de la route et (3) combinaison de (1) et (2) pour le calcul de la distance moyenne de débardage.

2.2 Estimation du volume

Le volume d'un *peuplement* représente la somme des volumes individuels d'un groupe d'arbres de composition floristique et écologique homogène formant une unité spatiale intègre (Renaud, 2000). L'estimation du volume d'un bloc de récolte est obtenue principalement à partir des inventaires forestiers, qui varient selon l'objectif poursuivi lors de la planification forestière. Ainsi, on peut se référer à des inventaires de reconnaissance, d'aménagement, de prescription ou de contrôle (OIFQ, 1996). D'autres méthodes telles que la cartographie et la télédétection sont aussi utilisées, mais l'amélioration de leur niveau de précision est encore le but de plusieurs études (Hyyppä et al., 2000).

Au niveau cartographique, la première source d'information pour estimer le volume correspond à la photo-interprétation des photos aériennes (Bolduc et al., 1999). Les photographies aériennes permettent l'identification de patrons de végétation, ainsi que des unités homogènes et de certaines caractéristiques du territoire (Lord et Mclean, 1969). Elles permettent également l'estimation du volume des arbres en utilisant des modèles mathématiques et statistiques (Tarp-Johansen, 2002), ainsi que la détermination de la distribution spatiale des volumes (Uuttera et al., 1998), les effets des épidémies (D'Aoust, 2003) et la détermination de la structure de la canopée (Nakashizuka et al., 1995 ; Fujita et al., 2003).

Au niveau dendrométrique, les procédures d'échantillonnage et l'obtention de l'information sur le terrain, tant pour les inventaires forestiers que pour l'estimation du volume de bois affecté par les opérations de récolte, sont clairement stipulées au Québec (MRNF, 2005). Ainsi, les inventaires forestiers permettent d'estimer le volume en utilisant la valeur moyenne par tige des volumes des placettes inférés au niveau de l'hectare. Le volume par hectare permet de rapporter les coûts totaux associés à la récolte en coût unitaire de récolte ($$/m^3$). Les placettes sont localisées en fonction de l'objectif de l'inventaire et des normes en vigueur. Elles ont une taille fixe. En règle générale, les inventaires en forêt boréale traités en

coupe totale ou CPRS, utilisent des placettes de 400 m², c'est-à-dire un rayon de 11,28 mètres (MRNF, 2005).

L'inventaire forestier tel qu'utilisé actuellement ne permet pas d'intégrer la variation, dans un peuplement, de la taille des tiges. Seules les valeurs moyennes par peuplement ou strates regroupées sont estimées, et il est donc impossible d'identifier la position des tiges les plus grosses ou les plus petites dans le bloc de récolte avec cette méthode.

2.3 Estimation de la productivité des machines lors de la récolte

La productivité est définie comme la quantité de matière produite par unité de surface et de temps (OIFQ, 2003). Elle est influencée par le procédé de récolte appliqué, les machines utilisées pour réaliser les opérations forestières, la main d'œuvre (son expertise), la distance de débardage à parcourir et le volume à récolter. On entend par opération de récolte : l'abattage, le façonnage ainsi que le débardage. Les modèles de productivité permettent de mettre en relation la productivité des machines et les variables qui l'affectent. Afin de construire de tels modèles, certains paramètres doivent être connus, entre autres, la productivité horaire des machines, c'est-à-dire la quantité de volume pouvant être abattue, ramassée ou déplacée par les machines durant une heure. Plusieurs modèles statistiques permettent d'estimer les coûts d'opération associés à la productivité des équipements utilisés dans la récolte forestière. La plupart de ces modèles utilisent la modélisation statistique avec fonctions locales. Dans le cas du modèle de production du débardage, la distance de débardage est la seule variable explicative (Wang, 1997 ; Klepac et Rummer, 2000) et elle est la plus pratique à utiliser pour estimer la productivité du débardage. D'autres variables peuvent être considérées, tels l'intensité de la récolte, le nombre de tiges (Kluender et Stokes, 1996 ; Kluender *et al.*, 1998), la pente, le type de coupe, la charge utile dans la pince (Holtzscher et Lanford, 1997 ; Renzie et Han, 2000), le diamètre à la hauteur de la poitrine (DHP) (Kluender et Stokes, 1996) et le volume par tige.

(a) La distance de débardage, la productivité et les coûts de récolte

Un modèle général de productivité en fonction de la distance de débardage (Fig. 4), montre que la productivité (m^3/hmp^*) des opérations forestières diminue à mesure que la distance de débardage augmente. Ces variations affectent les coûts de débardage et, en conséquence, les coûts de récolte forestière (OIFQ, 1996).

Une des machines utilisées dans les opérations de débardage correspond au porteur. Sa fonction principale est le débardage de billes. Il est plus sensible que les autres débardeurs aux difficultés du terrain, cependant, sa productivité est peu affectée par la distance, car la proportion du cycle de travail affectée aux déplacements est faible par rapport aux temps de chargement et de déchargement (Richardson et Makkonen, 1994 ; OIFQ, 1996).

La productivité des porteurs est affectée négativement par l'augmentation de la distance de débardage. Cependant, elle l'est moins comparativement à un débardeur à câble lorsque la distance de débardage dépasse les 500 m. Richardson et Makkonen (1994) ont estimé que la productivité des porteurs en coupe partielle varie entre 12 et 31 m^3/hmp et qu'elle est davantage affectée par le volume transporté que par la distance parcourue pour mobiliser ce volume (Fig. 5). La capacité de charge des porteurs varie entre 4000 et 20 000 kg.

Le coût de débardage ($$/m^3$) est directement corrélé à la productivité du débardage (m^3/hmp), (Fig. 6). Ainsi, lorsque la distance de débardage (DD) est constante, une augmentation de la productivité fera diminuer les coûts de débardage.

* Hmp : heure machine productive.

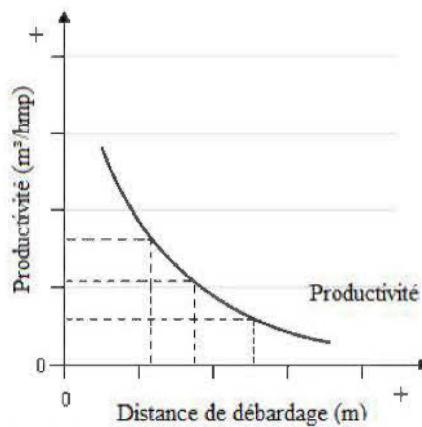


Figure 4 Courbe de productivité des opérations de récolte forestière (m³/hmp) en fonction de la distance de débardage³ (m).

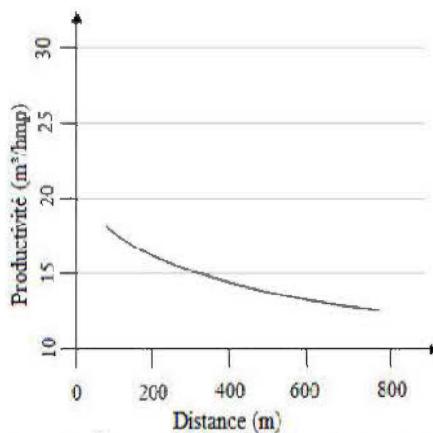


Figure 5 Productivité du porteur (m³/hmp) en fonction de la distance de débardage⁴ (m).

³ Source : Adapté de l'OIFQ, 1996.

⁴ Source : OIFQ, 1996

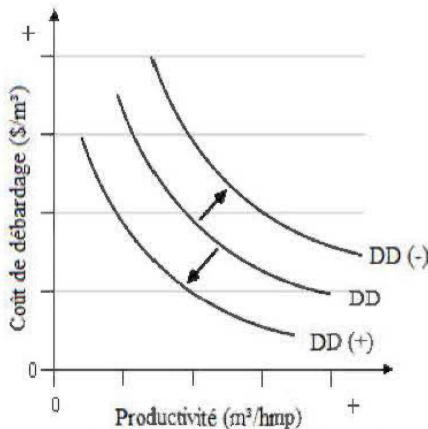


Figure 6 Variation des coûts de débardage ($$/m^3$) en fonction de la productivité⁵ (m^3/hmp). DD(-) indique une diminution de la distance de débardage et DD(+) indique une augmentation de celle-ci.

(b) Le volume à récolter, la productivité et les coûts de récolte

Le volume par tige influence directement la valeur de productivité de l'abattage, l'ébranchage et le façonnage (Valeria, 2003). Les modèles de production pour l'opération d'abattage sont principalement expliqués par les variables : volume par tige et DHP (Richardson et Makkonen, 1994 ; Holtzscher et Lanford, 1997 ; Renzie et Han, 2000). D'autres variables sont également utilisées pour améliorer la réponse des modèles, telles la surface terrière (Lanford et Stokes, 1996 ; Holtzscher et Lanford, 1997), la distance qui sépare les tiges et la proportion d'arbres récoltés (Kluender et Stokes, 1996 ; Kluender *et al.*, 1998). Pour l'ébranchage et le tronçonnage, les modèles sont principalement expliqués par le volume moyen par tige. Tant les modèles de productivité que les fonctions de calcul des coûts de récolte considèrent, en général, l'estimation du volume comme étant celui qui présume une distribution homogène dans les blocs à couper.

Toutefois, dans la forêt boréale en absence d'intervention, on observe que la distribution des volumes ne semble pas homogène. En effet, cette forêt est plutôt irrégulière et inéquieune, elle est la résultante des perturbations naturelles telles que les épidémies et les feux de forêt qui affectent le paysage (Vaillancourt *et al.*, 2008).

⁵ Source : Adapté de l'OIFQ, 1996

Une des machines utilisées dans les opérations d'abattage correspond à l'abatteuse-façonneuse. La productivité d'une tel engin est proportionnelle au volume moyen par tige récolté (dm^3/tige), (Fig. 7). Ainsi, sa productivité augmente lorsque des tiges de plus grande taille sont traitées et est expliquée aussi par un nombre réduit de manipulations par unité de temps. Cette représentation simplifiée (pas nécessairement une courbe droite) ne tient pas compte des variations pouvant affecter la productivité (expérience, fatigue, type de machine, dimension du bois abattu, etc.). Les valeurs de productivité des abatteuses-façonneuses observées en coupe partielle varient entre 4 et 22 m^3/hmp (Richardson et Makkonen, 1994).

La productivité de la récolte est alors fortement influencée par la grosseur des tiges, affectant également l'abattage et le débardage. Elle a donc des impacts directs sur les coûts de récolte. La figure 8, adaptée de Seymour et Gadzik (1985), montre les relations entre le pourcentage de tiges prélevées, la taille des tiges, la productivité des opérations - en heures productives - et le coût associé. On peut également estimer, selon cette figure, l'influence du nombre de tiges récoltées sur la productivité et les coûts des opérations reliées. Lorsque ce nombre diminue par rapport à une coupe totale, une diminution de la productivité peut être observée. Conséquemment, les coûts associés seront plus élevés. Selon cette logique, lorsqu'un nombre plus réduit de tiges est récolté en coupe partielle, une augmentation des coûts des opérations peut être observée.

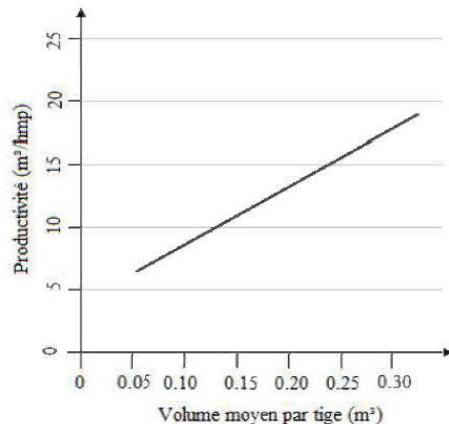


Figure 7 Productivité d'une abatteuse-façonneuse (m^3/hmp) en fonction du volume moyen par tige⁶ (m^3).

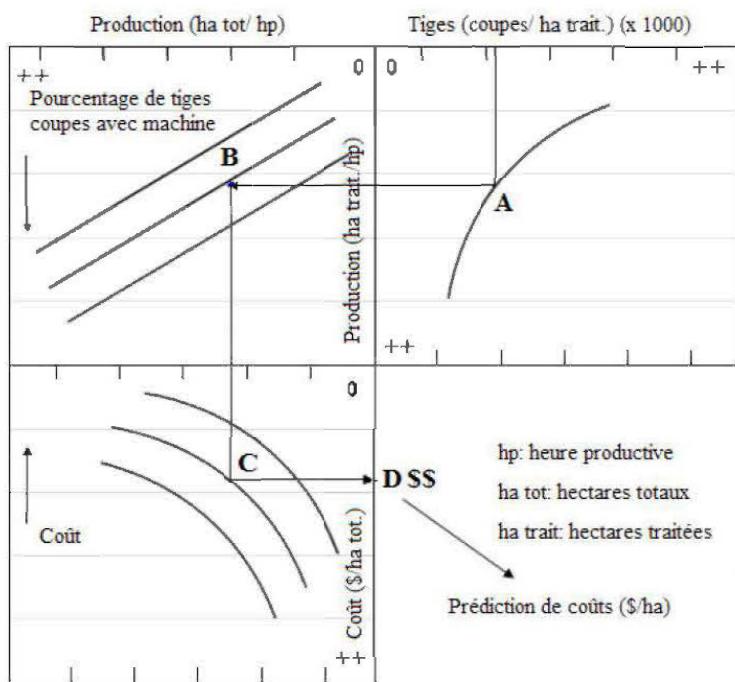


Figure 8 Nombre de tiges récoltées (coupes/ ha traités) en fonction de la production (ha tot/hp) et les coûts de récolte⁷ (\$/ha tot). (A) nombre de tiges en fonction de la productivité (B) pourcentage de tiges en fonction de la productivité (C) coûts de récolte en fonction de la productivité.

⁶ Source : OIFQ, 1996

⁷ Source: Adaptée de Seymour et Gadzik (1985).

2.4 Les coûts de récolte forestière

Les fonctions génériques permettant l'estimation des coûts pour le procédé en bois tronçonné et en bois long sont présentées dans le tableau 1. Ces fonctions, cependant, ne tiennent pas compte de la composante spatiale de la distribution des volumes dans les blocs de coupe.

Tableau 1 Fonctions génériques d'estimation des coûts de récolte selon l'opération et la machine de récolte et le procédé de récolte : bois court ou bois long

Type de coût	Bois court	Bois long
*Coût de l'abattage (\$/ha)	---	$C_a = \frac{V}{aV_t^b T^c} Ch_a$
*Coût de l'ébranchage (\$/ha)	---	$C_e = \frac{V}{a''V_t^{b''}} Ch_e$
(a) Coût de débardage (\$/ha)*	---	$C_d = \frac{V}{a'D'^b T^c} Ch_d$
(b) Coût de débardage (\$/m ³)	---	$C_d = \frac{D^{b'}}{aV^{c'}} Ch_d$
(c) Coût de débardage (\$/m ³)	---	$C_d = \frac{1}{a'D^{b'}} Ch_d$
*Coût de l'abattage-façonnage (\$)	$C_{af} = \frac{V}{aV_t^b} Ch_{af}$	---
*Coût du porteur (\$)	$C_p = \frac{V}{aD^b} Ch_p$	---
*Coût de récolte (\$/m ³)	$C_R = \frac{(C_{af} + C_p)}{V}$	$C_R = \frac{(C_a + C_d + C_e)}{V_{tot}}$
Ch _a : Coût horaire de l'abattage (\$/hmp).	D : Distance moyenne de débardage du bloc (m).	
Ch _d : Coût horaire du débardage (\$/hmp).	V : Volume du bloc (m ³).	
Ch _e : Coût horaire de l'ébranchage (\$/hmp).	V _t : Volume par tige du bloc (m ³ /tige).	
Ch _{af} : Coût horaire de l'abattage-façonnage (\$/hmp).	V _{tot} : Volume total récolté (m ³).	
Ch _p : Coût horaire du porteur (\$/hmp).	T : Nombre de tiges du bloc par hectare (tiges/ha).	
	a, b, c, a', b', c', a'', b'' : Coefficients des fonctions de productivité.	

*Source : Tiré de Valeria 2003 et adaptée de l'Institut canadien de recherches en génie forestier (FERIC)

3. Matériels et méthodes

3.1 Aire d'étude

Notre aire d'étude couvre une surface de 1362 ha ayant été traités par coupes partielles. Nous avons concentré nos analyses sur cinq secteurs d'étude qui font partie du Réseau d'expérimentation de coupes partielles de l'Abitibi (RCPA). Quatre secteurs du réseau (Puiseaux, Collines de Gaudet, Collines de Maskuchi et Fénelon) sont situés dans le domaine bioclimatique de la Pessière noire à mousses (EPN/m), sous-domaine de l'ouest, dans la région écologique 6a-Plaine du Lac Matagami (Blouin et Berger, 2005), (Fig. 9). Ce territoire peu accidenté est recouvert de dépôts organiques dans les sections plus basses et de dépôts minéraux ou sableux dans les sections plus élevées. Dans l'est de la région, le relief est un peu plus accidenté, formé de coteaux aux pentes faibles variant entre 0 et 3%. La végétation résineuse se caractérise principalement par l'épinette noire (*Picea mariana*), très fréquente dans le paysage et, dans une moindre mesure, le sapin baumier (*Abies balsamea*) qu'on retrouve dans les milieux plus accidentés. La végétation feuillue arborescente est composée presque exclusivement de bouleaux à papier (*Betula papyrifera*) et de peupliers faux-trembles (*Populus tremuloides*) (Blouin et Berger, 2005). Le secteur de Dufay, pour sa part, se trouve dans le domaine bioclimatique de la Sapinière à bouleau blanc (SAB-BOP), sous-domaine de l'ouest, dans la région écologique 5a-Plaines de l'Abitibi (Blouin et Berger, 2002), (Fig. 9). Ce territoire correspond à une immense surface plane couverte tantôt d'un dépôt argileux (drainage modéré à imparfait), tantôt d'un dépôt organique (drainage mauvais) et où les peuplements sont improductifs (Blouin et Berger, 2002). Dans cette zone, les espèces les plus abondantes sont le sapin baumier, le bouleau blanc, le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*), l'épinette noire (*Picea mariana*), l'épinette blanche (*Picea glauca*) et le pin gris (*Pinus banksiana*), (OIFQ, 1996). Ces secteurs ont été choisis pour leur représentativité de la forêt présente en Abitibi-Témiscamingue et parce qu'ils présentent un gradient des interventions en coupes partielles susceptibles d'être appliquées en forêt boréale.

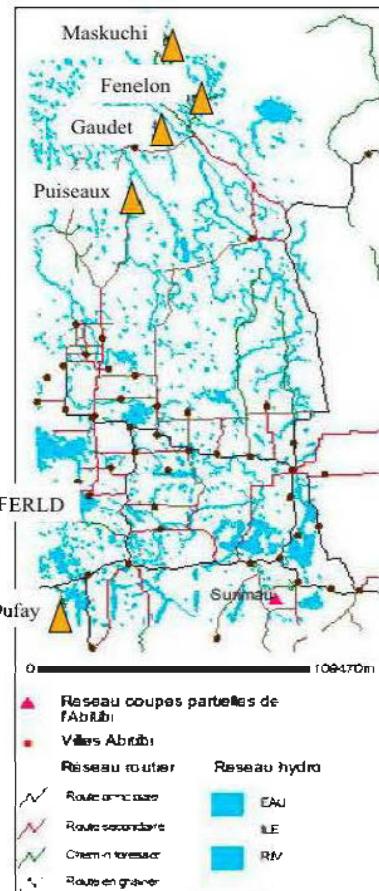


Figure 9 Carte de l'emplacement des secteurs d'étude du Réseau de coupes partielles de l'Abitibi-Témiscamingue (RCPA).

Chacun des secteurs, a été soumis à des traitements prescrits de 1) coupe partielle à rétention variable (CPRV), 2) bloc témoin non traité et 3) bloc de coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS). Des essais en coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) avec l'extraction des arbres matures et des tiges défectueuses ayant un diamètre à hauteur de la poitrine (DHP) plus petit ou égal à 14 cm étaient aussi pratiqués (Tableau 2). Cependant, la présence partielle de chablis et le souci de préserver une fermeture de la canopée ont incité à abandonner la CPPTM et à réaliser des CPRV (Bergeron, 2003). Le procédé de récolte utilisé pour la mise en place des dispositifs fut entièrement mécanisé et réalisé à l'aide d'une abatteuse-façonneuse et d'un porteur. L'objectif de prélèvement dans la coupe partielle à rétention variable a été de 80 % à 90 % du volume marchand sur pied en

choisisant les tiges à prélever de préférence au niveau de tiges dépérissantes et penchées. Les traitements à l'intérieur des blocs avaient une superficie minimale de 29 ha.

Placettes d'échantillon permanentes (PEP) ont été distribuées aléatoirement dans chacun des traitements, et ce pour chaque bloc (Tableau 2). Le nombre de placettes par bloc est relié à la taille des blocs et établi selon les normes d'inventaire au Québec (MRNF, 2005). L'information des dispositifs expérimentaux établis sur le RCPA est présentée à l'Annexe III. D'autres éléments, tels les volumes prélevés et résiduels, ont également été mesurés.

Tableau 2 Description des secteurs d'étude du Réseau de coupes partielles de l'Abitibi (RCPA) présentée par secteur, type de traitement de récolte appliqué, superficie totale par traitement et nombre de placettes d'inventaire effectuées lors de l'établissement du site

Secteur	Région écologique	Traitement	Superficie (ha)	PEP*
Dufay	5a	CPRS	35,03	13
		CPPTM	84,98	13
		Témoin	29,02	13
Fénelon	6a	CPRS	97,46	14
		CPRV	126,03	18
		Témoin	79,38	18
Collines de Gaudet	6a	CPRS	43,11	17
		CPRV	69,23	17
		Témoin	38,15	13
Collines de Maskuchi	6a	CPRS	172,78	58
		CPPTM	226,98	104
		Témoin	130,58	34
Puiseaux	6a	CPRS	85,92	19
		CPRV	83,46	17
		Témoin	93,25	18

*PEP : placette d'échantillon permanente.

3.2 Estimation de la distance de débardage

Nos analyses ont été réalisées au niveau des sous-blocs de récolte : 40 sous-blocs en CPRS et 55 sous blocs en CP (coupe partielle : CPPTM ou CPRV). Ces sous-blocs ont été délimités à l'intérieur de chaque bloc de récolte, selon l'orientation des sentiers de débardage effectués par la machinerie pendant la coupe (Fig. 10). L'information a été tirée des photographies aériennes (Annexe V) numérisées et ensuite utilisées pour une analyse fine des sentiers de

débardage. Pour ce faire, nous avons numérisé les sentiers de débardage ayant été parcourus par la machinerie et leurs déplacements, tout en tenant compte des obstacles (forêt résiduelle et obstacles majeurs) pour chacun des blocs de récolte. Les sentiers de débardage ont été numérisés manuellement en utilisant les photographies aériennes après récolte et un stéréoscope. Les sentiers ont ensuite été ajoutés aux autres couches d'information (délimitation de bloc de récolte et chemins forestiers), à l'aide de l'extension *Image Analysis* d'Arcview (version 3.2), pour les analyses.

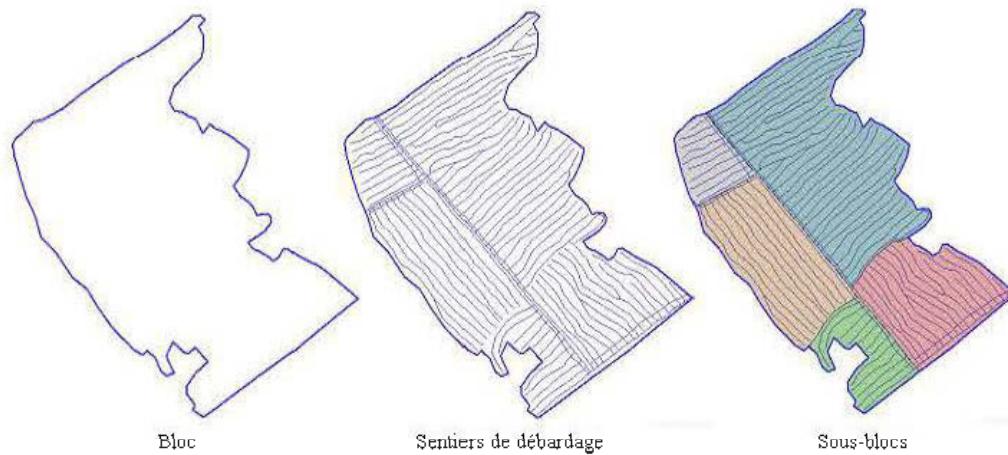


Figure 10 Illustration des subdivisions des blocs en sous-blocs de récolte, selon le sens des sentiers de débardage effectués par la machinerie, pendant la récolte forestière.

L'estimation de la distance de débardage a été réalisée selon trois méthodes, soit la distance maximale parcourue par sous-bloc divisé par deux (Équation 1), considérée comme étant la méthode traditionnelle⁸ d'estimation (DIST_A); la distance estimée à partir de la photo-interprétation des photographies aériennes d'après récolte (Équation 2), appelée aussi distance de référence (DIST_B); et la méthode raster-centroïde (DIST_C) calculée en combinant le format raster pour la représentation spatiale et la distance en ligne droite de la méthode centroïde, à l'aide de l'extension *Spatial Analyst* d'ArcView (version 3.2). La figure 11 montre un exemple de l'obtention des distances de débardage selon chacune des méthodes utilisées.

⁸ On a réalisé le calcul en prenant compte de deux distances maximales par sous-bloc.

$$\overline{D}_A = \frac{D_{\max}}{2} \quad \text{Équation 1 : DIST_A}$$

Où :

\overline{D}_A : Distance de débardage moyenne du sous-bloc (m).

D_{\max} : Distance maximale du sous-bloc (m).

$$\overline{D}_B = \frac{\sum_{s=1}^n D_s}{n} \quad \text{Équation 2 : DIST_B}$$

Où

\overline{D}_B : Distance de débardage moyenne numérisée (distance de référence) (m).

D_s : Longueur du sentier de débardage « s » du sous-bloc (m).

s : Identifiant ou indice du sentier à l'intérieur du sous-bloc.

n : Nombre total de sentiers de débardage dans le sous-bloc.

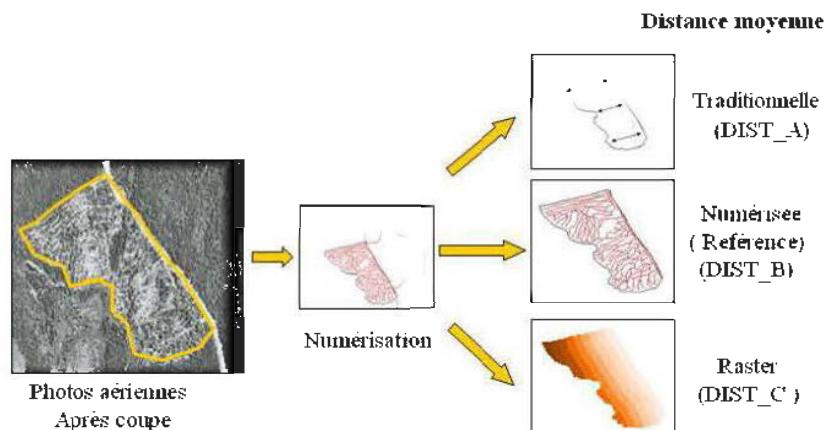


Figure 11 Représentation graphique des méthodes d'estimation de la distance de débardage moyenne : (a) traditionnelle (DIST_A), (b) numérisée ou référence (DIST_B) et (c) raster (DIST_C).

Lors de la photo-interprétation des photographies aériennes après la récolte, d'autres variables ont été estimées pour chaque sous-bloc telles : le nombre d'obstacles, l'aire du polygone et la forme du polygone. La perite des sous-blocs n'a pas été considérée compte tenu qu'elle est peu significative dans les régions écologiques généralement plaines étudiées (Blouin et Berger, 2002 ; 2005). Le nombre d'obstacles (Fig. 12) a été déterminé en comptabilisant visuellement sur les photos aériennes la présence d'éléments (forêt résiduelle ou obstacles majeurs) ayant affecté les changements de direction des sentiers de débardage.

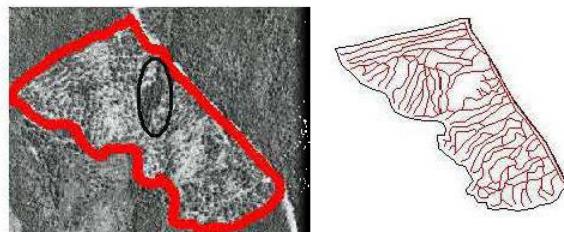


Figure 12 Illustration de la numérisation des sentiers de débardage et visualisation, dans la photographie aérienne, d'obstacles considérés dans l'estimation du nombre d'obstacles (forêt résiduelle et/ou obstacles majeurs).

L'aire des polygones (sous-blocs) a été mesurée en hectares, tandis que leur forme a été caractérisée à l'aide de l'extension *Patch Analyst* et de l'Indice de forme du polygone ou "Mean shape index" (MSI⁹) d'ArcView.

Afin de tester leur influence sur la variation des distances de débardage, les variables obstacles (nombre), aire du polygone et forme du polygone ont été ajoutées aux analyses effectuées à l'aide des modèles mixtes (Tableau 3). Ainsi, chaque variable a été soumise à des analyses de variance. Les distances de débardage (obtenues des trois méthodes), ont été comparées à l'aide d'une ANOVA simple. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel statistique R (R Development Core Team, 2008).

⁹ MSI > 1; MSI = 1 lorsque la forme du polygone est régulière, soit circulaire ou carrée. MSI est la somme du périmètre de chaque zone, divisée par la racine carrée de l'aire de la zone (hectares) pour chaque classe (au niveau de classe) ou pour toutes les zones (au niveau du territoire), et ajusté par un standard circulaire (polygones) ou standard carré (grids), divisée par le nombre de zones (McGaril et Marks (1994) dans Elkie, Rempel et Carr, 1999).

Chaque modèle candidat (Tableau 3) considéré correspond à une hypothèse définie à priori (Mazerolle, 2006). Ainsi, deux modèles généraux (avec DIST_A et DIST_C) ont été créés à partir des variables considérées pour estimer DIST_B (modèles 1 et 17 du Tableau 3).

Tableau 3 Modèles candidats permettant d'expliquer la distance de débardage de référence (DIST_B) à partir de la méthode traditionnelle (DIST_A) et raster (DIST_C) selon le traitement de récolte (TRAIT) et les variables considérées: nombre d'obstacles (OBSTACLES), aire du polygone (AIRE_POLYG) et indice de forme du polygone (FORME_POLYG)

Variables affectant l'estimation de DIST_B	
N°	Modèles
1	DIST_A+OBSTACLES+AIRE_POLYG+FORME_POLY+TRAIT
2	DIST_A+OBSTACLES+AIRE_POLYG+TRAIT
3	DIST_A+OBSTACLES+TRAIT
4	DIST_A+TRAIT
5	DIST_A
6	DIST_A+OBSTACLES+AIRE_POLYG+FORME_POLY
7	DIST_A+OBSTACLES+AIRE_POLYG
8	DIST_A+OBSTACLES
9	DIST_A+AIRE_POLYG+FORME_POLY+TRAIT
10	DIST_A+AIRE_POLYG+FORME_POLY
11	DIST_A+AIRE_POLYG
12	DIST_A+AIRE_POLYG+TRAIT
13	DIST_A+OBSTACLES+FORME_POLY+TRAIT
14	DIST_A+OBSTACLES+FORME_POLY
15	DIST_A+FORME_POLY+TRAIT
16	DIST_A+FORME_POLY
17	DIST_C+OBSTACLES+AIRE_POLYG+FORME_POLY+TRAIT
18	DIST_C+OBSTACLES+AIRE_POLYG+TRAIT
19	DIST_C+OBSTACLES+TRAIT
20	DIST_C+TRAIT
21	DIST_C
22	DIST_C+OBSTACLES+AIRE_POLYG+FORME_POLY
23	DIST_C+OBSTACLES+AIRE_POLYG
24	DIST_C+OBSTACLES
25	DIST_C+AIRE_POLYG+FORME_POLY+TRAIT
26	DIST_C+AIRE_POLYG+FORME_POLY
27	DIST_C+AIRE_POLYG
28	DIST_C+AIRE_POLYG+TRAIT
29	DIST_C+OBSTACLES+FORME_POLY+TRAIT
30	DIST_C+OBSTACLES+FORME_POLY
31	DIST_C+FORME_POLY+TRAIT
32	DIST_C+FORME_POLY

Tel que s'observe dans le tableau précédent, pour chaque modèle général, quinze sous-modèles ont été créés en combinant les variables étudiées. La variable traitement de récolte appliquée (TRAIT) a aussi été incluse afin de tester son influence sur la distance de débardage. Le degré de preuve (*strength of evidence*) des modèles candidats a été déterminé en se basant sur la différence de critère d'information d'Akaike (AIC) corrigé pour petits échantillons (ΔAICc)⁴ et du poids d'AICc (w). Par la suite, l'inférence multi-modèle a été réalisée afin de quantifier l'effet de chaque variable sur la distance de débardage.

3.3 Analyse du volume à récolter

(a) Analyse de la distribution spatiale des volumes dans les blocs de récolte.

Cette distribution a été analysée en observant sa variation à l'intérieur des blocs de récolte et des secteurs, pour déterminer si la forêt (avant coupe), présentait effectivement une distribution spatiale des volumes non homogène. Une analyse de la normalité de la distribution des volumes et une analyse de variance de cette variable, au niveau des blocs, ont été effectués. Les secteurs étudiés présentaient une taille des blocs qui variait entre 29 ha et 126,03 ha avec une valeur moyenne de 53,56 ha. Le nombre total de placettes analysées correspondait à 191.

(b) Estimation des volumes moyens à l'hectare par bloc

Les volumes moyens à l'hectare ont été estimés à partir des placettes échantillon (en moyenne 17 placettes par bloc) de 400 m². L'estimation des volumes moyens à l'hectare a aussi été réalisée au niveau des blocs de récolte.

⁴ S'utilise l'AIC ou l'AICc, selon le nombre d'échantillons (n) et le nombre de paramètres (k) considérés. Si n/k est $<\sim 40$, AICc peut être choisi. Le ΔAIC indique la probabilité du modèle: $\Delta\text{AIC} < 2$ indique un modèle très plausible; $4 < \Delta\text{AIC} < 7$ indique un modèle moins plausible et $\Delta\text{AIC} > 10$ indique un modèle improbable. Pour ça part, w_i indique la probabilité d'être le meilleur modèle entre les modèles candidats.

Dans le but d'intégrer la répartition hétérogène des volumes à l'intérieur des blocs de coupe, nous avons utilisé deux méthodes d'assignation de superficie aux volumes observés: la photo-interprétation des photos aériennes avant coupe (Annexe V) et l'interpolation Thiessen (polygones de Thiessen). La photo-interprétation a été choisie parce que la sélection des sites de coupe est faite, généralement, à l'aide des photos aériennes en identifiant leurs caractéristiques telles : la texture, la structure de la canopée ou les changements significatifs dans la composition des espèces (Stone, 1998). Cette méthode permet d'identifier la concentration et la distribution spatiale des agrégats homogènes de la forêt à l'intérieur de chaque bloc de récolte. En utilisant un stéréoscope, on a analysé des paires de photos aériennes avant récolte et des sections présentant des caractéristiques visuellement homogènes ont été identifiés et délimités à l'intérieur de chacun des blocs. D'autre part, l'interpolation de Thiessen a été choisie parce qu'elle génère des polygones formés par tesselation de Voronoi (ou triangulation de Dirichlet) (Gold et Edwards, 1992). Ces polygones définissent areas d'influence autour de points. Ces points, dans ce cas, correspondent au centre des placettes d'inventaire où la valeur du point correspond au volume de la placette à l'hectare. La taille des polygones est donnée par la distance aux points voisins. La taille maximale de chaque polygone de Thiessen a été limitée à la taille du bloc à analyser. Cette méthode rend possible la détermination des petites unités de récolte - représentant soit des volumes déterminés, soit des caractéristiques d'habitats d'intérêt - (Barrett, 1997), et de faire une description des patrons de distribution des volumes dans la forêt (Kristensen, 2006) de façon automatique avec l'aide de logiciels (ex. : Arcview). Étant donné qu'il s'agit du logiciel couramment utilisé au sein des compagnies forestières, nous avons voulu tester son application dans l'estimation des volumes moyens à l'hectare des blocs en considérant les superficies associées.

Les volumes moyens à l'hectare provenant des photo-interprétations et ceux obtenus selon la méthode de polygones de Thiessen, pondérés par les superficies assignées (Équation 4), ont ensuite été comparés au volume moyen des placettes d'inventaire (méthode traditionnelle) pour chaque bloc de récolte (Équation 5).

$$\overline{V}_{Th-Ph} = \frac{\sum_{j=1}^m (V_j \times S_j)}{\sum_{j=1}^m S_j}$$

Équation 4 : Estimation du volume moyen prélevé selon la méthode polygones de Thiessen ou la méthode photo-interprété par bloc de récolte (m³/ha)

Où :

\overline{V}_{Th-Ph} : Volume moyen à l'hectare estimé par la méthode des polygones de Thiessen ou la méthode photo-interprété pour un bloc de récolte donné (m³/ha).

V_j : Volume à l'hectare estimé dans le sous-polygone « j » à l'intérieur d'un bloc de récolte donné (m³/ha).

S_j : Superficie du sous-polygone « j » d'un bloc de récolte donné (ha).

j : Identifiant ou indice du sous-polygone à l'intérieur du bloc de récolte.

$$\overline{V}_{Tr} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}$$

Équation 5: Estimation du volume moyen prélevé à l'hectare selon la méthode traditionnelle (m³/ha)

Où :

\overline{V}_{Tr} : Volume moyen à l'hectare pour un bloc de récolte donné (m³/ha).

V_i : Volume à l'hectare de la placette « i » d'un bloc de récolte donné (m³/ha).

n : Nombre total de placettes pour un bloc donné.

Afin de déterminer quelle méthode pourrait mieux estimer les valeurs du volume moyen obtenu selon la méthode d'assignation de superficie par photo-interprétation, considérée comme référence, les moyennes des méthodes ont été comparées à l'aide d'une « Anova ». Ensuite, une sélection de modèles statistiques à l'aide de la régression linéale a été réalisée. Un schéma des trois méthodes d'estimation du volume moyen à l'hectare est présenté à la figure 13.

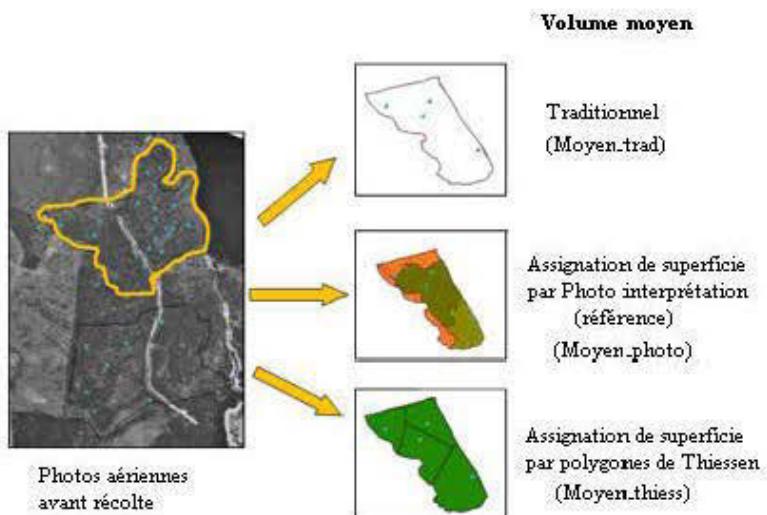


Figure 13 Représentation graphique des méthodes d'estimation du volume moyen à l'hectare : (a) traditionnelle (Moyen_trad), (b) par photo-interprétation (Moyen_photo) et (c) par polygones de Thiessen (Moyen_thiess).

3.4 Analyse combinée de la distance de débardage moyenne et le volume moyen à l'hectare

Cette analyse, appelée « Analyse combinée », a été effectuée au niveau des sous-blocs de récolte. La notion de non homogénéité des volumes sur les sous-blocs a été exprimée par les méthodes d'assignation de superficie, parmi lesquelles on a choisi la méthode de polygones de Thiessen pour réaliser cette analyse. Afin de tenir compte de la distance de débardage ajustée ou distance combinée (obstacles, rétention) et de la répartition des volumes à l'intérieur du sous-bloc de coupe, les modèles de productivité et équations de récolte mentionnées (sections 2.3 et 2.4) ont été adaptés. Une formule exprimant la distance de débardage combinée à la répartition non-homogène du volume est présentée à l'équation 6.

$$\bar{D}^c = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{V_j}{C_k} \times d_j \right)}{n}$$

Équation 6 : Estimation de la distance de débardage combinée au volume, par sous-bloc (m) (DIST_COMB)

Où :

\bar{D}^c : Distance de débardage moyenne par sous-bloc (m).

V_j : Volume estimé à l'intérieur du sous-bloc à la position « j » (m^3).

C_k : Capacité de charge (m^3) du débardeur « k » (gros porteur, semi porteur, etc).

d_j : Distance de la position « j » à l'intérieur du sous-bloc par rapport au chemin (m).

j : Identifiant ou indice du pixel dans le sous-bloc.

n : Nombre total de pixels du sous-bloc.

Le ratio du volume contenu sur un pixel divisé par la capacité de charge de la machine (V_j/C_k) correspond au nombre de voyages pour débarder le bois contenu sur un pixel. Ce nombre prend la valeur 1 chaque fois que le volume à extraire est plus petit que la capacité de charge du débardeur. On a assumé que la machine ira à cette position du bloc et parcourra cette distance, même si la charge est moindre que sa capacité. On a utilisé une valeur de capacité de charge de $1,5 \text{ m}^3/\text{voyage}$. Cette valeur a été déterminée par effets de comparer les changements sur la distance de débardage en prenant compte d'une capacité de charge minimale. V_j correspond à la valeur du volume du pixel « j » qui est déterminée en multipliant la valeur du volume à l'hectare moyen observé dans le bloc ou une section du bloc par la superficie d'un pixel, soit 0,01 d'hectare (superficie d'un pixel $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$). Une taille du pixel plus élevée impliquerait de prendre en compte les déplacements de la machine à l'intérieur d'un pixel, élément non considéré dans l'analyse. En plus, la taille de pixel utilisée tient compte de la séparation entre les sentiers de débardage, qui est d'environ 20 m au Québec. La figure 14 illustre un exemple de la méthodologie appliquée à l'analyse combinée.

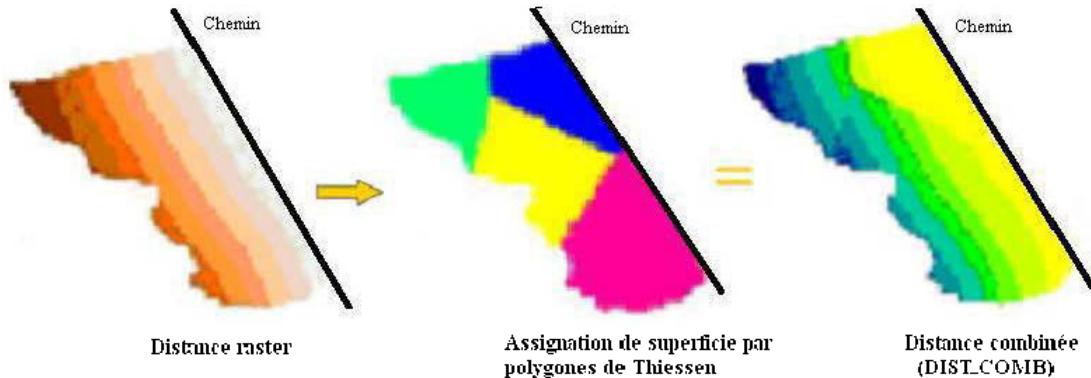


Figure 14 Représentation graphique d'estimation de la distance de débardage moyenne combinée (DIST_COMB) par l'intégration de la distance de débardage raster (DIST_C) et l'assignation du volume par la méthode des polygones de Thiessen.

3.5 Analyse des coûts de débardage et récolte

Afin de tenir compte des modifications apportées au calcul de la distance moyenne de débardage et à l'estimation du volume moyen extrait, nous avons utilisé la formule suivante pour estimer le coût de débardage (Équation 7):

$$C_{pa} = \sum_{j=1}^n \frac{V_j}{a' \times D_a^{b'} \times T_j^{c'}} Ch_p \quad \text{Équation 7 : Coût du porteur ajusté par sous-bloc (\$)}$$

Où :

C_{pa} : Coût du porteur ajusté (\$).

V_j : Volume estimé sur le pixel « j » du sous-bloc (m^3).

T_j : Nombre de tiges à l'hectare estimé sur le pixel « j » (tiges/ha).

D_a : Distance de débardage moyenne ajustée pour le sous-bloc (m).

Ch_p : Taux horaire du porteur (\$/hmp).

a' , b' , c' : Coefficients des fonctions de productivité.

Nous avons également ajusté le coût de l'abattage-façonnage (Équation 8). La distance de débardage (déplacement de la machine) quoiqu'elle n'est pas directement exprimée dans la

formule, aura certainement un impact sur la productivité de l'opération d'abattage-façonnage. Finalement, l'estimation des coûts de récolte ajustés a été modifiée afin de tenir compte des variations des coûts d'abattage-façonnage ajustés et du coût du porteur ajusté (Équation 9).

$$C_{af_a} = \frac{V}{aV_t^b} Ch_{af} \quad \begin{array}{c} \text{Équation 8 : Coût de l'abattage-façonnage ajusté par} \\ \text{sous- bloc (\$)} \end{array}$$

$$C_{R_a} = \frac{(C_{af_a} + C_{pa})}{V} \quad \begin{array}{c} \text{Équation 9 : Coût de récolte ajusté (\$/m}^3\text{)} \end{array}$$

Où :

V : Volume du sous-bloc (m^3).

V_t : Volume par tige du sous-bloc ($m^3/tige$).

Ch_{af} : Coût horaire de l'abatteuse-façonneuse ($$/hmp$).

a, b : Coefficients des fonctions de productivité.

C_{Ra} : Coût de récolte ajusté.

C_{af_a} : Coût d'abattage-façonnage ajusté.

C_{pa} : Coût du porteur ajusté.

Les coûts de débardage des sous-blocs d'étude ont été estimés à partir des formules précédentes et les valeurs des coefficients des fonctions de productivité et les taux horaires pour les équipements ont été obtenus de FERIC permettant d'estimer la productivité et les coûts en coupes partielles (CPPTM et CPRV) et en CPRS. Les coûts de débardage ont été estimés en utilisant les distances de débardage moyennes obtenues par chacune des méthodes d'estimation suivante : la méthode traditionnelle (DIST_A), la méthode de référence (DIST_B), la méthode raster (DIST_C) et la méthode combinée (DIST_COMB). Une analyse des coûts par type de traitement et par méthode d'estimation de la distance de débardage a été effectuée.

4. Résultats

4.1 La distance moyenne de débardage

4.1.1 *Distance moyenne de débardage selon les trois méthodes utilisées*

Distance moyenne de débardage DIST_A

Au niveau des secteurs, la distante moyenne de débardage (DIST_A) observée correspondait à $\bar{X} \pm SD$: $115,11 \pm 67,73$ m. et les valeurs de DIST_A variaient significativement ($p < 0,01$) d'un secteur à l'autre (Fig. 15). Les distances DIST_A plus longues ont été observées dans le secteur Dufay ($\bar{X} \pm SD$: $188,88 \pm 71,74$ m) tandis que le secteur Gaudet contenait les plus courtes ($\bar{X} \pm SD$: $83,79 \pm 46,44$ m). Fénelon, Maskuchi et Puiseaux présentaient respectivement les valeurs $\bar{X} \pm SD$: $123,16 \pm 52,16$ m, $134,34 \pm 70,66$ m et $90,34 \pm 62,54$ m.

Au niveau des traitements, les distances moyennes de débardage DIST_A différaient selon le traitement de récolte appliquée ($p = 0,03$) (Fig. 16). Ainsi, la distance de débardage DIST_A des traitements de CPPTM et de CPRS présentait une différence importante (de plus de 30 m) par rapport au traitement en CPRV ($\bar{X} \pm SD$: CPPTM = $142,19 \pm 70,28$ m, CPRS = $120,35 \pm 64,42$ m et CPRV = $93,64 \pm 64,98$ m).

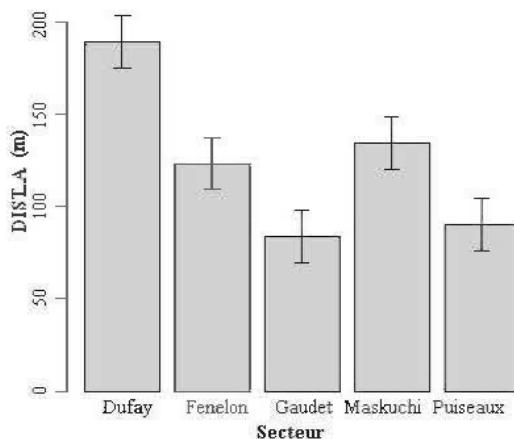


Figure 15 Distance de débardage DIST_A moyenne par secteur d'étude : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux ; et erreur type .

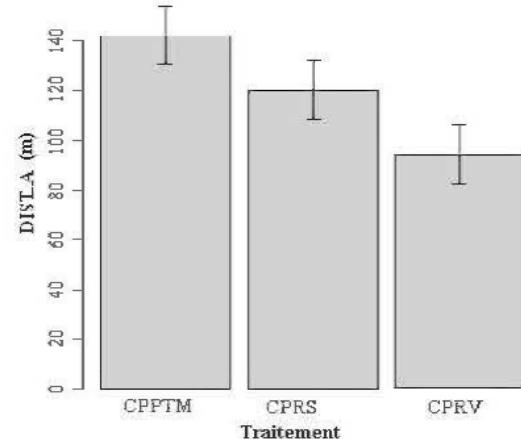


Figure 16 Distance de débardage DIST_A moyenne par type de traitement : CPPTM, CPRS et CPRV ; et erreur type .

Distance moyenne de débardage DIST_B

La valeur moyenne des distances de débardage (DIST_B) des sous-blocs qui a été observée pour l'ensemble des secteurs correspondait à $\bar{X} \pm SD : 108,47 \pm 64,31$ m. La valeur moyenne de distance entre les secteurs ne présentait pas de différences significatives ($p=0,11$) (Fig. 17). Les distances variaient entre $\bar{X} \pm SD : 87,59 \pm 50,18$ m pour le secteur Gaudet à $\bar{X} \pm SD : 138,46 \pm 52,62$ m pour le secteur Dufay. Ceci peut être expliqué principalement par la différence des superficies des sous-blocs entre ces deux secteurs (sous-blocs plus grandes sur Dufay et plus petites sur Gaudet). Cependant, la forme des sous-blocs et les obstacles peuvent aussi affecter la distance de débardage. À titre d'exemple, Puiseaux présentait les superficies de sous-blocs les plus petites sans pour autant afficher les distances de débardage DIST_B les plus courtes ($\bar{X} \pm SD : 91,42 \pm 69,42$ m). Les autres secteurs analysés présentaient des distances moyennes pour Fénelon de $120,42 \pm 56,50$ m et pour Maskuchi de $23,40 \pm 68,75$ m.

La variation de la distance de débardage DIST_B selon le type de traitement de récolte appliquée ne montrait pas de différences significatives ($p=0,28$). Les valeurs moyennes de

distance pour les traitements en CPPTM, CPRS et CPRV étaient respectivement de $\bar{X} \pm SD$: $116,43 \pm 61,14$ m, $116,46 \pm 66,11$ et $94,53 \pm 63,41$ m (Fig. 18).

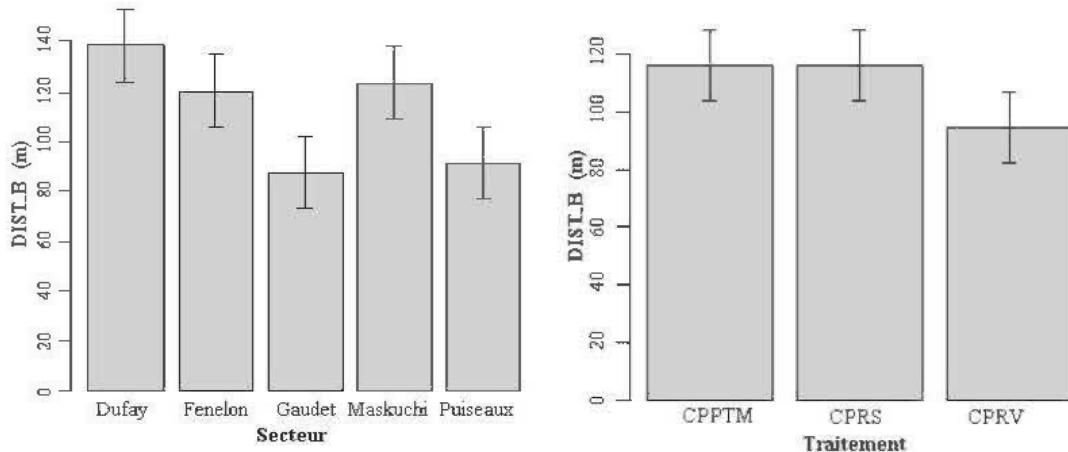


Figure 17 Distance de débardage DIST_B moyenne par secteur d'étude : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux ; et erreur type.

Figure 18 Distance de débardage DIST_B moyenne pour les traitements : CPPTM, CPRS et CPRV ; et erreur type.

Distance moyenne de débardage DIST_C

La valeur moyenne des distances DIST_C observée pour l'ensemble des secteurs était de $\bar{X} \pm SD$: $109,09 \pm 73,68$ m. Les distances DIST_C entre les secteurs (Fig. 19) présentaient différences significatives ($p=0,01$). Tel que dans les deux cas précédents, les valeurs des distances moyennes plus élevées se présentaient dans le secteur Dufay ($\bar{X} \pm SD$: $176,82 \pm 71,33$ m), alors que Gaudet présentait les distances les plus courtes ($\bar{X} \pm SD$: $73,43 \pm 42,88$ m). Fénelon, Maskuchi et Puiseaux présentaient respectivement les valeurs de distance DIST_C de $112,21 \pm 62,03$ m, $124,31 \pm 84,56$ m et $94,71 \pm 71,07$ m.

Au niveau des traitements (Fig. 20), la distance de débardage moyenne DIST_C présentait des différences statistiquement moins significatives ($p=0,09$). Les moyennes de distances observées étaient pour la CPPTM de $129,97 \pm 77,29$ m, pour la CPRS de $116,76 \pm 76,31$ m et pour la CPRV de $88,39 \pm 65,00$ m.

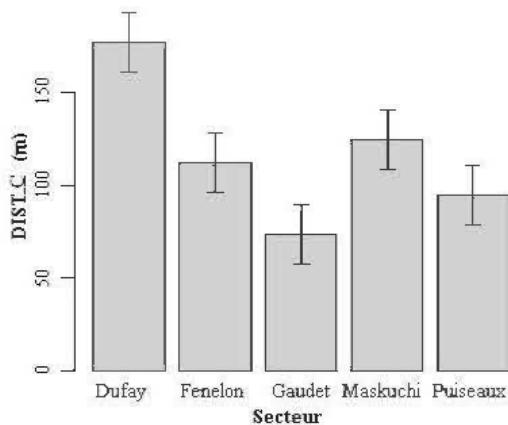


Figure 19 Distance de débardage DIST_C moyenne par secteur d'étude : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux ; et erreur type.

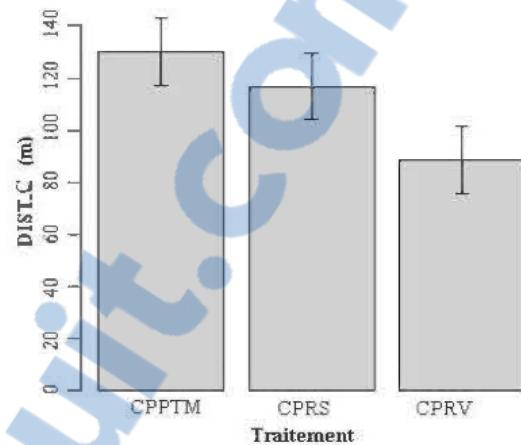


Figure 20 Distance de débardage DIST_C moyenne pour les traitements : CPPTM, CPRS et CPRV ; et erreur type.

4.1.2 Comparaison des méthodes d'estimation de la distance moyenne de débardage

Les résultats indiquent qu'il n'y avait pas des différences significatives entre les trois méthodes d'estimation des distances analysées (DIST_A, DIST_B et DIST_C), ($p=0,76$), Tableau 4.

Tableau 4 Analyse de variance simple de distances de débardage moyennes évaluées à partir des méthodes DIST_A, DIST_B et DIST_C

	Degrés de liberté	Sommes des carrés	Carré moyen	Valeur F	Pr(>F)
Type de distance	2	2599	1299	0,2754	0,7595
La Résiduels	282	1330306	4717		valeur

moyenne de DIST_A correspondait à $\bar{X} \pm SD$: $115,11 \pm 67,73$ m, tandis que les valeurs moyennes de DIST_B et DIST_C correspondaient respectivement à $108,37 \pm 64,31$ m et $109,09 \pm 73,68$ m.

4.1.3 *Identification des variables ayant un impact dans l'estimation de la distance de débardage*

Obstacles

Le nombre moyen d'obstacles observés et leur écart-type correspondaient à $\bar{X} \pm SD : 4,81 \pm 5,98$. Nous remarquons ici un grand écart-type attribuable à la variabilité à l'intérieur des secteurs. Ainsi, par secteur, on observait que le nombre moyen d'obstacles (Fig. 21) ne variaient pas significativement ($p=0,12$). Dufay et Maskuchi présentaient les plus grands nombres d'obstacles identifiés ($\bar{X} \pm SD : Dufay = 6,75 \pm 4,30$ et $Maskuchi = 6,92 \pm 9,16$), tandis que Gaudet et Puiseaux présentaient les nombres les moins élevés d'obstacles observés de tous les secteurs ($\bar{X} \pm SD : Gaudet = 3,31 \pm 2,94$ et $Puiseaux = 3,17 \pm 3,80$). Pour Fénelon, nous avons observé $4,88 \pm 4,72$.

La variabilité à l'intérieur des secteurs était plus importante pour Maskuchi et Puiseaux. Ceci s'explique par la présence de valeurs extrêmes : Maskuchi présentait deux sous-blocs contenant 35 et 36 obstacles et Puiseaux présentait un sous-bloc contenant 17 obstacles. Bien que la topographie de l'ensemble des secteurs était plutôt plane, ce n'était pas le cas du secteur Maskuchi où la présence d'un plus grand nombre d'obstacles peut être expliquée par la topographie plus accidentée. Quant au secteur de Puiseaux, la présence de collines et le degré d'entourbement, caractéristiques de certains secteurs de la Pessière à mousse de l'ouest (Fenton, 2006), ont pu affecter le déplacement de la machinerie.

Dans le cas des traitements, la variation du nombre d'obstacles (Fig. 22) présentait des différences significatives ($p<0,01$). Ces différences provenaient du nombre d'obstacles plus élevé dans la CPPTM ($\bar{X} \pm SD : 8,75 \pm 9,98$). Notons qu'on observait un nombre d'obstacles similaires tant dans la CPRS que dans la CPRV ($\bar{X} \pm SD : 3,82 \pm 3,75$ et $3,69 \pm 3,92$, respectivement).

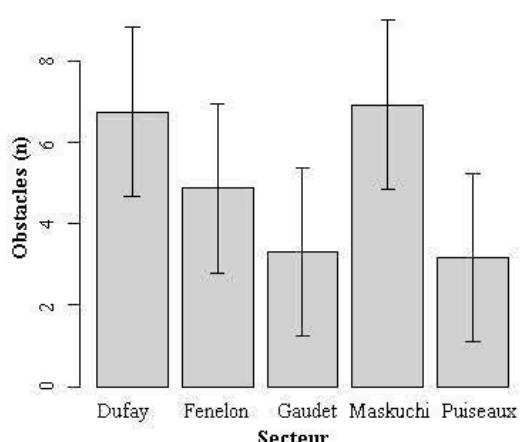


Figure 21 Nombre moyen d'obstacles par secteur d'étude : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux ; et erreur type.

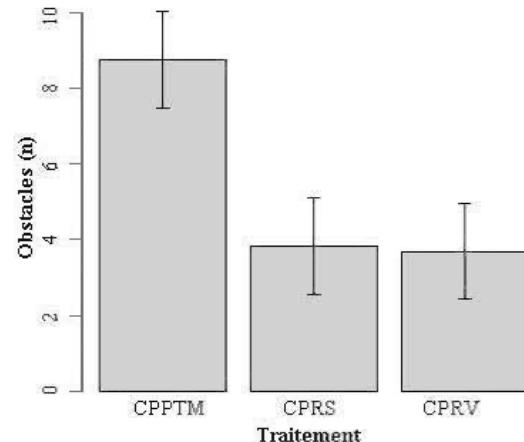


Figure 22 Nombre moyen d'obstacles par type de traitement : CPPTM, CPRS et CPRV ; et erreur type.

Superficie de blocs de récolte (aires des sous-blocs)

Pour l'ensemble des secteurs, les superficies des sous-blocs de récolte variaient entre 0,29 ha et 62,4 ha ($\bar{X} \pm SD$: $10,48 \pm 11,52$ ha). La superficie des sous-blocs de récolte présentait des différences significatives entre les secteurs ($p=0,02$) (Fig. 23). Puiseaux présentait les sous-blocs de récolte de plus petites tailles ($\bar{X} \pm SD$: $5,84 \pm 6,53$ ha). Dufay, pour sa part, présentait les sous-blocs de plus grandes tailles ($\bar{X} \pm SD$: $15,00 \pm 12,33$ ha). Certaines valeurs extrêmes s'observaient dans quelques sous-blocs à l'intérieur des secteurs : Fénelon = 55,74 ha, Gaudet = 19,47 ha et 23,64 ha, Maskuchi = 62,40 ha et Puiseaux = 19,88 ha et 24,13 ha. Ces valeurs expliquent la différence des moyennes entre les secteurs. S'observaient aussi des différences significatives ($p=0,06$) de l'aire des sous-blocs de récolte par type de traitement (Fig. 24). Les sous-blocs traités en CPPTM présentaient la plus grande taille, donc la valeur moyenne était de 15,59 ha ($\bar{X} \pm SD$: $15,59 \pm 15,17$ ha). À l'opposé, les traitements en CPRV présentaient la plus petite taille ($\bar{X} \pm SD$: $7,96 \pm 10,57$ ha) bien qu'il avait certains sous-blocs de plus grandes tailles (21,78 ha, 28,72 ha et 55,74 ha). En ce qui concerne la CPRS, la taille moyenne des sous-blocs se trouvait entre les deux autres traitements ($10,14 \pm 9,56$ ha).

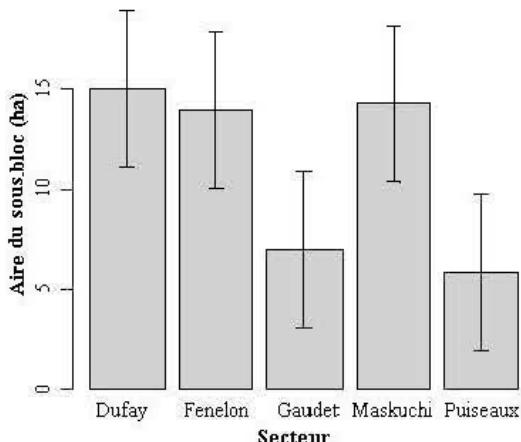


Figure 23 Aires moyennes des sous-blocs (ha) par secteur d'étude : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux ; et erreur type.

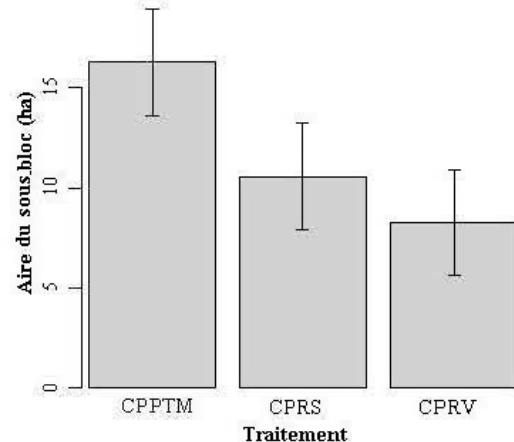


Figure 24 Aires moyennes des sous-blocs (ha) par type de traitement : CPPTM, CPRS et CPRV ; et erreur type .

Indice de forme des blocs de récolte (sous-blocs)

Pour l'ensemble des secteurs, la valeur moyenne des indices de forme des sous-blocs correspondait à $\bar{X} \pm SD$: $1,51 \pm 0,35$. Les indices de forme des sous-blocs de récolte présentaient des différences significatives ($p=0,03$) (Fig. 25). Dufay présentait la moyenne ($\bar{X} \pm SD$: $1,24 \pm 0,09$) la plus proche à la valeur 1, donc les formes les plus régulières des secteurs d'étude. Puiseaux, au contraire, présentait la moyenne la plus élevée ($\bar{X} \pm SD$: $1,65 \pm 0,45$) et, en conséquence, un nombre plus élevé de sous-blocs de formes irrégulières.

Selon les traitements de récolte appliqués, nos résultats montrent que la forme des sous-blocs ne variait pas significativement ($p=0,35$). Donc, il n'y avait pas des différences significatives entre la forme des polygones traités en CPPTM, CPRV ou CPRS (Fig. 26).

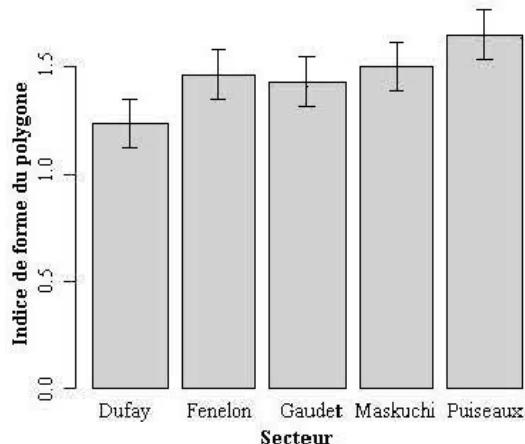


Figure 25 Indices de forme moyens des sous-blocs par secteur d'étude : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux ; et erreur type.

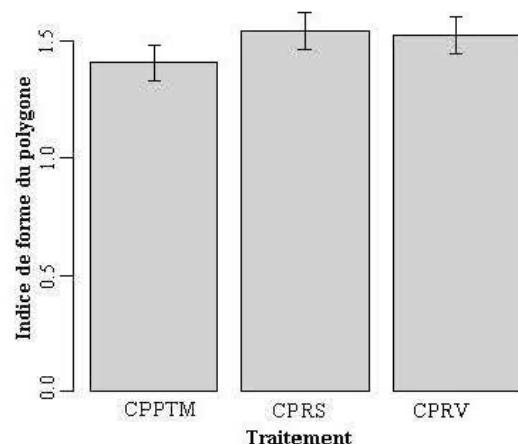


Figure 26 Indices de forme moyens des sous-blocs par type de traitement : CPPTM, CPRS et CPRV ; et erreur type.

4.1.4 Analyse multi-modèles de l'effet des variables identifiées sur l'estimation de la distance de débardage

Les modèles considérant la variable DIST_C étaient ceux qui expliquaient le mieux la distance de débardage DIST_B (Tableau 5). Le modèle 21 était, selon l'évidence ratio, 1.26 fois plus parcimonieux que le modèle 24. Le troisième modèle en ordre de ΔAIC_c (modèle 32) était 1.81 fois moins parcimonieux¹⁰ que le modèle 21. Étant donné que plusieurs modèles combinant des variables présentaient des valeurs de $\Delta AIC_c < 2$, ils étaient aussi parcimonieux. Les modèles avec $\Delta AIC_c < 7$ étaient moins parcimonieux, mais ils étaient tous probables. Donc, pour déterminer l'effet de chaque variable des modèles plausibles sur la distance de débardage DIST_B, une inférence multi-modèles a été effectuée (Tableau 6). La variable individuelle ayant le plus d'effet sur la distance de débardage moyenne DIST_B pouvant mieux l'expliquer correspondait à la variable DIST_C. Les variables OBTACLES, AIRE DU POLYGONE, FORME DU POLYGONE et TRAITEMENT ne présentaient pas d'effet sur l'estimation de la distance de débardage (le zéro n'est pas exclut).

¹⁰ Modèles qui utilisent le minimum de éléments pour expliquer un phénomène.

Tableau 5 Résultats de la comparaison des modèles d'estimation de la distance de débardage moyenne DIST_B dans cinq secteurs du RCPA pour 95 sous-blocs de récolte. Chaque modèle est présenté selon les Critères d'information d'Akaike : le nombre de paramètres (K), le critère d'information d'Akaike de second ordre (AICc), la distance du modèle le plus parcimonieux (Δ AICc) et leur poids d'Akaike (w_i)

DIST_B						
N°	Modèle	Log-likelihood	K	AIC _c	Δ AIC _c	w_i
21	DIST_C	-453,13	3	912,51	0,00	0,19
24	DIST_C+OBSTACLES	-452,26	4	912,97	0,46	0,15
32	DIST_C+FORME_POLY	-452,63	4	913,70	1,19	0,11
26	DIST_C+AREA_POLYG +FORME_POLY	-451,62	5	913,91	1,40	0,09
20	DIST_C+TRAIT	-451,79	5	914,25	1,74	0,08
30	DIST_C+OBSTACLES +FORME_POLY	-451,93	5	914,54	2,03	0,07
27	DIST_C+AREA_POLYG	-453,06	4	914,56	2,05	0,07
31	DIST_C+FORME_POLY+TRAIT	-451,07	6	915,09	2,58	0,05
23	DIST_C+OBSTACLES+AREA_POLYG	-452,25	5	915,17	2,66	0,05
19	DIST_C+OBSTACLES+TRAIT	-451,39	6	915,74	3,23	0,04
28	DIST_C+AREA_POLYG+TRAIT	-451,78	6	916,52	4,01	0,03
22	DIST_C+OBSTACLES+AREA_POLYG +FORME_POLY	-451,89	6	916,72	4,21	0,02
29	DIST_C+OBSTACLES+FORME_POLY +TRAIT	-450,84	7	916,98	4,47	0,02
25	DIST_C+AREA_POLYG+FORME_POLY +TRAIT	-451,05	7	917,40	4,89	0,02
18	DIST_C+OBSTACLES+AREA_POLYG +TRAIT	-451,37	7	918,03	5,52	0,01
17	DIST_C+OBSTACLES+AREA_POLYG +FORME_POLY+TRAIT	-450,76	8	919,19	6,68	0,01

Note : les modèles ayant un AICc >7 ne sont pas présentés.

Tableau 6 Intervalles de confiance (95%) obtenus à la suite de l'inférence multi-modèles des paramètres retenus dans les modèles expliquant la distance de débardage moyenne de référence ou DIST_B, dans cinq secteurs de la RCPA et 95 sous-blocs de récolte

Effet de la variable				
	Estimé	Erreurs-type	Borne inf.	Borne sup.
DIST_C	0,79	0,05	0,69	0,89
OBSTACLES	-0,24	0,25	-0,73	0,26
AIRE_POLYG	-0,01	0,11	-0,23	0,22
FORME_POLY	-3,23	3,88	-10,82	4,37
TRAITcprs	3,00	3,12	-3,11	9,11
TRAITcprv	3,23	3,31	-3,26	9,71

4.2 Estimation du volume à récolter

4.2.1 Analyse de la répartition spatiale des volumes dans le bloc de récolte

Après d'avoir confirmé la normalité de la variable volume, les analyses visaient à vérifier l'homogénéité de la répartition spatiale, tant au niveau des secteurs que des blocs de récolte. Ainsi, la valeur moyenne du volume SEPM regroupant tous les secteurs correspondaient à $\bar{X} \pm SD$: $117,42 \pm 54,56 \text{ m}^3/\text{ha}$. Les secteurs Fénelon et Maskuchi présentaient $131,22 \pm 46,93$ et $131,10 \pm 59,43 \text{ m}^3/\text{ha}$ respectivement (Fig. 27). Venaient ensuite les secteurs de Dufay et Puiseaux ($107,47 \pm 51,32$ et $111,09 \pm 36,89 \text{ m}^3/\text{ha}$). La moyenne observée dans le secteur Gaudet était de $68,74 \pm 24,79 \text{ m}^3/\text{ha}$.

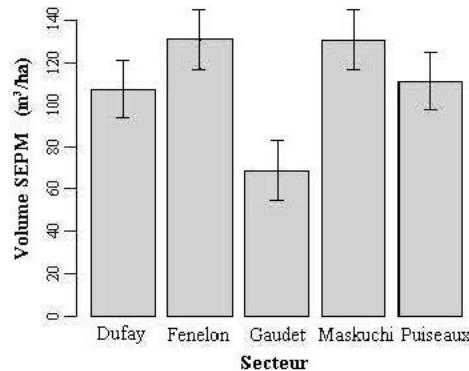


Figure 27 Volume moyen des essences d'intérêt commercial SEPM par secteur d'étude : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puisseaux ; et erreur type.

Bien que cette analyse nous a permis de connaître la concentration des volumes par secteur d'étude, elle ne permettait pas d'identifier la disposition spatiale de ces volumes à l'intérieur des secteurs. Une analyse par bloc de récolte pouvait donner plus d'information sur la distribution spatiale des volumes. La figure 28 montre la distribution des volumes de SEPM par bloc de récolte.

Afin d'analyser la variabilité du volume qui s'observe dans la figure 28, une analyse de variance entre secteurs, blocs et traitements a été effectuée. Cette analyse montrait que le 8,29% de la variance des volumes est expliquée par la variabilité entre secteurs, 23,99% de la variance des volumes est expliquée par la variabilité entre les blocs et le 67,71% de la variance des volumes est expliquée par la variation à l'intérieur des blocs. Conséquemment, les volumes SEPM ne suivaient pas une distribution spatiale uniforme à l'intérieur des blocs des secteurs étudiés. Ce résultat nous indique qu'il serait pertinent de s'intéresser à la distribution du volume à l'intérieur du bloc pour mieux comprendre ces effets sur l'estimation des coûts de récolte.

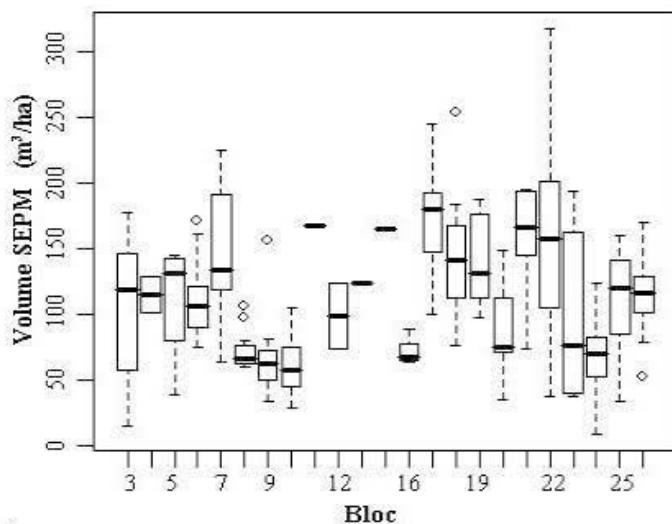


Figure 28 Distribution des volumes des essences d'intérêt commercial SEPM dans les secteurs : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi, et Puiseaux (médiane, minimums, maximums et quartiles par bloc de récolte). Les blocs 1 à 5 sont situés dans les secteurs Dufay, 6 et 7 dans Fénelon, 8 à 10 dans Gaudet, 11 à 24 dans Maskuchi et 25 et 26 dans le secteur Puiseaux.

4.2.2 Comparaison des méthodes d'estimation du volume moyen

Cette analyse a été effectuée au niveau des 26 blocs de récolte dans les secteurs Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux du réseau RCPA. Rappelons que les méthodes d'estimation du volume moyen utilisées ont été la méthode avec assignation de superficie par photo-interprétation (Moyen_photo), la méthode avec assignation de superficie par interpolation de Thiessen (Moyen_thiess) et la méthode traditionnelle (Moyen_trad). L'anova des volumes moyens (Tableau 7) indique que la moyenne des volumes selon les trois méthodes d'assignation ne présentait pas des différences significatives ($p=0,68$).

Tableau 7 Analyse de variance simple du volume moyen obtenu selon la méthode d'assignation de superficie : photo-interprétation (Moyen_photo), Thiessen (Moyen_thiess) et la méthode traditionnelle (Moyen_trad)

	Degrés de liberté	Sommes des carrés	Carré moyen	Valeur F	Pr(>F)
Type de volume moyen	2	1056	528	0,386	0,682
Résiduels	51	69741	1367		

Les valeurs moyennes des volumes (m^3/ha) pour le groupe SEPM étaient ($\bar{X} \pm SD$) : Moyen_trad : $113,24 \pm 33,78 \text{ m}^3/\text{ha}$, Moyen_photo : $108,91 \pm 37,71 \text{ m}^3/\text{ha}$ et Moyen_thiess : $102,48 \pm 39,23 \text{ m}^3/\text{ha}$. Ces résultats indiquent que la méthode d'estimation tenant compte des différents méthodes d'assignation de superficie d'influence n'affectait pas les valeurs des volumes moyens obtenus dans cette étude. Ceci peut être expliqué, par l'utilisation des valeurs des volumes des placettes d'inventaire qui ne considéraient pas la position du volume à l'intérieur du bloc, mais seulement les valeurs moyennes. La principale variation entre les méthodes provenait de la pondération par la superficie assignée aux volumes.

4.3 Analyse combinée distance-volume

Nos analyses de la distance de débardage combinée (DIST_COMB) incorporaient la distance de débardage raster (DIST_C) et les volumes moyens obtenus de la méthode d'assignation de superficie par interpolation de Thiessen. Le volume prélevé par placette, au niveau du RCPA, présentait des valeurs qui variaient entre 0 et $302,08 \text{ m}^3/\text{ha}$. La valeur moyenne correspondait à $86,23 \pm 50,67 \text{ m}^3/\text{ha}$.

L'équation 6 (voir section 3.4), proposée pour l'analyse combinée, a été utilisée pour une capacité de charge de $1,5 \text{ m}^3/\text{voyage}$. Les valeurs du volume récolté par bloc de récolte, ramenées au niveau du pixel et combinées à la distance de débardage (DIST_C et DIST_COMB), à chaque position du volume (pixel), n'ont pas donné des différences significatives ($p=0,47$), Tableau 8.

Tableau 8 Analyse de variance simple de la distance de débardage moyenne obtenue selon la méthode distance raster (DIST_C) et la distance combinée (DIST_COMB)

	Degrés de liberté	Sommes des carrés	Carré moyen	Valeur F	Pr(>F)
Type de distance	1	2633	2633,5	0,522	0,471
Résiduels	174	878095	5046,5		

Les valeurs moyennes des distances étaient de à $\bar{X} \pm SD$: $109,40 \pm 73,87$ m et $101,66 \pm 67,56$ m pour la distance DIST_C et DIST_COMB, respectivement. La valeur de DIST_COMB ne différait pas significativement de DIST_C, parce que dans le calcul de DIST_COMB, le volume récolté à chaque position du bloc était peu élevé, ce qui impliquait que là où le volume était plus bas que la capacité de charge du porteur, la machine devait réaliser au moins un voyage à cette position. Par conséquent, elle pouvait parcourir une distance de débardage équivalente à DIST_C.

4.4 Analyses des coûts de débardage et de récolte

4.4.1 *Productivité de l'abattage et du débardage*

La productivité de l'abattage (m^3/hmp) a été mesurée lors de l'implantation du réseau de coupes partielles de l'Abitibi pour le site Collines de Gaudet. Dans ce site, la productivité observée correspondait à $13,1\ m^3/hmp$ en CPRV et $10,4\ m^3/hmp$ en CPRS (Fenton et al., 2008). Lorsque la productivité de l'abattage a été estimée pour l'ensemble des secteurs (FERIC (b) voir Tableau 1), les valeurs observées étaient semblables à celles obtenues pour le site de Gaudet : CPRS = $11,4\ m^3/hmp$, CPRV = $12,6\ m^3/hmp$ et CPPTM = $16,2\ m^3/hmp$. Pour sa part, la productivité (m^3/hmp) du débardage estimée (FERIC (a) voir Tableau 1) considérant le volume par tige prélevé et la distance de débardage pour le porteur est de $19,1\ m^3/hmp$ en CPRS, $14,9\ m^3/hmp$ en CPRV et $14,2\ m^3/hmp$ en CPPTM.

4.4.2 *Analyse des coûts de débardage par mode d'évaluation de la distance de débardage*

Lorsque l'équation (c) du tableau 1 a été utilisée, a été possible de comparer l'effet d'utilisation de chaque distance de débardage sur les coûts de débardage. L'utilisation de la distance DIST_C entraînait une réduction du coût de débardage de 3,5% en CPRS par rapport à DIST_B. Cette différence était presque nulle si s'utilisait la distance DIST_COMB (0,3%). En CPRV la distance DIST_C et DIST_COMB ne présentait pas de différence avec DIST_B.

En CPPTM, la différence du coût atteignait 5,2% entre toutes les distances en comparaison avec la distance DIST_B (Fig. 29). Toutefois, cette différence pourrait être réduite dans le cas de la distance DIST_COMB et de la distance DIST_C lors de l'incorporation *à priori* des zones de rétention et/ou des obstacles au moment des analyses.

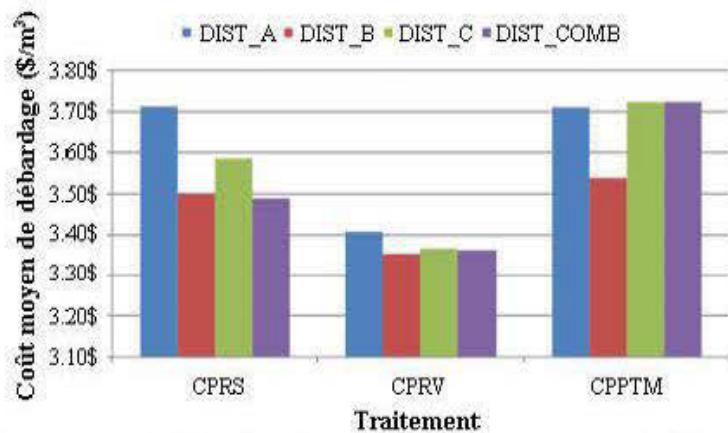


Figure 29 Coûts moyens de débardage (\$/m³) estimés par distance de débardage : DIST_A, DIST_B, DIST_C et DIST_COMB pour un porteur.

4.4.3 Analyse des coûts de débardage par traitement

Lorsqu'on a comparé les coûts moyens de débardage par type de traitement appliqué, nos résultats montraient que, indépendamment de la distance de débardage utilisé, les coûts de débardage (\$/m³) étaient plus élevés en CPRV et CPPTM qu'en CPRS (Fig. 30). Cette différence était statistiquement significative ($p<0,01$) et impliquait une augmentation de coûts par rapport à la CPRS. Elle atteignait 36,8 % (1,27 \$/m³) dans le cas de la CPPTM et 27,7% (0,96 \$/m³) dans le cas de la CPRV. Entre la CPRV et la CPPTM s'observait une différence de 7,1 % (0,31 \$/m³).

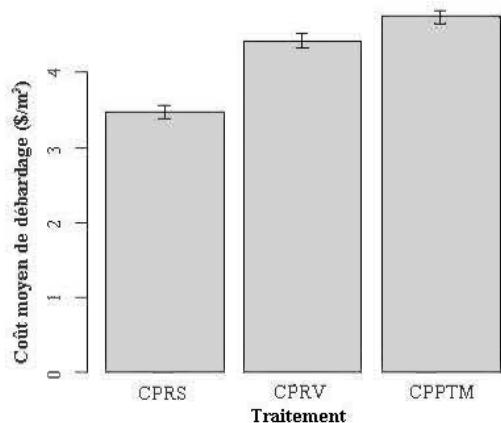


Figure 30 Coûts moyens de débardage (\$/m³) par traitement : CPRS, CPRV et CPPTM dans les secteurs d'étude ; et erreur type.

4.4.4 Analyse des machines de débardage

Pour illustrer l'effet de la distance de débardage sur le type de machinerie de débardage utilisé, une comparaison des coûts de débardage par type de machine a été réalisée. Cette comparaison montrait que lorsque la distance de débardage DIST_C (Fig. 31) ne dépassait pas les 250 m, le porteur présentait les valeurs de coûts de débardage les plus élevés, tandis que le grappin obtenait les valeurs les moins élevées. Les coûts du grappin augmentaient plus vite que les autres débardeurs quand la distance de débardage augmentait et son coût dépassait ceux des autres débardeurs après les 240 m.

Entre la distance minimale observée de 7 m et les 65 m, la machine la moins dispendieuse correspondait au débardeur à grappin. Entre 65 m et 206 m, il s'agissait du semi-porteur et à partir de 241 m se trouvait le débardeur à câble. Il est à noter que le débardeur à grappin était donc le moins dispendieux au début, mais après 65 m le coût dépassait le semi-porteur ; après 119 m, il dépassait le coût du débardeur à câble et après 241 m, il dépassait aussi le coût du porteur. Le coût du semi-porteur était très similaire au débardeur à grappin lorsqu'il effectuait des distances plus petites que 65 m et dépassait le coût du débardeur à câble après 206 m.

La variation des coûts en $\$/m^3$ par type de machine entre les distances observées était de 3,35 $\$/m^3$ pour le semi-porteur, 4,47 $\$/m^3$ pour le débardeur à grappin, 2,71 $\$/m^3$ pour le débardeur à câble et 2,58 $\$/m^3$ pour le porteur.

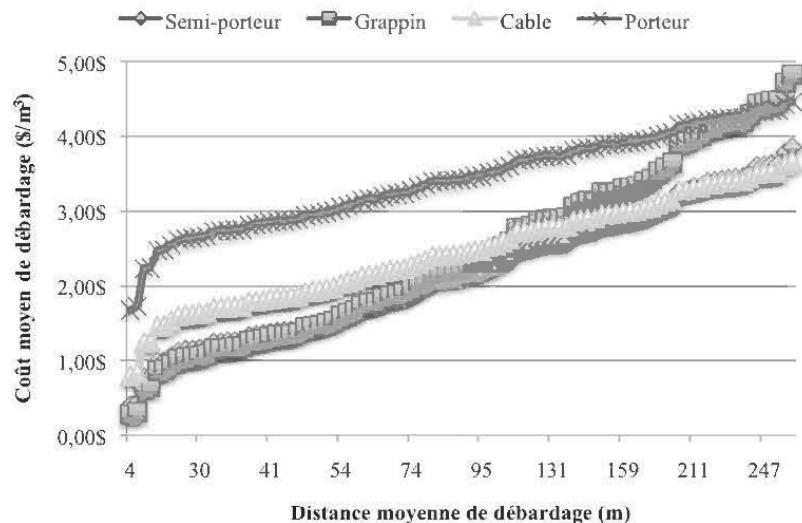


Figure 31 Coûts moyens de débardage ($\$/m^3$) selon le type de machine de débardage utilisé : Semi-porteur, Grappin, Câble et Porteur ; distance de débardage DIST_C.

4.4.5 Analyse des coûts de récolte

Les coûts de récolte comprennent les coûts d'abattage et les coûts de débardage. Ces coûts estimés pour les secteurs d'étude montraient que les coûts d'abattage étaient plus élevés que les coûts de débardage, ils étaient davantage sensibles au volume et n'étaient pas affectés par la distance. Le coût moyen d'abattage était plus élevé en CPRS. Il était 10,5 % (1,1 $\$/m^3$) plus élevé qu'en CPRV et 34,3 % (2,9 $\$/m^3$) plus élevé qu'en CPPTM. En CPRV, le coût d'abattage était 21,5 % (1,8 $\$/m^3$) plus élevé que la CPPTM. Les coûts de débardage ont été présentés dans la section 1.4.4.3. Leurs valeurs détaillées, ainsi que celles de l'abattage sont présentées dans le Tableau 9.

Tableau 9 Coûts moyens (\$/m³) par secteur, traitement, type de distance de débardage et opération forestière

Secteur	Traitement	Abattage (Abattage-façonnage)*	Débardage (Porteur)	Débardage (Porteur)	Débardage (Porteur)	Débardage (Porteur)
			DIST_A	DIST_B	DIST_C	DIST_COM_B
Dufay	CPRS	NA	3,97	3,57	3,69	NA
Dufay	CPPTM	9,25	5,01	4,89	5,12	5,12
Fenelon	CPRS	10,41	3,46	3,43	3,33	3,37
Fenelon	CPRV	6,651	4,99	4,99	5,00	4,99
Gaudet	CPRS	10,49	3,61	3,59	3,67	3,68
Gaudet	CPRV	14,84	4,30	4,36	4,17	4,18
Maskuchi	CPRS	13,43	3,69	3,62	3,53	NA
Maskuchi	CPPTM	7,83	4,62	4,35	4,33	4,32
Puisseaux	CPRS	11,54	3,36	2,96	2,98	2,91
Puisseaux	CPRV	9,64	4,23	3,90	3,89	3,90
Moyenne	CPRS	11,47	3,62	3,43	3,44	3,32
Moyenne	CPRV	10,38	4,51	4,42	4,36	4,36
Moyenne	CPPTM	8,54	4,82	4,62	4,72	4,72

5. Discussion

Un modèle spatial capable d'estimer les coûts de récolte en considérant les obstacles majeurs, la forêt résiduelle (rétention), ainsi qu'une distribution variable des volumes à prélever en forêt boréale québécoise a été élaboré. Lors du développement du modèle, nous avons tenu compte de différentes variables pouvant affecter les coûts de récolte, principalement en lien avec la distance de débardage.

5.1 La distance moyenne de débardage

Selon nos analyses, DIST_A présentait une valeur moyenne plus élevée comparativement aux autres. La raison principale qui explique cette différence est la manière dont elle est traditionnellement calculée. En effet, moins il y avait de distances maximales considérées (pour estimer la DIST_A par sous-bloc à partir du chemin), plus la valeur moyenne obtenue était loin de celle des autres méthodes. Donc, sa valeur dépend également de la précision, de la forme et de la taille des sous-blocs favorisés par l'analyste. La distance DIST_B présentait les distances maximales les plus courtes des trois méthodes, car les sentiers de débardage numérisés étaient toujours plus courts que la largeur des sous-blocs de récolte. La distance DIST_C, pour sa part, dépendait du nombre et de la taille des pixels compris dans l'estimation de la distance de débardage moyenne. Cette dernière semble être la mesure la plus appropriée pour estimer la distance moyenne de débardage (en forêt boréale) compte tenu de la facilité à l'obtenir via des outils géomatiques. De plus, elle peut être déterminée selon diverses configurations de blocs de récolte.

5.2 Autres variables pouvant affecter la distance de débardage

Effet des obstacles

Nous avons analysé les obstacles comme étant un facteur ayant un effet sur la traficabilité et les déplacements de la machinerie. Cependant, nous n'avons pas trouvé d'effet comme variable explicative de la différence entre les distances moyennes de débardage analysées. Cette situation peut être expliquée par les caractéristiques du territoire dans les secteurs d'étude. Certaines valeurs plus élevées représentaient soit la forêt résiduelle, comme dans les cas de la CPRV, ou des obstacles existants sur le terrain, comme dans le cas de la CPRS. Ces derniers ont été identifiés par le changement de direction des sentiers de débardage à l'aide de la photo-interprétation à posteriori. De plus, on a constaté que là où les obstacles étaient de plus petites tailles, la machinerie a été capable de les traverser et de poursuivre le sentier de débardage. Par contre, lorsque les obstacles étaient d'une taille supérieure ou lorsque la forêt résiduelle occupait plus de 15 m², la machine contournait ces derniers. Cependant, le type d'obstacle qui ne correspondait pas à la forêt résiduelle n'a pas été identifié, même si la machine a changé de direction dans son parcours.

Nous n'avons pas été en mesure de réaliser une classification exhaustive des obstacles tels que les arbres-chicots, les trous ou les roches qui ont affecté la traficabilité¹¹ du terrain, tel que le propose Leblanc (2007). Les éléments retenus dans cette analyse (forêt résiduelle ou obstacles majeurs) ont généré des changements dans la longueur et/ou la direction des sentiers de débardage et ont été les éléments les plus fréquemment observés par photo-interprétation. Identifier plus clairement le type d'obstacle et/ ou la rétention peut faciliter une planification plus soigneuse et diminuer l'impact sur les coûts de récolte, car ces éléments affectent la productivité des opérations (Kluender et Stokes, 1996 ; Lanford et Stokes, 1996 ; Holtzscher et Lanford, 1997 ; Kluender et al., 1998).

¹¹ Leblanc (2007) définit la traficabilité comme étant la plus ou moins grande facilité de la machinerie et des ouvriers sylvicoles à circuler sur les terrains forestiers.

Effet de la taille du bloc

La taille du bloc est généralement affectée par la largeur de celui-ci qui est généralement placé parallèle au chemin. Lors de cette étude la taille des blocs n'a pas eu d'influence sur la distance moyenne de débardage. Il est important de noter que la taille et la forme des blocs de récolte observées respectent les normes en vigueur au Québec (Anonyme, 2006). Ainsi, dans la zone d'étude, la superficie d'un seul tenant d'une aire de coupe n'a pas dépassé 150 ha (aire max. Fénelon = 99,67 ha) tout en respectant sa forme (longueur égale ou supérieure à 4 fois la largeur moyenne).

Effet de la forme du bloc

Nous n'avons pas trouvé des différences significatives entre les formes des polygones traités. Cependant, les différences de formes de polygones observées entre les traitements ne peuvent être attribuées qu'à la forme adoptée par les sous-blocs créés lors de l'analyse *à posteriori* (après récolte), car les sous-blocs prennent leur forme selon l'orientation des sentiers de débardage empruntées par la machinerie. Par exemple, dans un même bloc, les sentiers de débardage ont présenté différentes orientations, ce qui peut être attribué à la décision de l'opérateur de la machinerie suivant son expertise, à la présence d'obstacles, à la traficabilité, etc. Ceci nous a amené à subdiviser le bloc en sous-blocs.

5.3 La distribution du volume

Nos résultats ont montré que la distribution du volume n'est pas homogène à l'intérieur des blocs de récolte étudiés. Ce résultat ne fait que confirmer que, en forêt boréale, la distribution des volumes est variable. En effet, elle est affectée principalement par les perturbations naturelles et les traitements sylvicoles, qui donnent les caractéristiques structurelles aux peuplements quant aux diamètres, hauteurs et composition (Bouchard, 2008). Ceci implique que pour la détermination d'une méthode d'estimation des volumes qui tienne compte de cette variabilité il faudrait déterminer aussi le type de structure et composition du peuplement

des secteurs à récolter, élément important pour la sélection du traitement à appliquer ainsi que pour l'analyse des coûts du traitement.

5.4 La distance combinée

On a proposé une méthode d'estimation de la distance moyenne de débardage qui base son analyse sur la distance combinée (distance-volume). En effet, notre proposition permettrait de capter les variations du volume selon leur position, leur concentration, mais aussi leur niveau de rétention voulu. Ainsi, la méthode d'assignation du volume par Thiessen est une manière simple d'intégrer les valeurs estimées du volume moyen au niveau des pixels à l'intérieur de chaque polygone de Thiessen et la distance raster permet d'obtenir la distance de chaque pixel au chemin. Chaque pixel peut contenir l'information de cette distance combinée, inscrivant le volume, la distance, ainsi que la capacité de charge de la machine de débardage. La capacité de charge observée dans les porteurs utilisés en coupes partielles, à l'est du Canada, varie entre 3 et 7 m³/charge (Roderick, 2001). Dans le cas d'un débardeur à grappin 1 à 3 m³/charge (Wang et al 2004). Dans notre étude, nous avons observé que les valeurs du volume, au niveau des pixels, étaient en moyenne de 1,17 m³/pixel. Cette valeur se trouve plus proche de la capacité de charge d'un débardeur à grappin.

5.5 Les coûts de débardage

Effet de la productivité

La productivité observée dans les secteurs de récolte dégage des différences entre les traitements qui peuvent être expliquées par l'augmentation du volume des tiges récoltées en coupe partielle (Fenton et al., 2008).

La diminution de la productivité dans le cas de la distance de débardage estimée tenant compte du volume prélevé (DIST_COMB), peut être expliquée par les éléments affectant la distance de débardage : éléments de rétention, obstacles du terrain, etc.

Effet du type de distance de débardage utilisé

Nos résultats montrent que la distance DIST_C et DIST_COMB sont de bons estimateurs du coût de débardage en CPRS et en CPRV lorsqu'ils sont comparés à la DIST_B. En CPPTM, aucune des méthodes a donné des valeurs proches de la valeur de référence, ce qui peut être expliqué par : (1) DIST_A surestime presque tout le temps la valeur de distance, parce qu'elle considère des valeurs extrêmes de la profondeur du polygone et assume une forme de polygone régulière (ce qui a été rarement le cas) ; (2) DIST_C et DIST_COMB n'incorporent pas les zones de rétention ni les obstacles, ce qui implique qu'elles n'ont pas été éliminées de l'analyse et en conséquence surestiment aussi la valeur de distance. (3) En CPPTM, nous avons observé un nombre plus élevé d'obstacles, ce qui explique des changements de direction des sentiers de débardage plus fréquents comparativement aux autres traitements.

Effet du traitement

Des différences significatives ont été observées dans les coûts reliés aux traitements. La réalisation de coupes partielles entraîne des coûts supplémentaires associés à la diminution de prélèvement de matière ligneuse (Meek et Cormier, 2004 ; Fenton et al., 2008). Cependant, ces coûts peuvent être mieux estimés si ils étaient analysés plus en détail à l'aide du modèle développé et une analyse minutieuse des obstacles.

Effet du type de machine de débardage utilisé

La valeur du coût de débardage varie en fonction de la distance de débardage, du volume à transporter, ainsi que de sa capacité de charge. Elle varie aussi d'une site à l'autre selon les conditions de terrain, des arbres à prélever et à laisser sur pied, du procédé de récolte et de l'organisation (Wang, 1997). Dans notre analyse, on a incorporé les différents types de débardeurs à titre de comparaison lors des coupes partielles. Les résultats montrent que les distances de débardage semblent plus réalistes avec notre méthode, appliquée à la forêt boréale. D'ailleurs, le choix de la machine à utiliser pourrait être différent de celle choisie lorsque les valeurs étaient calculées de façon traditionnelle.

5.6 Les coûts de récolte

Les coûts d'abattage comme de débardage varient selon le traitement de récolte appliqué. Le type de traitement affecte le volume à prélever ainsi que la distance de débardage à parcourir. Cependant, l'estimation de ces coûts pour les différents traitements n'a pas considérée : la position du volume, la concentration du volume à cette position, la position de la rétention effectuée, ni l'identification des obstacles. Alors, considérer ces éléments dans l'estimation des variables qui sont affectées par les conditions de récolte devrait générer des différences de coûts encore plus élevées. En effet, Contreras et Chung (2007) ont déterminé des zones de concentration de volume différent dans un terrain plat et sans obstacles et ont traduit ces variations de concentrations du volume en terme de coûts. Ils montrent que le coût total de débardage diminuait de $0,13/m^3$ à $0,28/m^3$ considérant 2 à 3 zones de concentration de volume différent, ce qui implique un effet direct sur les coûts de récolte.

5.7 Limites de l'étude

Notre étude se limite à l'utilisation de sentiers de débardage parallèles et débardage en bordure de route, caractéristiques du débardage en forêt boréale. Il ne considère pas l'utilisation de jetées. Les obstacles sont évalués pour déterminer leur influence dans l'estimation de la distance de débardage. Cependant, à cause du faible nombre identifié et de la difficulté à identifier les secteurs de rétention et les éléments retenus, ceux-ci n'ont pas été intégrés dans l'analyse combinée. La pente ne fait pas partie des variables considérées dans l'analyse puisque le terrain des secteurs d'étude correspondait aux caractéristiques planes.

Nous avons établi comme hypothèse l'utilisation d'un débardeur à Grappin afin de réaliser l'étude à une échelle très fine (pixel 10×10 m). Dans cette unité il est possible de faire une charge complète d'un débardeur à grappin (un modèle John Deere 640, par exemple, qui mesure 5×6 m), ce qui veut dire que la machine n'aurait qu'un seul arrêt à faire dans chaque pixel. Le déplacement de la machinerie a été comptabilisé par pixel, sans avoir inclus la possibilité de mouvement à l'intérieur des pixels. Donc, dans nos analyses, la machine va au moins une fois à chaque position (pixel).

6. Conclusion

Nos résultats montrent que la distance moyenne de débardage selon la méthode DIST_C c'était une méthode efficace et performante. Cette méthode est une façon alternative à la méthode traditionnelle (DIST_A) proposée par Matthews 1942. De plus, la méthode DIST_C est simple, facile à utiliser, accessible (les outils nécessaires se trouvent dans le logiciel ArcView ou ArcGis) et s'ajuste bien au contexte de sentiers parallèles appliqués en forêt boréale québécoise.

Nous avons également démontré que 67,71% de la variance du volume était expliquée par la variabilité à l'intérieur des blocs. Conséquemment, les volumes SEPM ne suivent pas une distribution spatiale uniforme à l'intérieur des blocs de récolte des secteurs étudiés dans le réseau de coupes partielles de l'Abitibi (RCPA). Afin d'intégrer cette variabilité à l'intérieur du bloc de récolte, nous avons proposé une façon adaptée aux bases des données disponibles. En effet, nous avons comparé trois méthodes d'assignation du volume au bloc de récolte : la méthode traditionnelle, la méthode d'interpolation de Thiessen et la méthode par photo-interprétation. Nous avons remarqué que, bien que comparables statistiquement, chaque méthode représente une situation différente dans la pratique. En effet, il semble difficile de représenter la distribution réelle des volumes dans un bloc de récolte seulement avec les valeurs moyennes par placette. Il faut noter cependant que nos analyses tenaient compte d'une extraction complète du volume. La situation pourrait être distincte si les volumes prélevés étaient différemment distribués dans le bloc de récolte. Cette approche, a été introduite grâce à la méthode d'assignation de superficie aux volumes. Nous avons proposé la méthode d'interpolation de Thiessen compte tenu de sa facilité d'intégration dans les outils géomatiques. Cette méthode requiert l'identification de la position des placettes échantillon dans chaque bloc de récolte.

Ensuite, une combinaison des méthodes utilisant la méthode d'estimation de la distance de débardage, tels que la méthode raster-centroïde (DIST_C) et de l'assignation de volume selon la superficie déterminée par la méthode de polygones de Thiessen (DIST_COMB) a été

proposée. DIST_COMB qui est issue de DIST_C, permet d'incorporer tant la position comme la concentration du volume, ainsi que la distance à chaque pixel (position). Cependant, une fois ces deux distances comparées, nos analyses montrent que lorsque le volume moyen à extraire, au niveau de la superficie du pixel, est plus bas que la capacité de charge du débardeur, la distance moyenne de débardage du bloc (DIST_COMB) présente des valeurs semblables à la distance moyenne obtenue par la méthode raster (DIST_C). Donc, l'identification des secteurs de rétention et/ou des obstacles, ainsi que la détermination de la position et la concentration du volume à prélever ferait toute la différence. Enfin, la distance DIST_COMB a été retenue et ajoutée aux formules d'estimation de coûts de débardage. Ainsi, la formule ajustée permet de tenir compte de la distribution du volume et du prélèvement variable lors de la récolte.

Le coût d'abattage est affecté par le volume à prélever ainsi que par la productivité de l'abattage, laquelle est affectée à la fois par les obstacles. Les obstacles qui affectent les opérations d'abattage n'ont pas été traités dans cette étude. Le coût de débardage est influencé tant par le volume à prélever que par la distance de débardage. Les coûts d'abattage comme de débardage varient selon le type de traitement de récolte réalisé. Ainsi, pour l'abattage, le coût en CPRS était 10,5 % plus élevé qu'en CPRV et 34,35 % plus élevé qu'en CPPTM. Dans le cas du débardage, les coûts sont affectés par le volume, la distance de débardage (méthode de distance de débardage utilisée) - ce qui affecte la productivité – ainsi que par le type de machine utilisée. Au contraire de l'abattage, le coûts de débardage en coupes partielles était plus dispendieux, donc le coût en CPRV était 27,7 % plus élevé qu'en CPRS et le coût en CPPTM était 36,8 % plus élevé qu'en CPRS. Toutefois, ces valeurs pourraient être plus significatives si sont incorporés les éléments de rétention, l'information plus détaillée des volumes, ainsi que les obstacles du terrain.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les stratégies d'aménagement écosystémique, proposées pour l'aménagement en forêt boréale, sont à la base des analyses de plusieurs études scientifiques. Ces études visent à déterminer l'effet de ces stratégies sur les écosystèmes boréaux et sur sa dynamique forestière. En Abitibi, dans le cadre d'une aménagement écosystémique, différents traitements sylvicoles dont les coupes partielles et à rétention variable font partie, ont été évaluées à partir de la mise en place du réseau de coupes partielles de l'Abitibi-Témiscamingue.

Entre autres, les aspects à évaluer sur ce réseau ont été l'évaluation de l'efficacité économique quant au coût d'opération et la productivité ligneuse, ainsi que l'évaluation écologique. Dans cette optique, des éléments importants à évaluer ont été les aspects opérationnels et sylvicoles de la récolte par coupes partielles et à rétention variable. Ces aspects ont été approfondis dans cette étude sur la recherche des meilleures façons d'estimer les variables qui affectent les coûts de débardage et le coût de récolte.

Traditionnellement, les variables qui affectent les coûts de débardage et de récolte ont été estimées sans considérer la position du volume à récolter à l'intérieur du bloc de récolte, ni la rétention (soit d'îlots, de chablis, etc.) considérée pour les différents objectifs d'aménagement. Notre étude montre alors, d'un côté, une nouvelle façon d'estimer la distance de débardage qui s'adapte bien aux conditions de récolte en forêt boréale et, de l'autre côté, elle permet d'incorporer ces nouveaux éléments de l'aménagement écosystémique. Nous avons aussi fait une analyse des façons de représenter la distribution variable du volume dans les blocs de récolte et une combinaison de ces informations afin d'obtenir une distance de débardage ajustée et plus représentative de ces conditions de récolte.

La considération de la rétention n'est pas non plus un élément négligeable dans ce contexte d'aménagement. Donc, on a réalisé une étude de cas (voir Annexe I) où on a analysé et

démontré que la position de la rétention, le design (configuration) dans le bloc de récolte, le pourcentage de rétention ainsi que la concentration et la position du volume à l'intérieur du bloc de récolte sont tous des facteurs qui affecteront les principales variables considérées dans les coûts de débardage et le coût de récolte. Selon l'annexe I, le type de configuration de la rétention et le pourcentage de rétention à appliquer dépendront des objectifs d'aménagement recherchés. Cependant, il faut prendre en compte que les différences dans les distances de débardage moyennes à obtenir affecteront l'estimation des coûts de débardage et, par conséquent, les coûts de récolte forestière. Ainsi, par exemple, la rétention du volume dispersée donnera de distances moyennes de débardage semblables à aux distances en coupe traditionnelle (CPRS), indépendamment du pourcentage de volume retenu. La rétention agglomérée où les éléments retenus sont plus loin du chemin engendreront distances de débardage plus courtes et en conséquence coûts de débardage moins élevés. La concentration du volume affectera plus la distance de débardage combinée si les volumes plus élevés se situent plus loin de 250 m à partir du chemin.

Selon nos analyses en accord avec la façon dont se réalise la planification forestière, en plus des outils informatiques disponibles actuellement, les planificateurs devraient être capables de déterminer *à priori* plusieurs de ces éléments pour réaliser une meilleure estimation des coûts liés à l'application des coupes partielles et à rétention variable. Un outil informatique pourrait rendre ces estimations plus aisées.

LISTE DE RÉFÉRENCES

- Anonyme (2006).** Règlement sur les normes d'intervention dans les Forêts du domaine de l'État. Loi sur les forêts (L.R.Q., c. F-4.1, a. 171). Gouvernement du Québec, doc. F-4.1, r.1.001.1 mars 2006.
- Barrett, T.M. (1997).** Voronoi tessellation methods to delineate harvest units for spatial forest planning. *Can. J. For. Res.* 27 : 903-910.
- Bergeron, Y. et Harvey, B. (1997).** Basing silviculture on natural ecosystem dynamics : an approach applied to the southern boreal mixedwood forest of Quebec. *Forest Ecology and Management* 92, 235 – 242.
- Bergeron, Y. (2003).** Évaluation sylvicole et écologique de la coupe partielle dans la forêt boréale de la ceinture d'argile. Projet de recherche. Chaire AFD 2003. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec.
- Bescond, H (2005).** L'aménagement inéquien en forêt boréale : que peut-on apprendre de la sylviculture des peuplements conifériens ailleurs qu'au Canada. Rapports de synthèse: doctorat en sciences de l'environnement, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- Bescond, H. (2002).** Protocole d'établissement et d'analyse des dispositifs expérimentaux. Réseau de coupes partielles de l'Abitibi. Chaire Industrielle CRSNG-UQAT-UQAM en aménagement forestier durable.
- Blouin, J. et J.-P. Berger (2002).** Guide de reconnaissance des types écologiques de la région écologique 5a – Plaine de l’Abitibi. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Forêt Québec, Direction des inventaires forestiers, Division de la classification écologique et productivité des stations.
- Blouin, J. et J.-P. Berger (2005).** Guide de reconnaissance des types écologiques de la région écologique 6a - Plaine du lac Matagami et 6b - Plaine de la baie de Rupert, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction des inventaires forestiers, Division de la classification écologique et productivité des stations.
- Bolduc, P., Lowell, K. et Edwards, G. (1999)** Automated estimation of localized forest volume from large-scale aerial photographs and ancillary cartographic information in a boreal forest. *Int. J. Remote Sensing*, 20 (18) ; 3611-3624.
- Bonham-Carter, G. (1994).** Geographic information systems for geoscientists, Modelling with GIS. Elsevier, 398 p.

- Bouchard, M. (2008).** « La sylviculture dans un contexte d'aménagement écosystémique en forêt boréale et en forêt mixte ». Chap. 13 dans Aménagement écosystémique en forêt boréale, sous la direction de Sylvie Gauthier, Marie-A. Vaillancourt, Alain Leduc, Louis De Grandpré, Daniel Kneeshaw, Hubert Morin, Pierre Drapeau et Yves Bergeron. Presses de l'Université du Québec. p. 335 – 359.
- Brown, S., Schereier, H., Thompson, W. A. et Vertinsky, I. (1994).** Linking multiple accounts with GIS as Decision Support System to Resolve Forestry/Wildlife Conflicts. *Journal of Environmental Management* 42, 349-364.
- Courtois, R. (2003).** La conservation du caribou forestier dans un contexte de perte d'habitat et de fragmentation du milieu. Thèse de doctorat en Sciences de l'environnement. Université du Québec à Rimouski.
- Contreras, M. et Chung, W. (2007).** A computer approach to finding an optimal log landing location and analyzing influencing factors for ground-based timber harvesting. *Can. J. For. Res.* 37 : 276-292.
- D'Aoust, V. (2003).** Caractérisation à l'aide de photos aériennes, de l'ouverture du couvert forestier avant et après une épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette en forêt boréale mixte. Mémoire de Maîtrise en Biologie, Université du Québec à Montréal.
- Drapeau, P., Leduc, A., Bergeron, Y., Gautier, S. et Savard, J-P. (2003).** Les communautés d'oiseaux des vieilles forêts de la pessière à mousses de la ceinture d'argile : Problèmes et solutions face à l'aménagement forestier. *The Forestry Chronicle*, may/june, 79 (3).
- Elkie, P., Rempel, R. and Carr, A.** 1999. Patch Analyst User's Manual. Ont. Min. Natur. Resour. Northwest Sci. & Technol. Thunder Bay, Ont. TM-002. 16 pp + Append.
- Fenton, N. (2005).** Paludification in black spruce (*Picea mariana*) forests of eastern Canada: Potential factors and management implications. *Forest Ecology and Management* 213, 151-159.
- Fenton, N. (2006).** Le Rôle des bryophytes dans les mécanismes d'entourbement des forêts d'épinette noire de la ceinture d'argile du Québec et de l'Ontario. Thèse de Doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. 180 p.
- Fenton, N., Bescond, H., Imbeau L., Boudreault C., Drapeau P. et Bergeron Y. (2008)** « Évaluation sylvicole et écologique de la coupe partielle dans la forêt boréale de la ceinture d'argile ». Chap. 15 dans Aménagement écosystémique en forêt boréale, sous la direction de Sylvie Gauthier, Marie-A. Vaillancourt, Alain Leduc, Louis De Grandpré, Daniel Kneeshaw, Hubert Morin, Pierre Drapeau et Yves Bergeron. Presses de l'Université du Québec. p. 394 – 415.

- Forêts Canada (1992).** Terminologie de la sylviculture au Canada. Direction générale des politiques et de l'économie, Forest Canada. Direction générale des sciences et du développement durable, Forest Canada.
- Fujita, T., Itaya, A., Miura, M., Manabe, T. et Yamamoto, S. (2003).** Canopy structure in a temperate old-growth evergreen forest analyzed by using aerial photographs. *Plant Ecology* 168: 23-29.
- Greulich, F. (2002).** Transportation Networks in Forest Harvesting : Early Development of the Theory. University of Washington. 13p.
- Gold, C. M. et Edwards G. (1992).** The Voronoi spatial model : two - and three - dimensional applications in image analysis. *ITC Journal*. 1: 11-19
- Halleux, O. et Greene, D. (2001).** Setting Analyst : A Practical Harvest Planning Technique. *Proceedings of de 24th Annual COFE Meeting* : 127 – 132.
- Hassler, C. et Grushecky, S. (2000).** The effets of group selection harvest size on logging productivity. *Northern Journal of Applied Forestry* 17(2).
- Holmes, S., Kreutzweiser, D. et Hamilton, P. (2010).** Operational and economic feasibility of logging within forested riparian zones. *The Forestry Chronicle*. Septembre/Octobre, 86 (5).
- Holtzscher, M.A., et Lanford, B.L. (1997).** Tree diameter effects on cost and productivity of cut-to-length systems. *Forest Prod. J.* 47(3): 25-30.
- Hedin, I. (1995).** Small-path cuts : cost implications. *Canadian Forest Industries*. Octobre : 28-33.
- Hyyppa, J., Hyyppa, H., Inkkinen, M., Engdahl, M., Linko, S. et Zhu, Y-H. (2000).** Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management* 128 : 109 - 120.
- Jirousek, R., Klvac, R. et Skoupy, A (2007).** Productivity and costs of the mechanised cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. *Journal of forest science*, 53 (10) : 476-482.
- Klepac, J.F., B. Rummer. (2000).** Productivity and Cost Comparison of Two Different-Sized Skidders. *ASAE Annual International Meeting*. Milwaukee, Wisconsin.
- Kluender, R., D. Lortz, W. McCoy, B. J. Stokes et J. Klepac. (1998).** Removal intensity and tree size effect on harvesting cost and profitability. *Forest Products Journal*. 48 (1), p. 54-59.

- Kluender, R. et Stokes, B. (1996).** Felling and Skidding Productivity and Harvesting cost in Souttiet a Pine Forests. CW/IUFRO conf.
- Koger, J. et Webster, D. (1984).** L-O-S-T: Logging Optimization Selection Technique. United States Department of Agriculture. Forest Service. Southern Forest Experiment Station. New Orleans, Louisiana.
- Kristensen, L., Olsen, J. Weiner, J., Griepentrog, H. et Norremark, M. (2006).** Describing the spatial pattern of crop plants with special reference to crop-weed competition studies. Fiel Crops Research 96 : 207-215.
- Lanford, B. L. et B. J. Stokes. (1996).** Comparison of Two Thinning Systems. Productivity and Costs. Forest Products Journal. 46 (11/12), p. 47-53.
- Leblanc, P. (2007).** Méthode de classification de la difficulté des terrains en fonction des obstacles jonchant le sol des sites forestiers à dégager. Mémoire de Maîtrise. Faculté de Foresterie et Géomatique. Université Laval, Québec. 85 p.
- Lord, T. et Mclean, A. (1969).** Aerial Photo Interpretation on British Columbia Rangelands. The Journal of Range Management, 22 (1), January.
- Maguire, D.A., Mainwaring, D.B. et Halpern, C.B. (2006).** Stand dynamics after variable-retention harvesting in mature Douglas-Fir forest of Western North America. Allg. Forst- u. J.-Ztg., 177. Jg., 6/7.
- Matthews, DM. (1942).** Cost control in the logging industry. McGraw-Hill Book Company Inc. New York and London. 374 p.
- Mazerolle, M. J. (2006).** Improving data analysis in herpetology: using Akaike's Information Criterion (AIC) to assess the strength of biological hypotheses. Amphib. Reptil. 27(2) : 169-180.
- Meek, P. (2001).** Les sentiers secondaires : une option pour utiliser les machines de grande dimension en éclaircie commerciale. Inst. Can. de rech. en génie for. (FERIC), Pointe Claire, Qué. Avantage, 2 (18). 8 p.
- Meek, P. (2004).** Les opérations de récolte en coupes partielles. Les coupes partielles en forêt résineuse. Transfert de Connaissances. Le Monde Forestier. Septembre.
- Meek, P. (2006).** Guide d'implantation : Le jardinage mécanisé par la méthode avec sentiers espacés aux 33 m. Inst. Can. de rech. en génie for. (FERIC), Pointe Claire, Qué. Avantage, 7 (5). 12 p.
- Meek, P. et Cormier, D. (2004).** Études de premières interventions d'un système de coupes progressives. Inst. Can. de rech. en génie for. (FERIC), Pointe Claire, Qué. Avantage. 5 (43).

- Meek, P. et Simard, P. (2000).** Optimisation de la distance de débardage en éclaircie commerciale. Inst. Can. de rech. en génie for. (FERIC), Pointe Claire, Qué. Avantage, 1 (12). 8 p.
- MRN (1998).** Manuel d'aménagement forestier. 3^e Édition. Direction des programmes MRforestiers. Ministère des Ressources Naturelles. Québec. 128 p.
- MRN (2003).** Manuel d'aménagement forestier. 4^e Édition. Direction des programmes forestiers. Ministère des Ressources Naturelles, de la Faune et des Parcs. Québec. 245 p.
- MRNF (2005).** Estimation des volumes de bois affectés par les opérations de récolte. Instructions. Ministère des ressources naturelles et de la faune, Québec. 39 p.
- MRNF (2010).** Ressources et Industries Forestières. Portraits Statistique Édition 2010. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune. Québec. 498 p.
- Nadeau, F., Valeria, O. et Lebel, L. (2002).** Détermination du coût combiné récolte et chemins forestiers dans un contexte de coupes dispersées. L'Aubelle-N°140: 15-17.
- Nakashizuka, T. Katsuki, T. et Tanaka H. (1995).** Forest canopy structure analyzed by using aerial photographs. Ecological Research, 10 : 13-18.
- OIFQ (1996).** Manuel de Foresterie. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Les Presses de l'Université Laval. Québec. 1428 p.
- OIFQ (2003).** Dictionnaire de la foresterie. Préparé sous la direction de Marc Côté. Éd. spéciale 12e Congrès forestier mondial. Sainte-Foy : Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. 744 p
- OIFQ (2009).** Manuel de foresterie, Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Éditions Multi Mondes. Québec. 1510 p
- Palander, T.S. (1997).** A local DLP-GIS-LP system for geographically decentralized wood procurement planning and decision making. Silva Fennica 31(2) :179-192
- Pentassuglia, N. (2003).** Considérations opérationnelles de la coupe avec rétention variable dans l'est du Canada. Mémoire de fin d'études. Faculté de Foresterie, Université Laval. Québec. 70p.
- Pentassuglia, N. et Meek, P. (2004).** Essais de coupe avec rétention variable dans l'est du Canada. Inst. Can. de rech. en génie for. (FERIC), Pointe Claire, Qué. Avantage, 5 (5). 6 p.
- Pentek, T., Pičman, D., Potočnik, I., Dvorščak, P. et Nevečerel, H. (2005)** Analysis of an existing forest road network. Croatian Journal of Forest Engineering, 26 (1).

- Perron, N., Belanger, L. et Vaillancourt, M-A. (2008).** «Organisation spatiale des peuplements et de la forêt résiduelle sous régimes de feu et de coupes » Chap. 6 dans Aménagement écosystémique en forêt boréale, sous la direction de Sylvie Gauthier, Marie-A. Vaillancourt, Alain Leduc, Louis De Grandpré, Daniel Kneeshaw, Hubert Morin, Pierre Drapeau et Yves Bergeron. Presses de l'Université du Québec. p. 136 – 163.
- R Development Core Team (2008).** R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Renzie, Ch. et Han, H-S. (2000).** Operational analysis of partial cut and clearcut harvesting methods in north-central interior ICH/ESSF Mountain Forest. Final report to the Robson Valley Enhanced Forest Management Forest Project (EFMPP). Forestry Program. University of Northern BC.
- Renaud, A. (2000).** Cartographie du volume ligneux des peuplements de la forêt boréale à l'aide de données d'altimétrie laser. Mémoire de Maîtrise. Département de Géographie. Université du Québec à Montréal. 113 p.
- Richardson, R. et Makkonen, I. (1994).** Performance des systèmes de récolte en bois tronçonnés dans l'est du Canada. Inst. Can. de rech. en génie for. (FERIC), Pointe Claire, Qué. Rapport Technique N°RT-109. 16p.
- Roderick H, E. (2001)** Revue technique des petits équipements appropriés à la coupe partielle. Inst. Can. de rech. en génie for. (FERIC), Pointe Claire, Qué. Avantage, 2 (51). 12 p.
- Rojas, J. (2004).** Cambios en la localización de caminos y determinación de los costos totales de cosecha. Memoria para optar al Título de Ingeniero Forestal. Universidad de Talca, Chile.
- Saucier, J-P. et Groot, A. (2008).** «Modélisation des peuplements complexes et de l'effet des traitements sylvicoles ». Chap. 16 dans Aménagement écosystémique en forêt boréale, sous la direction de Sylvie Gauthier, Marie-A. Vaillancourt, Alain Leduc, Louis De Grandpré, Daniel Kneeshaw, Hubert Morin, Pierre Drapeau et Yves Bergeron. Presses de l'Université du Québec. p. 416 – 443.
- Simard, M., Lecomte, N., Bergeron, Y., Bernier, P.Y. et Paré, D. (2008).** «Un aménagement écosystémique de la pessière du nord de la ceinture d'argile québécoise. Gérer la forêt...mais surtout les sols » Chap. 11 dans Aménagement écosystémique en forêt boréale, sous la direction de Sylvie Gauthier, Marie-A. Vaillancourt, Alain Leduc, Louis De Grandpré, Daniel Kneeshaw, Hubert Morin, Pierre Drapeau et Yves Bergeron. Presses de l'Université du Québec. p. 269 – 299.

- Seymour, R. et Gadzik, C. (1985).** A nomograms for predicting precommercial thinning costs in overstocked spruce-fir stands. *North J. Appl. For.* 2 h 37 -40. June.
- Sougavisnki, S. et Doyon, F. (2002).** Variable Retention: Research Findings, Trial Implementation and Operational Issues. Réseau sur la gestion durable des forêts. Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt Feuillue. 45 p.
- Sougavisnki, S. et Doyon, F. (2003).** La rétention variable : un outil de sylviculture écosystémique. *L'Aubelle* N°144.
- Stone, M. G. (1998).** Forest-type mapping by photointerpretation : A multi-purpose base for Tasmania's forest management. *Tasforests*, 10 : 15-32, December.
- Suddhart, S. et Herrick, A. 1964.** Average skidding distance for theoretical analysis of logging costs. *Purdue Univ. Agric. Exp. Stn. Res. Bull.* 789p.
- Tu ek, J. et Pacola, E. 1999.** Algorithms for skidding distance modelling on a raster digital terrain model. *Journal of forest engineering*, 10 (1).
- Tarp-Johansen, (2002).** Stem diameter estimation from aerial photographs. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17 : 369-376.
- Tufts, R. (1997).** Productivity and cost of the ponse 15-series, cut-to-length harvesting system in southern pine plantations. *Forest Products Journal*, 47 (10). October.
- Uuttera, J., Haara, A., Tkola, T. et Maltamo, M. (1998).** Determination of the spatial distribution of trees from digital aerial photographs. *Forest Ecology and Management* 110 : 275-282.
- Vaillancourt, M-A., De Grandpré, L., Gauthier, S., Leduc, A., Kneeshaw, D., Claveau, Y., Bergeron, Y. (2008).** «Comment les perturbations naturelles peuvent-elles constituer un guide pour l'aménagement écosystémique? ». Chap. 2 dans *Aménagement écosystémique en forêt boréale*, sous la direction de Sylvie Gauthier, Marie-A. Vaillancourt, Alain Leduc, Louis De Grandpré, Daniel Kneeshaw, Hubert Morin, Pierre Drapeau et Yves Bergeron. Presses de l'Université du Québec. p. 41–59.
- Valeria, O. (2003).** Outil spatial d'aide à la planification forestière, intégrant les intérêts culturels de la communauté Crie de Waswanipi. Thèse de Doctorat. Faculté de Foresterie et Géomatique. Université Laval, Québec. 233 p.
- Wang, L. (1997).** Assessment of animal skidding and ground machine skidding under mountain conditions. *International Journal of Forest Engineering*, 8 (2).
- Wang, J., Long, Ch. et McNeel, J. (2004).** Production and cost analysis of a feller-buncher and grapple skidder in central Appalachian hardwood forests. *Forest products journal*. vol. 54 (12) : 159-167.

ANNEXE I : ÉTUDE DE CAS

EFFETS DE DIFFÉRENTS NIVEAUX DE RÉTENTION ET DE LA POSITION DU VOLUME SUR LA DISTANCE DE DÉBARDAGE COMBINÉE

A.1.1 Introduction

Le dépôt de la nouvelle loi sur l'aménagement durable du territoire forestier (loi N° 57) à l'Assemblée nationale du Québec confirme l'importance que l'aménagement écosystémique aura à jouer dans ce nouveau régime forestier. Ainsi, les outils que l'aménagement écosystémique propose, notamment l'utilisation des coupes partielles, deviendront plus fréquents que par le passé. En effet, les coupes partielles jouent un double rôle, soit le maintien des attributs structuraux des peuplements surannés et anciens des mosaïques naturelles (Perron et al., 2008) et le maintien des peuplements dans un état productif, selon l'objectif d'aménagement que ces coupes poursuivent (Simard et al., 2008). Ainsi, différents types de configurations de récolte pourraient être observés. Ces objectifs peuvent être, par exemple, des objectifs sylvicoles (en ordre à l'obtention d'une essence d'intérêt commercial), fauniques (pour la conservation des habitats des animaux via la connectivité ou l'isolation des îlots verts), environnementaux (liées à l'acceptation sociale et au respect des lois) ou des objectifs écosystémiques (maintien des attributs et des processus naturels). Dans ce sens, l'aménagement écosystémique propose justement d'adapter les interventions sylvicoles de façon à imiter la dynamique des perturbations naturelles qui affecte la forêt (Bergeron et Harvey, 1997). Ces configurations variées engendrent des modifications dans la planification des éléments de rétention qui devront être intégrés et repartis dans les blocs de récolte. La taille variable des blocs et le taux de prélèvement variable du volume dans chaque bloc de récolte risquent de complexifier la tâche des aménagistes forestiers. De plus, tous ces changements pourraient avoir des répercussions directes sur les coûts de récolte.

A.1.2 Revue de la littérature

La modélisation a été utilisée depuis plusieurs années pour représenter différents phénomènes naturels. Lorsque la modélisation correspond aux phénomènes tels les perturbations naturelles et les traitements sylvicoles, elle semble de plus en plus inadéquate pour les peuplements d'âge multimodal qui résulteraient d'un aménagement écosystémique (Saucier et Groot, 2008).

Actuellement, dans les sciences environnementales il existe plusieurs outils pour modéliser, tels les systèmes d'information géographique (SIG). Ces logiciels permettent de simuler différentes conditions pour étudier différents phénomènes. Ainsi, par exemple, dans le cas de la récolte forestière, Brown et al. (1994) ont présenté leur simulation : un modèle spatialement explicite des scénarios de récolte. De la même manière, Contreras et Chung (2007) ont proposé, dans le but d'optimiser la localisation des jetées, une méthode incorporant différents éléments pour l'estimation de coûts à partir de modèles raster, tels que les obstacles, la pente et le volume. D'autres outils de simulation utilisant l'environnement d'ArcView ou ArcGIS, sous la forme d'extension du logiciel, ont été aussi développés : « Setting analyses » permet d'estimer la distance de débardage et les coûts d'approvisionnement considérant les routes, les jetées et le transport (Halleux et Greene, 2001) ; « Wood Procurement Planning Tool » (WPPT) permet d'estimer les coûts d'approvisionnement considérant des scénarios de récolte, de rétention, de réseau routier et la construction de chemins (Valeria, 2003) ; « Planiroute » aide aux compagnies forestières dans la planification des réseaux routiers. Ce dernier comprend des modules d'optimisation des routes forestières et du débardage/portage, de dimensionnements des ponceaux et d'inventaire des ponts. Le premier module est un module qui utilise des équations mathématiques développées par FPInnovations (FERIC) pour optimiser les coûts routes/débardage à partir des cartes forestières.

Ainsi, plusieurs outils utilisant ArcGis ont été développés pour modéliser différents éléments et scénarios de récolte, mais peu de guides sont disponibles à cet effet : (1) pour orienter les aménagistes dans leur choix de la disposition des éléments de rétention et le prélèvement du

volume et (2) pour déterminer les effets de ces changements sur les coûts de récolte où la distance de débardage, la distribution du volume dans le bloc et le type de machinerie utilisée sont des exemples des éléments qui auraient une influence sur ces coûts.

A.1.3 Objectifs

- a) Évaluer l'effet d'une répartition non-homogène des volumes et des niveaux de rétention variable dans les blocs de récolte, sur la distance de débardage.
- b) Identifier des configurations spatiales de rétention minimisant les impacts sur les coûts de récolte.
- c) Analyser l'effet de la configuration de la récolte, de la position et de la concentration du volume sur le coût de débardage et de récolte.

A.1.4 Matériels et méthodes

À l'aide de blocs de récolte fictifs, nous avons simulé différentes configurations spatiales de rétention. Trois tailles de blocs ont été simulées : (1) petite 9,5 ha (2) moyenne 62 ha et (3) grande 126 ha, et ce, selon deux distances maximales de débardage (profondeur de bloc) : 500 mètres et 1000 mètres. La taille des blocs et la distance maximale de débardage correspondent aux valeurs moyennes observées sur le réseau des coupes partielles de l'Abitibi (RCPA).

Les blocs de récolte simulés ont été construits selon une forme rectangulaire et parallèle au chemin. Chaque bloc a été divisé en sections de 50 mètres selon deux distances maximales pour lesquelles se voulait déterminer leur influence sur la distance moyenne de débardage, soit 500 mètres et 1000 mètres. (Fig. A.1.1). Ensuite, chaque bloc numérisé a été converti en format raster (pixels de 10x10 mètres).



Figure A.1.1 Bloc de taille moyen (62 ha), 500 m de profondeur et subdivisé dans 10 sections de 50 m.

Les différentes analyses ont été réalisées d'abord au niveau de la distance de débardage combinée D^c (voir sections 3.4 et 4.3). Afin de couvrir un gradient plausible de rétention, nous avons utilisé la proposition de Maguire et al. (2006), (Fig. A.1.2).

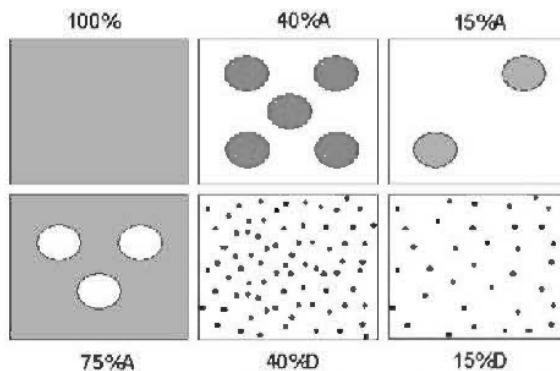


Figure A.1.2 Représentation des niveaux de rétention variable (gris), tirée de Maguire et al. 2006. (A) rétention agglomérée et (D) rétention dispersée.

Ainsi, nous avons construit un total de 20 blocs fictifs pour les blocs de 500 m de profondeur (Tableau A.1.1) selon les pourcentages suivants de rétention du volume à l'intérieur du bloc : 0%, 15%, 40%, 60% et 75%, tant à rétention dispersée qu'aggrégée.

Tableau A.1.1 Codification de la répartition de simulations de blocs de récolte selon le pourcentage de rétention, le type de rétention (agglomérée ou dispersée) et sa configuration (position de la rétention à l'intérieur du bloc) pour un polygone de taille moyenne de 62 ha

Rétention (%)	Sans Rétention (SR)	Rétention Dispersée (RD)	Type de rétention				
			Rétention agglomérée (RA) et type de configuration				
0	SR		A	B	C	D	E
15		RD15	RA15A	RA15 B	RA15 C		
40		RD40	RA40A	RA40B	RA40C	RA40D	
60		RD60	RA60A	RA60B	RA60C	RA60D	RA60E
75		RD75	RA75A	RA75B	RA75C		

Note : Couleur gris pâle = rétention.

A fin d'intégrer l'effet sur la distance de débardage d'une variation du volume dans l'espace un, deux et trois fois l'écart-type ($55 \text{ m}^3/\text{ha}$) ont été additionnées au volume moyen dans deux type d'analyses : (1) addition des écarts au volume moyen à chaque position dans le bloc (chaque section de 50 m) à partir du fond du bloc et jusqu'à au bord du chemin, appelé ici « Analyse cumulée » et (2) addition des écarts au volume moyen par sections (sans cumul), appelait ici « Analyse séquentielle ». Tout en évaluant l'effet de la variation de la concentration du volume à extraire.

Un total de 160 simulations ont été effectuées pour la rétention dispersée, analyse du volume cumulé. Le même nombre de simulations ont été réalisées pour la rétention dispersée, analyse du volume séquentiel. Dans le cas de la rétention agglomérée, 600 simulations ont été réalisées pour l'analyse du volume cumulé et 600 pour l'analyse du volume séquentiel (Fig. A.1.3). Des analyses de variance des valeurs des distances moyennes de débardage obtenues

ont été réalisées par type de rétention. Les changements dans les coûts de débardage et de récolte ont également été analysés.

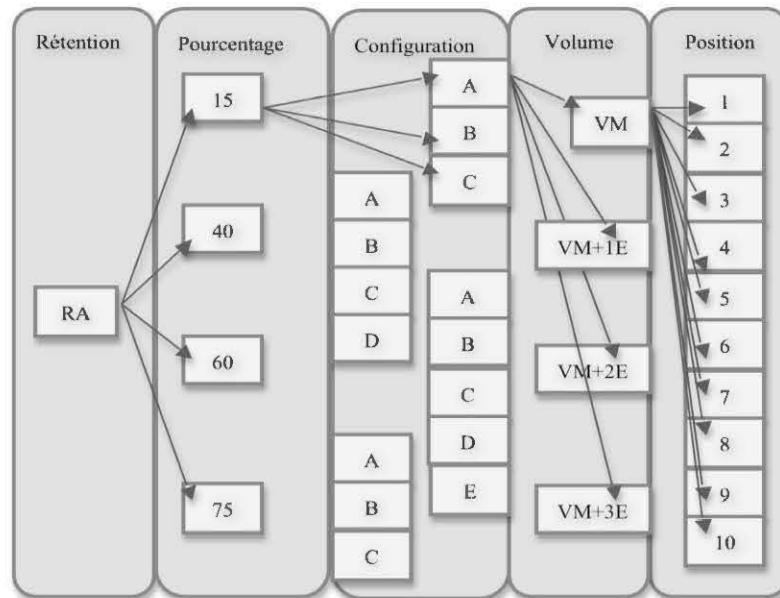


Figure A.1.3 Représentation de la structure des données et des variables analysées pour la rétention agglomérée (RA) tant pour l'analyse cumulée comme séquentielle.

A.1.5 Résultats

L'effet de la profondeur du bloc sur la distance moyenne de débardage a été analysé. Ainsi, les blocs (petit, moyen et grand) avec une profondeur de 500 m et sans aucun ajout d'un autre élément d'analyse, présentaient une distance moyenne de débardage : $\bar{D} = 255$ m. Pour les blocs (petit, moyen et grand) de profondeur de 1000 m, la distance moyenne de débardage observée a été : $\bar{D} = 505$ m.

L'analyse de la distance de débardage moyenne combinée \bar{D}^c , considérant que la variation des écarts-types (concentration du volume), correspondait à : $\bar{D}_{VM}^c = 255$ m, $\bar{D}_{VM+1E}^c = 292,49$ m, $\bar{D}_{VM+2E}^c = 385,82$ m et $\bar{D}_{VM+3E}^c = 477,62$ m, pour les blocs petit, moyen et grand de 500 m de profondeur de bloc. Pour les blocs de 1000 m de profondeur de tailles petite, moyenne et

grande, les valeurs observées correspondaient à : $\overline{D_{VM}^C} = 505 \text{ m}$, $\overline{D_{VM+1EC}^C} = 579,24 \text{ m}$, $\overline{D_{VM+2EC}^C} = 764,07 \text{ m}$ et $\overline{D_{VM+3EC}^C} = 946,87 \text{ m}$.

A.1.5.1 Distances moyennes de débardage combinées : analyses du volume au niveau du bloc entier et des différents types de rétention; bloc de 500 m de profondeur

(c) *Rétention dispersée*

Indépendamment du pourcentage de rétention analysé (75%, 60%, 40% et 15%), les valeurs de la distance moyenne de débardage combinée présentaient les mêmes tendances*. Plus on augmentait les valeurs du volume du bloc de récolte, plus augmentait $\overline{D^C}$ et ça, pour toutes les valeurs du volume analysées : VM = 117 m³/ha, VM+1EC = 172 m³/ha, VM+2EC = 227 m³/ha et VM+3EC = 282 m³/ha, (Fig. A.1.4).

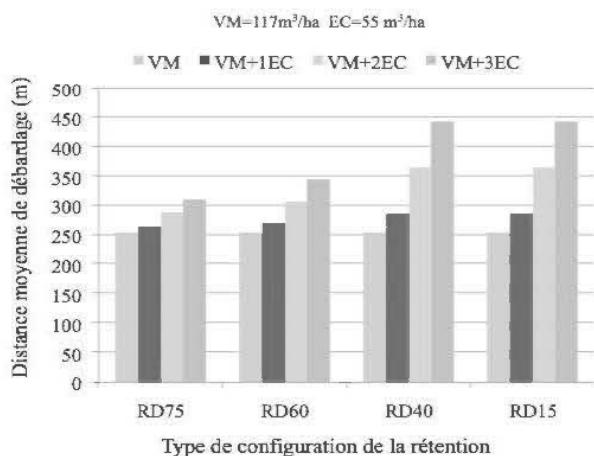


Figure A.1.4 Distance moyenne de débardage combinée en fonction de la concentration du volume à extraire : VM, VM+1EC, VM+ 2EC et VM+3EC (volume moyen et volume moyen plus un, deux et trois écarts-type) et type de configuration de la rétention : RD75, RD60, RD40 et RD15. (RD) rétention dispersée, (75, 60, 40 et 15) pourcentages de rétention ; au niveau du bloc entier.

* Les valeurs de $\overline{D^C}$ se présentent dans le Tableau A.1.2 codes de rétention RD, colonnes $*S_{0-500}$.

(d) Rétention agglomérée

La distance combinée $\overline{D^c}$ variait selon la position de l'agglomération à l'intérieur du bloc de récolte (Fig. A.1.5). Plus proche du chemin se concentrerait l'agglomération, plus élevée était la valeur de la distance moyenne de débardage combinée. En effet, les voyages étaient surtout nécessaires pour aller le plus loin du chemin (configurations RA75A, RA60A, RA40A et RA15A). Cet effet était amplifié par l'augmentation du volume à extraire.

Bien que la tendance observée dans tous les pourcentages de rétention analysés se répétait, les différences observées entre les valeurs des $\overline{D^c}$, par type de configuration, étaient les plus significatives dans les modèles RA40 et RA15 où les valeurs du volume moyen comme celles des concentrations du volume plus élevés généraient les valeurs de $\overline{D^c}$ les plus élevées (Fig. A.1.5 c et d). Ces valeurs augmentaient lorsque les valeurs des volumes augmentaient. Cependant, elles variaient selon la configuration de l'agglomération à l'intérieur du bloc de récolte. Ainsi, plus loin se situait l'agglomération du chemin (RA75C, RA60E, RA40D et RA15C), plus courte la distance à parcourir et, en conséquence, plus basse la valeur obtenue de la distance moyenne de débardage combinée*.

* Les valeurs de $\overline{D^c}$ se présentent dans le Tableau A.1.2, codes de rétention RA, colonnes *S₀₋₅₀₀.

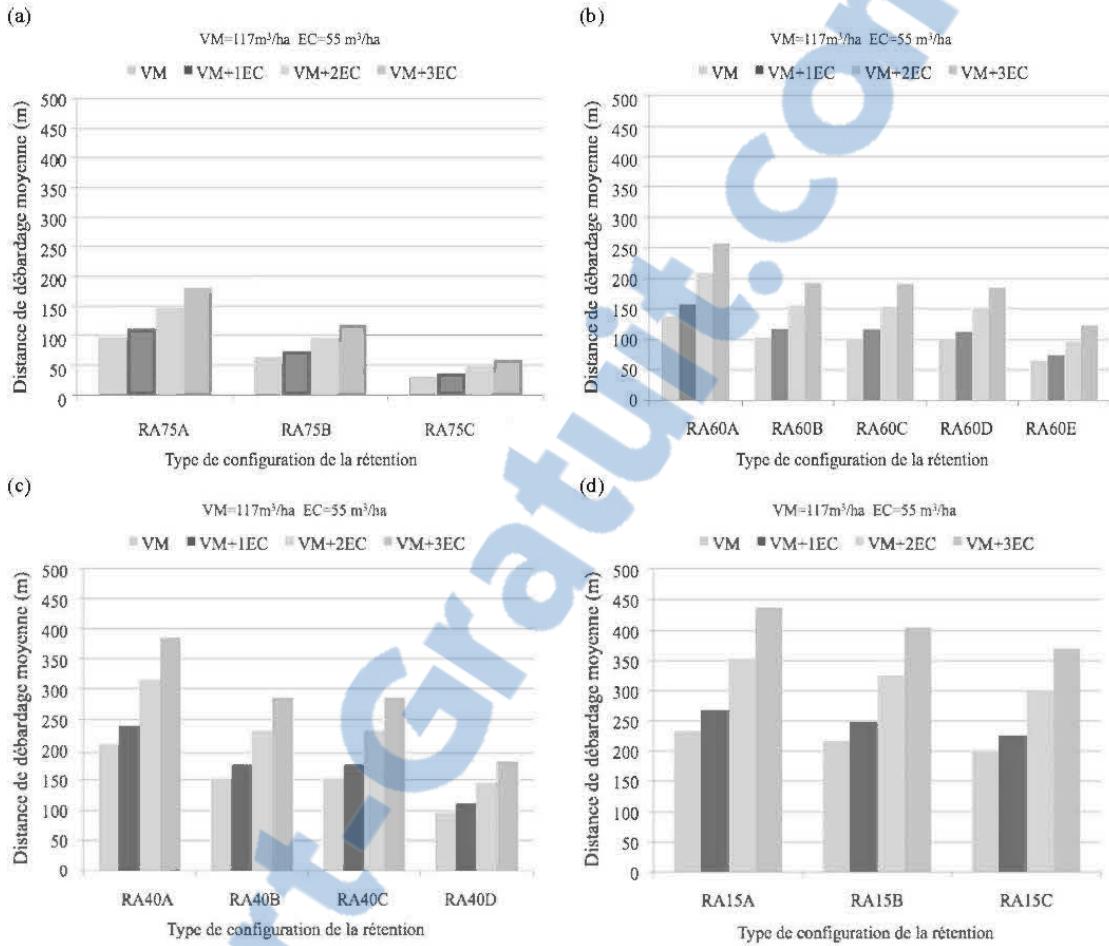


Figure A.1.5 Distance moyenne de débardage combinée en fonction du volume à extraire : VM, VM+1EC, VM+2EC et VM+3EC (volume moyen et volume moyen plus un, deux et trois écarts-type) et types de configuration de la rétention : (a) RA75A, RA75B et RA75C, (b) RA60A, RA60B, RA60C, RA60D et RA60E, (c) RA40A, RA40B, RA40C et RA40D et (d) RA15A, RA15B et RA15C. (RA) rétention agglomérée, (75, 60, 40 et 15) pourcentages de rétention et (A, B, C, D ou E) configurations de la rétention.

A.1.5.2 Distances moyennes de débardage combinées : analyse du volume cumulé et séquentiel par type de rétention

Un résumé des résultats des distances moyennes de débardage combinée est présenté dans les tableaux A.1.2 et A.1.3. Les résultats au complet sont présentés dans les tableaux A.1.8 et A.1.9. Les analyses de variance des distances combinées sont présentées dans le tableau A.1.4. Un analyse détaillée de variations des distances pour la rétention agglomérée est présentée dans les tableaux A.1.5 à A.1.7.

Tableau A.1.2 Distances moyennes de débardage combinées $\overline{D^c}$, simulées (analyse cumulée) selon le type et configuration de la rétention, la position et la concentration du volume à récolter, pour un bloc de récolte de 500 m de profondeur. L'estimation de $\overline{D^c}$ considère l'augmentation du volume entre les sections (S_{x-y}) tandis que le reste du bloc présente le volume moyen

Code de rétention	Distances moyennes de débardage combinées par concentration du volume									
	$\overline{D^c}_{VM}$	$\overline{D^c}_{VM+1EC}$		$\overline{D^c}_{VM+2EC}$		$\overline{D^c}_{VM+3EC}$				
	Concentration du volume cumulé entre les sections S_{x-y} à partir du bord de la route (m)									
* S_{0-500}	$S_{450-500}$	$S_{250-500}$	* S_{0-500}	$S_{450-500}$	$S_{250-500}$	* S_{0-500}	$S_{450-500}$	$S_{250-500}$	* S_{0-500}	
SR	255	262,06	282,93	292,49	279,62	352,47	385,82	296,90	420,87	477,62
RD15	255	260,98	278,68	286,79	275,93	337,88	366,25	290,61	395,99	444,27
RD40	255	260,98	278,68	286,79	275,93	337,88	366,25	290,61	395,99	444,27
RD60	255	257,82	266,15	269,98	264,86	294,04	307,43	271,78	321,42	344,19
RD75	255	256,76	261,97	264,36	261,16	279,38	287,75	265,48	296,48	310,72
RA15A	233	240,52	261,34	267,72	258,12	331,01	353,33	257,39	399,41	437,38
RA15B	217	222,92	240,02	248,15	239,19	299,04	327,49	255,18	356,99	405,40
RA15C	199	205,01	217,67	227,21	219,17	266,49	299,86	233,91	314,43	371,19
RA40A	209	215,93	236,76	239,53	233,53	306,42	316,12	250,81	374,82	391,32
RA40B	153	158,07	169,83	175,25	171,17	212,32	231,29	184,03	254,04	286,31
RA40C	153	158,07	169,83	175,25	171,17	212,32	231,29	184,03	254,04	286,31
RA40D	97	97,24	101,26	110,79	98,80	112,85	146,22	100,34	124,23	180,99
RA60A	138	144,91	156,09	158,09	162,51	201,65	208,65	179,79	246,38	258,28
RA60B	103	106,43	114,76	118,39	114,38	143,53	156,26	122,19	171,77	193,43
RA60C	102	106,09	113,87	116,77	116,74	143,95	154,11	127,19	173,49	190,77
RA60D	99	101,56	109,62	113,33	108,37	136,59	150,61	115,06	163,07	185,15
RA60E	66	67,27	71,64	75,45	70,96	86,25	99,57	74,59	100,59	123,26
RA75A	97	100,56	111,08	111,08	109,79	146,59	146,59	118,85	181,48	181,48
RA75B	64	65,51	70,72	73,10	69,91	88,13	96,48	74,23	105,23	119,43
RA75C	31	31,45	31,45	36,07	31,45	31,45	47,59	31,45	31,45	58,92

Note : (1) Les valeurs des sections intermédiaires ne sont pas présentées (voir Tableau A.1.8).

(2) * S_{0-500} = bloc complet. Ces distances sont représentées dans les Figures A.1.5 (a) à (d).

Tableau A.1.3 Distances moyennes de débardage combinées \overline{D}^c , simulées (analyse séquentielle) selon le type et configuration de la rétention, la position et la concentration du volume à récolter, pour un bloc de récolte de 500 m de profondeur. L'estimation de \overline{D}^c considère l'augmentation de la concentration du volume par section (S_{x-y}) tandis que le reste du bloc présente le volume moyen

Code de rétention	Distances moyennes de débardage combinées par concentration du volume								Concentration du volume séquentiel dans la section S_{x-y} à partir du bord de la route (m)	
	\overline{D}_{VM}^c	\overline{D}_{VM+1EC}^c	\overline{D}_{VM+2EC}^c	\overline{D}_{VM+3EC}^c	Concentration du volume séquentiel dans la section S_{x-y} à partir du bord de la route (m)					
	S_{0-50}	S_{0-50}	$S_{250-300}$	$S_{450-500}$	S_{0-50}	$S_{250-300}$	$S_{450-500}$	S_{0-50}	$S_{250-300}$	$S_{450-500}$
SR	255	255,44	259,12	262,06	256,54	269,36	279,62	257,62	279,44	296,90
RD15	255	255,38	258,49	260,98	256,32	267,21	275,93	257,25	275,76	290,61
RD40	255	255,38	258,49	260,98	256,32	267,21	275,93	257,25	275,76	290,61
RD60	255	255,19	256,65	257,82	255,65	260,77	264,87	256,10	264,82	271,78
RD75	255	255,11	256,02	256,76	255,39	258,58	261,16	255,67	261,09	265,48
RA15A	233	233,86	237,58	240,52	234,82	247,85	258,12	235,76	257,93	275,39
RA15B	217	216,79	220,02	222,92	217,77	229,05	239,19	218,72	237,92	255,18
RA15C	199	198,59	201,29	204,15	199,69	209,13	219,17	200,77	216,84	233,91
RA40A	209	208,93	212,99	215,93	209,03	223,26	233,53	209,12	233,34	250,81
RA40B	153	153,12	155,15	158,07	153,84	160,95	171,17	154,54	166,37	184,03
RA40C	153	153,12	155,15	158,07	153,84	160,95	171,17	154,54	166,64	184,03
RA40D	97	97,06	99,15	97,24	98,16	105,47	98,80	99,24	111,68	100,34
RA60A	138	137,97	138,74	144,91	138,19	140,89	162,51	138,42	143,00	179,79
RA60B	103	103,95	110,48	114,38	103,95	110,48	114,38	104,44	115,55	122,19
RA60C	102	102,10	102,69	106,09	102,77	104,85	116,74	103,42	106,96	127,19
RA60D	99	99,02	100,42	101,56	99,49	104,39	108,37	99,95	108,29	115,06
RA60E	66	66,24	66,66	67,27	67,34	68,81	70,96	68,42	70,92	74,59
RA75A	97	96,87	98,62	100,56	96,87	103,01	109,79	96,87	107,31	118,85
RA75B	64	63,86	64,78	65,51	64,14	67,34	69,91	64,41	69,86	74,23
RA75C	31	31,68	31,45	31,45	32,26	31,45	31,45	32,83	31,45	31,45

Note : S_{0-500} correspond au bloc complet. Les valeurs des sections intermédiaires ne sont pas présentées (voir Tableau A.1.9).

Tableau A.1.4 Analyse de variance des moyennes des distances de débardage combinées ($\overline{D^c}$), selon la variation du volume cumulé et séquentiel par type et par la configuration de la rétention, la position et la concentration du volume à extraire dans le bloc de récolte

Source de variation		Distance Volume cumulé					Distance Volume séquentiel				
		Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Valeur F	Probabilité p	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Valeur F	Probabilité p
SR	Concentration	3	151332	50444	63,1582	<0.01	3	2987,02	995,67	28,3715	<0.01
	Position	9	27580	3064	3,8368	0,0031	9	1211,81	134,65	3,8367	0,0032
	Résiduels	27	21565	799			27	947,54	35,09		
RD	Concentration	3	209178	69726	324,6436	<0.01	3	4131,1	1377,0	232,6210	<0.01
	Position	9	38101	4233	19,7108	<0.01	9	1670,8	185,6	31,3613	<0.01
	Pourcentage	1	46740	46740	217,6207	<0.01	1	922,6	922,6	155,8509	<0.01
	Concentration*Position	27	29815	1104	5,1414	<0.01	27	1307,5	48,4	8,1805	<0.01
	Concentration*Pourcentage	3	36576	12192	56,7652	<0.01	3	721,9	240,6	40,6527	<0.01
	Position*Pourcentage	9	6662	740	3,4463	<0.01	9	292,7	32,5	5,4936	<0.01
	Résiduels	107	22981	215			107	633,4	5,9		
RA	Concentration	3	614879	204960	3932,7955	<0.01	3	11552	3851	452,8158	<0.01
	Position	9	98768	10974	210,5748	<0.01	9	5671	630	74,0925	<0.01
	Configuration	14	3589779	256413	4920,0876	<0.01	14	2289502	163536	19230,9049	<0.01
	Concentration*Position	27	77393	2866	55,0012	<0.01	27	4437	164	19,3260	<0.01
	Concentration*Configuration	42	153688	3659	70,2139	<0.01	42	2398	57	6,7137	<0.01
	Position*Configuration	126	25087	199	3,8204	<0.01	126	4107	33	3,8335	<0.01
	Résiduels	378	19700	52			378	3214	9		

Tableau A.1.5 Rétention agglomérée, analyse détaillée des variations significatives des valeurs de \bar{D}^c selon la source de variation : concentration du volume et position (section) à l'intérieur du bloc pour les analyses cumulée et séquentielle

Code de rétention	Analyse cumulée										Analyse séquentielle									
	Différences statistiquement significatives des distances moyennes de débordage combinées, entre les sections 1 à 10 et par type de configuration																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VM	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
VM+1EC	n	a	a	a	a	a	a	b	c	d	a	a	a	a	a	a	a	b	c	
VM+2EC	n	a	a	a	b	c	d	e	f	g	a	a	a	b	c	d	e	f	g	h
VM+3EC	n	a	a	b	c	d	e	f	g	h	a	a	b	c	d	e	f	g	h	i

Note : n= Sans valeur; a= Non significatif; b à i = indiquent différences significatives ($p<0,05$)

Tableau A.1.6 Rétention agglomérée, analyse détaillée des variations significatives des valeurs de \bar{D}^c selon la source de variation : concentration du volume et configuration de la rétention à l'intérieur du bloc pour les analyses cumulée et séquentielle

Code de rétention	Analyse cumulée				Analyse séquentielle			
	Différences statistiquement significatives des distances moyennes de débordage combinée, entre les concentrations des volumes par type de configuration							
	VM	VM+1EC	VM+2EC	VM+3EC	VM	VM+1EC	VM+2EC	VM+3EC
RA15A	n	b	c	d	n	n	b	c
RA15B	n	c	d	e	n	n	c	d
RA15C	n	a	e	f	n	n	d	e
RA40A	n	d	f	g	n	n	e	f
RA40B	n	a	g	h	n	n	a	g
RA40C	n	a	h	i	n	n	a	h
RA40D	n	a	i	j	n	n	a	a
RA60A	n	a	j	k	n	n	a	a
RA60B	n	a	a	a	n	n	a	a
RA60C	n	a	a	a	n	n	a	a
RA60D	n	a	a	l	n	n	a	a
RA60E	n	a	k	m	n	n	a	a
RA75A	n	a	a	a	n	n	a	a
RA75B	n	a	l	n	n	n	a	a
RA75C	n	e	m	o	n	n	a	j

Note : n= Sans valeur; a= Non significatif; b à o = indiquent différences significatives ($p<0,05$)

Tableau A.1.7 Rétention agglomérée, analyse détaillée des variations significatives des valeurs de \bar{D}^c selon la source de variation : configuration de la rétention et position (section) à l'intérieur du bloc pour les analyses cumulée et séquentielle

Code de rétention	Analyse cumulée										Analyse séquentielle									
	Différences statistiquement significatives										des distances moyennes de débordage combinées,									
	entre les sections 1 à 10 et par type de configuration																			
Code de rétention	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RA15A	n	a	a	a	a	b	c	d	e	f	n	a	a	a	a	a	b	c	d	
RA15B	n	a	a	a	a	c	d	e	f	g	n	a	a	a	b	a	a	a	c	
RA15C	n	a	a	a	d	e	f	g	h	i	n	a	a	b	c	a	a	a	a	
RA40A	n	a	a	a	a	a	h	i	j		n	a	a	a	a	b	c	d	e	f
RA40B	n	a	a	a	a	a	h	i	j	k	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
RA40C	n	a	a	a	a	a	i	j	k	l	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
RA40D	n	a	a	a	h	i	j	k	l	a	n	a	a	b	c	a	d	e	f	g
RA60A	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	a	a	a	a	a	a	g	h	
RA60B	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	
RA60C	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	
RA60D	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	
RA60E	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	a	a	a	a	a	h	i	
RA75A	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	a	a	a	a	a	a	a	
RA75B	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	a	a	a	a	a	a	a	
RA75C	n	a	a	a	a	a	a	a	a	m	n	a	a	a	a	a	g	h	j	

Note : n= Sans valeur; a= Non significatif; b à m = indiquent différences significatives ($p<0,05$)

Tableau A.1.8 Valeurs des distances moyennes de débardage combinée \bar{D}^c par les volumes cumulés selon le code de rétention pour chaque concentration du volume et leur position dans le bloc de récolte (S_{x-y})

Code de rétention		$S_{500-450}$	$S_{450-400}$	$S_{400-350}$	$S_{350-300}$	$S_{300-250}$	$S_{250-200}$	$S_{200-150}$	$S_{150-100}$	S_{100-50}	S_{50-0}
SR	VM	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
	VM+1EC	262,056	268,377	273,963	278,814	282,930	286,311	288,957	290,868	292,044	292,485
	VM+2EC	279,624	301,683	321,177	338,106	352,470	364,269	373,503	380,172	384,276	385,815
	VM+3EC	296,904	334,443	367,617	396,426	420,870	440,949	456,663	468,012	474,996	477,615
RD15	VM	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
	VM+1EC	260,980	266,339	271,079	275,192	278,679	281,543	283,790	285,409	286,409	286,786
	VM+2EC	275,931	294,687	311,277	325,671	337,876	347,899	355,767	361,430	364,932	366,252
	VM+3EC	290,610	322,520	350,744	375,233	395,997	413,049	426,434	436,069	442,027	444,273
RD40	VM	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
	VM+1EC	260,980	266,339	271,079	275,192	278,679	281,543	283,790	285,409	286,409	286,786
	VM+2EC	275,931	294,687	311,277	325,671	337,876	347,899	355,767	361,430	364,932	366,252
	VM+3EC	290,610	322,520	350,744	375,233	395,997	413,049	426,434	436,069	442,027	444,273
RD60	VM	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
	VM+1EC	257,818	260,348	262,571	264,505	266,154	267,510	268,563	269,327	269,794	269,979
	VM+2EC	264,862	273,717	281,499	288,269	294,039	298,783	302,471	305,143	306,777	307,425
	VM+3EC	271,778	286,843	300,082	311,601	321,417	329,488	335,762	340,308	343,088	344,189
RD75	VM	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
	VM+1EC	256,761	258,337	259,731	260,944	261,966	262,809	263,471	263,947	264,246	264,358
	VM+2EC	261,162	266,679	271,560	275,803	279,381	282,332	284,650	286,314	287,362	287,753
	VM+3EC	265,483	274,870	283,174	290,393	296,479	301,499	305,444	308,275	310,057	310,723
RA15A	VM	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233
	VM+1EC	240,517	246,824	252,398	257,238	261,344	263,832	265,450	266,618	267,338	267,721
	VM+2EC	258,117	280,191	299,697	316,637	331,011	339,718	345,381	349,471	351,988	353,329
	VM+3EC	275,397	312,951	346,137	374,957	399,411	414,224	423,859	430,817	435,099	437,381
RA15B	VM	217	217	217	217	217	217	217	217	217	217
	VM+1EC	222,919	228,005	232,499	236,402	240,015	243,144	245,273	246,811	247,757	248,146
	VM+2EC	239,199	257,000	272,731	286,392	299,037	309,989	317,440	322,822	326,134	327,495
	VM+3EC	255,183	285,467	312,231	335,473	356,985	375,618	388,295	397,451	403,086	405,401
RA15C	VM	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
	VM+1EC	205,006	208,871	212,287	214,534	217,673	221,047	223,687	225,593	226,767	227,207

	VM+1EC	67,273	68,595	69,764	70,779	71,640	72,347	72,901	73,834	75,007	75,447
	VM+2EC	70,963	75,592	79,682	83,234	86,247	88,723	90,660	93,926	98,033	99,573
	VM+3EC	74,587	82,461	89,419	95,462	100,589	104,801	108,097	113,653	120,639	123,259
RA75A	VM	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97
	VM+1EC	100,561	103,867	106,789	109,326	111,079	111,079	111,079	111,079	111,079	111,079
	VM+2EC	109,787	121,358	131,583	140,463	146,598	146,598	146,598	146,598	146,598	146,598
	VM+3EC	118,845	138,530	155,927	171,034	181,476	181,476	181,476	181,476	181,476	181,476
RA75B	VM	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64
	VM+1EC	65,510	67,087	68,480	69,690	70,717	71,560	72,220	72,697	72,990	73,100
	VM+2EC	69,910	75,428	80,305	84,540	88,133	91,085	93,395	95,063	96,090	96,475
	VM+3EC	74,230	83,618	91,915	99,667	105,233	110,255	114,185	117,023	118,770	119,425
RA75C	VM	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
	VM+1EC	31,452	31,452	31,452	31,452	31,452	32,836	34,219	35,219	35,834	36,065
	VM+2EC	31,452	31,452	31,452	31,452	31,452	36,295	41,139	44,637	46,790	47,597
	VM+3EC	31,452	31,452	31,452	31,452	31,452	39,692	47,932	53,884	57,546	58,919

Tableau A.1.9 Valeurs des distances moyennes de débardage combinée \bar{D}^c par les volumes séquentiels selon le code de rétention pour chaque concentration du volume et leur position dans le bloc de récolte (S_{x-y})

Code de rétention		$S_{500-450}$	$S_{450-400}$	$S_{400-350}$	$S_{350-300}$	$S_{300-250}$	$S_{250-200}$	$S_{200-150}$	$S_{150-100}$	S_{100-50}	S_{50-0}
SR	VM	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
	VM+1EC	262,06	261,32	260,59	259,85	259,12	258,38	257,65	256,91	256,18	255,44
	VM+2EC	279,62	277,06	274,49	271,93	269,36	266,80	264,23	261,67	259,10	256,54
	VM+3EC	296,90	292,54	288,17	283,81	279,44	275,08	270,71	266,34	261,98	257,62
RD15	VM	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
	VM+1EC	260,980	260,359	259,740	259,113	258,487	257,864	257,248	256,618	256,001	255,377
	VM+2EC	275,931	273,757	271,590	269,394	267,205	265,023	262,867	260,663	258,502	256,320
	VM+3EC	290,610	286,911	283,224	279,489	275,764	272,053	268,385	264,635	260,958	257,245
RD40	VM	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
	VM+1EC	260,980	260,359	259,740	259,113	258,487	257,864	257,248	256,618	256,001	255,377
	VM+2EC	275,931	273,757	271,590	269,394	267,205	265,023	262,867	260,663	258,502	256,320
	VM+3EC	290,610	286,911	283,224	279,489	275,764	272,053	268,385	264,635	260,958	257,245
RD60	VM	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
	VM+1EC	257,818	257,530	257,223	256,934	256,649	256,356	256,054	255,763	255,467	255,185
	VM+2EC	264,862	263,855	262,782	261,770	260,770	259,744	258,688	257,672	256,634	255,648
	VM+3EC	271,778	270,065	268,240	266,518	264,817	263,071	261,274	259,546	257,781	256,102
RD75	VM	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
	VM+1EC	256,761	256,576	256,395	256,212	256,022	255,843	255,662	255,476	255,299	255,112
	VM+2EC	261,162	260,518	259,881	259,243	258,578	257,951	257,318	256,664	256,047	255,392
	VM+3EC	265,483	264,387	263,304	262,219	261,087	260,020	258,944	257,831	256,782	255,666
RA15A	VM	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233
	VM+1EC	240,517	239,784	239,051	238,317	237,584	235,965	235,096	234,646	234,197	233,861
	VM+2EC	258,117	255,551	252,984	250,417	247,851	242,184	239,141	237,568	235,994	234,819
	VM+3EC	275,397	271,031	266,664	262,297	257,931	248,290	243,112	240,436	237,758	235,759
RA15B	VM	217	217	217	217	217	217	217	217	217	217
	VM+1EC	222,919	221,493	220,901	220,310	220,019	219,536	218,536	217,944	217,353	216,795
	VM+2EC	239,199	234,208	232,138	230,068	229,051	227,359	223,858	221,788	219,718	217,768
	VM+3EC	255,183	246,691	243,170	239,648	237,919	235,039	229,084	225,562	222,041	218,722
RA15C	VM	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
	VM+1EC	204,151	202,061	201,606	201,151	201,285	201,519	200,785	200,052	199,319	198,585

	VM+1EC	67,273	67,119	66,965	66,812	66,658	66,504	66,350	66,730	66,970	66,237
	VM+2EC	70,963	70,425	69,887	69,349	68,811	68,272	67,734	69,062	69,903	67,337
	VM+3EC	74,587	73,671	72,755	71,840	70,924	70,009	69,093	71,352	72,783	68,417
RA75A	VM	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97
	VM+1EC	100,561	100,177	99,793	99,408	98,624	96,871	96,871	96,871	96,871	96,871
	VM+2EC	109,787	108,442	107,096	105,751	103,006	96,871	96,871	96,871	96,871	96,871
	VM+3EC	118,845	116,556	114,267	111,978	107,309	96,871	96,871	96,871	96,871	96,871
RA75B	VM	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64
	VM+1EC	65,510	65,327	65,143	64,960	64,777	64,593	64,410	64,227	64,043	63,860
	VM+2EC	69,910	69,268	68,627	67,985	67,343	66,702	66,060	65,418	64,777	64,135
	VM+3EC	74,230	73,138	72,047	70,955	69,863	68,772	67,680	66,588	65,497	64,405
RA75C	VM	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
	VM+1EC	31,452	31,452	31,452	31,452	31,452	32,836	32,836	32,451	32,060	31,682
	VM+2EC	31,452	31,452	31,452	31,452	31,452	36,295	36,295	34,950	33,604	32,259
	VM+3EC	31,452	31,452	31,452	31,452	31,452	39,692	39,692	37,403	35,114	32,825

A.1.5.3 Analyse des effets du type de débardeur sur la distance de débardage combinée, le coût de débardage et les coûts de récolte

Le coût de débardage est affecté différemment selon le type de machine à utiliser pour le débardage, soit un porteur, un débardeur à câble, un débardeur à grappin ou un semi-porteur. La distance de débardage à parcourir affectera le coût d'opération du débardeur choisi. Les porteurs, par exemple, ne sont pas très affectés par la distance de débardage, mais plutôt par le volume à transporter comparés au débardeur à grappin (OIFQ, 1996). Lorsqu'on a ajouté ces éléments (types de débardeur) en plus de la valeur du volume pour réaliser l'analyse combinée, nos résultats ont montré que : (1) les distances moyennes de débardage variaient entre 31 m et 444 m; (2) les coûts d'utilisation des machines pouvaient varier, entre ces distances minimales et maximales observées, de l'ordre de 2,34 \$/m³ pour un porteur, de 2,73 \$/m³ pour un débardeur à câble, de 3,84 \$/m³ pour un semi-porteur et de 5,62 \$/m³ pour un débardeur à grappin; (3) selon les distances observées, le semi-porteur était le moins dispendieux pour les distances plus courtes que 210 m et le porteur était le plus dispendieux jusqu'aux 240 m. Le débardeur à câble devient le moins dispendieux à partir des 210 m, et à partir de 240 m, le plus dispendieux est le débardeur à grappin (Fig. A.1.6).

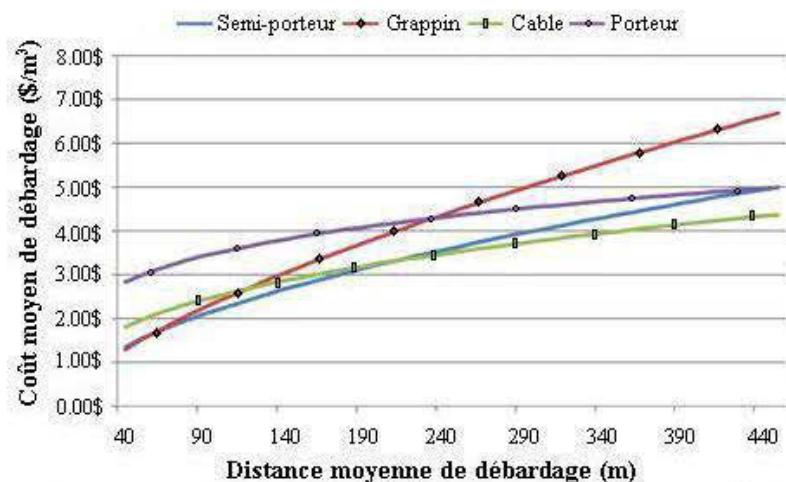


Figure A.1.6 Coûts moyens de débardage (\$/m³) par type de débardeur utilisé : Semi-porteur, Grappin, Câble et Porteur, selon la distance de débardage combinée considérant différents niveaux de rétention (pourcentage et configuration), position et concentration du volume.

A.1.6 Discussion

Effet de la forme et la taille du bloc

Bien que les résultats présentés ont été estimés à partir d'un bloc de forme régulière et une taille de bloc moyenne, des analyses de différentes formes et tailles de bloc ont aussi été réalisées. Ceci, nous a permis d'affirmer que la distance moyenne de débardage n'est pas affectée significativement ni par la forme ni par la taille du bloc (voir section 4.1.3).

Effet de la profondeur du bloc

La profondeur du bloc présente des effets importants sur la valeur de la distance moyenne de débardage. L'augmentation de la profondeur du bloc de 500 m à 1000 m implique une augmentation de la distance moyenne de débardage presque double (255 m à 505 m). La distance de débardage est affectée davantage par la distance maximale à parcourir de la machinerie jusqu'au fond du bloc pour amener les bois coupés au bord de la route. La profondeur de bloc choisie pour le gros de nos simulations a été 500 m ce qui a donné la valeur 255 m comme distance moyenne de débardage. Pentek et al. (2005) montrent que la distance moyenne de débardage optimale correspond à 250 m, ce qui implique la présence de distances maximales observées d'environ 500 m. Ces distances maximales ont aussi été observées par Tu ek et Pacola (1999).

A.1.6.1 Blocs sans rétention

Effet de la concentration du volume

Si tout le bloc présentait une même valeur de volume, le fait d'augmenter cette valeur de un, deux ou trois fois l'écart-type engendrait une augmentation de la distance moyenne de débardage combinée de l'ordre de 14,5% pour un écart-type, 51,3% pour deux écarts-types et 87,3% pour trois écarts-types.

Les valeurs des $\overline{D^c}$ étaient significativement différentes pour toutes les valeurs de concentration (VM+2EC et VM+3EC) du volume tant pour l'analyse cumulée ($p<0,01$) que séquentielle ($p<0,01$), sauf lorsque le volume correspondait à VM et VM+1EC. Ceci signifie que les valeurs de concentration peu élevées du volume à prélever n'affecteront pas la valeur de la distance moyenne combinée dans un bloc sans rétention.

Effet de la position du volume dans le bloc

La distance de débordage présentait les valeurs les plus élevées lorsque le volume à prélever se situait à plus de 250 m de la route. Lorsque le volume était cumulé à partir du fond du bloc jusqu'à au bord de la route, des différences significatives s'observaient entre les sections 1 par rapport aux sections 7, 8, 9 et 10*. Ceci implique qu'un volume plus concentré dans les premiers 50 m du bloc générât des distances de débordage statistiquement différentes (plus petites) comparativement à un volume supérieur concentré à plus de 300 m à partir de la route.

Lorsque le volume variait de façon séquentielle (une section à la fois), les différences significatives des $\overline{D^c}$ s'observaient entre la section 1 et 2 par rapport à la 10 et la section 1 par rapport à la 9. C'est-à-dire, la concentration du volume situé à plus de 400 m de la route par rapport à la même valeur de concentration, mais située à moins de 100 m de la route. Les deux analyses (cumulée et séquentielle) présentaient une différence hautement significative ($p<0,01$).

* Rappelons que les blocs ont été divisés dans 10 sections, dont la section 1 correspond à la section entre les 0 m et 50 m et la section 10 correspond à la section entre les 450 m et 500 m à partir de la route.

A.1.6.2 Blocs à rétention dispersée

Effet de la concentration du volume

Tant pour l'analyse cumulée comme séquentielle, les valeurs des $\overline{D^c}$ présentaient des différences statistiquement significatives ($p<0,01$). Cependant, indépendamment du pourcentage et de la position de la rétention dispersée appliquée, lorsque le volume du bloc correspondait au volume moyen, la valeur de $\overline{D^c}$ ne changeait pas. Les pixels représentant la rétention dans l'analyse combinée ont pris la valeur 1 pour maintenir les valeurs des distances, car on n'a pas considéré la possibilité de contournement des obstacles ainsi que de la forêt résiduelle, il fallait donc passer par tous les pixels dans les déplacements simulés.

Quand la valeur du volume moyen augmentait, indépendamment du pourcentage de rétention, la distance moyenne de débardage combinée augmentait, parce que les valeurs du volume des pixels aussi augmentaient, ce qui affectait le nombre de voyages nécessaires de la machine pour amener les bois coupés en bordure de route. Donc, le débardeur devait passer par le pixel au moins une fois.

Effet de la position du volume dans le bloc

Les valeurs de $\overline{D^c}$ présentaient des différences significatives ($p<0,01$) qui s'observaient lorsque la concentration du volume variait d'une position à l'autre à l'intérieur du bloc. Ces différences présentaient des réponses semblables tant pour l'analyse cumulée que séquentielle et ce, à partir de 300 m de la route.

Effet du pourcentage de rétention

Un pourcentage de rétention dispersée élevée (75%) ne faisait que diminuer la distance moyenne de débardage à parcourir. Donc, un pourcentage de rétention plus élevé générait des distances plus courtes.

Effet de l'interaction de la concentration et la position du volume dans le bloc

L'effet des deux variables ensemble montrait des différences significatives de $\overline{D^c}$ qui se produisaient lorsque le volume présentait une valeur plus élevée que la valeur du volume moyen et, principalement, à partir des valeurs considérant les positions plus éloignées des 300 m de la route par rapport aux positions les plus proches.

A.1.6.3 Blocs à rétention agglomérée

Effet de la concentration du volume

Pour l'analyse cumulée, $\overline{D^c}$ présentait des différences significatives ($p<0,01$) pour les concentrations de volume VM+1EC, VM+2EC et VM+3EC. Dans le cas de l'analyse séquentielle, $\overline{D^c}$ présentait des différences significatives ($p<0,01$) pour toutes les valeurs de volume analysé VM, VM+1EC, VM+2EC et VM+3EC.

Effet de la position dans le bloc

Pour l'analyse cumulée, $\overline{D^c}$ présentait des différences significatives ($p<0,01$) lorsque les volumes étaient cumulés jusqu'à la position 6 (250 m) à partir du fond du bloc. Dans le cas de l'analyse séquentielle, $\overline{D^c}$ ne présentait des différences significatives qu'au niveau de la position 5 (200-250 m).

Effet de la configuration de la rétention

Pour l'analyse cumulée, toutes les configurations analysées ont généré des $\overline{D^c}$ statistiquement différentes, sauf les configurations RA75A, RA60B, RA60C et RA60D. Dans le cas de l'analyse séquentielle, les $\overline{D^c}$ présentaient différences significatives pour toutes les configurations, sauf les configurations RA75A et RA60D. L'incorporation des différentes

configurations de la rétention affectait alors les valeurs des distances moyennes de débardage obtenues. Ces configurations affectaient plus la distance lorsque l'agglomération se situait plus loin de la route, parce que les distances obtenues étaient plus courtes. Dans les cas où l'agglomération se situait repartie en proportions semblables (une partie proche et une partie loin de la route), l'effet s'annulait, ce qui ne causait pas d'effet sur la distance moyenne à parcourir.

Effet de l'interaction de la concentration et la position du volume

Pour l'analyse cumulée, plus on augmentait la concentration du volume à partir du fond du bloc vers la route, plus grande était la différence des $\overline{D^c}$ entre les positions. Pour un volume VM+3EC, dans le cas de l'analyse séquentielle, l'effet combiné était significatif sur les $\overline{D^c}$ pour toutes les sections, sauf la section la plus proche à la route. Pour un volume VM+2EC, les différences significatives s'observaient aussi pour toutes les sections, mais seulement à partir de la position 4 (150 m de la route). On observait alors la même tendance décrite précédemment : plus on augmentait la concentration du volume, plus importante devenait la position à l'intérieur du bloc et l'effet sur la distance moyenne de débardage.

Effet de l'interaction de la concentration et la configuration de la rétention

Lorsque on observait l'analyse cumulée, pour un volume VM+3EC, les $\overline{D^c}$ étaient affectées par toutes les configurations, sauf la RA75A, RA60B et RA60C. Pour un volume VM+2EC, les différences des $\overline{D^c}$ étaient significatives pour toutes les configurations, sauf RA75A, RA60B, RA60C et RA60D. Pour un volume VM+1EC, les différences des $\overline{D^c}$ ne étaient significatives que pour RA75C, RA40A, RA15A, RA15B et RA15C. Dans le cas de l'analyse séquentielle, s'observaient des différences significatives dans les valeurs des $\overline{D^c}$ au niveau du volume VM+3EC et une configuration de la rétention RA15A, RA15B, RA15C, RA40A, RA40B, RA40C, RA60A et RA75C. Pour un volume VM+2EC, les $\overline{D^c}$ étaient statistiquement différentes pour la configuration RA15A, RA15B, RA15C et RA40A. La

combinaison de la concentration du volume VM+1EC et toutes les configurations n'ont pas eu d'effet sur les valeurs des $\overline{D^c}$. Alors, la concentration du volume affectait différemment la distance de débardage selon la configuration appliquée.

Effet de l'interaction de la position du volume et la configuration de la rétention

Pour l'analyse cumulée, les configurations RA15B et RA40D présentaient des valeurs de $\overline{D^c}$ statistiquement différentes à partir de la position 5 (200 m) ; RA15A, RA15C RA40B et RA40C à partir de la position 6 (250 m) ; RA40A à partir de la position 7 (300 m) ; RA75C seulement pour la position 10 (450-500 m), tandis que pour les configurations RA60 les $\overline{D^c}$ ne présentaient pas des différences entre les positions distinctes. Pour l'analyse séquentielle, $\overline{D^c}$ présentait des différences pour RA15A à la position 5 (200 m), pour RA15B à la position 5 et 10 et pour RA15C à la position 4 (150 m), 5 et 10 ; RA40A et RA40D présentaient des différences significatives pour les $\overline{D^c}$ de la position 5 (200 m) jusqu'à la position 10 ; RA60A de la position 9 à 10; RA60E de la position 7 à 10 ; RA75A à partir de la position 6 et RA75B qu'à la position 10. Les configurations RA40B, RA40C, RA60B, RA60C, RA60D et RA75C ne présentaient pas de différences de $\overline{D^c}$. De façon générale, il s'observait qu'indépendamment du type de configuration de la rétention agglomérée appliquée, les positions du volume les plus éloignées de la route affectaient davantage la valeur de $\overline{D^c}$.

A.1.6.4 Limitations de l'étude

L'étude tient compte du débardage en bordure de route et de l'utilisation des sentiers de débardage parallèles. Le mouvement supposé pour le débardeur à chaque position à l'intérieur du bloc s'inscrivait dans l'espace de 100 m² établis pour la taille des pixels utilisés (10x10 m). Le débardeur utilisé pour les analyses et sa capacité de charge a été le grappin.

A.1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, ont été analysés différents éléments pouvant affecter la distance de débardage combinée. Ces éléments ont été analysés à partir de blocs fictifs incorporant les valeurs observées dans le Réseau de coupes partielles de l’Abitibi (RCPA).

La taille du bloc n'a pas été une variable importante dans le calcul de la distance moyenne de débardage combinée. A été observé que ce qui affectait le déplacement de la machinerie n'était pas la taille du bloc, mais la profondeur du bloc. Ceci, étant donné la disposition courant des sentiers par rapport au chemin et aux blocs (parallèles entre eux et perpendiculaires au chemin).

Le pourcentage de rétention et la configuration de la rétention, ainsi que la concentration et la position du volume à récolter ont affecté la distance moyenne de débardage combinée.

Quand la rétention du volume a été agglomérée et la rétention correspondait à 75%, la position de la rétention a été plus importante que la concentration du volume à récolter. Les positions de la rétention plus éloignées du chemin ont affecté davantage la valeur de la distance de débardage et ont été considérablement différentes de la valeur de distance estimée sans considérer la rétention.

Lorsque la rétention de volume agglomérée correspondait à 60%, différentes configurations de la rétention ont été possibles. Cependant, les configurations affectant le plus la valeur de la distance moyenne de débardage ont été les plus proches ou les plus éloignées du chemin. Pour les analyses cumulée et séquentielle du volume, ces configurations n'ont pas généré de différences des valeurs des distances moyennes de débardage combinées statistiquement significatives.

La rétention agglomérée du 40% du volume a été le pourcentage de rétention affectant le plus la valeur de la distance de débardage moyenne (après la rétention de 15%). Dans ce type de rétention, tant la configuration de la rétention (position) que les concentrations des volumes à

récolter ont eu des effets significatifs sur la distance moyenne de débardage combinée.

La rétention agglomérée de 15% du volume a été affectée davantage par la concentration du volume à récolter que par la position de la rétention. Cependant, ces configurations ont affecté significativement les valeurs des distances de débardage combinée dans les analyses cumulée et séquentielle du volume.

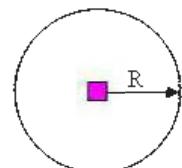
En général, les différences entre $\overline{D^c}$ ont été plus ou moins significatives dépendamment de la configuration de l'agglomération et de la position où se situait la concentration plus élevée du volume dans le bloc de récolte.

Finalement, le type de configuration de la rétention et le pourcentage de rétention à appliquer dépendront des objectifs d'aménagement recherchés. Cependant, il faut prendre en compte que les différences dans les distances de débardage moyennes à obtenir affecteront l'estimation des coûts de débardage et, par conséquent, les coûts de récolte forestière. Ainsi, par exemple, la rétention du volume dispersée donnera de distances moyennes de débardage semblables à aux distances en coupe traditionnelle (CPRS), indépendamment du pourcentage de volume retenu. La rétention agglomérée où les éléments retenus sont plus loin du chemin engendreront distances de débardage plus courtes et en conséquence coûts de débardage moins élevés. La concentration du volume affectera plus la distance de débardage combinée si les volumes plus élevés se situent plus loin de 250 m à partir du chemin.

ANNEXE II

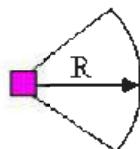
MÉTHODES DE CALCUL DE LA DISTANCE DE DÉBARDAGE

Pour formes géométriques simples et jetées dans le bloc de récolte^{} :*



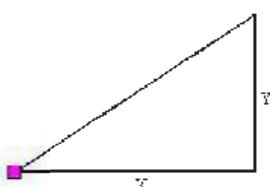
$$DD = \left(\frac{2}{3}\right) * R$$

Figure A.2.1 Illustration de la méthode et équation de calcul de la distance moyenne de débardage de Suddarth (1952) pour une bloc de récolte de forme régulière (circulaire) et débardage à jetée.



$$DD = \left(\frac{2}{3}\right) * R$$

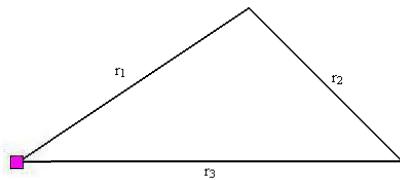
Figure A.2.2 Illustration de la méthode et équation de calcul de la distance moyenne de débardage de Suddarth (1952) pour une bloc de récolte de forme régulière (segment circulaire) et débardage à jetée.



$$DD = \sqrt{\frac{X^2 + Y^2}{3}} - \left[\frac{X^2}{3Y} \right] \ln \left[\tan \left\{ \frac{\arctan \left(\frac{X}{Y} \right)}{2} \right\} \right]$$

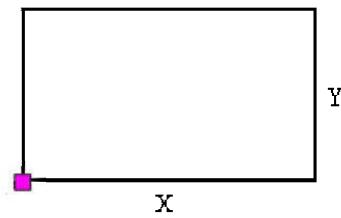
Figure A.2.3 Illustration de la méthode et équation de calcul de la distance moyenne de débardage de Suddarth (1952) pour une bloc de récolte de forme régulière (triangle rectangle) et débardage à jetée.

* Source: Koger, J. and Webster, D., 1984.



$$DD = \frac{r_1 + r_2}{6r_3^2} \left[r_3^2 + (r_1 - r_2)^2 \right] + \frac{\left[r_3^2 - (r_1 - r_2)^2 \right] \left[(r_1 + r_2)^2 - r_3^2 \right]}{12r_3^3} \ln \left[\frac{r_1 + r_2 + r_3}{r_1 + r_2 - r_3} \right]$$

Figure A.2.4 Illustration de la méthode et équation de calcul de la distance moyenne de débardage de Peters (1978) pour une bloc de récolte de forme régulière (n'importe quel triangle) et débardage à jetée.



$$DD = \sqrt{\frac{X^2 + Y^2}{3}} - \left[\left[\frac{Y^2}{6X} \right] \ln \tan \left[\frac{\arctan \left(\frac{Y}{X} \right)}{2} \right] \right] - \left[\left[\frac{X^2}{6Y} \right] \ln \tan \left[\frac{\arctan \left(\frac{X}{Y} \right)}{2} \right] \right]$$

Figure A.2.5 Illustration de la méthode et équation de calcul de la distance moyenne de débardage de Peters (1978) pour une bloc de récolte de forme régulière (rectangle) et débardage à jetée.

Pour formes géométriques irrégulières et jetées dans le bloc de récolte :

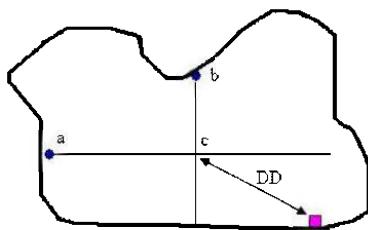


Figure A.2.6 Illustration de la méthode du centroïde de calcul de la distance moyenne de débardage (Koger et Webster, 1984) pour une bloc de récolte de forme irrégulière et débardage à jetée.

« Cette distance est obtenue en calculant le centroïde de l'aire de récolte. Se déterminent les points a et b dans la bordure du bloc de récolte, séparés de la jetée environ 1/3 d'une circonférence. L'intersection des droites qui vient de ces points crée le point c, et la distance de ce point-ci fois l'échelle de la carte en usage est l'approximation de la distance de débardage moyenne ».

ANNEXE III

INFORMATION DES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ÉTABLIS DANS LA RCPA

Dans le protocole d'établissement et d'analyse des dispositifs expérimentaux préparé par Bescond (2002), est décrite la procédure de choix d'établissement des placettes permanentes et des inventaires avant et après la coupe pour chaque type de traitement et par bloc. Les mesures pour obtenir les données qui seront utilisés dans notre étude sont :

- Dans les 17 placettes principales de 400m^2 (11,28 m de rayon), ont été mesurés et numérotés tous les arbres avec DHP supérieur à 90 mm et les gaules* ($\geq 51\text{ mm}$) qui se trouvent dans la placette, des essences commerciales ou non, vivant sur pied, vivants chablis et morts sur pied.
- Dans les 17 sous placettes de 40m^2 (3,57 m de rayon), les gaules ont été mesurées, mais seules ont été numérotées celles qui avaient un diamètre de 6 ou 8 cm. Par rapport à la hauteur des arbres, qui permet de calculer le volume, a été mesuré à cinq arbres des numérotés vivants, trois d'entre eux on été sélectionnés de façon systématique et les deux autres selon leur représentativité dans le peuplement observé.
- Dans les 68 microplacettes de 4m^2 (1,13 m de rayon), ayant 4 microplacettes par placette principale, le dénombrement a été effectué par essence sur les semis des tiges commerciales ou non, ayant un DHP inférieur à 10 cm selon trois classes de hauteur : de 0-15 cm, de 15 à 60 cm et plus de 60 cm jusqu'à un DHP de 1 cm.

* Les gaules sont les arbres vivants d'essences commerciales ou non ainsi que l'ensemble d'espèces arbustives dont le diamètre à 1,3 m du niveau le plus haut du sol est compris entre 10 et 90 mm.

ANNEXE IV

LES COUPES FORESTIÈRES

Plusieurs types de coupes forestières sont pratiqués au Québec. Elles peuvent être divisées essentiellement en deux types : les coupes totales et les coupes partielles, chacune ayant des variantes. Ces variantes incluent, par exemple, la CPRS (coupe avec protection de la régénération et des sols) parmi les coupes totales, et la CPPTM (coupes avec protection de petites tiges marchandes) ou la CPRV (coupe partielle à rétention variable) parmi les coupes partielles. Le type d'essence et l'objectif de production ou d'aménagement forestier déterminent finalement le traitement choisi.

Coupes totales

La Coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) est le type de coupe totale le plus utilisé à Québec. Il est définie comme la récolte de tous les arbres dont le diamètre d'utilisation est au moins égal à celui déterminé pour chaque essence en prenant toutes les précautions nécessaires pour ne pas endommager la régénération préétablie et en minimisant les perturbations du sol (MRN, 1998).

Cependant, les coupes totales essentiellement correspondent à quatre types de coupes, soit la Coupe totale (CT) proprement dite, la CPRS, la Coupe avec protection de la haute régénération et des sols (CPRHS) et la Coupe en Mosaïque (CMO).

Coupes partielles

La coupe partielle (CP), définie comme la coupe enlevant une partie des arbres d'un peuplement (Forêts Canada, 1992), peut prendre plusieurs formes selon l'objectif tel que CPPTM, CPRV ou l'éclaircie commerciale (EC), entre autres.

La Coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM), c'est une récolte variant entre 70 et 90 % du volume marchand et au cours de laquelle la régénération, soit les gaules des classes de DHP de 2 à 8 cm ainsi que les petites tiges marchandes de classes de DHP de 10 à 14 cm, est soigneusement protégée (MRN, 2003). Pour sa part, la Coupe partielle à rétention variable (CPRV) est un type de récolte qui maintient des éléments structuraux de l'habitat sur le parterre de coupe à long terme. Ces éléments sont représentés par de gros arbres vivants, morts ou moribonds à différents stades de décomposition, par des débris ligneux grossiers, des îlots de végétation de sous étage (buissons, herbes et mousses et sols intacts) ou toute autre structure jugée essentielle pour le bon fonctionnement de l'écosystème (Sougavinski, S. et Doyon, F., 2003).

Une description en détail de chaque type de coupe peut être révisée dans MRN (1998).

ANNEXE V

Tableau A.5.1 Liste des photos aériennes, avant et après coupe, utilisées pour les analyses des secteurs : Dufay, Fénelon, Gaudet, Maskuchi et Puiseaux, du réseau de coupes partielles de l’Abitibi-Témiscamingue (RCPA)

Secteur	Avant Coupe	Après Coupe
Dufay	Q 99 251 — 102	Q 02 563 — 35
	Q 99 251 — 103	Q 02 563 — 36
	Q 99 251 — 104	Q 02 563 — 37
		Q 02 563 — 38
Fénelon	Q 93 201 — 85	Q 04 255 — 65
	Q 93 201 — 86	Q 04 255 — 66
	Q 93 201 — 87	Q 04 255 — 67
	Q 93 201 — 88	Q 04 255 — 68
	Q 93 201 — 102	Q 04 255 — 69
	Q 93 201 — 103	
	Q 93 201 — 104	
	Q 93 201 — 105	
Collines de Gaudet	Q 92 815 — 98	Q 03 554 — 55
	Q 92 815 — 99	Q 03 554 — 56
	Q 92 815 — 100	Q 03 554 — 66
Collines de Maskuchi	Q 87 832 — 51	Q 01 266 — 139
	Q 87 832 — 52	Q 01 266 — 140
	Q 87 832 — 53	Q 01 266 — 141
	Q 87 832 — 84	Q 01 266 — 142
	Q 87 832 — 85	
	Q 87 832 — 86	
	Q 87 832 — 87	
Puiseaux	Q 92 809 — 57	Q 04 255 — 116
	Q 92 809 — 58	Q 04 255 — 117
	Q 92 809 — 124	Q 04 255 — 118
	Q 92 809 — 125	Q 04 255 — 119
	Q 92 809 — 189	Q 04 255 — 120
	Q 92 809 — 190	Q 04 255 — 121