UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CARACTÉRISATION DES OBSTACLES NUISANT AU TRAVAIL DES DÉBROUSSAILLEURS ET DE LEURS IMPACTS SUR LA PRODUCTIVITÉ PAR LA MODÉLISATION ET L'ANALYSE DU TRAVAIL COGNITIF

DENISE DUBEAU

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR

(GÉNIE INDUSTRIEL)

DÉCEMBRE 2011

© Denise Dubeau, 2011.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

CARACTÉRISATION DES OBSTACLES NUISANT AU TRAVAIL DES DÉBROUSSAILLEURS ET DE LEURS IMPACTS SUR LA PRODUCTIVITÉ PAR LA MODÉLISATION ET L'ANALYSE DU TRAVAIL COGNITIF

Présentée par : DUBEAU Denise

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. OUALI Mohamed-Salah, Ph.D., président

M. IMBEAU Daniel, Ph.D, membre et directeur de recherche

M. LEBEL Luc, Ph.D, membre et codirecteur de recherche

Mme. DE MARCELLIS-WARIN Nathalie, Ph.D, membre

M. FISET Jean-Yves, Ph.D, membre externe

DÉDICACE

À mon fils, Karl

À ma mère, Huguette

REMERCIEMENTS

À Daniel Imbeau, mon directeur de recherche, j'exprime toute ma gratitude pour la confiance et l'encouragement, pour sa disponibilité incomparable, chaque fois où j'ai eu besoin d'un petit coup de pouce ou de démêler mes idées. J'ai également apprécié l'efficience de mon co-directeur, Luc G. LeBel, qui garde toujours le focus sur le résultat à atteindre, fournit les outils et prodigue les conseils juste au bon moment (JIT). C'est un privilège de bénéficier d'un encadrement d'une telle qualité.

Parmi mes collègues, je tiens à souligner l'implication et l'efficacité de Steve Lemay, toujours intéressé et prêt à faire un petit extra pour atteindre les objectifs. Philippe-Antoine Dubé a été pour moi un précieux collaborateur au fil des ans, par son enthousiasme et sa rigueur. Isabelle Auger a généreusement accompagné mes apprentissages en statistiques et m'a aussi aidée à garder les pieds bien sur terre. Enfin, je suis très reconnaissante à Robert Bellemare pour la confiance et l'amitié qu'il m'a offertes dès le début de l'aventure, et à Jean-Pierre Saucier qui m'a épaulée dans le dernier droit.

Les premières places dans mon cœur demeurent pour mon fils, Karl, qui a vu sa mère passer d'innombrables heures à travailler, et pour Guy, mon partenaire, qui avait une confiance inébranlable en moi, qui m'a maintes fois aidée à garder le focus sur mes priorités et qui m'a protégée contre la malbouffe pendant le sprint final. À ma famille, ma mère, Huguette, mon père, Marcel, ma sœur, Luce, mes deux frères, Ghislain et Pierre, à René et à Normand, qui m'ont inspirée et encouragée, je redis merci.

Je veux aussi exprimer ma reconnaissance aux quelque 150 travailleurs qui ont participé à nos recherches. J'ai apprécié rencontrer ces travailleurs, apprendre d'eux et comprendre leur environnement.

Je remercie également les membres du jury, M. Mohamed-Salah Ouali, Mme Nathalie de Marcellis-Warin, M. Jean-Yves Fiset et M. Aboulfazl Shirazi-Adl pour avoir accepté de réviser ma thèse.

Le financement de ce projet est issu de diverses sources : le programme d'Action concertée du Fonds québécois pour la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT), la direction de la Recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNFQ), la Chaire de recherche du Canada en Ergonomie de l'École Polytechnique de Montréal, le Laboratoire d'Opérations forestières de la Faculté de Foresterie et de Géomatique à l'Université Laval. Enfin, le Comité sectoriel de main-d'œuvre en Foresterie, ainsi que les trois principales associations d'employeurs du milieu sylvicole, soit la Fédération québécoise des coopératives forestières, l'Association des entrepreneurs en travaux sylvicoles du Québec et le Réseau d'aménagement des forêts privées du Québec, ont aussi participé au financement initial du projet.

RÉSUMÉ

Les traitements sylvicoles sont généralement payés à forfait (taux unitaire en $/ha) au Québec comme ailleurs dans le monde. Un taux unitaire mal ajusté peut induire des comportements risqués pour la santé et la sécurité. Les modèles de taux actuels ne prennent pas en compte l'abondance d'obstacles présents sur le terrain (résidus ligneux, amas de résidus, souches, pierres et boulders, chicots, rugosité du terrain), alors que les débroussailleurs considèrent que ceux-ci réduisent leur productivité. Lorsque le terrain est moins encombré, les débroussailleurs tendent à augmenter la cadence afin d'atteindre l'objectif salarial hebdomadaire qu'ils se sont fixés. Ce type de comportement augmente le risque de fatigue et de blessures (Bellemare & Shearer, 2010; Bender, Green, & Heywood, 2010; Johansson, Rask, & Stenberg, 2010; Sundström-Frisk, 1984). L'objectif de cette thèse était de modéliser la relation statistique entre la productivité des débroussailleurs et les obstacles du terrain lors du dégagement de la régénération naturelle et artificielle, dans le but de permettre un meilleur ajustement des taux unitaires pour ce traitement.

Trois recherches ont été entreprises pour atteindre cet objectif. La première consistait à modéliser la productivité en fonction l'abondance de végétation compétitrice et d'obstacles à l'aide de la régression linéaire, et d'explorer les relations entre les types d'obstacles et la productivité grâce à une analyse en composantes principales. Des études du temps ont été menées dans des aires de traitement de 0,12 ha, avec la participation de 91 sujets représentant 22 entrepreneurs sylvicoles dans toutes les régions du Québec où des opérations de dégagement de la régénération avaient lieu. Le meilleur modèle de régression (R^2 = 0,61, RMSE = 4,3 heures par hectare, n = 91) prédit la consommation de temps effectif à l'aide de trois variables: 1) le pourcentage de couverture (%) du terrain par trois espèces de broussailles,

soient les framboisiers, les fougères et les épilobes à feuilles étroites; 2) la densité (nombre par hectare) des arbres et arbustes de hauteur supérieure à 1 m; et 3) la densité des obstacles qui entravent la progression des travailleurs sur le terrain (résidus ligneux laissés après la récolte, souches, boulders et rugosité du terrain). L'analyse en composantes principales (ACP) a révélé que deux composantes représentant les résidus ligneux et les souches contournées par le travailleur étaient significativement reliés au temps effectif requis pour traiter un hectare (R^2 = 0,14, RMSE = 6,4 heures par hectare, n = 91).

L'estimation de l'abondance d'obstacles entravant les déplacements du débroussailleur n'est pas facilement reproductible en conditions opérationnelles puisque deux obstacles semblables ne produisent pas le même effet sur le comportement du travailleur. Ceci suggère que d'autres processus entrent en jeu pendant le travail de débroussailleur lorsque les conditions changent. Le niveau de travail cognitif pouvait varier en fonction des obstacles sur le terrain. Afin de vérifier cette hypothèse, quarante-et-un participants ont pris part à des observations et des entrevues en 2004, 2005 et 2007. Ces participants ont été sélectionnés dans plusieurs régions du Québec où ont lieu des travaux de dégagement de la régénération. Une analyse hiérarchique des tâches (HTA) a été effectuée pour décrire le travail de dégagement de la régénération, puis complétée par une analyse suivant le formalisme des compétences-règles-connaissances (SRK). Le contenu cognitif semblait plus élevé lorsque les travailleurs étaient confrontés à des obstacles, en particulier avec les amas de résidus et les résidus seuls. Ce résultat concernant les résidus ligneux renforce celui de l'analyse en composantes principales, du moins pour la composante qui décrit les résidus ligneux (la plus significative). Une analyse préliminaire d'étude de temps sur vidéo montre que la moitié du temps observé était passé à traiter des zones sans obstacles tandis que 30% du temps était affecté à composer avec des résidus et des amas de résidus (n=19 débroussailleurs). Ces résultats pourraient contribuer à développer une méthode valable et pratique pour tenir compte des obstacles sur le terrain et contribuer à l'amélioration des programmes de formation des débroussailleurs.

La dernière partie de cette thèse visait à tester la relation entre chaque différent type d'osbtacle et la productivité des débroussailleurs dans le traitement de dégagement de régénération. Des études de temps ont été effectuées avec la participation de 19 sujets employés par 11 entrepreneurs sylvicoles différents, sur des sites répartis dans la province de Québec. Les trajectoires empruntées par les débroussailleurs ont été enregistrées pendant la période d'observation à l'aide d'un récepteur GPS Garmin 60Cx. Les heures exactes du début de chaque activité (débroussaillage, le remplissage du réservoir d'essence, limage de la lame, repos) ont été enregistrées. L'heure ainsi que la nature de chaque obstacle qui a entravé la progression du travailleur sur le terrain ont aussi été enregistrés. Une caméra légère était fixée sur le casque de sécurité du travailleur pour capter ce qui se passait dans la zone de travail de la lame de la débroussailleuse. Les séquences vidéo ainsi captées ont été utilisées pour effectuer une étude de temps en utilisant le logiciel Video Event Analysis (Chappe Software, 2007) pour mesurer l'heure précise de début et la durée du travail autour de chaque type d'obstacle ainsi que le temps en l'absence d'obstacles. Les données d'observation et celle de l'analyse de données vidéo ont été synchronisées ensemble avec les données de trajectoire GPS, en fonction l'heure exacte de chaque évènement (n = 4 sujets). Des contrastes entre les vitesses de déplacement des débroussailleurs en fonction des différents types d'obstacles ont été faits à l'aide de la procédure Mixed du progiciel SAS (SAS Institute 2004). Il a été constaté que seulement les résidus et les amas de résidus réduisaient significativement la vitesse de marche de 41 mètres / heure ($p = 0,0042$), et par conséquent diminuaient la productivité du débroussailleur. Plus de la moitié du temps de travail observé était libre d'obstacles.

Les résultats de ces trois études sont présentés et discutés, de même que leur impact à court terme sur les modèles de rémunération des débroussailleurs. Des pistes de recherche futures sont aussi proposées comme suite possible à ces travaux.

ABSTRACT

Piece-rate payment systems (unit rate in $/ha) are commonly used for silvicultural treatments in Quebec and elsewhere in the world. A piece-rate that is not properly adjusted can lead to risky behavior affecting health and safety. Current brushcutter productivity prediction models do not consider the abundance of obstacles on the ground, while the brushcutters believe they reduce their productivity and require them to increase the pace when possible, in order to achieve a desired weekly wage. This is a kind of behavior that increases the risk of fatigue and injury (Bellemare & Shearer, 2010; Bender, Green, & Heywood, 2010; Johansson, Rask, & Stenberg, 2010; Sundström-Frisk, 1984). The aim of this dissertation was to model the statistical relationship between brushcutter productivity and terrain obstacles (slash, slash piles, stumps, stones and boulders, snags, terrain roughness) in the regeneration release silvicultural treatment in order to allow better adjustment of piece-rates for this treatment.

Three steps were taken to reach that goal. The first step was to model productivity based on competing vegetation and obstacles abundance using linear regression analyses, and to explore the relationship between individual obstacle types and productivity through principal component analysis. Work studies were conducted in 0.12 ha treatment plots, with the participation of 91 subjects representing 22 silvicultural contractors. The best regression model (R^2=0.61, RMSE=4.3 hours per hectare, n=91) predicted effective time consumption (ETC) using three variables: 1) percent cover (%) of three brush species (raspberry, ferns, fireweed), 2) density of trees and shrubs higher than 1 m (number per hectare) and 3) density of obstacles hindering worker progression in the field (woody residue, stumps left after harvest, boulders and terrain roughness). Principal component analysis (PCA) was used to further revealed that two components representing woody residue and stumps bypassed by the worker were significant predictors of ETC (R^2=0.14, RMSE=6.4 hours per hectare, n=91).

Measurements of hindering obstacle abundance have not been found to be easily reproducible, suggesting that some cognitive processes may be involved in coping with changing conditions. Forty-one participants were engaged in observations and interviews. Hierarchical task analysis (HTA) was performed to describe release work, complemented by an analysis according to the Skills-Rules-Knowledge (SRK) framework. Cognitive content seemed higher when workers were faced with obstacles. Half of the observed time was spent in obstacle-free areas while 30% was spent coping with slash and slash piles. Results should help develop a valid and practical method to account for obstacles in the field and may also help improve brushcutter training programs.

The final part of this dissertation aimed at testing the relationship between individual obstacle types and brushcutter productivity in the regeneration release treatment. Work studies were performed with the participation of 19 subjects employed by 11 different silvicultural contractors on as many sites spread across the province of Québec. Brushcutter trajectories were tracked during the observation period using a Garmin GPS 60cx receiver. Exact start time of observed activities (brushcutting, filling up gas tank, filing the blade, resting) were tallied as well as obstacles that hindered brushcutter progression. A bullet camera was mounted on brushcutter safety hat to capture what was going on in front of the brushcutter. The video sequences were subjected to a time study using the Video Event Analysis software (Chappe Software) to measure the start time and duration of work around each type of obstacle as well as time in the absence of obstacle. The observation data and the video analyses data were synchronized with GPS trajectory data based on time (N=4 subjects). Calculated worker speed was contrasted between obstacle types using the SAS Mixed procedure. It was found that only slash and slash piles were significantly affecting walking speed by 41 meters/hour (p=0,0042) and thus lowered productivity. More than half of the observed work time was obstacle-free.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iii

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ vi

ABSTRACT ix

TABLE DES MATIÈRES xi

LISTE DES TABLEAUX xvi

LISTE DES FIGURES xvii

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xviii

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 L'industrie forestière 1

1.2 Cadre législatif 1

1.3 Le travail de dégagement de la régénération 3

1.4 Problématique 7

1.5 Choix des méthodes 10

1.5.1 L'étude des relations entre les facteurs de site et la productivité 10

1.5.2 L'analyse du travail cognitif 11

1.5.3 L'extraction de connaissances 13

1.6 Objectifs 20

CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE 23

2.1 Périmètre d'investigation 23

2.2 Démarche et collecte de données 24

2.3 Organisation de la thèse 32

CHAPITRE 3 ARTICLE 1 - IMPACTS OF VEGETATION ABUNDANCE AND TERRAIN OBSTACLES ON BRUSHCUTTER PERFORMANCE DURING REGENERATION RELEASE 33

3.1 Abstract 34

3.2 Introduction 35

3.3 Materials and methods 37

3.3.1 Treatment plots 37

3.3.2 Initial sampling 38

3.3.3 Subjects 38

3.3.4 Observations 39

3.3.5 Final sampling 39

3.3.6 Variables 40

3.3.7 Interviews 42

3.3.8 Statistical analyses 42

3.4 Results 45

3.4.1 Time consumption and site characteristics 45

3.4.2 Statistical versus applied models 45

3.4.3 Principal component analysis (PCA) 46

3.4.4 Predictive models using component scores 47

3.5 Discussion 47

3.6 Conclusion 49

3.7 Acknowledgements 50

3.8 References 51

CHAPITRE 4 ARTICLE 2 - A HIERARCHICAL TASK ANALYSIS TO UNCOVER COGNITIVE WORK IN FOREST REGENERATION RELEASE OPERATIONS 59

4.1 Abstract 60

4.2 Highlights 61

4.3 Introduction 62

4.3.1 Background 62

4.3.2 Methods to uncover cognitive work 64

4.4 Materials and methods 65

4.4.1 Selection of participants 65

4.4.2 Interviews 66

4.4.3 Hindering obstacles and factors 66

4.4.4 Observations 67

4.4.5 Videos and photographs 67

4.4.6 Data processing 68

4.5 Results 70

4.5.1 Hierarchical task analysis 70

4.5.2 SRK analysis 71

4.5.3 Adaptation of work patterns 72

4.5.4 Video analyses and subjective ratings 72

4.6 Discussion 73

4.7 Conclusions 76

4.8 Acknowledgements 77

4.9 References 78

CHAPITRE 5 EFFET DES OBSTACLES DE TERRAIN SUR LA VITESSE DE DÉPLACEMENT DES DÉBROUSSAILLEURS 93

5.1 Résumé 94

5.2 Introduction 95

5.3 Matériel et méthodes 97

5.3.1 Participants 97

5.3.2 Inventaire avant traitement 99

5.3.3 Observations 99

5.3.4 Point de vue du travailleur 100

5.3.5 Vue d'ensemble 103

5.3.6 Enregistrement des trajectoires des débroussailleurs 104

5.3.7 Description des variables 104

5.3.8 Appariement des données des différentes sources 105

5.3.9 Trajectoires empruntées par les débroussailleurs 107

5.3.10 Analyses statistiques 108

5.4 Résultats 108

5.4.1 Facteurs de site et productivité 108

5.4.2 Obstacles et vitesse d'avancement 110

5.5 Discussion 112

5.5.1 Vulnérabilité des systèmes d'acquisition de données 114

5.6 Conclusion 115

5.7 Remerciements 115

5.8 Références 117

CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE 119

6.1 Les résultats obtenus 119

6.2 Examen critique des méthodes employées 126

6.3 Exigences des études en milieu forestier 129

6.4 Recherches futures 130

CHAPITRE 7 CONCLUSION 133

ANNEXE 1 – DÉMARCHE D'ANALYSES STATISTIQUES ET ÉTAPES DE VALIDATION DES MODÈLES DE PRÉDICTION DE LA PRODUCTIVITÉ DES DÉBROUSSAILLEURS 134

ANNEXE 2 - TRAJECTOIRE QUASI-SYSTÉMATIQUE MALGRÉ LA PRÉSENCE D'OBSTACLES 152

RÉFÉRENCES 153

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1.Descriptive statistics for time consumption (h•ha-1) of brushcutters (n = 91). 54

Tableau 3-2. Descriptive statistics for site and stand characteristics of treatment plots (n = 91)..... 55

Tableau 3-3. Parameters of the best and the operational model for predicting effective time consumption of brushcutters (h•ha-1) (n = 91). 56

Tableau 3-4. Predictive model parameters for effective time consumption of brushcutters, using regression scores of significant components and pooling of all hindering obstacles (h•ha-1). 57

Tableau 4-1 SRK analysis of regeneration release work. S= skill-based operation, R= rule- based, K=knowledge based. 86

Tableau 4-2 Adaptation of work patterns to cope with obstacles 89

Tableau 4-3 Proportion of observation time and total duration per participant to cope with obstacles, extracted from head-mounted video analyses (n = 18 valid video sequences) 91

Tableau 4-4 Cognitive workload ratings for frequent combinations of obstacles or factors. Scale: 0= none; 1= very low; 3= low; 5= median; 7= high; 9= very high; 10= maximum possible..... 92

Tableau 5-1 Statistiques descriptives des terrains étudiés 109

Tableau 5-2 Durée d'interaction par type d'obstacles en minutes par heure (N=28 séquences vidéo de 17 participants). 110

Tableau 5-3 Moyenne des moindres carrés de la vitesse (m/heure) par type d'obstacles (N=4 participants) 110

Tableau 5-4 Comparaisons entre les classes d'obstacles et l'absence d'obstacles (N=4 participants). ... 111

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1. Schéma de la zone d'étude délimitée par l'équipe de recherche et des échantillonnages effectués avant ou après l'observation du travail des débroussailleurs. 26

Figure 3-1 Geographical distribution of sites and treatment plots in the province of Québec..... 58

Figure 4-1 Examples of obstacles types (a to n). 81

Figure 4-2 Worker in action and brushsaw movement schema 84

Figure 4-3 Hierarchical task analysis of regeneration release work. Boxes describe goals and sub-goals. Plans describe grouping and sequencing or simultaneity of goal achievement. 85

Figure 5-1 Localisation des sites d'études visités en 2005 (# 131 à 137) et en 2007 (# 138 à 149)..... 98

Figure 5-2 Débroussailleur portant les appareils de mesure (caméra fixée au casque et enregistreur, récepteur GPS)..... 101

Figure 5-3 Captures d'écran extraites de séquences vidéo de la caméra fixée au casque du débroussailleur. 103

Figure 5-4 Relations entre les sources de données et analyses effectuées..... 106

Figure 5-5. Superposition de la trajectoire empruntée par les débroussailleurs, des observations extraites de la caméra fixée au casque, et des obstacles identifiés par l'observateur pendant l'étude. 107

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AIC	Akaike information criterion
CAAF	contrat d'approvisionnement et d'aménagement forestier
CSMOAF	Comité sectoriel main-d'œuvre en aménagement forestier
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
ETC	effective time consumption
FFE	framboisiers, fougères et épilobes
FQRNT	Fonds québécois pour la recherche sur la nature et les technologies
fps	frames per second
GB	Gigabytes
GPS	Global Positioning System
h•ha	Hours per hectare
HTA	Hierarchical task analysis
LRQ	Lois revisées du Québec
MRNFQ	Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec
MSA	Kaiser's Measure of Sampling Adequacy
NSERC	Natural Science and Engineering Research Council of Canada
PCA	Principal component analysis
PIB	produit intérieur brut
PCT	precommercial thinning
PRESS	Prediction Sum of Square.
RFF	raspberry, ferns and fireweed
RMSE	Root mean square error
RMSEP	Root mean square error for prediction (= (PRESS/n)½)
SD	Standard Deviation
SGT	subgoal template
SRK	Skills-Rules-Knowledge framework

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 L'industrie forestière

Les forêts du monde couvrent 40 millions de kilomètres carrés et celles du Canada en couvrent 4 millions, soit 10% des forêts mondiales. À elles seules, les forêts du Québec s'étendent sur 0,76 millions de kilomètres carrés, soit 19% des superficies forestières canadiennes, ce qui équivaut à la moitié de la superficie forestière de l'Europe, et à 2% des superficies forestières mondiales (Gouvernement du Québec 2009). En 2004, le secteur forestier générait 4% du PIB (9 milliards de dollars) et procurait 126 127 emplois au Québec (Parent et Fortin 2007). Malgré les difficultés, le PIB du secteur forestier contribue encore pour 7,9 milliards de dollars, soit 2,7% du PIB total du Québec (Gouvernement du Québec 2009). Ce secteur d'activité économique constitue une des principales sources d'emploi pour les travailleurs de plusieurs régions du Québec. Par exemple, entre 2008 et 2010, au Saguenay-Lac-Saint-Jean, on comptait 2 200 emplois dans le secteur primaire de la foresterie et de l'exploitation forestière, soit plus de 39% des 5 600 emplois du secteur primaire de cette région (Services Canada 2011).

1.2 Cadre législatif

Au Québec, la loi sur les forêts, entrée en vigueur en 1986, a marqué le début d'une période d'intensification du développement de l'industrie sylvicole (Gouvernement du Québec 1986). À partir de ce moment, la responsabilité des travaux de remise en production des forêts publiques récoltées était confiée à l'industrie forestière en échange de réductions sur les redevances à payer pour obtenir la matière ligneuse. Présentement, la valeur de ces réductions sur les redevances (crédits sylvicoles) est établie par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF). Dès le début de l'application de la Loi sur les forêts, les compagnies forestières ont confié les travaux de remise en production et de

gestion de la végétation à des entreprises sylvicoles, des coopératives forestières et des groupements forestiers, dans un mode d'organisation du travail caractérisé par la sous-traitance.

La Loi sur les forêts encadre la gestion des forêts du domaine public (Gouvernement du Québec 1986). Les interventions en forêt comme la récolte, la remise en production, la gestion de la végétation, la construction de chemins, l'exploitation acéricole et la protection des forêts sont gérées au moyen de contrats d'approvisionnement et d'aménagement forestiers ou d'autres types d'ententes prévus dans la Loi sur les forêts.

Des règlements viennent préciser les conditions d'application de la Loi sur les forêts dans chacun de ces domaines d'activités (Gouvernement du Québec 2011). Les règles qui doivent être mises-à-jour plus souvent sont mises à jour par voie d'arrêté ministériel. C'est le cas de la valeur des traitements sylvicoles et des redevances à payer pour récolter la matière ligneuse dans les forêts publiques. Ces valeurs sont indexées à chaque année et ajustées pour les fluctuations des prix du carburant à tous les trimestres (Gouvernement du Québec 2011b).

La fixation et l'ajustement de la valeur des traitements sylvicoles se base sur des études et enquêtes confiées à des établissements universitaires, à la Direction de la recherche forestière du Québec ou à des consultants externes. Un ajustement inadéquat des taux peut avoir des conséquences importantes pour les entreprises forestières et les travailleurs sylvicoles (Coulombe et al. 2004; LeBel et Mercier 2000; Mercier 2002; Toupin 2004). Les revenus bruts des entreprises sylvicoles dépendent des taux unitaires accordés en crédits pour les traitements sylvicoles. Pour leur part, les travailleurs reçoivent environ 50% du taux unitaire pour un traitement. Si ce taux unitaire est trop bas, les travailleurs sont incités à utiliser des pratiques non sécuritaires ou à travailler à un rythme trop élevé.

Des changements importants surviendront à partir de 2013 lorsque la Loi sur l'aménagement durable des forêts entrera en vigueur (Gouvernement du Québec 2010). Cette Loi transfèrera la

supervision directe des travaux d'aménagement forestier au gouvernement qui attribuera des contrats pour la planification, pour les travaux de récolte et de transport ainsi que pour les travaux sylvicoles. L'industrie sylvicole s'y prépare depuis déjà quelques années, entre autres par la certification des pratiques qui a été mise en place par le Bureau de normalisation du Québec (BNQ) sur demande des associations d'entrepreneurs sylvicoles, de groupements forestiers et de coopératives forestières. Cette démarche de certification visait à certifier et à améliorer les pratiques de gestion en vigueur dans le milieu sylvicole (Bureau de normalisation du Québec 2011). La certification permet au Gouvernement de confier les travaux à des entreprises éthiques et engagées dans un processus d'amélioration continue. Les changements à venir sont susceptibles d'intensifier le besoin pour le gouvernement de connaître précisément les coûts des travaux afin de faire des choix sylvicoles éclairairés tout en offrant des taux forfaitaires équitables (salaires adéquats pour le travail demandé et meilleures conditions possibles parmi les paramètres qui peuvent être contrôlés en forêt).

Les recherches présentées dans cette thèse rapportent une partie des travaux visant à permettre d'améliorer l'ajustement du taux forfaitaire pour l'un de ces traitements sylvicoles : le dégagement de la régénération naturelle et artificielle dans les forêts publiques au Québec.

1.3 Le travail de dégagement de la régénération

Le Manuel de foresterie définit le débroussaillage comme l'élimination des « broussailles ou morts-bois afin de dégager » les semis d'espèces favorisées (Collectif 1996). L'objectif de cette opération est de s'assurer que l'espèce favorisée « dispose de conditions initiales de croissance satisfaisantes ». Selon ce manuel, les principaux critères définissant le besoin de débroussailler sont :

- la distance entre le semis d'espèce favorisée et la végétation compétitrice;
- la hauteur relative de la végétation compétitrice et des semis d'espèces favorisées;

- la proportion du territoire qui est recouverte par la compétition.

Le travail de débroussaillage comprend la détection et la sélection d'un semis à conserver, suivi de l'enlèvement de la végétation concurrente dans un rayon d'un mètre tout autour du semis à conserver, tout en gardant un espacement régulier entre les semis conservés. Le cadre normatif associé à ce travail est révisé et publié chaque année (Québec 2007). Malgré son apparente simplicité, ce travail implique de tenir compte de critères de qualité parfois contradictoires, d'ajuster ses stratégies en fonction de la configuration du terrain, et de maîtriser les techniques d'abattage nécessaires pour débroussailler rapidement et en sécurité.

En effet, le débroussailleur doit considérer huit critères de qualité dans son travail : 1) la qualité du semis sélectionné ; 2) l'ordre de priorité des espèces ; 3) le maintien d'une distribution adéquate des semis conservés ; 4) l'absence de végétation coupée sur les semis conservés (rabattage) ; 5) la façon de traiter des talles de semis d'espèces désirées ; 6) le traitement de la zone autour d'un arbre rémanent ; 7) les limites de tolérance acceptées ; 8) le rayon immédiat autour du semis dégagé (Québec 2007).

En premier lieu, il doit sélectionner le semis qui est de bonne qualité, c'est-à-dire exempt de blessure grave et de maladie, possédant un tronc droit et libre de défauts importants. En deuxième lieu, certaines espèces sont sélectionnées en priorité pour favoriser la biodiversité des forêts : pin blanc et thuya par exemple (Québec 2007). Troisièmement, les critères d'espacement associés au dégagement reflètent les résultats de recherche concernant la densité optimale recherchée dans le peuplement en croissance. Ainsi, dans une plantation, le travailleur doit viser un espacement moyen inférieur à 3,3 mètres entre les semis sur la rangée pour obtenir la densité minimale prescrite de 1500 semis/ha considérant que la distance entre les rangées de semis est d'environ 2 mètres. Par ailleurs, dans un peuplement qui se régénère naturellement (non reboisé), le débroussailleur doit sélectionner le semis à conserver en préservant une distribution uniforme sur le terrain pour atteindre une densité minimale de

1875 semis/ha. Dans les deux cas, le travailleur doit laisser une distance minimale d'un mètre entre les semis conservés. Il doit éviter de créer ou agrandir une trouée naturelle, soit une zone dans laquelle ne poussent aucun semis d'espèce désirée, en s'efforçant de conserver les tiges qui la bordent (Québec 2007). Il doit donc décider du meilleur choix de semis en tenant compte de la position des semis déjà dégagés aux alentours. Dans certains cas, il doit aussi tenir compte des semis à dégager qui se retrouvent dans son champ de vision pour obtenir une jeune forêt composée d'arbres les plus uniformément espacés que possible.

Quatrièmement, le débroussailleur doit s'assurer que les semis dégagés ne sont pas recouverts par la végétation qu'il vient de couper (rabattage). Il doit également s'assurer que le semis soit libre de toute compétition qui mesure plus de sa demi-hauteur dans un rayon d'un mètre autour de son tronc. Les souches des tiges coupées ne doivent pas dépasser 20 cm de hauteur. Une hauteur supérieure est acceptée s'il n'y a pas de branche vivante sous la hauteur de coupe. S'il y a des obstacles naturels, les souches peuvent être coupées plus haut afin de limiter les risques de percuter les obstacles, ce qui pourrait entraîner la coupe accidentelle d'un semis (Québec 2007).

En cinquième lieu, lorsque le travailleur rencontre un bouquet de semis d'espèces désirées qui mesurent entre 30 et 60 cm de hauteur et contenant peu de compétition feuillue, il peut le laisser intact si un traitement d'éclaircie précommerciale est prévu dans le scénario sylvicole (séquence des travaux prévue pour ce territoire) (Québec 2007). Ce critère est difficile à appliquer par le travailleur parce qu'il est rarement au courant du scénario sylvicole à venir pour les terrains qu'il traite.

Sixièmement, lorsqu'il y a présence d'un arbre rémanent, c'est-à-dire une gaule ou un arbre mature demeurant sur le site après la récolte, le débroussailleur doit choisir un semis à dégager qui se trouve à l'extérieur de la projection de la cime de cet arbre rémanent. Septièmement, les critères sont assouplis dans certains cas afin de faciliter le travail ou de protéger les semis désirés. Par exemple, afin

d'éviter que le semis soit coupé accidentellement en tentant de le dégager, il est accepté que le travailleur laisse de la végétation compétitrice dans un rayon de 5 cm autour du tronc à condition qu'elle ne le dépasse pas en hauteur. Enfin, le huitième critère concerne la présence de végétation compétitrice non coupée dans le rayon d'un mètre autour du semis. Il est accepté que 10% de cette surface soit colonisée par de la végétation compétitrice. La végétation résiduelle ne doit pas être composée de plus de la moitié d'arbres et arbustes, et ces arbres et arbustes ne doivent pas dépasser le plant en hauteur. Le rayon de 5 cm de végétation non coupée autour des semis (critère numéro 7) est inclus dans le calcul de cette couverture de 10 %.

En somme, pour faire le bon choix du semis à conserver, le débroussailleur doit traiter simultanément un nombre important d'informations visuelles et de critères parfois contradictoires qui se superposent à l'occasion. Les huit critères de qualité décrits ci-dessus représentaient la deuxième source de stress la plus souvent mentionnée par un échantillon de 54 débroussailleurs interrogés en 2001 et 2002, derrière le salaire à forfait (Langlois 2004).

En plus de ce processus continu de décision sur le choix du semis à conserver, le débroussailleur doit composer avec des obstacles présents sur le site. Il doit souvent modifier sa trajectoire ou ralentir son travail pour éviter de heurter ces obstacles. Il est possible que le fait de devoir modifier la trajectoire ajoute un élément de difficulté au travail cognitif exigé par la tâche de débroussailleur. Un exercice continuel de rafraîchissement de l'image mentale pour la localisation des semis environnants et des obstacles est susceptible de contribuer à augmenter la charge cognitive de travail du débroussailleur et à influencer sa productivité.

Cependant, il est probable que le débroussailleur expert vient à réaliser cet exercice sans trop y penser. Ce phénomène est observé dans la plupart des métiers lorsque le travailleur atteint un niveau élevé d'expertise (Farrington-Darby & Wilson, 2006; Johnson, Zualkernan, & Garber, 1987). Devant un

choix de tige ou une configuration d'obstacles complexes, les débroussailleurs débutants sont susceptibles d'expérimenter une charge cognitive signifivativement plus importante qu'un expert du domaine (O'Hare et al. 1998). Dans un échantillon de 54 débroussailleurs, une proportion de 75% des travailleurs interrogés considère que le travail de débroussaillage requiert un niveau d'attention de moyen à élevé (3 ou 4 sur une échelle de Likert à 5 niveaux) (Langlois 2004). L'étude des effets des obstacles sur la productivité des débroussailleurs devrait donc comprendre l'analyse du travail cognitif afin de discerner entre les types d'obstacles nuisibles, ceux qui ont l'impact le plus important, et de proposer des solutions pour l'avenir.

1.4 Problématique

Au moment de démarrer l'étude en 2004, deux taux de rémunération fixes étaient attribués pour le travail de dégagement, 750$/ha en zone boréale et 840$/ha en zone tempérée nordique (Parent et Fortin 2006). Cette pratique entraînait des conséquences néfastes sur le milieu sylvicole et sur la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs. L'application de taux fixes générait de faibles marges bénéficiaires pour l'industrie sylvicole, réduisant sa capacité de développement ainsi que la possibilité d'offrir des conditions attrayantes à la main-d'œuvre (LeBel et Mercier 2000; Mercier 2002).

Du côté des travailleurs, il a été démontré que la rémunération à forfait a pour effet d'augmenter le niveau de risque pour la santé et la sécurité. Les risques sont reliés à un rythme de travail élevé menant à une fatigue excessive, à une alternance travail/repos déficiente, ou à l'augmentation du nombre d'actions risquées (Bender et al. 2010; Berthelette et Abenhaim 1984; Imbeau et al. 2007; Johansson et al. 2010; Paarsch et Shearer 1997, 2009; Toupin et al. 2007).

De plus, les taux fixes utilisés à ce moment généraient des iniquités salariales dans les jeunes peuplements à dégager qui étaient envahis par de la compétition végétale dense ou qui étaient

encombrés d'obstacles puisque les débroussailleurs prennent plus de temps à y compléter le dégagement d'un hectare de terrain tout en recevant le même taux forfaitaire. Différentes stratégies étaient employées par les entreprises et les travailleurs pour pallier à ce problème. Une des stratégies utilisée par les employeurs était d'alterner entre des terrains difficiles à traiter et des terrains plus faciles à traiter, et donc plus rentables pour le travailleur et l'entreprise. Certains débroussailleurs utilisaient des moyens de pression pour tenter d'obtenir une meilleure rémunération, par exemple en changeant fréquemment d'employeur lorsque les conditions offertes ou les terrains leur semblaient meilleurs dans une autre région. Le roulement de personnel pouvait atteindre 50% dans certaines situations (Langlois 2004). Cependant, comme le taux unitaire était fixe pour toute la province, les différences entre les salaires offerts étaient faibles. Le seul moyen pour un débroussailleur d'augmenter son revenu était de traiter des terrains plus faciles.

Pour corriger ce problème, des modèles de prédiction de la productivité en fonction des facteurs de site ont été développés pour permettre l'ajustement des taux forfaitaires en se basant principalement sur la densité végétale. (Dubeau et al. 2011; LeBel et Dubeau 2007; Toupin et al. 2007). Cependant, ces modèles semblaient incomplets aux yeux des travailleurs. Une proportion de 26,6% des débroussailleurs interrogés dans une étude menée en 2000 et 2001 considérait que l'encombrement du terrain contribuait à rendre le travail difficile, alors que 7% d'entre eux jugeaient que la densité de végétation à couper augmentait la difficulté de leur travail (Langlois 2004).

Les recherches publiées sur l'opération de dégagement manuel de la régénération sont peu nombreuses puisque c'est le dégagement chimique qui est la méthode de dégagement la plus couramment employée au Canada et à travers le monde de par son efficacité supérieure (Canadian Council of Forest Ministers 2010; Dampier et al. 2006; Fortier et Messier 2006; Thiffault et Roy 2010; Bell et al. 1997; Dampier et al. 2006; De Franceschi et Bell 1990). Au Québec, le dégagement manuel est

l'unique méthode employée depuis l'interdiction en 2001 du dégagement chimique dans les forêts publiques.

Parmi dix publications concernant l'éclaircie précommerciale, un traitement similaire intervenant quelques années plus tard dans la vie d'un peuplement, aucune n'intègre l'abondance d'obstacles au sol comme modulateur de la productivité dans les terrains traités (Anonyme, 1992; Kaila, Kiljunen, Miettinen, & Valkonen, 2006; Ligné, Eliasson, & Nordfjell, 2005; Needham & Clements, 1989; Needham & Hart, 1991; O'Brien, 1994; Samset, 1986; Seymour, Ebeling, & Gadzik, 1984; Seymour & Gadzik, 1985; Svensson, 1971).

Une étude effectuée au Nouveau Brunswick dans laquelle étaient mesurées la pente du terrain, la pierrosité, et la rugosité du terrain (mesure de la micro-topographie du terrain) rapportait des relations non significatives avec la productivité. Les auteurs ne pouvaient déterminer la cause de l'absence de relations significatives, mais suggéraient qu'elles avaient pû être causées par une définition inadéquate des variables, une distribution inadéquate sur le terrain, une importance insuffisante pour provoquer un effet sur la productivité, ou que la relation n'existait simplement pas (Needham & Hart, 1991). Pour sa part, Svennson (1971) rapporte avoir mesuré la pente et la rugosité du terrain, mais les modèles proposés ne contiennent pas ces variables.

Aucun moyen n'était suggéré dans les études publiées pour tenir compte des obstacles dans l'estimation de la productivité des travailleurs. Considérant le fait que les travailleurs sont payés à forfait, un taux unitaire qui ne tient pas compte des variations dans la quantité d'obstacles était susceptible d'induire des comportements risqués, tel que décrit plus haut. Il était donc impératif de chercher des solutions pour considérer les effets obstacles sur la productivité des débroussailleurs dans l'établissement des taux.

1.5 Choix des méthodes

1.5.1 L'étude des relations entre les facteurs de site et la productivité

L'objectif général du projet était de prédire la productivité des débroussailleurs en fonction des facteurs de site (obstacles, pente du terrain) et de la densité végétale. Une étude des relations au moyen de la régression statistique est appropriée dans ce cas puisqu'elle permet la prédiction de nouveaux cas, une fois le modèle validé (Tabachnick & Fidell, 2001). C'est une technique flexible qui s'adapte à des situations complexes ou de nature opérationnelle, pour lesquelles un dispositif expérimental en laboratoire ne produit pas de résultats pertinents (Bergstrand, 1991; Tabachnick & Fidell, 2001).

Le type de données nécessaires à la régression statistique comprend à la fois des données sur la variable dépendante (variable qu'on désire prédire) et des variables indépendantes perçues comme potentiellement reliées à la variable dépendante (Bergstrand, 1991). Dans le cas du dégagement de la régénération, la variable dépendante était la productivité (temps effectif requis pour traiter un hectare de terrain). Les variables indépendantes à mesurer concernaient la végétation (densités, espèces, couverture du territoire), les facteurs de site (obstacles, pente du terrain), ainsi que l'historique des traitements (procédé de récolte, type de préparation de terrain, mode de régénération, soit plantation ou naturel) (Anonyme, 1987, 1992; Doucet, 1973; L. G. LeBel & Dubeau, 2007; Needham & Hart, 1991; Toupin et al., 2007).

Les conditions nécessaires pour obtenir des modèles prédictifs sont de couvrir l'ensemble de la variabilité associée à chaque variable et de mesurer un nombre suffisant d'observations. Il est suggéré d'obtenir au moins 50 observations et d'ajouter 10 observations supplémentaires pour chaque variable intégrée dans le modèle (Tabachnick & Fidell, 2001). Ainsi, un modèle contenant trois variables devrait

se baser sur au moins 80 observations indépendantes, c'est-à-dire 80 travailleurs sur autant de sites différents.

Le choix des sites d'étude doit permettre de capter la variabilité des principaux facteurs qui sont susceptibles d'influencer la productivité : composition floristique et densité de végétation, topographie, historique des traitements. Au Québec, la composition floristique varie entre les régions, d'est en ouest et du nord au sud. La composition floristique dépend du type de sol, de la topographie et du climat. La vitesse de croissance est plus importante au sud de la province, dans les forêts de la zone boréale mixte (sud du 45e parallèle jusqu'au lac Michigan) comparativement à la zone boréale (au nord du 45e parallèle) (Bellefleur & Parent, 2009). Le type de sol (dépôt de surface) et la topographie varient en fonction de l'altitude et de l'importance du remodelage dû à la dernière glaciation. Au Québec, on compte neuf principaux dépôts de surface (Brais et al., 2009). Tous ces facteurs se combinent pour créer une multitude de conditions de sites à l'échelle de la province et même à l'échelle locale. Pour capter cette variabilité, il faut visiter l'ensemble des régions où est effectué le traitement sous étude.

1.5.2 L'analyse du travail cognitif

En ce qui concerne l'analyse du travail cognitif, le choix des méthodes dépend d'abord de la nature du travail (Crandall, Klein, & R., 2006; Vicente, 1995). Le travail de débroussailleur est un mélange de travail physique et de travail cognitif. L'aspect physique du travail consiste à se déplacer sur le terrain en évitant les obstacles, ainsi qu'à sélectionner et dégager les semis désirés en utilisant une débroussailleuse. Les aspects cognitifs de ce travail comprennent la recherche visuelle et l'anticipation de ce qui s'en vient (objets ou semis présents dans la trajectoire du débroussailleur), le choix des trajectoires, l'orientation sur le site, le choix des stratégies, et le maniement de la débroussailleuse. Ce travail est exécuté par un débroussailleur seul et dépend peu de la communication interpersonnelle.

Le dégagement de la régénération se déroule en milieu naturel. Le travail se fait donc en conditions non contrôlées et la prise de décision doit être adaptive et dynamique. Le travail est également marqué par des contraintes de temps (décisions instantanées quant au contrôle des mouvements de la débroussailleuse, incitatifs à travailler rapidement amenés par le paiement à forfait). De plus, les critères sont parfois contradictoires (nécessité de conserver un semis de faible qualité pour régulariser l'espacement entre les semis, ce qui va à l'encontre des objectifs de qualité des peuplements à long terme).

L'étude de ce type de travail nécessite le croisement de plusieurs techniques d'analyse afin de capter les opérations physiques nécessaires pour accomplir la tâche ainsi que le travail cognitif associé aux décisions et aux opérations (Cooke, 1994; Crandall, Klein, & R., 2006). Le travail cognitif peut être déduit uniquement à partir de méthodes indirectes. Le travail cognitif du débroussailleur n'a jamais été analysé. La première étape est donc de décrire ce travail de façon détaillée, puis d'identifier les tâches qui ont un effet sur la charge cognitive (Annett & Stanton, 2000; Crandall et al., 2006; Shepherd, 2001). L'analyse hiérarchique de tâche est une méthode éprouvée pour décortiquer les tâches une à une et permettre ensuite l'analyse du travail cognitif (Annett & Stanton, 2000; Phipps, Meakin, & Beatty, 2011; Shepherd, 2001; Stanton, 2006).

Cette méthode d'analyse des tâches repose sur les objectifs propres à une tâche et sur les étapes suivies par les travailleurs expérimentés pour les atteindre (Shepherd, 2001). Ces étapes sont nommées plans et décrivent la séquence d'opérations (sous-objectifs) pour atteindre l'objectif parent. Chaque objectif peut être éclaté en sous-objectifs, qui à leur tour peuvent aussi être redécrits. À chaque niveau de redescription, l'analyste doit évaluer la nécessité de continuer à subdiviser un objectif. Pour ce faire, il utilise les critères suivants en collaboration avec son client : la probabilité d'erreur de la part de l'opérateur en combinaison avec la gravité de cette erreur (règle P x C) (Shepherd, 2001). Lorsque la gravité de l'erreur est importante, il est suggéré de redécrire en sous-objectifs même si la probabilité de

commettre cette erreur est faible. Par exemple, une erreur de lecture d'un cadran de température dans une centrale nucléaire peut avoir des conséquences graves et cette opération devrait être redécrite jusqu'à ce que toute l'information nécessaire à un opérateur soit colligée (Shepherd, 2001). Dans le cas du travail de débroussailleur, la gravité des erreurs est faible pour certaines activités telles que couper accidentellement un semis, rabattre de la végétation sur un semis, etc (voir les 8 critères de qualité ci-haut), alors qu'elle peut s'avérer dangereuse pour le travailleur si la lame percute un objet et produit un effet de rebond (risque de blessure au dos), ou si le travailleur emploie des méthodes peu sécuritaires, ce qui augmente le risque de se blesser. Cependant, aucune des erreurs d'un débroussailleur n'a de conséquences néfastes pour la société. Le niveau de gravité des erreurs serait faible pour des erreurs qui réduisent la qualité du travail et moyen pour les erreurs qui augmentent le risque de blessure pour le travailleur. En regard de ces informations, les objectifs doivent être décrits avec suffisamment de détails pour couvrir l'ensemble des situations auxquelles les débroussailleurs devront faire face (configurations d'obstacles et organisation du travail de dégagement des semis), tout en demeurant dans les limites de l'information tangible apportée par les données recueillies. Diverses techniques d'extraction des connaissances associées à l'observation sont nécessaires pour capter et comprendre les détails du travail de débroussailleur.

1.5.3 L'extraction de connaissances

L'extraction des connaissances (terme anglais « elicitation ») constitue une étape de l'acquisition de connaissances (terme anglais «knowledge acquisition») utilisée pour le développement d'un système expert ou de tout système à base de connaissances (terme anglais « knowledge-based system ») (Cooke, 1994). L'extraction de connaissances est typiquement pratiquée à partir de sources humaines, souvent des experts du domaine étudié. Selon Cooke (1994), les chercheurs s'entendent pour dire que les connaissances des experts sont complexes, que l'extraction des connaissances est un processus difficile,

et qu'il existe des incertitudes liées aux résultats de l'extraction des connaissances. Aussi, plusieurs facteurs rendent l'extraction de connaissances difficile. Premièrement, une forte composante de la connaissance experte est tacite. Soit elle est carrément inconsciente, soit non décrite par l'expert parce qu'il juge qu'elle va de soi, parce qu'elle est appliquée machinalement (Cooke, 1994; Farrington-Darby & Wilson, 2006; Ford, Petry, Adams-Webber, & Chang, 1991; Hoffman Robert R., Shadbolt Nigel R., Burton A. Mike, & Klein Gary, 1995; Hoffman, Shadbolt, Burton, & Klein, 1995; Shaw & Woodward, 1990).

Plusieurs techniques existent pour recueillir et analyser les connaissances des experts. Cooke (1994) a recensé 231 références pour décrire les techniques d'extraction des connaissances et leurs utilisations. Elle distingue trois familles de techniques d'extraction des connaissances : les observations et entrevues, les techniques d'examen des procédés et les techniques conceptuelles (Cooke, 1994; Cordingley, 1989).

Dans la première famille, les entrevues peuvent être divisées en trois catégories : dirigées, semi-dirigées ou non dirigées (Infopolis, 2007). Cooke (1994) les regroupe en deux catégories, dirigées et non dirigées, et elle inclut les entrevues semi-dirigées dans la catégorie des entrevues dirigées. L'entrevue dirigée est réalisée au moyen d'un questionnaire précis administré à tous les sujets. L'entrevue semi-dirigée comporte des questions précises, mais l'ordre peut varier en fonction du contexte. Les questions peuvent être ouvertes ou fermées. Plus les questions son fermées et plus l'entrevue est dirigée, plus les résultats sont faciles à formaliser, mais l'information recueillie peut manquer de profondeur. De plus, la confection du questionnaire doit être réalisée avec soin pour obtenir l'information recherchée, ce qui requiert une bonne connaissance du domaine. Au contraire, dans une entrevue non structurée, le sujet parle librement, l'information est riche et variée, mais devient difficile à formaliser. Aussi, avec ce type d'entrevue, il faut un plus grand nombre d'études pour recueillir toute l'information nécessaire à la confection d'un modèle complet. Toutefois, ce type d'entrevues est plus accessible pour un chercheur qui ne connaît pas le domaine étudié. Les entrevues sont particulièrement utiles afin de recueillir

l'information nécessaire pour formaliser le sujet à l'étude. Elles présentent le désavantage de ne pas être entièrement fiables parce qu'il est fréquent que les experts ne décrivent pas exactement ce qu'ils font en réalité, à cause de la portion tacite de leurs processus cognitifs.

L'observation est considérée comme un des plus puissants outils d'extraction des connaissances (Cooke, 1994). Cette méthode permet d'identifier des stratégies de résolution de problèmes qui sont souvent réalisés de façon tacite par le sujet, d'étudier des habiletés motrices et des procédures automatiques, d'identifier les tâches spécifiques à un domaine et les contraintes de ces tâches, de vérifier la description faite par l'expert en entrevue.

Cooke (1994) classe l'analyse des tâches parmi les techniques d'observations et entrevues parce qu'elles utilisent principalement les observations et entrevues pour modéliser le travail étudié. L'Analyse des tâches cognitives s'avère utile pour l'acquisition de connaissances d'experts puisqu'elle permet de formuler le problème et de comprendre les exigences cognitives d'une tâche. Par exemple, les cartes de concepts, l'analyse de graphes conceptuels et les incidents critiques, les cas difficiles et les cas contraints sont parmi les techniques les plus utilisées pour identifier et classifier les connaissances des experts, ainsi que pour faire ressortir leurs connaissances tacites (Gordon & Gill, 1997).

Les techniques de la famille des observations et entrevues sont utiles pour l'acquisition de connaissances. Il existe une multitude de variantes applicables à différents cas d'espèce. Toutefois, elles génèrent une grande quantité d'information qualitative qu'il est parfois difficile de formaliser et d'analyser (Cooke, 1994). Elles requièrent une bonne connaissance du domaine étudié de la part du chercheur et exigent de l'expert qu'il se souvienne de la séquence des décisions qu'il a prises. Malgré ces lacunes, ces techniques demeurent les plus employées.

La deuxième famille d'extraction des connaissances selon la classification de Cooke (1994) se nomme examen des procédés. Ces techniques visent à recueillir et comprendre les processus qui entrent

en jeu pendant le travail, qu'ils soient individuels ou collectifs (travail d'équipe). Cette famille comprend les rapports verbaux, les rapports non verbaux, l'analyse de protocole, et l'analyse de décision. Les rapports verbaux consistent à demander à l'expert de décrire et expliquer ce qu'il fait pendant son travail. Ils peuvent être faits pendant le travail, en rétrospective, ou sous forme de description par un expert pendant l'observation d'un autre expert. Les rapports non verbaux sont aussi réalisés à postériori et s'appliquent lorsque le travail étudié demande une grande concentration. Ces techniques génèrent une grande quantité de données, souvent de nature subjective, qui sont difficiles à formaliser.

Parmi les techniques d'examen des procédés, les techniques d'analyse de protocole cherchent à pallier aux faiblesses des rapports verbaux. Par exemple, l'analyse de contenu permet d'organiser une masse de matériel général en identifiant objectivement et systématiquement ses caractéristiques. Le choix des catégories est difficile avec cette méthode. L'analyse par théorisation ancrée est similaire à cette méthode, mais les catégories ne sont pas prédéfinies, ce qui offre une plus grande souplesse que l'analyse de contenu. L'analyse de discours/de conversation vise à identifier les catégories d'interaction (négociation, conversation, orientation, classification et possibilités). Il existe aussi des outils automatiques d'analyse de protocole : logiciels PAS-1 (Waterman & Newell, 1971), Pas-II (Sanderson, Verhage, & Fuld, 1989), Kriton (Diederich, Ruhmann, & May, 1987), Shapa (Sanderson, James, & Seidler, 1989), Cirrus (Kowalski & VanLehn, 1988), (ces auteurs sont cités dans Cooke 1994). Ces logiciels datent toutefois d'avant 1994, et sont probablement remplacés dans la pratique par d'autres qui sont plus performants.

Le dernier groupe de techniques de la famille de l'analyse des procédés est intitulé analyse des décisions (Cooke, 1994). L'analyse des décisions est un groupe de méthodes quantitatives qui utilisent les statistiques et les probabilités pour modéliser les décisions des sujets étudiés. Il est ensuite possible de comparer les jugements des experts à ces modèles pour les valider.

La troisième famille, celle des techniques conceptuelles, regroupe des méthodes utiles pour révéler les concepts, leur structure et les interrelations entre les concepts. Ce sont des méthodes indirectes qui ne se concentrent pas sur la tâche mais sur des construits déterminés par le chercheur ou par l'expert (Cooke, 1994). Plusieurs de ces techniques s'apparentent aux entrevues structurées, mais l'accent est mis sur les concepts ou construits qui conditionnent le comportement et les décisions des travailleurs. Entre autres, les grilles-répertoire, les évaluations et classification, le classement selon un gradient déterminé sont des techniques employées. Plusieurs de ces techniques peuvent ensuite faire l'objet d'analyses statistiques pour vérifier la corrélation, la probabilité d'occurrence d'un comportement ou d'une décision, la structure de décision ou les concepts sous-jacents (analyse structurelle).

Il existe une nuance importante entre la famille intitulée entrevues et observations et la famille intitulée examen des procédés. Lorsqu'on utilise les techniques d'entrevues, on pose des questions sur le travail et l'expert y répond. Les entrevues peuvent être plus ou moins structurées en fonction du type de connaissances qu'on veut extraire. Les observations sont utilisées par le chercheur pour inférer sur ce que fait l'expert.

Quant à elles, les techniques d'examen des procédés font appel directement à l'expert qui commente ou analyse son travail ou celui d'autres experts, de différentes façons. L'examen des procédés vient préciser l'analyse sur des tâches sélectionnées. C'est donc le niveau de détail qui distingue les deux familles de techniques : la première famille permet de connaître globalement la tâche tandis que la deuxième permet d'obtenir plus de détails sur des éléments particuliers du travail observé.

La troisième famille, de nature quantitative vise à identifier et classifier les concepts généraux associés aux décisions et sous-jacents au travail de l'expert. Plusieurs méthodes statistiques peuvent être employées pour grouper les concepts similaires et distinguer entre les groupes de concepts.

Toutefois, le choix des méthodes et la compétence du chercheur (ou de l'observateur) sont primordiaux dans la réussite de l'extraction des connaissances d'experts. Dans une expérience, (Batty & Kamel, 1995) comparaient la technique de la grille répertoire à une technique qu'ils ont nommé « réseau associatif ». Ils démontrent que la méthode de la grille répertoire ne saisit pas aussi bien les nuances que le réseau associatif. Or, les nuances fines dans le jugement sont une des propriétés importantes de l'expertise, en complément avec la capacité de raisonner sur des concepts généraux (Ford et al 1991, cité par Batty et Kamel 1995). Le captage de ces nuances permet d'améliorer la précision du modèle ou du logiciel expert qui en est déduit. C'est pourquoi la combinaison de deux ou plusieurs méthodes d'extraction des connaissances, sélectionnées judicieusement, est susceptible de mieux faire ressortir les nuances de jugement propres aux experts.

En somme, plusieurs auteurs s'entendent sur le constat que l'extraction des connaissances est plus complète et précise lorsque plusieurs techniques sont utilisées, puisqu'elles tendent à être complémentaires les unes des autres, et présentent des avantages et désavantages respectifs (Cooke, 1994; Klein, Calderwood, & MacGregor, 1989).

En fait, au moment de prendre une décision, les experts identifient à prime abord le problème ainsi que le meilleur scénario de solution (Doumanidis, 2004). L'auteur a testé une méthode applicable à la planification d'opérations militaires et l'a comparée à la méthode habituellement employée par les commandants dans les mêmes circonstances. L'expérience a été menée avec la participation d'une équipe ad hoc formée de commandants retraités et d'autres actifs. La méthode traditionnelle, appelée processus militaire de prise de décision (military decision making process ou MDMP), se divise en 6 étapes successives qui permettent d'évaluer plusieurs scénarios d'intervention à partir d'un énoncé de mission. Par opposition, la méthode proposée par les auteurs, nommée modèle de décision basé sur la reconnaissance (recognition-primed model RPM), se base sur l'expertise et l'expérience des commandants pour dégager à prime abord le scénario le plus efficace pour répondre aux besoins de la

mission. Cette façon de faire est plus naturelle, puisque l'expert procède intuitivement en fonction de son bagage d'expérience. De plus, un seul scénario à la fois est évalué, ce qui réduit la durée du processus d'environ 30% d'après les participants à l'étude. Cette réduction du temps total est principalement due au fait que, connaissant le scénario général à prime abord, il est possible de commencer plus tôt la planification des opérations sur le terrain.

La méthode développée par Ross et al. (2004) se base sur le concept de reconnaissance de situations d'après lequel un expert compare une situation à celles déjà vécues pour construire un schéma général de la situation et entrevoir rapidement un scénario efficace de résolution du problème. Il devient inutile d'analyser d'autres scénarios puisque l'expert propose souvent le meilleur scénario, puis s'appuie sur les compétences des collègues et les tests opérationnels pour le valider. Toutefois, cette méthode semble plus risquée lorsque le scénario est développé par des novices.

Dans la même veine, certains auteurs ont utilisé une version modifiée de la méthode de décision critique développée par Klein (O'Hare, Wiggins, Williams, & Wong, 1998). Les questions touchent l'identification des buts, l'identification des indices, la prévision de ce genre de décision, la conceptualisation, l'influence de l'incertitude, l'intégration de l'information, la conscience de la situation, l'évaluation de la situation, les options, les facteurs qui bloquent la décision ou qui sont sources de stress pour le sujet, règles de base à extraire, généralisation et analogie. Chacun de ces thèmes est investigué à l'aide de questions ouvertes. Elles visent à recueillir des informations sur ce qui distingue un expert d'un novice et à formaliser ces connaissances, souvent tacites, pour les rendre utilisables dans un cadre de formation ou pour la confection de systèmes experts.

Aussi, l'utilisation de commentaires d'experts sur des séquences vidéo sélectionnées, en utilisant une combinaison de techniques d'extraction des connaissances a donné des résultats intéressants

(Carter, Patrick, & Deane, 2001). Les auteurs proposent cette approche pour des activités observables sur vidéo.

Les méthodes suivantes pourraient être employées pour extraire les connaissances des débroussailleurs : entrevues (non structurées, semi structurées et structurées) pour la définition initiale des obstacles avec analyse et recensement des obstacles à partir d'un logiciel de codification des évènements dans une échelle temporelle, tel le logiciel « Video Event Analysis » (Chappe Software, 2007). L'analyse hiérarchique des tâches pourrait être réalisée à l'aide de séquences vidéo disponibles et des résultats des entrevues, puis vérifiée au cours de la 2e campagne de terrain.

Ensuite, des méthodes de traçage de procédés (2e famille proposée par Cooke 1994) pourraient être envisagées pour mieux connaître, comprendre et identifier les obstacles et/ou configurations d'obstacles les plus dérangeantes. Une des techniques proposées dans les Rapports verbaux hors ligne/rappel simulé pourrait être utilisée pour extraire des connaissances supplémentaires à l'aide de séquences vidéo. Aussi, l'analyse de contenu pourrait être utile pour catégoriser les réactions en relation avec les types d'obstacles.

1.6 Objectifs

L'objectif principal de cette thèse était de modéliser la relation statistique entre la productivité des débroussailleurs et les obstacles du terrain (résidus, amas de résidus, souches, pierres et boulders, chicots, rugosité du terrain) lors du dégagement de la régénération naturelle et artificielle, dans le but de permettre un meilleur ajustement des taux unitaires pour ce traitement.

L'examen des recherches publiées a permis de constater que les relations entre les obstacles et la productivité des débroussailleurs sont absentes des modèles de prédiction, alors que les travailleurs affirment que la présence d'obstacles a un effet sur leur productivité. Cette contradiction a amené à

revoir les méthodes utilisées et à poser l'hypothèse que d'autres facteurs entrent en action dans le travail de débroussailleur, comme par exemple une composante de travail cognitif que les méthodes de mesure utilisées jusqu'ici ne peuvent pas capter :

Ces constats suggèrent trois hypothèses concernant l'effet des obstacles sur la productivité des débroussailleurs :

1) L'abondance d'obstacles présents sur le terrain est significativement reliée à la productivité des débroussailleurs;
2) Le niveau de nuisance des obstacles rapporté par les débroussailleurs est associé à une composante de travail cognitif;
3) La mesure détaillée des mouvements des travailleurs permettrait de révéler les variations de productivité réelles qui sont associées à chaque type d'obstacle.

Afin de comprendre et mesurer comment les obstacles affectent la productivité du débroussailleur et de pouvoir modéliser la productivité en fonction des obstacles, les quatre objectifs suivants étaient poursuivis :

1) Vérifier s'il existe une relation significative entre la productivité des débroussailleurs et l'abondance d'obstacles présents sur le terrain;
2) Décortiquer et analyser les éléments de la tâche de dégagement de la régénération;
3) Décrire le travail cognitif associé à la tâche de dégagement de la régénération en présence d'obstacles;
4) Estimer les différences de productivité selon les types d'obstacles.

Ces quatre objectifs visaient à décrire et quantifier globalement les relations entre les obstacles, le travail cognitif et la productivité des débroussailleurs en dégagement de la régénération. Les résultats attendus étaient un modèle de prédiction de la productivité en fonction des obstacles nuisibles. Ce modèle devait être suffisamment robuste pour permettre l'application à de nouveaux cas en conditions opérationnelles en milieu forestier. Pour être considéré comme valide, le modèle devait respecter les règles de parcimonie en régression (ne pas être surspécifié), ne pas contenir de variable multicolinéaires, être capable de prédire de nouveaux cas de façon fiable. Le dernier critère est validé à l'aide de la statistique PRESS (Green, 1983) et de la validation croisée en dix groupes (Pothier & Auger, 2011; Schneider, Riopel, Pothier, & Côté, 2008).

Le chapitre suivant présente la structure générale de la thèse ainsi que les terrains et la démarche utilisée en relation avec les objectifs présentés ci-haut.

CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

2.1 Périmètre d'investigation

Cette thèse s'inscrit dans un effort concerté de la Chaire de recherche du Canada en Ergonomie de l'École Polytechnique de Montréal, du Laboratoire d'opérations forestières de l'Université Laval et de la Direction de la Recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune qui s'est établi en 2000 pour investiguer la productivité, l'efficience et l'ergonomie propre au milieu sylvicole. Les recherches effectuées en commun visent à dresser un portrait multifacettes du travail sylvicole, de façon à fournir des résultats de recherche qui permettent aux utilisateurs de prendre des décisions éclairées concernant l'effort, les conditions environnementales et le travail. Des mesures de charge de travail physique, de productivité et d'efficience ont été recueillies concernant les débroussailleurs et les reboiseurs. Les résultats de ces recherches sont utilisés par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune et touchent l'ensemble des travailleurs sylvicoles au Québec.

Le premier projet a démarré en 2000 par la mesure de la productivité, de la charge de travail physique et de certains aspects cognitifs du travail de débroussailleur en dégagement de la régénération. Ce projet a été réalisé avec la participation de 91 débroussailleurs de diverses régions du Québec. Ce projet a permis d'élaborer un modèle de prédiction de la productivité applicable en conditions opérationnelles et de constater que les débroussailleurs subissaient une charge de travail physique dépassant les seuils proposés dans la littérature (Chengalur, Rodgers, & Bernard, 2004; Chiasson, 2004; Fortin, Chiasson, & Imbeau, 2005; Imbeau, Dubeau, & Farbos, 2007; Toupin, 2004; Toupin, Lebel, Dubeau, Imbeau, & Bouthillier, 2007). Les travailleurs blâmaient entre autres les mauvaises conditions du terrain pour ce niveau d'effort important : les obstacles présents sur le terrain et la végétation dense qui dissimulait ces obstacles. Il n'était pas possible de vérifier qu'il y avait une relation significative à

partir des recherches publiées à ce moment. Également, aucune étude publiée ne portait sur le travail cognitif associé au débroussaillage.

C'est ainsi que s'est manifesté le besoin de développer une méthode applicable pour mesurer l'effet des obstacles sur la productivité des débrousssailleurs, d'où les idées de réanalyser les données, d'investiguer le travail cognitif du débroussailleur, et de tester une méthode basée sur des mesures détaillées de l'activité de travail. Cette thèse rapporte les résultats des recherches effectuées par l'auteure. Plus spécifiquement, les analyses détaillées des relations entre les obstacles et la productivité ainsi que du travail cognitif associé au dégagement et à l'abondance d'obstacles présents sur le terrain sont présentées.

2.2 Démarche et collecte de données

La méthodologie de recherche, les terrains de la recherche, les collectes de données ainsi que la codification des variables employées pour vérifier chacune des trois hypothèses formulées sont décrites à tour de rôle dans cette section.

La première hypothèse posée était que l'abondance d'obstacles présents sur le terrain était significativement reliée à la productivité des débroussailleurs. Pour vérifier cette hypothèse et produire un modèle utilisable en conditions opérationnelles, l'étude des relations par la régression apparaîssait être la méthode la plus appropriée. Tel que décrit plus haut, l'échantillonnage doit capter toute la variabilité associée à chacune des variables dépendantes et indépendantes. Pour capter cette variabilité et faire en sorte que le modèle résultant soit applicable à l'ensemble des régions forestières concernées, la stratégie adoptée a été de contacter au hasard des entreprises pendant la période d'opérations des trois étés de collecte de données pour installer le dispositif de recherche dans le territoire qui était en cours de traitement et de changer de région chaque semaine. Cette pratique permettait de réduire au minimum le temps d'interruption du travail, de ne pas biaiser le choix des sites, de capter toute

l'étendue de la variabilité possible, et de faciliter l'acceptabilité des résultats au moment de leur application. Les entreprises étaient sollicitées environ une semaine avant l'observation sur le terrain pour obtenir leur consentement et expliquer le but du projet ainsi que les critères de sélection des travailleurs (minimum 3 ans d'expérience, méthode de travail stabilisée et respect des critères de qualité du travail en vigueur). Sur une période de trois ans, 22 organisations (appelées entreprises pour simplifier la lecture) ont participé à l'étude, soit huit groupements forestiers, quatre coopératives forestières et dix entreprises sylvicoles (la localisation des sites pour cette étude est présentée à la figure 3.1).

En 2000, l'équipe de recherche, composée de quatre personnes, a observé 22 sujets différents en dix semaines de terrain. En 2001, l'équipe était composée de dix personnes qui effectuaient la collecte de données complète pour trois à six travailleurs différents par semaine pendant 13 semaines (59 observations). En 2002, l'équipe était composée de trois personnes et a observé 15 travailleurs en sept semaines. Au final, un échantillon de 96 débroussailleurs a été recueilli dans cette étude. Les lundis et vendredis étaient réservés aux déplacements entre Québec et le site, ce qui laissait trois jours d'observation. L'équipe de travail arrivait sur le terrain en même temps que le débroussailleur (vers 6 heures) et repartait lorsque la collecte de données pour la journée était terminée (vers 16 heures). Le dispositif était installé sur place, suivi de l'échantillonnage avant traitement, de l'observation et de l'administration des questionnaires, de l'inventaire après traitement, et enfin, de la vérification de la qualité du traitement. Tout le travail de collecte de données pour un travailleur était effectué le même jour que l'observation.

L'observation du travail était effectuée dans des zones délimitées sur une parcelle de terrain non traitée située à l'intérieur de l'aire de travail en cours de dégagement lors de l'arrivée de l'équipe sur le terrain. Les zones délimitées couvraient une superficie de 0,12 ha (30 x 40 m). Avant l'observation, un échantillonnage de l'abondance de végétation était effectué dans 12 placettes d'échantillonnage de 4 m^2 (rayon de 1,13 m) (Figure 2-1).

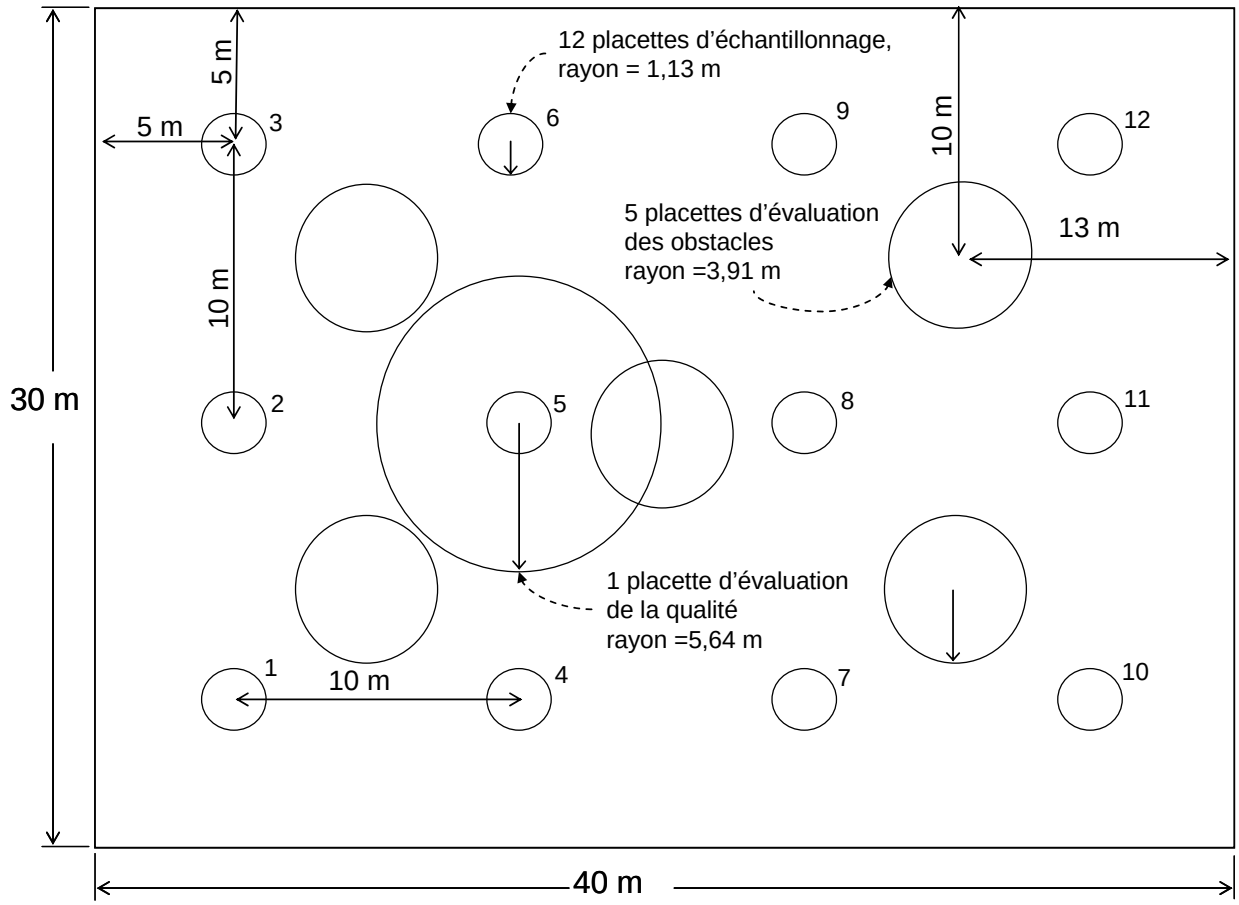


Figure 2-1. Schéma de la zone d'étude délimitée par l'équipe de recherche et des échantillonnages effectués avant ou après l'observation du travail des débroussailleurs.

Les variables concernant la végétation ont été séparées en deux catégories, les arbres et arbustes, ou la végétation compétitrice (Tableau A1.2 en annexe). Dans des études comparables effectuées sur l'éclaircie précommerciale (traitement similaire intervenant plus tard dans la vie du

peuplement forestier), la variable la plus significative était la densité d'arbres et arbustes dénombrés par espèce (nombre/ha) (Anonyme, 1987; Bell et al., 1997; De Franceschi & Bell, 1990; Kaila, Kiljunen, Miettinen, & Valkonen, 2006; LeBel & Dubeau, 2007; Needham & Clements, 1989; Needham & Hart, 1991; Seymour & Gadzik, 1985). En ce qui concerne la végétation compétitrice, certaines espèces se développent rapidement au cours des premières années suivant la récolte de la matière ligneuse (framboisiers, fougères et épilobes par exemple) pour décliner lorsque la quantité de lumière et de ressources diminuent suite à l'apparition d'autres espèces végétales et à la croissance des arbres et arbustes en place. Ces espèces sont donc caractéristiques des très jeunes peuplements forestiers à dégager et leur nuisance diminue rapidement durant les dix premières années suivant la récolte. Les méthodes de mesure les plus employées pour quantifier la végétation compétitrice sont l'évaluation de la quantité de lumière disponible pour les semis, le dénombrement tige par tige de la végétation compétitrice, et l'estimation visuelle de la couverture (Delong, 1991; Fiala, Garman, & Gray, 2006; Fortier & Messier, 2006; Ter-Mikaelian, Wagner, Bell, & Shropshire, 1999; Thompson & Pitt, 2003). Les deux premières méthodes sont généralement réservées aux études scientifiques alors que la troisième est couramment utilisée en conditions opérationnelles.

Sur la base des recherches comparables, il a été décidé de dénombrer les arbres et arbustes et d'estimer le pourcentage de couverture des autres espèces de végétation compétitrice. Ainsi, les arbres et arbustes ont été comptés dans chacune des douze placettes d'échantillonnage, et enregistrés par espèce et par classe de hauteur (0,15 à 0,99 m ; 1,0 à 1,99 m ; 2,0 à 2,99 m ; 3,0 m et plus). Ces classes de hauteur étaient basées sur les méthodes employées dans les études sur l'éclaircie précommerciale et la connaissance des caractéristiques des peuplements en régénération. À partir des nombres de tiges par espèce et par classe de hauteur, des regroupements ont été faits : les espèces résineuses, les espèces feuillues, les espèces feuillues sans les aulnes, les aulnes seuls, l'ensemble des espèces. Les classes de hauteur étaient également prises séparément ou regroupées. La valeur de chaque variable était obtenue

en faisant la moyenne des 12 placettes, puis calculée en nombre/ha en multipliant cette moyenne par 2500 (surface d'une placette = 4 m^2 ; 1 hectare = 10 000 m^2).

Quant aux autres espèces de végétation compétitrice, elles comprenaient en majorité des espèces qui repoussent chaque année (fougères, framboisiers, épilobes, graminées, asters, etc) ou des espèces ligneuses qui n'atteignent pas plus d'un mètre de hauteur totale à maturité (éricacées comme le kalmia, les bleuets et le thé du Labrador). Le dénombrement de ces espèces aurait pris beaucoup de temps, ce qui aurait réduit l'acceptabilité pour les utilisateurs d'un modèle basé sur ces variables. L'utilisation du radiomètre (mesure de la lumière incidente atteignant les plants) n'est pas pratique en conditions opérationnelles puisqu'il faut prendre les mesures dans un ciel uniforme (sans nuages ou avec une couverture nuageuse uniforme) entre 10h et 14h. Les entreprises qui réalisent les inventaires en conditions opérationnelles sont également payées à forfait. Il n'est pas envisageable de travailler seulement quatre heures par jour au lieu de huit ou neuf heures puisque les coûts de déplacements gonfleraient les coûts d'inventaire. La végétation compétitrice (autre que les arbres et arbustes) a donc fait l'objet d'une estimation de la couverture par espèce à partir d'un seul point de vue, debout à l'extérieur de la placette d'échantillonnage. Seule la couverture de l'étage supérieur était enregistrée, par espèce. La couverture d'une espèce qui était cachée par de la végétation plus haute n'était pas comptabilisée, de sorte que le pourcentage total possible pour l'ensemble des espèces de végétation compétitrice (excluant les arbres et arbustes) dans une placette d'échantillonnage était de 100%. La hauteur moyenne et maximale était également mesurée avec un ruban à mesurer gradué en cm et comptabilisée par espèce. Il était ainsi possible de regrouper les espèces par attributs semblables ou toutes ensemble.

La pente du terrain était mesurée dans chaque placette dans la direction de la virée d'inventaire à l'aide d'un clinomètre Suunto. La pente moyenne était calculée à partir des 12 placettes d'échantillonnage, tandis que la pente minimale ou la pente maximale étaient les deux extrêmes parmi les 12 placettes.

L'observation consistait à noter l'heure de début et de fin de chaque activité du débroussailleur ainsi que la nature de cette activité. Pendant le traitement de la zone d'étude, l'observateur notait l'heure à laquelle le travailleur croisait un obstacle sur son chemin et la nature de l'obstacle. Lorsque le débroussailleur se trouvait à une distance sécuritaire, l'observateur inscrivait le numéro séquenciel directement sur l'obstacle à l'aide de peinture forestière. La période d'observation commençait au début du dégagement de la zone d'étude et se terminait lorsqu'il avait terminé de dégager tous les semis contenus dans la zone d'observation. Le temps effectif, soit le temps mis à dégager des semis, était calculé en enlevant toutes les périodes pendant lesquelles le travailleur faisait autre chose. La variable dépendante de cette analyse était le temps effectif que le travailleur avait mis pour dégager un hectare, calculée comme suit : (10 000 m^2 x temps requis pour dégager l'aire d'étude en heures / 1200 m^2), où 1200 m^2 représente la superficie de l'aire d'étude.

Lorsque le travailleur avait terminé le traitement de la zone d'étude, il était invité à répondre aux questionnaires concernant son travail et à indiquer les facteurs qui nuisaient à son travail. Pendant ce temps, le reste de l'équipe vérifiait la qualité du travail au moyen d'une placette d'échantillonnage de 100 m^2, centrée sur la placette no 5 des 12 placettes mesurées avant traitement (Figure 2.1). Enfin, les obstacles ayant été numérotés étaient mesurés (longueur, largeur, hauteur moyenne au-dessus du sol). Les variables dérivées de ces mesures étaient le nombre moyen d'obstacles /ha (calculé de la même façon que le temps effectif : 10 000 m^2 x nombre d'obstacles dans l'aire d'étude / 1200 m^2), la longueur moyenne par type d'obstacle, largeur moyenne par type d'obstacle, hauteur moyenne par type d'obstacle. Les mêmes compilations étaient faites pour l'ensemble ou pour des sous-groupes d'obstacles. La somme et la moyenne des surfaces et des volumes par hectare étaient calculées par type d'obstacle et pour l'ensemble des types d'obstacles.

Toutes ces variables ont été intégrées dans l'analyse statistique. La démarche analytique est décrite à l'annexe A et la description du projet et des résultats obtenus est présentée au chapitre 3.

La deuxième hypothèse à vérifier concernait la présence d'une composante de travail cognitif pour expliquer le niveau de nuisance des obstacles perçue par les débroussailleurs. Pour vérifier cette hypothèse, de nouvelles données ont été recueillies en 2004 (22 travailleurs en 5 semaines par une équipe de quatre personnes), en 2005 (8 travailleurs en 8 semaines à raison de 3 journées d'observation consécutives par travailleur par une équipe de trois personnes) et en 2007 (11 travailleurs en 4 semaines par une équipe de quatre personnes). La procédure de sélection des entreprises et des travailleurs était la même que lors de la première étude, ainsi que les méthodes employées et les variables recueillies. Les travailleurs étaient tous expérimentés d'au moins une année complète, leur méthode était stable et ils produisaient un travail de qualité. Trois moyens étaient utilisés pour recueillir des données permettant de déduire le travail cognitif associé au dégagement de la régénération : les entrevues non structurées et semi-structurées, l'observation des activités et le captage de ce que voyait le débroussailleur devant lui pendant son travail. Pour ce faire, le débroussailleur était équipé d'une caméra légère montée sur son casque et qui enregistrait une séquence filmée de la zone immédiate devant lui pendant son travail. L'analyse hiérarchique de tâche a été effectuée à l'aide des verbatims des entrevues, rédigés dans Word (Microsoft), puis colligés dans une carte heuristique pour organiser et regrouper les thèmes abordés par les travailleurs (Shepherd, 2001). Cette méthode a permis de décortiquer le travail de débroussailleur pour en extraire les composantes cognitives. La règle d'arrêt pour cette analyse a été de considérer toutes les réponses des débroussailleurs sans extrapoler par des interprétations non appuyées par des réponses. Une analyse complémentaire à l'aide du formalisme SRK (skills-rules-knowledge) visait à dégager les tâches qui exigeaient le plus de contenu cognitif, en considérant que tous les sujets étaient suffisamment expérimentés et compétents pour être considérés comme des experts du domaine (Phipps et al., 2011; Shepherd, 2001). Au final, 17 des 19 sujets pour lesquels des séquences vidéo étaient disponibles ont été jugés assez compétents pour répondre aux besoins de l'étude (Farrington-Darby &

Wilson, 2006; Johnson, Zualkernan, & Garber, 1987). Les détails de la démarche ainsi que les résultats des analyses sont présentées au chapitre 4.

Enfin, la troisième hypothèse proposait que la mesure détaillée des comportements des travailleurs en présence ou en absence d'obstacles permettrait de mesurer les variations de productivité qui sont associées à chaque type d'obstacle. Pour vérifier cette hypothèse, trois sources de données étaient utilisées : les observations, les entrevues et le suivi des déplacements des débroussailleurs pendant leur travail (trajectoire et vitesse). Cette mesure était obtenue au moyen d'un récepteur GPS fixé sur le harnais du débroussailleur et qui enregistrait sa position géographique à intervalle fixe (15 secondes). Ces données ont été recueillies sur le même groupe de 19 travailleurs qu'au chapitre précédent et au même moment (2005 et 2007). Les méthodes de sélection des travailleurs étaient donc les mêmes pour tous les travailleurs qui ont participé aux recherches présentées dans cette thèse. Le chapitre 5 repose sur les mêmes données d'observation et d'entrevues que celles présentées au chapitre 4. Les séquences vidéo ainsi que les observations ont servi pour l'analyse des chapitres 4 et 5.

Les trajectoires ont été générées à partir des positions en utilisant le logiciel ArcMap (ESRI). L'heure exacte associée à chaque position a été utilisée pour relier les observations concernant les activités et les obstacles aux bonnes positions géographiques. Elles ont également servi à calculer la vitesse d'avancement du travailleur entre chaque paire de positions géographiques (distance parcourue en mètres / temps en heures). Ces données ont ensuite fait l'objet d'analyses de variance dans lesquelles l'effet aléatoire de la corrélation entre les multiples observations obtenues d'un même sujet est considéré (proc MIXED, SAS Institute Inc. 2004). La démarche ainsi que les résultats de ce volet de l'étude sont présentés au chapitre 5.

2.3 Organisation de la thèse

La thèse est subdivisée comme suit. Au chapitre 1, l'introduction présentait le contexte général concernant les travaux de dégagement de la régénération, la problématique identifiée, les hypothèses à vérifier ainsi que les objectifs de la thèse. Le chapitre 2 décrit le contenu de la thèse, présente les défis de modélisation, revoit la littérature ayant permis le choix des méthodes, décrit les collectes de données et les variables. Le chapitre 3 présente l'étude de la productivité en fonction de la densité de compétition végétale et des obstacles. Le chapitre 4 présente ce que nous croyons être la première description détaillée du travail cognitif relatif au travail de dégagement de la régénération. Le chapitre 5 présente une nouvelle méthode qui a été développée pour mesurer précisément la relation entre les types d'obstacles et la productivité des débroussailleurs. Le chapitre 6 aborde l'ensemble des résultats et des méthodes utilisées et suggère des avenues de recherche à poursuivre.

CHAPITRE 3 ARTICLE 1 - IMPACTS OF VEGETATION ABUNDANCE AND TERRAIN OBSTACLES ON BRUSHCUTTER PERFORMANCE DURING REGENERATION RELEASE

Denise Dubeau[1;3], Luc G. LeBel [2], Daniel Imbeau[3]

1. École Polytechnique de Montréal, Département de mathématiques et de Génie industriel, Montréal (Qc), Canada

2. Université Laval, Département des Sciences du bois et de la forêt, Québec (Qc), Canada

3. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la Recherche forestière, Québec (Qc), Canada

Article accepté pour publication dans le *Northern Journal of Applied Forestry*

Mots clé

traitements sylvicoles, facteurs de site, étude du travail, régression, taux forfaitaires

silviculture treatments, site factors, work study, regression, piece-rates

3.1 Abstract

Motor-manual brushcutting is commonly used throughout North America for regeneration release. Companies pay for this silvicultural treatment according to a piece-rate wage system which does not consider stand and site characteristics, though both have been shown to affect worker productivity. This study aimed to establish a formal regression model relating stand and site conditions to brushcutter productivity for regeneration release operations. Work studies were conducted in 0.12 ha treatment plots, with the participation of 91 subjects representing 22 silvicultural contractors. The best regression model (R^2=0.61, RMSE=4.3 hours per hectare, n=91) predicted effective time consumption (ETC) using three variables: 1) percent cover (%) of three brush species (raspberry, ferns, fireweed), 2) density of trees and shrubs higher than 1 m (number per hectare) and 3) density of obstacles hindering worker progression in the field (woody residue, stumps left after harvest, boulders and terrain roughness). Principal component analysis (PCA) was used to further explore the relationships between ETC and obstacle type. Two components representing woody residue and stumps bypassed by the worker were significant predictors of ETC (R^2=0.14, RMSE=6.4 hours per hectare, n=91).

Keywords: silviculture treatments, site factors, work study, regression, piece-rates

3.2 Introduction

In North-Eastern America, the rapid growth of competing vegetation after harvest commands early regeneration release treatment in reforested or natural softwood stands to foster optimal seedling growth (Jobidon et al. 2003; Thompson and Pitt 2003). Available treatment methods are chemical release, mechanical or motor-manual release (brushcutting). In the past twenty years, motor-manual release was used to treat an average of 57 000 hectares per year in Canada, 29 % of the total regeneration release area in the country (Canadian Council of Forest Ministers 2010). In the province of Quebec, chemical release has been banned since 2001 and brushcutting remains as the only method used (Parent and Fortin 2010).

While chemical methods cost less and reduce competition more efficiently (Hartley 2002; Thiffault and Roy 2010), motor-manual release is perceived to foster conservation of biodiversity and seems more socially acceptable than chemical release, despite higher risks for workers (Fortier and Messier 2006; Hartley 2002; Wyatt et al. 2011). Some of these risks for brushcutters are chemical vapors emanating from the motor of the brush saw and field hazards such as terrain roughness, snags and woody residue.

The wage system may also influence worker risk levels (Johansson et al. 2010; Lacey et al. 2007). In Canada, as in many countries, piece-rate wage systems are commonly used for silvicultural work. Until 2009, such a piece-rate was applied in Quebec (Canada) for regeneration release treatments. Moreover, this piece-rate was fixed, meaning that a flat rate was applied to all sites regardless of vegetation density and site variables. This may have produced adverse effects for silvicultural contractors and workers. First, the fixed piece-rate is suspected to have maintained low profits for companies, which resulted in low salaries and high workforce turnover rates (Del Degan and Dupuis 2002). Up to 50 % of workers looked elsewhere to obtain a better salary or work conditions (Langlois 2004). Consequently, some companies

were left with a less competent workforce, which has been shown to reduce overall efficiency and profitability (LeBel and Mercier 2000; Mercier 2002). Second, the fixed piece-rate pay system may have affected worker behavior, particularly by leading them to bear heavy workloads or to adopt risky behaviors (Bender et al. 2010; Johansson et al. 2010; Paarsch and Shearer 2009). Workers may skip or shorten rest pauses, work longer hours, or increase their work speed to reach their production goal (Bender et al. 2010; Toupin et al. 2007). Piece-rate wage systems have been associated with higher accident rates or increased severity of accidents (Bender et al. 2010; Johansson et al. 2010; Toupin et al. 2007).

These factors make the adjustment of piece-rates a delicate procedure. A precise knowledge of the relationships between time consumption and stand and site factors is key to implementing an adequate incentive system. Currently, no published models take both stand and site variables into account to predict worker productivity for motor-manual regeneration release treatments. Studies of worker productivity during precommercial thinning (PCT), a similar type of work, show that vegetation density is the most significant factor affecting productivity (Hoffman 1987; LeBel and Dubeau 2007; Seymour and Gadzik 1985), but none of these models include obstacles in the field (woody residue, boulders, stumps from the harvest). Despite the fact that work is similar in both treatments, vegetation density, height, stem diameter and species in regeneration release differ from PCT. The release treatment is performed in the first few years after the plantation or harvest to eliminate competing vegetation overtopping the seedlings or planted trees (Thompson and Pitt 2003). Pre-commercial thinning occurs later and involves spacing regulation and the selection of dominant trees. Therefore, models that were developed to predict worker productivity in PCT are not suitable for regeneration release operations. To fill this gap, time consumption and physical workload of brushcutters under various stand and site conditions needed to be measured.

The objective of this study was to develop a predictive model based on stand and site variables, allowing the adjustment of piece-rate wages in operational settings, while promoting safety for workers. Such a model would also provide land management agencies, landowners, silvicultural contractors with better costing information when assessing the relevance and added value of release treatments.

3.3 Materials and methods

3.3.1 Treatment plots

Field data was collected during three consecutive summers between the end of June and mid-September, when competing vegetation development was at its peak. The study sites were located in softwood plantations or natural regenerated stands in several regions of Québec being released at the time of the observations (Figure 3-1). Overall representativeness of the data was obtained by targeting contractors across the province to observe operations in progress.

The desired stand age for the study ranged from 1 to 8 years after reforestation for regeneration stands, or up to 14 years after harvest for naturally regenerated stands (Gouvernement du Québec 2000). Site history was obtained from planning documents (harvest year, site preparation method and year, reforestation year).

At each site, treatment plots were delineated within the flagged work area being treated by the participating subjects. Each flagged work area usually requires about one week to treat by a single worker. This procedure provided a representative sample of site and vegetation conditions, while preventing time loss for the subject, who did not have to move away from his work area to participate in the study. The treatment plot surface was set to 0.12 ha (30 x 40 m) to represent both homogenous conditions within each treatment plot and about 40 % of the mean daily production, a period judged

adequate to capture most rare events (for example, small repairs or visit from the foreman). Each treatment plot was sampled immediately before proceeding with work observations.

3.3.2 Initial sampling

Twelve circular sample plots were systematically placed on a 10 m x 10 m grid within each treatment plot to assess vegetation abundance: tree density by height class, and percent cover of each brush species. Each 4 m^2 plot was marked by a 15 cm high central post. Trees and shrubs were tallied by species and height class. Visibility (visible or not) of one seedling per plot was assessed at a 1-m distance, following the cruise line bearing, in order to reproduce the distance between the brush saw blade and the worker's eye. Percent cover of competing vegetation was assessed in each plot, estimated to the nearest 5 % for each species in the plot area (Ter-Mikaelian et al. 1999; Wang et al. 2000).

3.3.3 Subjects

A total of 96 brushcutters from 22 silvicultural contractors took part in the study. On average, the workers were 38.5 years old [SD = 12.4, range = 19 to 62] and had 5.5 seasons [SD = 4.1, range = 1 to 18] of experience. The minimal experience required had been set to three seasons. The study objective and methods were explained to each subject before they signed the free consent form. They received their usual piece-rate while releasing the treatment plot, with an additional monetary compensation for lost time related to their participation in the study (time allocated to questionnaires and other interruptions). The data from five brushcutters had to be rejected because of insufficient work quality (three cases), or an inadequate work technique (two cases). The final dataset consisted of 91 brushcutters observed in as many treatment plots.

3.3.4 Observations

A time study began following a brushsaw gas tank refill and ended when the treatment plot was completely covered. The observer followed the brushcutter at a safe distance and positioned himself to have a clear view of the task performed. The observer recorded the exact starting time of each new activity (hh:mm:ss). The beginning of an activity set the end of the preceding one. The recorded activities were brushcutting, refuelling, saw blade filing, minor mechanical adjustments, resting, eating, personal time, discussion with foreman or colleagues, and interruptions due to research activities.

Brushcutting was the only activity included in effective time consumption (ETC) (Bjorheden and Thompson 1995). Operational delays included the following events: discussion with foreman or colleagues, refuelling, filing the saw blade and doing minor mechanical adjustments. Personal time included resting, eating and other personal activities. Research interruptions were excluded from the analysis. During brushcutting work, the observer tallied every obstacle that modified the worker's trajectory or behavior, and marked it with paint. He also recorded the worker's reactive behavior when crossing each obstacle, namely whether he stepped over or bypasssed it, and tallied the interruptions of the brushcutter's progression to deal with an obstacle.

3.3.5 Final sampling

After the release of each treatment plot, dimensions of the marked obstacles were measured. Length and width were exact measurements of the whole obstacle. Mean height above the ground was measured for woody residue and woody residue piles, even if the obstacle was not in contact with the ground. Two to four measurements were taken to obtain mean height: the lowest and the highest points when the obstacle was straight, and two additional measurements, at the inflexion points, when the

obstacle was irregularly shaped. Maximum height was measured at the highest point for stumps, boulders and bumps. Maximum depth was tallied at the lowest point for holes.

Finally, the quality of release work was assessed using a 100 m^2 circular plot, centered on plot number 5 of the initial sampling grid, 5 m offset from the center of each treatment plot. A treatment plot was removed from the dataset if it did not meet quality requirements, namely a minimum spacing of 1.4 m, no injury to the seedling and a maximum of 5 % vegetation cover in a 1-meter radius around each seedling.

3.3.6 Variables

The dependent variable was effective time consumption (ETC), expressed in hours per hectare. Independent variables were grouped in two datasets : 1) measurements of stand and site characteristics; 2) aggregated variables composed of obstacle dimensions, obstacle type, and subject behavior in reaction to the situation (reactive behavior). The first dataset contained 110 independent measured or estimated variables, grouped as following:

A) Density of trees and shrubs (30 variables), by species and height class (number per hectare with height from 0.15 to 1 m, from 1.01 to 2 m, from 2.01 to 3 m, and higher than 3 m);

B) Percent cover of brush (20 variables), obtained by visually estimating the projection of low vegetation over the ground in each sample plot. Percent cover for the treatment plot was calculated as the arithmetical mean of the observations for the twelve sample plots. The cover estimates included brush species, but not trees and shrubs species (previous group). Nine species were found in most treatment plots : grasses (Gramineae sp.), wild red raspberry (Rubus idaeus L.), fireweed (Epilobium angustifolium L.), bracken fern (Pteridium aquilinum (L) Khun), wild sarsaparilla (Aralia nudicaulis L.), pearly everlasting (Anaphalis margaritacea (L.) Benth.), early lowbush blueberry (Vaccinium

angustifolium Aiton), sheep laurel (Kalmia angustifolia L.) and common Labrador tea (Ledum groenlandicum Oeder). A total of 43 shrubs species were found in at least one site;

C) Visibility (1 variable), precisely percent visible seedlings, expressed as the ratio of the number of sample plots containing a visible seedling to the total number of sample plots in the treatment plot;

D) Terrain slope (%) (3 variables), namely mean, minimum and maximum slope, measured with a Suunto clinometer;

E) Site preparation (1 variable), 0 = no, 1 = yes;

F) Mechanical site preparation method (1 variable): disc trenching, mounding, windrowing;

G) Hindering obstacle dimensions (40 variables), based on length, width, height, area, and volume of eight obstacle categories: woody residue, piles of woody residue, snags, stumps from the harvest, boulders and rocks, holes, bumps, and all obstacle types taken together. Hindering obstacles were defined as objects inducing a change in a brushcutter's path or pace. Obstacle area was calculated in m^2. Volume was the total space occupied by obstacles, in m3 (length x width x height), using the mean height above ground;

H) Density of hindering obstacles (14 variables), by type or grouped (number per hectare).

The second dataset contained 303 aggregated variables, representing specific cases of brushcutters' reactive behavior when facing obstacles. These were subsets of obstacle data for each dimension (density, length, width, height, area, volume), obstacle type and reactive behavior of the brushcutter (bypassing or stepping over the obstacle). Examples of these aggregated variables were the mean density of boulders bypassed by the brushcutter (number per hectare), the sum of height measurements of all slash the brushcutter stepped over (m), the mean area of bypassed slash piles (m^2) or the total volume of all stepped-over slash (m^3).

3.3.7 Interviews

Twenty-two brushcutters were interviewed in the field in a complementary survey. The interviews took place after the release of a treatment plot, to identify which obstacles or terrain configurations interfered with brushcutting work. Brushcutters were also asked to explain how these obstacles affected their work.

3.3.8 Statistical analyses

Multiple linear regression was used to model ETC required to release one hectare of regenerating stand (h•ha-1) predicted by stand and site factors. The REG procedure available in SAS/STAT was used to find the best models to predict ETC, relying on the MinR selection method to compare the different models with similar coefficients of determination (R^2) for a given number of variables, in order to choose the most useful model for application purposes (SAS Institute 2004). Similarly to the selection method based on the Akaike information criterion (AIC) (Akaike 1973), the MinR selection method allows the comparison of a wide range of models of 1 to n variables, ordering the candidate models from worst to best, based on R^2 for each number of variables. It is then possible to evaluate a subset of quasi-equivalent models for goodness of fit and usefulness in operational settings. The number of variables retained in the final model was determined with the adjusted R^2 (Draper and Smith 1981), which selected the same number of variables as with the AIC criterion, with our dataset. Possible nonlinearity in the relationship between the response variable and any predictor was accounted for by including logarithmic and square root transformations of the independent variables in the pool of predictors.

The analysis strategy to account for collinearity among the predictors was to screen variables after the first analyses. All variables were included in the initial regressions to identify the best predictors, without biasing the results by arbitrarily choosing variables. The variables that were highly correlated to the best predictors were then removed from further analyses. For example, trees taller than 1 m included trees between 1 and 2 m high, trees between 2 and 3 m high, and trees taller than 3 m. When it was found that the variable including all trees taller than 1 m was the best predictor among these four variables, we removed all predictors in regard to the three other variables from the subsequent analyses.

Every candidate model was validated using the PRESS statistic (PREdiction Sum of Squares). To assess percent overfitting, the root mean square error (RMSE) for prediction (RMSEP = (PRESS/n)½) was compared to the model RMSE. PRESS residuals were used to calculate the prediction bias (mean PRESS residuals) (Myers 1990). All models introduced in this paper were validated by testing them for linearity, normally-distributed residuals and homogenous variances, as verified by visual examination of residual plots, probability plots and boxplots.

Four distinct analyses were performed on the two datasets described earlier. First, predictive models were developed for the ETC brushcutters, using the site and stand factors measured in the 91 valid treatment plots. All the 111 variables of the first dataset and transformations of these variables were tested in multiple regression analyses. A set of equivalent models were validated, and the best one was selected based on R^2, adjusted R^2, RMSE, RMSEP and prediction bias.

Second, a model was developed for the adjustment of piece-rates, using variables that were easily measurable under operational conditions, such as those describing terrain slope, regeneration type, site preparation, visibility and vegetation abundance (vegetation percent cover, density of trees and shrubs). A total of 65 variables were tested in the regression analyses. After validating a set of

equivalent models, the best model was selected based on R^2, adjusted R^2, RMSE, RMSEP and prediction bias.

Third, exploratory principal component analyses (PCA) were performed using the second dataset of aggregated obstacle variables, to reduce the number of variables used in subsequent regressions and to test whether the grouping of some variables improved ETC predictions. After screening outliers, 303 variables were left. Since this was greater than the number of observations (i.e. 91 treatment plots), a subset of these variables was selected, based on their statistical correlation with ETC. The final dataset used for PCA contained the 47 variables that were significantly correlated with ETC ($p < 0.05$). PCA was then performed using the FACTOR procedure (method = prin), with orthogonal rotation of components to enhance trends (rotation = varimax) (SAS Institute 2004). The number of components to keep was determined based on the following general selection rules: cumulative explained variation between 70 and 90 % ; eigenvalue > 1; scree plot slope examination, and significance of the component. The validity of the components was then assessed using Kaiser's Measure of Sampling Adequacy (MSA > 0.6), as well as squared multiple correlations of the variables with the components (Jolliffe 2002; Tabachnick and Fidell 2001).

In the last set of analyses, the selected components were tested as independent variables in a multiple regression model to predict ETC. The resulting model was then compared to a simple regression model based on the density of hindering obstacles (number per hectare). Finally, a multiple regression analysis was performed, using the best vegetation variables (see Table 3-3) and the valid components of PCA, to verify which components would still be significant predictors of ETC when used in combination with the most significant predictors ($\alpha = 0.05$).

3.4 Results

3.4.1 Time consumption and site characteristics

The ETC of brushcutters ranged between 3.3 and 35.0 h·ha-1, which represented a mean proportion of 87 % of total workplace time spent doing effective work (Table 3-1). The sequence of brushcutting, refuelling, filing the blade and taking a short break occurred in 45-to-75-minute cycles, repeated up to 9 times a day. A cycle usually ended when the brush saw ran out of fuel.

Site and stand characteristics for treatment plots are presented in Table 3-2. Before the release operation took place, an average of 63 % of selected seedlings in the treatment plots were visible to the observer from a 1-m distance, though they were less than 1 m high. Similarly, a mean proportion of about 66 % of all trees and shrubs were less than 1 m high, and 90 % were less than 2 m high. Together, three species (RFF: raspberry, ferns and fireweed) accounted for 15.6 % of total cover of all species of competing vegetation. A total of 72 % of all treatment plots had undergone site preparation, either disc trenching or windrowing (data not presented). Mean age of stands was 6.2 years (SD = 3.2).

3.4.2 Statistical versus applied models

The best predictive model for brushcutter ETC contained three independent variables: RFF percent cover, density of all species taller than 1 m and mean density of hindering obstacles. Parameter estimates and statistics for the model are presented in Table 3-3. Partial R^2 of RFF percent cover encompassed two-thirds of the total ETC variance explained by the model. Prediction bias was negligible (mean PRESS residuals = 0.00068). RMSEP was 3.5 % higher than RMSE (4.45, compared to 4.30), which was judged acceptable for that dataset (there is no precise criteria). There was no collinearity between the independent variables composing the model. Thus, the model was suitable for the ranges of RFF cover, tree and shrub density, and obstacle density observed in this study (Tables 3-1 and 3-2).

The MinR method allowed the choice of a model that can be used in operational settings while being almost equivalent to the best model in terms of coefficient of determination and standard error of prediction (R^2 and RMSEP). The operational model developed for piece-rate adjustments is presented in the lower part of 3-3. This model was very similar to the best statistical model (RMSE = 4.30 and R^2 = 0.614, compared to RMSE = 4.48 and R^2 = 0.582). The first variable was the same in both models. The second was the density of all woody and shrub species, instead of trees and shrubs higher than 1 m. The third variable was a binary variable expressing the regeneration method (plantation = 0 and natural regeneration = 1), in replacement of the density of hindering obstacles (Dubeau et al. 2009).

3.4.3 Principal component analysis (PCA)

The first four components extracted from PCA accounted for 75 % of total variance. Eigenvalues of the first eight components were greater than 1 (respectively 10.51, 9.00, 8.26, 4.91, 2.67, 1.96, 1.55, 1.02). The variance explained by each factor was greater than 1 for the first five components (9.20, 8.49, 8.12, 5.96, 3.58), meaning that each component explained more variance than its composing variables taken alone. Global Measured Sampling Adequacy was acceptable (MSA = 0.63). MSA for individual variables ranged between 0.53 and 0.93, which was judged acceptable even if it was slightly outside of suggested boundaries (MSA > 0.6). Squared multiple correlations between the variables and each component were 1.0 for all five components, indicating very good internal consistency.

The first component was interpreted as boulders bypassed by the brushcutter. The second component accounted for woody residues that were bypassed by the brushcutter. The third component was interpreted as stepped over harvest stumps, and the fourth referred to harvest stumps that were bypassed by the brushcutter. The fifth component had no interpretable meaning. Thus, the first four components were used in subsequent analyses.

3.4.4 Predictive models using component scores

Two of the first four components were significantly related to brushcutters' ETC (Table 3-4). However, R^2 of the model with these two components was lower than a simple regression model based on all hindering obstacles (Table 3-4). This indicates that the statistical relationship was weaker between ETC and only these two components, compared to all hindering obstacles.

When the two best predictors of ETC (see Table 3-3) were added to the first four PCA components in a multiple regression analysis, only the component expressing bypassed slash was significant (t = 3.47, pvalue = 0.0008, partial R^2 = 0.053) (model not presented). This model presented a R^2 of 0.598 and a RMSE of 4.39, which was almost equivalent to the one presented in Table 3-3. These results suggest that the most influential type of hindering obstacle may be woody residues large enough to compel the worker to bypass them.

3.5 Discussion

Brushcutter ETC is mostly influenced by the density of competing vegetation. Indeed, the first two variables in both statistical and operational models relate to vegetation abundance in the field. Together, those variables explain 54 % of ETC variability in both models (sum of partial R^2s). This agrees with research on precommercial thinning, a similar type of work, which identifies density of trees to cut as the most significant predictor of ETC (or productivity) (Hoffman 1987; LeBel and Dubeau 2007; Needham and Hart 1991; Seymour and Gadzik 1985).

The operational model based on vegetation abundance and regeneration method was implemented in 2009 to adjust piece-rates (Table 3-3). The mean cost to treat one hectare jumped from 877 to 1157 $CAD/ha [n = 91 sites, SD = 323 $CAD], a mean increase of 280 $CAD/ha compared to the

previous year. No data is yet available about the effects of applying this operational model on brushcutters' physical workload and behavior (work speed, break taking pattern).

This study also shows that obstacles have a significant impact on brushcutters' ETC. However, a variable designating hindering obstacles is not practical for predicting ETC under operational conditions, despite its statistical significance in the best regression model (Table 3-3). This is because it requires the direct observation of the worker's behavior while he negotiates an obstacle, before determining whether or not it has an impact. Total count of obstacles present in the field did not prove to be a good predictor of ETC either. Likewise, previous research studying precommercial thinning did not find statistically significant relationships between obstacle density and ETC (or productivity), when all obstacles were included in the analyses (Hoffman 1987; LeBel and Dubeau 2007; Seymour and Gadzik 1985). Thus, more research is still needed to develop an obstacle measurement method that better correlates with ETC while being practical.

Exploratory PCA on obstacle types and reactive behavior was compared to the results of the interviews conducted with 22 brushcutters. Interestingly, the first two extracted components were among those most frequently reported by the brushcutters as affecting their work: slash and woody residues (86 % and 68 % of respondents, respectively). Conversely, for boulders, regression results differ from workers perceptions. Boulders bypassed by the brushcutter were not statistically significant in regression models based on the PCA component scores. Also, lack of visibility of seedlings and ground, which was reported as affecting the work of all the interviewed brushcutters, did not explain much of ETC (R^2 = 16.6 %, RMSE = 6.31 h/ha) (model not presented). This weak relationship could be explained either by an inadequate measurement method to assess visibility, or by cognitive adaptations to poor visibility. For example, the brushcutter may anticipate the position of the next seedling based on the location of the last one in the row, which refers to the situation awareness concept (O'Brien and O'Hare 2007). Also, they may unconsciously recognize colors and textures (Chabris and Simons 2010). These

cognitive adaptations should be investigated in future research to better understand the impacts of obstacles on brushcutter behavior.

As for the measurement methods used in the study, dimensions of the entire obstacle were used in the analyses, even though only part of it affected the brushcutter. This may have added noise to the data. To be able to identify obstacle dimensions or configurations that better correlate with the ETC, characteristics of these obstacles need to be further explored in relation to the behavior of the approaching brushcutter. Cognitive work analysis of regeneration release work may be useful to better understand major determinants of the brushcutting activity and to model brushcutter behavior when faced with obstacles (deVries and Gordon 1994; Gordon 1995; McIlroy and Stanton 2011).

3.6 Conclusion

This research shows that the best model to predict brushcutter ETC includes the abundance of hindering obstacles. The model indicates that: 1) every 10 % increase of RFF translates into a 2.6-h increase in time consumption to release one hectare, 2) an increase of 10 000 stems per hectare which are higher than 1 m predicts an additional 1.2 h·ha-1 treated, and 3) each increment of 50 hindering obstacles per hectare increases time consumption by 1.1 h·ha-1. The models presented in this paper can be used in North-America in the range of conditions observed in the study (Table 3-2). Principal component analyses provided new insights on the effects of obstacles on brushcutter behavior in the field. However, models including the effects of obstacles on ETC remain difficult to implement, because there is no clear definition of obstacle characteristics relative to worker behavior. Nevertheless, statistical analyses suggest that boulders and woody residues bypassed by the brushcutters should be further examined using other methods. The use of cognitive research methods, associated with a more precise micro-level linkage between individual obstacles and ETC, may help integrate obstacles in predictive models.

3.7 Acknowledgements

The authors wish to thank Steve Lemay, Philippe Villemaire and Stéphane Lavallée for the field work and data preparation, as well as Denise Tousignant for the revision of the manuscript (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune of Québec, Canada). We also thank Dominic Toupin (Groupe Optivert) for the interviews with brushcutters.

This project received joint funding from the Ministère des Ressources naturelles et de la Faune of Québec, the Fonds Québécois pour la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT), the Comité sectoriel main-d'œuvre en aménagement forestier (CSMOAF), the Laboratoire d'opérations forestières of Université Laval, and the Natural Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC), through the Chaire de recherche du Canada en ergonomie of the École Polytechnique de Montréal.

3.8 References

Akaike, H. 1973. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. P. 267-281 in Proceedings of the 2nd International Symposium of Information Theory, B.N.P.a.F. Csaki (ed.). Akademiai Kiado.

Bender, K.A., C. Green, and J.S. Heywood. 2010. Piece Rates and Workplace Injury: Does Survey Evidence Support Adam Smith? Available online at http://ssrn.com/paper=1632260 last accessed march, 25, 2010.

Bjorheden, R., and M.A. Thompson. 1995. An international nomenclature for forest work study. P. 190-215 in IUFRO 1995, 20th world congress; S3:04 subject area, D.B. Field (ed.). University of Maine, Orono Me.

Canadian Council of Forest Ministers. 2010. Base de données nationale sur les forêts - National forestry database. Gouvernement du Canada,.

Chabris, C., and D. Simons. 2010. The invisible gorilla - And other ways our intuitions deceive us. Crown publishers, New York, USA. 306 p.

Del Degan, B., and P. Dupuis. 2002. Enquête sur les coûts de la sylviculture en forêt publique 2000-2001 (Survey on silviculture costs on public land 2000-2001). Del Degan, Massé & Associés inc. Number of 58 p. + annexes p.

deVries, M.J., and S.E. Gordon. 1994. Estimating cognitive complexity and the need for cognitive task analysis. P. 1023-1027 in Proceedings of the 38th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society Part 2 (of 2), Oct 24-28 1994. Human Factors and Ergonomics Society, Inc., Santa Monica, CA, USA.

Draper, N., and H. Smith. 1981. Applied Regression Analysis. John Wiley & Sons, New York.

Dubeau, D., L.G. LeBel, and D. Imbeau. 2009. Guide - Estimation de la productivité des débroussailleurs - Dégagement de la régénération -2e édition (Guide - Estimation of brushcutters productivity - Regeneration release - 2nd edition). Available online at http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Dubeau-Denise/Guide-terrain2eEdition.pdf.

Fortier, J., and C. Messier. 2006. Are chemical or mechanical treatments more sustainable for forest vegetation management in the context of the TRIAD. The Forestry Chronicle 82(6):806-818.

Gordon, S.E. 1995. Cognitive task analysis using complementary elicitation methods. P. 525-529 in Proceedings of the 39th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society Part 1 (of 2), Oct 9-13 1995. Human Factors and Ergonomics Society, Inc., Santa Monica, CA, USA.

Gouvernement du Québec. 2000. Instructions relatives à l'application du règlement sur la valeur des traitements sylvicoles admissibles en paiement des droits : exercice 2000-2001 (Instructions for application of the rule and regulation establishing silvicultural treatments value : year of 2000-

2001). P. 67 p. Ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de l'assistance technique, Division des traitements sylvicoles, Québec, QC.

Hartley, M.J. 2002. Rationale and methods for conserving biodiversity in plantation forests. Forest Ecology and Management 155:81-95.

Hoffman, B.F., Jr. 1987. Precommercial thinning. Journal of Forestry(Mars 1987):16-18.

Jobidon, R., V. Roy, and G. Cyr. 2003. Net effect of competing vegetation on selected environmental conditions and performance of four spruce seedling stock sizes after eight years in Québec (Canada). Ann For Sci 60:691-699.

Johansson, B., K. Rask, and M. Stenberg. 2010. Piece rates and their effects on health and safety - A litterature review. Applied Ergonomics 41:607-614.

Jolliffe, I.T. 2002. Principal Component Analysis, Second Edition. Springer-Verlag New York, New York. 487 p.

Lacey, R.J., M. Lewis, and J. Sim. 2007. Piecework, musculoskeletal pain and the impace of workplace psychososial factors. Occupational medicine 57:430-437.

Langlois, J. 2004. Intégration des facteurs humains dans l'étude du travail de débroussailleur: dégagement de la régénération naturelle et artificielle (Integration of human factors in brushcutters' work study: natural and artificial regeneration release)Mémoire de maîtrise, Université Laval, Sainte-Foy, QC. 142 p. p.

LeBel, L., and Y. Mercier. 2000. Silvicultural contracting : a performance evaluation analysis of planting and spacing operations in Quebec. P. 4 in Technologies for the New Millenium Forestry.

LeBel, L.G., and D. Dubeau. 2007. Predicting the productivity of motor-manual workers in precommercial thinning operations. The Forestry Chronicle 83(2):215-220.

McIlroy, R.C., and N.A. Stanton. 2011. Getting past first base: Going all the way with cognitive work analysis. Applied Ergonomics 42:358-370.

Mercier, Y. 2002. Étude des facteurs qui influencent la performance des entreprises sylvicoles par une approche de "benchmarking" (Study of factors influencing silvicultural contractor performance using benchmarking). Maîtrise, Université Laval, Québec. 98 p.

Myers, R.H. 1990. Classical and modern regression with applications, Duxbury, California. 488 p.

Needham, T., and D. Hart. 1991. Forest stand factors affecting precommercial thinning productivity. University of New Brunswick, Department of Forest Engineering. Number of 22 p. p.

O'Brien, K.S., and D. O'Hare. 2007. Situational awareness ability and cognitive skills training in a complex real-world task Ergonomics 50(7):1064-1091.

Paarsch, H.J., and B.S. Shearer. 2009. The response to incentives and contractual efficiency: Evidence from a field experiment. European Economic Review 53(5):481-494.

Parent, B., and C. Fortin. 2010. Ressource et industrie forestières - Portrait statistique - Édition 2010 (Ressource and forest industries - Statistical profile - 2010 Edition). Available online at http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-statistiques-complete.jsp; last accessed 2008-10-06.

SAS Institute, I. 2004. SAS/STAT User's Guide Release 9.1.3. NC : SAS Institute Inc. 1028 p. p.

Seymour, R.S., and C.J. Gadzik. 1985. A Nomogram for predicting precommercial thinning costs in overstocked spruce-fir stands. Northern journal of applied forestry 2(Juin 1985):37-40.

Tabachnick, B.G., and L.S. Fidell. 2001. Using multivariate statistics. Allyn and Bacon, Needham Heights, MA. 966 p.

Ter-Mikaelian, M.T., R.G. Wagner, F.W. Bell, and C. Shropshire. 1999. Comparison of photosynthetically active radiation and cover estimation for measuring the effects of interspecific competition on jack pine seedlings. Can J For Res 29:883-889.

Thiffault, N., and V. Roy. 2010. Living without herbicides in Québec (Canada): historical context, current strategy, research and challenges in forest vegetation management. European Journal of Forest research 130(1):117-133.

Thompson, D.G., and D.G. Pitt. 2003. A review of Canadian forest vegetation management research and practice. Annals of Forest science 60:559-572.

Toupin, D., L. LeBel, D. Dubeau, D. Imbeau, and L. Bouthillier. 2007. Measuring the productivity and physical workload of brushcutters within the context of a production-based pay system. Forest Policy and Economics 9(8):1046-1055.

Wang, G.G., J. Su, and J.R. Wang. 2000. Height growth of planted black spruce seedlings in response to interspecific vegetation competition: a comparison of four competition measures at two measuring positions Can J For Res 30:573-579.

Wyatt, S., M.-H. Rousseau, S. Nadeau, N. Thiffault, and L. Guay. 2011. Social concerns, risk and the acceptability of forest vegetation management alternatives: Insights for managers. The Forestry Chronicle 87(2):274-289.

Tableau 3-1.Descriptive statistics for time consumption (h•ha-1) of brushcutters (n = 91).

Time consumption variable	Mean	Standard deviation	Minimum	Maximum
Total workplace time	17.6	8.9	3.3	57.0
Effective time	14.8	6.8	3.3	35.0
Total delay time	2.7	3.2	0	22.0
Operational delay time	2.4	2.6	0	18.1
Mechanical delay time	0.2	1.6	0	14.8
Personal time	0.1	0.5	0	2.9

Tableau 3-2. Descriptive statistics for site and stand characteristics of treatment plots (n = 91).

Variable	Mean	Standard deviation	Minimum	Maximum
Site factors				
Mean terrain slope (%)	**12.0**	6.8	2.7	34.3
Percent visible crop trees (%)	**63.1**	21.3	14.0	100.0
Mean density of hindering obstacles (number/ha)	**211**	84	58	508
Mean density of all obstacles (number/ha) (n=19)	**3,224**	1,014	1,250	5,208
Trees and woody shrub density (number/ha)				
Total density of all species	**78,553**	50,765	16,666	393,750
Height > 1 m	**26,033**	19,819	416	76,250
Height < 1 m	**52,528**	41,997	7,500	329,583
1 m ≤ Height < 2 m	**19,775**	15,319	416	65,833
2 m ≤ Height < 3 m	**4,095**	4,408	0	18,541
Height > 3 m	**2,153**	3,416	0	20,000
Total density of hardwood species	**69,350**	48,255	12,708	383,333
Total density of softwood species	**9,202**	12,232	1111	90,416
Brush				
Percent cover of competing vegetation (%)	**34.4**	17.4	1.6	77.0
Mean height of competing vegetation (cm)	**46.1**	17.4	10.1	103.0
Percent cover of three shrubs species (RFF)[1] (%)	**15.6**	14.9	0	61.8
Weighted[2] mean height of RFF[1] (cm)	**50.8**	18.7	18.6	105.0
Max height of RFF[1] (cm)	**109.9**	42.0	30.0	200.0

[1] RFF = raspberry, fern, fireweed
[2] Mean weighted by percent cover

Tableau 3-3. Parameters of the best and the operational model for predicting effective time consumption of brushcutters (h•ha-1) (n = 91).

Model	Parameter estimate ($h \cdot ha^{-1}$)	Standard error	*t* value	p_{value}	Partial R^2
Best prediction model[1]					
Intercept	**3.06**	1.34	2.3	0.0245	
Raspberry, fern and fireweed (RFF) percent cover (%)	**0.26**	0.03	8.2	<0.0001	0.418
Density of all species of height > 1 m (number/ha)	**0.00012**	0.00002	5.1	<0.0001	0.127
Mean density of hindering obstacles (number/ha)	**0.022**	0.006	4.0	<0.0001	0.072
Operational model[2]					
Intercept	**4.98**	1.19	4.2	<0.0001	
Raspberry, fern and fireweed (RFF) percent cover (%)	**0.32**	0.03	9.8	<0.0001	0.413
Total density of all woody and shrubs (number/ha)	**0.0000536**	0.000013	4.1	<0.0001	0.131
Regeneration type[3]	**3.12**	1.110	2.8	0.0062	0.038

[1] RMSE = 4.30 ; R^2 = 0.614 ; Adjusted R^2 = 0.601
[2] RMSE = 4.48 ; R^2 = 0.582 ; Adjusted R^2 = 0.568
[3] Stand regeneration type: 0 for plantations; 1 for naturally-regenerated.

Tableau 3-4. Predictive model parameters for effective time consumption of brushcutters, using regression scores of significant components and pooling of all hindering obstacles (h•ha-1).

Model	Parameter estimates ($h \cdot ha^{-1}$)	Standard error	*t* value	p_{value}	Partial R^2
Model using component scores[1]					
Intercept	**14.83**	0.670	22.3	<0.0001	
Slash – bypassed	**1.98**	0.674	2.9	0.0043	0.084
Harvest stumps – bypassed	**1.57**	0.674	2.3	0.0218	0.053
Model pooling all hindering obstacles[2]					
Intercept	**7.37**	1.74	4.23	<0.0001	
Density of all hindering obstacles	**0.035**	0.0076	4.61	<0.0001	0.193

1. N=90 ; RMSE = 6.39 ; R^2 = 0.138 ; Adjusted R^2 = 0.118
2. N=91 ; RMSE = 6.15 ; R^2 = 0.193 ; Adjusted R^2 = 0.184

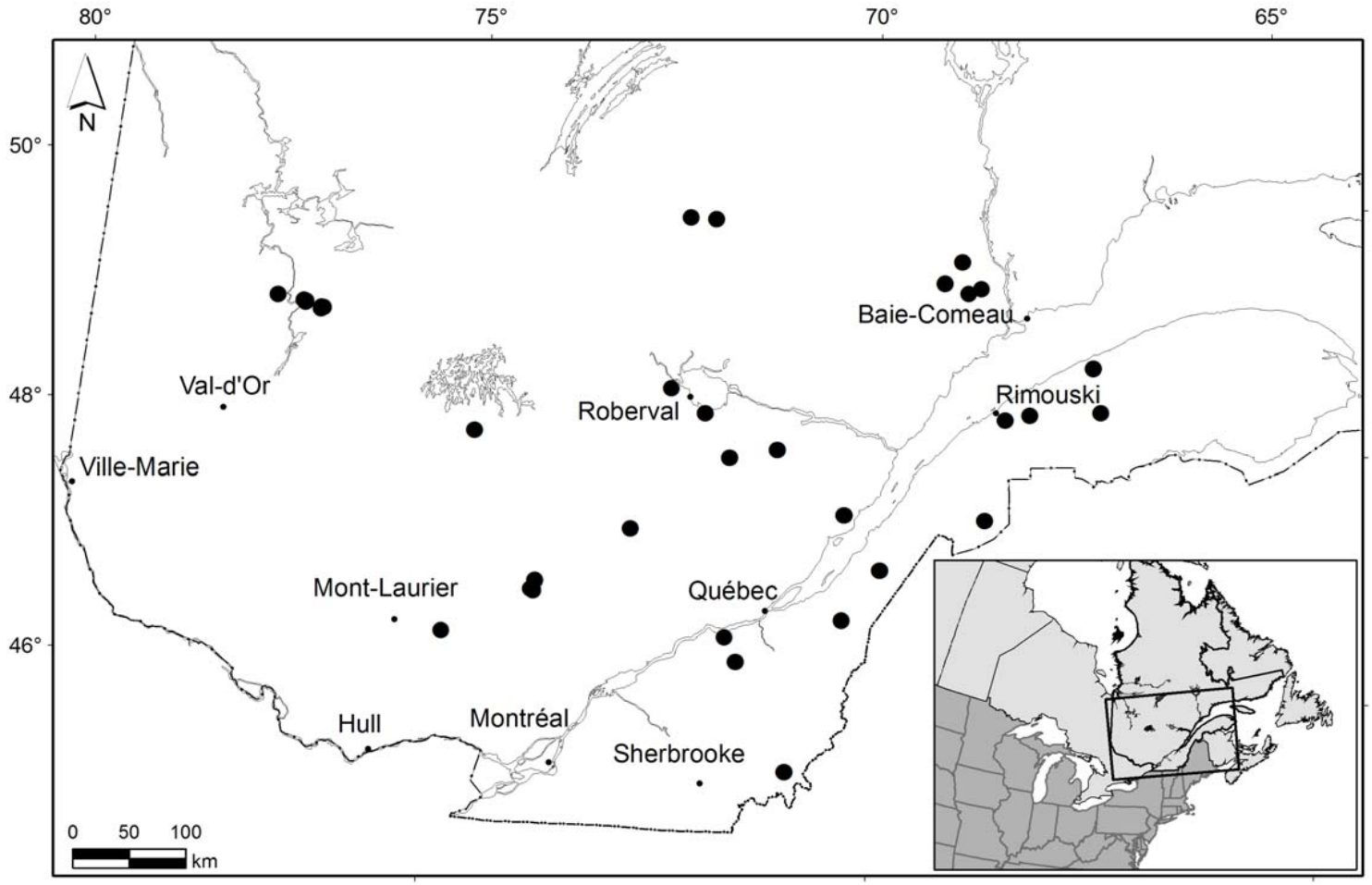


Figure 3-1 Geographical distribution of sites and treatment plots in the province of Québec

CHAPITRE 4 ARTICLE 2 - A HIERARCHICAL TASK ANALYSIS TO UNCOVER COGNITIVE WORK IN FOREST REGENERATION RELEASE OPERATIONS

Denise Dubeau[1;3], Daniel Imbeau[1], Luc G. LeBel[2]

1. École Polytechnique de Montréal, Département de mathématiques et de Génie industriel, Montréal (Qc), Canada
2. Université Laval, Département des Sciences du bois et de la forêt, Québec (Qc), Canada
3. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la Recherche forestière, Québec (Qc), Canada

Article soumis à la revue *Applied Ergonomics*

Mots clé :

Foresterie, traitements sylvicoles, débroussailleurs, analyse de tâches, extraction des connaissances

Forestry, silvicultural treatments, brushcutters, task analysis, knowledge elicitation

4.1 Abstract

Forest regeneration release consists in cutting competing vegetation around young crop trees. Current predictive models are based on abundance of vegetation to cut. However, workers feel that obstacles (slash, stumps, boulders and rocks) play a significant role in their productivity, and should thus be accounted for in the piece-rates they receive. Measurements of hindering obstacle abundance have not been found to be easily reproducible, suggesting that some cognitive processes may be involved in coping with changing conditions. Forty-one participants were engaged in observations and interviews. Hierarchical task analysis (HTA) was performed to describe release work, complemented by an analysis according to the Skills-Rules-Knowledge (SRK) framework. Cognitive content seemed higher when workers were faced with obstacles. Half of the observed time was spent in obstacle-free areas while 30% was spent coping with slash and slash piles. Results should help develop a valid and practical method to account for obstacles in the field and may also help improve brushcutter training programs.

Keywords

Forestry, silvicultural treatments, brushcutters, task analysis, knowledge elicitation

4.2 Highlights

- HTA was used to describe brushcutting work and uncover the cognitive content involved in this occupation
- Vegetation abundance combined with hindering obstacles seem to induce the most part of cognitive work during regeneration release
- Slash and slash piles should be removed during or soon after harvest, to ease up subsequent treatments and reduce risks to health and safety

4.3 Introduction

4.3.1 Background

Regeneration release is a silvicultural treatment involving the elimination of competing vegetation in plantations or natural regeneration following the harvest of a mature forest stand (Thompson and Pitt, 2003). This silvicultural treatment typically occurs between 3 to 8 years after forest harvest. Three methods exist: chemical, mechanical (heavy machinery) and motor-manual release. The latter is performed by silvicultural workers using a brushsaw. In this case, the brushcutter has to maintain a spacing of approximately two meters between selected crop trees. In eastern US and Canada, competing vegetation to cut is mostly constituted of shrubs and young hardwood and softwood trees (Jobidon et al., 2004).

Brushcutters work alone or in pairs and are assigned a work area that usually requires about 4-5 days to clear (about 2-2.5 ha). Release work can be classified as a “naturalistic decision making” process for four out of eight of its defining factors (Zsambok and Klein, 1997). It is characterized by uncertainty (hidden crop trees and obstacles), action/feedback loops (immediate feedback on quality and quantity of work achieved), time stress (brought by incentive pay), competing goals (quality requirements versus maximization of earnings in a piece-rate payment system), organizational goals and norms (quality level to achieve while coping with a cumbersome blade guard). It does not involve high stakes or critical decisions that could affect the outcome of future events, ill-structured problems or multiple players. Possible errors include accidentally cutting crop trees or making a poor choice between candidate trees. In the field, many factors cannot be controlled because regeneration release work takes place in a natural environment. Hills, rivers and roads form natural boundaries that result in irregular work area shapes. Vegetation height and density, previous forest stand composition and soil types vary from one

region to another, creating variable site conditions. Harvesting systems influence the amount and distribution of woody residue to deal with in subsequent silvicultural treatments. Mixed stands, composed of softwood and hardwood species, generate a greater amount of woody residues compared to pure softwood stands because some species or stems of no commercial interest are left in the field. Other hindering obstacles such as stumps, stump sprouts, terrain slope, boulders and rocks create multiple combinations of site conditions to deal with. Finally, brushcutters are exposed to weather that varies within and between days.

In many countries, brushcutters are paid according to a piece-rate wage system. Piece-rates are known to influence worker behavior as an incentive to sustain a fast work rate to maximize earnings, to achieve the minimal acceptable quality level and to increase risk taking behaviors (Bender et al., 2010; Johansson et al., 2010; Paarsch and Shearer, 2009; Sundström-Frisk, 1984). In order to adjust piece-rates to the variability in difficulty levels, predictive models were built based on the statistical relationships between worker productivity and competing vegetation density or height and hindering obstacles (De Franceschi and Bell, 1990; Dubeau et al., 2011; LeBel and Dubeau, 2007). However, the models currently in use to set piece-rates in the province of Québec (Canada) do not include the effects of hindering obstacles on worker productivity. Nevertheless, workers argue that these obstacles impact their productivity, and recent research corroborate this relationship (Dubeau et al., 2011; Toupin et al., 2007).

Some effects of obstacles were observed, but no exact rule could be applied in all situations to model productivity variability. This is because obstacles occur in many combinations that cannot be anticipated beforehand (Dubeau et al., 2011). This suggests the involvement of expert knowledge and cognitive work in the processing of obstacles according to the skills-rules-knowledge framework (SRK) (Phipps et al., 2011). The cognitive content of forestry machine operations has been studied (Berger, 2003; Gellerstedt, 1997; Inoue, 1996; Ovaskainen et al., 2004; Sullman and Kirk, 1998), but motor-manual brushcutting cognitive demands have not yet received much attention.

Understanding how brushcutters reason while performing their work activity could help target the obstacle types deserving further investigation for productivity prediction purposes. This study aimed at thoroughly describing brushcutting tasks and revealing cognitive work, in order to find which obstacles have the greatest impact on worker productivity.

4.3.2 Methods to uncover cognitive work

An array of methods are available to uncover cognitive content of work (Crandall et al., 2006). As the goal was to link obstacles to worker productivity, the first step was to describe the system and tasks before performing analyses to uncover brushcutter cognitive work. This had not been undertaken yet for brushcutting work.

The initial description of the system and tasks is best achieved by performing documentation analysis, interviews and observations, allowing the capture of detailed information on tasks and their role in the system without interfering too much with work activities (Crandall et al., 2006). After an initial description is achieved, additional methods may be used to identify cognitive content of work. Methods such as the think-aloud protocol can be useful to capture tacit knowledge, cues and strategies developed during work (Cooke, 1994; Diaper, 1989). Structured interviews are also useful to get information about precise details of cognitive work.

The choice of analysis methods depends on the characteristics of the work being studied. Brushcutting work can be divided in a series of goals requiring multiple cycles of assessment/decision/action/feedback all conducted to achieve the main goal of releasing crop trees from competing vegetation in the least possible time. Hierarchical task analysis (HTA) is well-suited to represent this type of work requiring repeated cycles (Phipps et al., 2011; Shepherd, 2001; Stanton, 2006). HTA uses subdivisions of a goal into subgoals to construct a detailed account of steps, order of execution and requirements involved in a task. These descriptions can then be supplemented by

complementary analyses such as the subgoal template (SGT) or the skills/ rules/ knowledge framework (SRK) (Phipps et al., 2011). SGT aims at describing interactions between a user and a system, which is irrelevant for brushcutting work, a manual task. The SRK framework is intended to reveal the cognitive effort level needed to achieve a goal or task (Phipps et al., 2011; Rasmussen, 1983). SRK may help in providing a precise description of brushcutter cognitive work.

This paper is aimed at thoroughly describing brushcutter work and uncovering the cognitive content of work, especially that which relates to the hindering obstacles encountered during regeneration release work.

4.4 Materials and methods

4.4.1 Selection of participants

The study took place during normally scheduled regeneration release operations in the field. A total of 19 silvicultural contractors were visited across the Province of Québec. The research team visited a different contractor each week. A minimum of three qualified brushcutters per week were needed. To achieve this goal, participants were recruited from contractors that employed ten brushcutters or more. To qualify, participants were required to: 1) have performed release work for at least one complete summer to ensure that they have reached a minimal level of work technique, 2) have an average productivity relative to their company standards to ensure representativeness of the sample in operational conditions, and 3) have a stable work technique to minimize within-subject variability during the study.

Brushcutter read and signed an informed consent form explaining the study goals and steps, and stipulating how they were to be compensated for time losses caused by their participation in the research project. A total of 41 brushcutters took part in the study: 22 in the summer of 2004, 8 in the

summer of 2005 and 11 in the summer of 2007. Overall, mean participant age was 43 [s = 12.3, range 20 to 61], with a mean brushcutting experience of seven seasons [s = 5.1, range 1 to 20].

4.4.2 Interviews

In the summer of 2004, the 22 participants were interviewed about hindering factors immediately following two to three hours of release treatment work in the area assigned to them. A semi-structured interview was then conducted to identify which obstacles or combination of obstacles they perceived as affecting their productivity. Participants would walk in the freshly-released area to point out each hindering obstacle and explain why and how it had affected their work. Photos of obstacles were taken along with the description provided by the worker (Figure 4-1).

These interviews were analysed and used to build a second semi-structured questionnaire for the 2005 and 2007 data collections involving 19 new workers from other regions and aiming to further explore how obstacles were hindering their work.

In addition to using the same protocol as in 2004 and 2005, a think-aloud session was added during which brushcutters were asked to verbalize what they were doing and why. This procedure aimed at eliciting tacit knowledge and cues that they used to make quick and efficient decisions (Cooke, 1994; Cordingley, 1989). However, out of the eleven participants, only two verbalized their thoughts, but it seemed to cause them to accidentally cut more crop trees when work conditions got more complex. Three other participants talked momentarily and then forgot to continue, four recordings were inaudible and the other two workers told us that they had nothing relevant to say.

4.4.3 Hindering obstacles and factors

Hindering obstacles identified from the first set of interviews were rocks (stones smaller than 30 cm in diameter), boulders (rocks bigger than 30 cm in diameter), stumps, stump sprouts, slash, slash

piles, woody residue, windfalls, snags and remnant trees (Figure 4-1). Workers also indicated that factors like competing vegetation density and height, lack of visibility of crop trees and / or ground, crop tree relative height compared to competing vegetation, and competing vegetation basal diameter affected their work. Finally other factors such as obstacle height, holes and ruts, ground softness, terrain slope, insects, and weather (high or low temperature, high air humidity, heavy rain) also had an effect on their work.

4.4.4 Observations

Workers were observed during a period ranging between 120 and 180 minutes, corresponding to twice the time needed to work until the gas tank is empty, fill it up and take a short rest break. This represented 25 to 35 percent of a normal workday. Past experience suggested that such an observation period length was sufficient to capture all obstacle types and situations normally encountered in a regular workday, while minimizing disturbance to the worker. The exact beginning time (hh:mm:ss) of each activity was recorded during work. The beginning of the next activity marked the end of the preceding one. Activities were then classified into effective time, work delays and personal time. The observer also recorded the time when the brushcutter encountered an obstacle and his reaction to it (stepping over or bypassing it).

4.4.5 Videos and photographs

A bullet camera (Sony HQ2 550 TVL Headset Camera) was mounted on the workers' hat and directed frontward, so the brushsaw blade was in the center of the image when the worker was in his working position (Figure 4-2). Video data were recorded with a 80 Gigabytes (GB) video-optimized hard drive portable device (Archos PVR-AV480). Recording rate was 30 frames per second (fps) and the

resulting video file was compressed (2 GB by hour). A new file was automatically recorded every hour or so, when the file size reached 2 GB.

Other digital videos were recorded on tape at a rate of 30 fps with an external camera during the entire observation period and the subsequent interviews (Sony DCR-TRV730 Digital8 Handycam Camcorder). They were then digitized on a computer and compressed to about 2.8 GB per hour. These videos provided a more general view that was useful as an aid to better understand the video sequences obtained from the head-mounted camera.

4.4.6 Data processing

Verbatims were made out of the recorded interviews. A mind map was then constructed based on the interviews to classify and organize answers in related themes: obstacle types, combinations of obstacles, work methods and strategies, organizational considerations, risks (Mueller et al., 2010).

Based on the constructed mind map, an HTA was performed to describe goals, rules, sequences of activities and decisions made by the workers. HTA was then supplemented with the Skills/Rules/Knowledge (SRK) evaluation to describe the requirements of release work (Rasmussen, 1983). According to Rasmussen (1983), skill-based behavior (sensory-motor performance) represents work done without consciously thinking about it, like riding a bicycle for example. Rule-based behavior applies a set of clearly defined rules or rules of thumb to make decisions in a familiar work situation. Knowledge-based decisions involve mostly unfamiliar situations where no rules are available to guide performance. In the case of brushcutters, the apparently simple task of releasing crop trees involves some judgement of how to apprehend quasi-infinite obstacle configurations based on their knowledge. Workers have to decide on a course of action through a fast analysis process. The decision tree adapted by Phipps et al. (2011) was used to classify HTA activities in the SRK framework. The strategies workers used to cope with obstacles and other factors were then summarized from interview verbatims.

An evaluation of proficiency in brushcutting was performed using video recordings. Based on assessments schedules for brushcutting work, a certified worker should master three competencies: 1) maintenance and repair of the brushsaw; 2) planning of work according to terrain features; 3) efficient operation of the brushsaw (Australian Government, 2011; Comité sectoriel de Main-d'oeuvre en aménagement forestier, 2004; National Proficiency Tests Council (NPTC), 2006). The first competence is not easily estimated on video. Failure to correctly adapt to terrain features and wind causes trees to fall either in untreated areas or on the worker. Efficient operation of the brushsaw involves precise control of blade position, limited unnecessary movements and both hands constantly holding handles. Lack of precision may result in more frequent saw kickbacks. To assess proficiency of participants, frequency counts of four variables were performed during a 5-min video sequence randomly chosen: tree falling on worker, kickbacks, lifting the blade over waistline (unnecessary movements), and operating brushsaw with one hand only.

Video sequences from the head-mounted camera were analyzed with the Video Event Analysis software (Chappe Software, 2007) which allows sequential recording of the time spent treating each obstacle (Figure 4-2a). The beginning of time to cope with an obstacle started when the blade's working zone (covering twice the blade diameter) contained an obstacle and stopped when the blade moved away. Because the brushsaw is normally swayed from left to right and back, big obstacles took more than one pass to be entirely processed. Windrows, long slash too high to step over or fallen trees, are especially difficult to process. Sometimes brushcutters work between obstacles and have to be careful on both ends of the brushsaw sway movement (Figure 4-2b). This situation was recorded as two distinct obstacles. Discrimination between large obstacles on video was difficult because of the narrow focal angle of the bullet camera (<90°). Worker frequent path changes added to the tunnel vision available through the camera made it very hard to know how long the worker was treating the same obstacle. For example, a worker could work around half of a 4-meter long white birch slash to his right, then switch to

a crop tree growing close to a stump in front of him, and then to a similar white birch slash to his left and come back to finish the first one. It was not possible to isolate each obstacle. Instead of isolating the exact time needed to work around each individual obstacle, the observer recorded the time to deal with obstacles in short time increments by obstacle type. The short time increments were then added together for each obstacle type (sum of small increments of time spent to work around all slash piles during the video footage for example). The final dataset for each of the 18 valid sequences contained four time variables: 1) the total observation time; 2) the total time spent working; 3) the total time spent coping with each obstacle type; 4) the total time with no obstacle in the blade's working zone. Percentage of total work time was calculated for each obstacle type. Descriptive statistics were computed using the SAS Means procedure (SAS Institute, 2004).

Finally, an HTA table was adapted from Shepherd (2001) to assess factors susceptible to induce some level of cognitive workload using a subjective evaluation scale. These were terrain slope, wind direction and orientation of plantation rows, taken alone or in combination with high density of competing vegetation (low visibility). Other hindering factors were added to this set: rocks, woody residue, soft ground and the absence of planting rows (no furrows). The cognitive factors evaluated were number of simultaneous variables to consider, task difficulty, uncertainty, controllability, time constraint, rules to evaluate, frequency (number of occurences / day). The evaluation of the cognitive workload was performed by the authors on the basis of observations, video analyses and interviews.

4.5 Results

4.5.1 Hierarchical task analysis

The HTA diagram representing regeneration release work is shown in Figure 4-3. On the diagram, boxes represent goals and sub-goals. Plans inserted under each goal or sub-goal describe the sequence

and grouping of sub-goals needed to achieve a goal. For example, Goal 1: locate new assigned work area is redescripted in three sub-goals: 1.1) follow foreman; 1.2) follow directions; 1.3) use map. The plan 1 informs the user that only one of the three sub-goals is necessary to achieve Goal 1. A total of seven main goals had a frequency of about once a week during the course of regeneration release operations. Goals 1 and 2 occurred roughly once per week. Goal 3 could take place more than once per day if conditions changed. Goals 4 and 8 occurred once per day. Goals 5 and 6 were repeated during 80% of the workday, up to 1000 times a day (167 times per hour) and about 500 times a day, respectively (based on a released area of 0.5 ha). Decisions have to be taken in seconds. Goal 7 was performed once per day, at the end of the work shift.

To achieve a daily production level of 0.5 ha, a brushcutter has to cover about 11 m^2 per minute, which represents the release of 2 to 3 crop trees. One pass, 1 meter to the left and right of the worker (Figure 4-2b), covers 0.75 m^2, meaning that the worker makes about 14 passes per minute. At the same time, sustained visual search is required to detect crop trees or obstacles that are in the way. When no obstacles are present (goal 5) and both crop trees and the ground are visible, the swaying movement looks seamless and uninterrupted. When visibility is obstructed by dense vegetation, the worker has to slow down to avoid cutting a crop tree or hitting an obstacle. When the blade gets close to obstacles (goal 6), the worker has to make quick decisions regarding how to cope with the situation without losing too much time.

4.5.2 SRK analysis

Table 4-1 details SRK classification for each goal and sub-goal. The relevant skill, rule or knowledge needed to perform each goal are indicated in the second column. The last column presents the rationale behind the rules or knowledge in use. A total of 8 goals were classified as skill-based, 13 as rule-based and 18 as knowledge-based. The core activity in release work is goal 5, which occurs about

1000 times a day. In the absence of obstacles, goal 6 stops at 6.1, where the worker visually scans the area around the blade's position to detect and identify any obstacle needing further attention. The large number of skills, rules and knowledge to master in interaction to the capacity to adapt to unpredictable changes in conditions can be overwhelming for a beginner.

4.5.3 Adaptation of work patterns

Hindering obstacles identified from the interviews are presented in Table 4-2 along with the reported effects on release work and the strategies workers reported as ways to adapt to every situation. Many of the invoked adaptation strategies involve slowing down to reduce error risk level. Table 4-2 lists general guidelines to adapt to a subset of situations within a quasi-infinite number of possible combinations to deal with. In workers' opinions, high competing vegetation density comes first as a factor reducing their productivity, multiplying difficulty level for the other hindering factors (100% of workers cited this as a major influencing factor).

The proficiency evaluations that were done using video footage (n=19) suggested that 4 brushcutters were experts (no errors), 2 were proficient (1 error), 7 were skilled (3 or 4 errors), 4 were advanced beginners (5 errors) and 2 presented a poor level of competence (13 and 14 errors). The most frequent observed error was the use of the left hand to orient tree falling.

4.5.4 Video analyses and subjective ratings

Table 4-3 shows the results of videos analyses from the head-mounted camera for a total of 18 valid sequences totalling 20.5 hours of video footage. For each obstacle type mean percentage of total video time and mean duration of work around each obstacle type are presented. Because of the swaying movement of the brushsaw (Figure 4-2b), time spent working around one particular obstacle is fragmented into many small chunks of time. Slash and slash piles were the two most time consuming

obstacles to deal with. Half of the observation time was obstacle-free. Stumps, rocks and boulders did not take much time, but are considered as the most stressful by the workers who fear hitting them, which would dull the blade —translating into work time lost to file or change the blade— and could cause a rebound effect and a higher risk of self injury (lower back) or of cutting a release tree.

Table 4-4 provides a subjective rating of factors affecting performance for selected combinations of events frequently encountered during a workday. The perceived level of difficulty increases when competing vegetation to cut is dense enough to lower visibility. Workers need more concentration when the immediate area around the blade contains an obstacle or a combination of obstacles. In these cases, uncertainty increases as workers have to make quick decisions to determine where to stop the blade's movement when needed while at the same time trying to maintain a good productivity. Low visibility prevents anticipation of what lays ahead in the work area and increases the time pressure put on decisions that have to be made about trees to cut, trajectory and speed.

4.6 Discussion

This study presents the first systematic description of the cognitive work involved in regeneration release and the strategies used by brushcutters to maximize their productivity while achieving the required quality level and avoiding injury. Also, measurements of time needed to work around individual obstacle types and the proportion of total time spent dealing with obstacles are original results.

HTA combined to SRK assessments revealed that goal 6, coping with obstacles, is the most cognitively engaging for brushcutters. Subgoals of Goal 6, are visual search tasks either rule-based or knowledge-based as shown in Table 4-1. A new obstacle is never identical to the preceding one, which adds a novelty factor that creates uncertainty as to what strategy to use. When competing vegetation is dense, the worker can never be fully prepared to cope with an obstacle, so anticipation of what is

coming is rarely possible. These results partly agree with previous study by the authors showing that productivity is closely related to competing vegetation abundance (R^2=0.545) (Dubeau et al., 2011). In the same study, a principal component analysis revealed that slash was the most influential obstacle type, followed by stumps (Dubeau et al., 2011). The possible interactions between competing vegetation abundance and hindering obstacles configuration should be further investigated to better predict worker productivity.

Visual search of expected objects is a very fast process that can take place without paying real attention to the task being done (Li et al., 2002). Visual search speed decreases when the scene is cluttered and the target objects have low saliency compared to the other objects in the scene (Itti et al., 2001; Itti and Koch, 2000; Underwood et al., 2005). The speed decrease in the detection of the presence of obstacles and their identification may be caused by the induction of mental work following two different pathways in the primary, secondary and tertiary visual cortex (Blumenfeld, 2010). The primary visual cortex detects an object (there is something here), then the location and/or movement of the object is assessed in secondary and tertiary dorsal pathways (where is it, does it move, how fast does it move and in which direction?). The identification of the object is done via the ventral pathways (what is this object?). The time needed for these kinds of mental analyses and the individual capacity to anticipate should be further investigated by comparing cases with unexpected obstacles (hidden by competing vegetation) and obstacle-free work areas.

By contrast, goal 5, the main work performed by brushcutters, involves sensory-motor activities, and thus is mostly composed of skill-based and rule-based activities. In the absence of obstacles, Goal 5 is categorized as a visual search task (Doll et al., 1992; Foulsham and Underwood, 2011; Itti et al., 2001). In such conditions, Goal 5 does not demand much attention as stated earlier and also because when the crop tree is visible then the location of the next crop tree is easily predictable.

Regeneration release work itself is a fairly straightforward task. It consists in cutting all competing vegetation in a one-meter area around each crop tree with a motor-manual brushsaw. Despite the apparent simplicity of the task, productivity varies between areas, even for a single worker. Roughly two-thirds of this variability (R^2=0.60) can be explained by competing vegetation and hindering obstacles abundance (Dubeau et al., 2011). The unexplained part of brushcutter productivity variability may arise from the cognitive demands of some regeneration release work tasks. For instance, brushcutters use macrocognition to develop and implement work strategies in the field, and then adapt the strategies to changes in the situation (Klein et al., 2003). Macrocognition relates to cognitive work performed in real-life situations where decisions may be complex, time constrained, uncertain and dynamic (need to adjust to situation changes). The uncertainty brought by the probability to hit hidden obstacles may increase workload. This should be investigated too.

Removing as much biomass as possible during or soon after harvest operations may improve the subsequent operations in the sequence of silvicultural treatments. Site preparation would be easier and of better quality, and plantation operations, as well as vegetation management operations, would be easier on workers. This should be experimentally tested to compare productivity and costs for different combinations of obstacles. Such a study would help assessing whether or not the cost of biomass extraction can be compensated by the savings incurred during the subsequent silvicultural treatments. At the present time, forest biomass harvesting is generating great interest as a renewable source of energy but initial cost is a significant hurdle to overcome. Accounting for post-harvest benefits to silvicultural works could provide a more complete evaluation process. As 25 % of yearly harvested areas are reforested, a strategy aimed at concentrating biomass harvesting efforts in reforested sites only may help create an equilibrium between intensive forest management and lighter management where natural quality is preserved for certain wildlife species.

At the microcognitive level, namely for visual search, the difficulty in brushcutting seems to come from the low saliency of crop trees. This should be further explored along with the possibility of developing an apparatus that would enhance saliency of crop trees within dense vegetation, like polarized glasses that would respond to softwood specific light spectrums. Another way to increase crop tree saliency would be to flag each crop tree when plantation occurs. Also, the development of an environmentally safe product to temporarily colour trees in a salient shade (fluorescent pink for example), lasting for 3 to 5 years may be helpful to brushcutters.

The detailed analyses of release work presented in this paper will serve as a basis to target the most important factors affecting worker productivity using time observations, in order to introduce them in predictive models. They may be incorporated into training programs to provide insights to beginners concerning the most efficient strategies to securely cope with obstacles, allowing a faster achievement of proficient techniques and higher productivity while protecting worker health and safety (reduce speed and effort to obtain desired wages). In turn, this could contribute to reduce the proportion of turnover observed in the first years of undertaking brushcutting work.

4.7 Conclusions

This study presents the first detailed task analysis of brushcutter work during regeneration release operations. Roughly, one-third of observed brushcutting work was spent dealing with slash and slash piles while half of the time was obstacle-free (Table 4-3). About 12 % of working time was spent for stumps, rocks and boulders together. The estimation of cognitive workload supports the belief that high density of competing vegetation increases task difficulty, uncertainty and time constraint compared to good visibility of crop trees and ground. The SRK analysis results suggest that regeneration release work is composed of skill-based operations needing low levels of attention, but that coping with obstacles increases significantly cognitive demands. Time constraints associated with piece-rate payment system

may increase the pressure to make quick decisions in the presence of obstacles. Workers have to pay closer attention not to hit obstacles, assess the situation, change path and to return to their original path. Reducing the abundance of obstacles could increase productivity and impose less physical and mental strain on brushcutters. The results of this study can find practical application in designing better work techniques to reduce strain, risks to health and safety, and improve productivity.

4.8 Acknowledgements

The authors wish to thank Steve Lemay for his expert contribution in the data collection and preparation processes, and Denise Tousignant for the linguistic revision of the manuscript (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune of Québec, Canada). We also thank Philippe-Antoine Dubé for his active part in the data collection process (École Polytechnique de Montréal). We wish to thank Yeni Arias, who has generously performed many hours of quality video data analyses (École Polytechnique de Montréal). We also are grateful to the silvicultural contractors and the brushcutters who participated in the study. This project received joint funding from the Ministère des Ressources naturelles et de la Faune of Québec, the Fonds Québécois pour la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT), the Laboratoire d'opérations forestières of Université Laval, and the Natural Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC) through the Chaire de recherche du Canada en ergonomie of the École Polytechnique de Montréal.

4.9 References

Australian Government, 2011. FPIFGM2207B Undertake brushcutting operations, in: Commonwealth of Australia (Ed.).

Bender, K.A., Green, C., Heywood, J.S., 2010. Piece Rates and Workplace Injury: Does Survey Evidence Support Adam Smith?, SSRN eLibrary, p. 29 p.

Berger, C., 2003. Mental stress on harvester operators, in: Austro (Ed.), High tech forest operations for mountainous terrain, October 5-9, 2003. Schlaegl - Austria, pp. 1-10.

Blumenfeld, H., 2010. Neuroanatomy through clinical cases, Second ed. Sinauer Associates Inc., Sunderland, MA 01375 U.S.A.

Chappe Software, 2007. Video Event Analysis.

Comité sectoriel de Main-d'oeuvre en aménagement forestier, 2004. Norme professionelle pour le métier d'ouvrière ou d'ouvrier sylvicole - débroussailleur. Gouvernement du Québec, Emploi Québec, Québec.

Cooke, N.J., 1994. Varieties of knowledge elicitation techiques. International Journal of Human-Computer Studies 41, 801-849.

Cordingley, E.S., 1989. Knowledge elicitation techniques for knowledge-based systems, in: Diaper, D. (Ed.), Knowledge elicitation : principles, techniques, and applications. Ellis Horwood ltd, New York, p. 270.

Crandall, B., Klein, G., R., H.R., 2006. Working minds - A Practitioner's Guide to Cognitive Task Analysis, MIT Press ed, Cambridge, Ma.

De Franceschi, J.P., Bell, F.W., 1990. Labor productivity and costs of motor-manual release of spruce from hardwoods in Manitoba, Information Report ed. Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta, p. 14 p.

Diaper, D., 1989. Knowledge elicitation : principles, techniques, and applications. Ellis Horwood Ltd, New York.

Doll, T.J., W., M.S., E., S.D., 1992. Visual Search and Detection in Background Clutter, Innovations for Interactions. Proceedings of the Human Factors Society 36th Annual Meeting, Atlanta, Georgia, October 12-16, 1992. The Human Factors Society, Santa Monica, California, Volume 2, pp. 1420 - 1424.

Dubeau, D., LeBel, L., Imbeau, D., Auger, I., 2011. Impacts of vegetation abundance and terrain obstacles on brushcutter performance during regeneration release. Northern Journal of Applied Forestry, in final revision.

Foulsham, T., Underwood, G., 2011. If Visual Saliency Predicts Search, Then Why? Evidence from Normal and Gaze-Contingent Search Tasks in Natural Scenes. Cognitive Computation 3, 48-63.

Gellerstedt, S., 1997. Mechanized cleaning of young forest - the strain on the operator. International Journal of Industrial Ergonomics 20, 137-143.

Inoue, K., 1996. Operators' mental strain in operating the high proficient forestry machine. Journal of Forest Research 1, 195-197.

Itti, L., Gold, C., Koch, C., 2001. Visual attention and target detection in cluttered natural scenes. Optical Engineering 40, 1784-1793.

Itti, L., Koch, C., 2000. A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention. Vision Research 40, 1489-1506.

Jobidon, R., Cyr, G., Thiffault, N., 2004. Plant species diversity and composition along an experimental gradient of northern hardwood abundance in Picea mariana plantations. Forest Ecol. Manage. 198, 209-221.

Johansson, B., Rask, K., Stenberg, M., 2010. Piece rates and their effects on health and safety - A litterature review. Applied Ergonomics 41, 607-614.

Klein, G., Ross, K.G., Moon, B.M., Klein, D.E., Hoffman, R.R., Hollnagel, E., 2003. Macrocognition. Intelligent Systems, IEEE [see also IEEE Intelligent Systems and Their Applications] 18, 81-85.

LeBel, L.G., Dubeau, D., 2007. Predicting the productivity of motor-manual workers in precommercial thinning operations. The Forestry Chronicle 83, 215-220.

Li, F.F., VanRullen, R., Koch, C., Perona, P., 2002. Rapid natural scene categorization in the near absence of attention. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 99, 9596-9601.

Mueller, J., Polanski, D., Foltin, C., Polivaev, D., 2010. Freemind, 0.9.0 ed, p. Logiciel libre de cartes mentales et d'élaboration de connaissances.

National Proficiency Tests Council (NPTC), 2006. Level 2, Certificate of competence in brushcutting operations - Assessment schedule. STONELEIGH PARK, WARWICKSHIRE CV8 LG, Warwickshire.

Ovaskainen, H., Uusitalo, J., Väätäinen, K., 2004. Characteristics and significance of a harvester operators' working technique in thinnings. International Journal of Forest Engineering 15, 67-77.

Paarsch, H.J., Shearer, B.S., 2009. The response to incentives and contractual efficiency: Evidence from a field experiment. European Economic Review 53, 481-494.

Phipps, D.L., Meakin, G.H., Beatty, P.C.W., 2011. Extending hierarchical task analysis to identify cognitive demands andÂ information design requirements. Applied Ergonomics 42, 741-748.

Rasmussen, J., 1983. Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics smc. 13, 257-266.

SAS Institute, I., 2004. SAS/STAT User's Guide Release 9.1.3, Edition. Cary ed. NC : SAS Institute Inc.

Shepherd, A., 2001. Hierarchical task analysis. Taylor and Fancis, London.

Stanton, N.A., 2006. Hierarchical task analysis: developments, applications and extensions. Applied Ergonomics 55-79.

Sullman, M., Kirk, P., 1998. Mental workload of mechanised processing with a single grip harvester, Liro Report ed. New Zealand Logging Industry Research Organisation, Rotorua, New Zealand, p. 7 p.

Sundström-Frisk, C., 1984. Behavioural control through piece-rate wages. Journal of Occupational Accidents 6, 49-59.

Thompson, D.G., Pitt, D.G., 2003. A review of Canadian forest vegetation management research and practice. Annals of Forest science 60, 559-572.

Toupin, D., LeBel, L., Dubeau, D., Imbeau, D., Bouthillier, L., 2007. Measuring the productivity and physical workload of brushcutters within the context of a production-based pay system. Forest Policy and Economics 9, 1046-1055.

Underwood, G., Foulsham, T., van Loon, E., Underwood, J., 2005. Visual attention, visual saliency, and eye movements during the inspection of natural scenes. Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 459-468.

Zsambok, C.E., Klein, G.A., 1997. Naturalistic decision making. Lawrence Erlbaum Associates inc, Mahwah, NJ.

a) High density of competing vegetation

b) Crop trees lower than competing vegetation

c) Small stones (diameter < 30 cm)

d) Stem to cut touching a boulder

e) Stump close to a rock

f) Stump sprouts

Figure 4-1 Examples of obstacles types (a to n).

g) Slash

h) Slash piles

i) Slash pile high over ground

j) Slash pile

Figure 4-2 Examples of obstacles types (a to n). (continued)

k) Snags and remnant trees

l) Hole

m) Soft ground

n) High terrain slope percentage

Figure 4-3 Examples of obstacles types (a to n). (end)

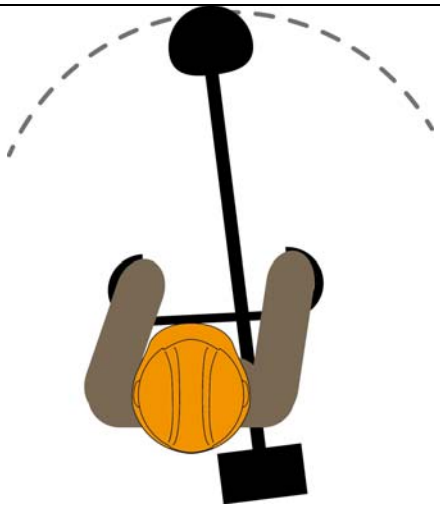
	
a)Worker in action with bullet camera mounted on his helmet	b) regular sway movement in the absence of obstacles

Figure 4-4 Worker in action and brushsaw movement schema

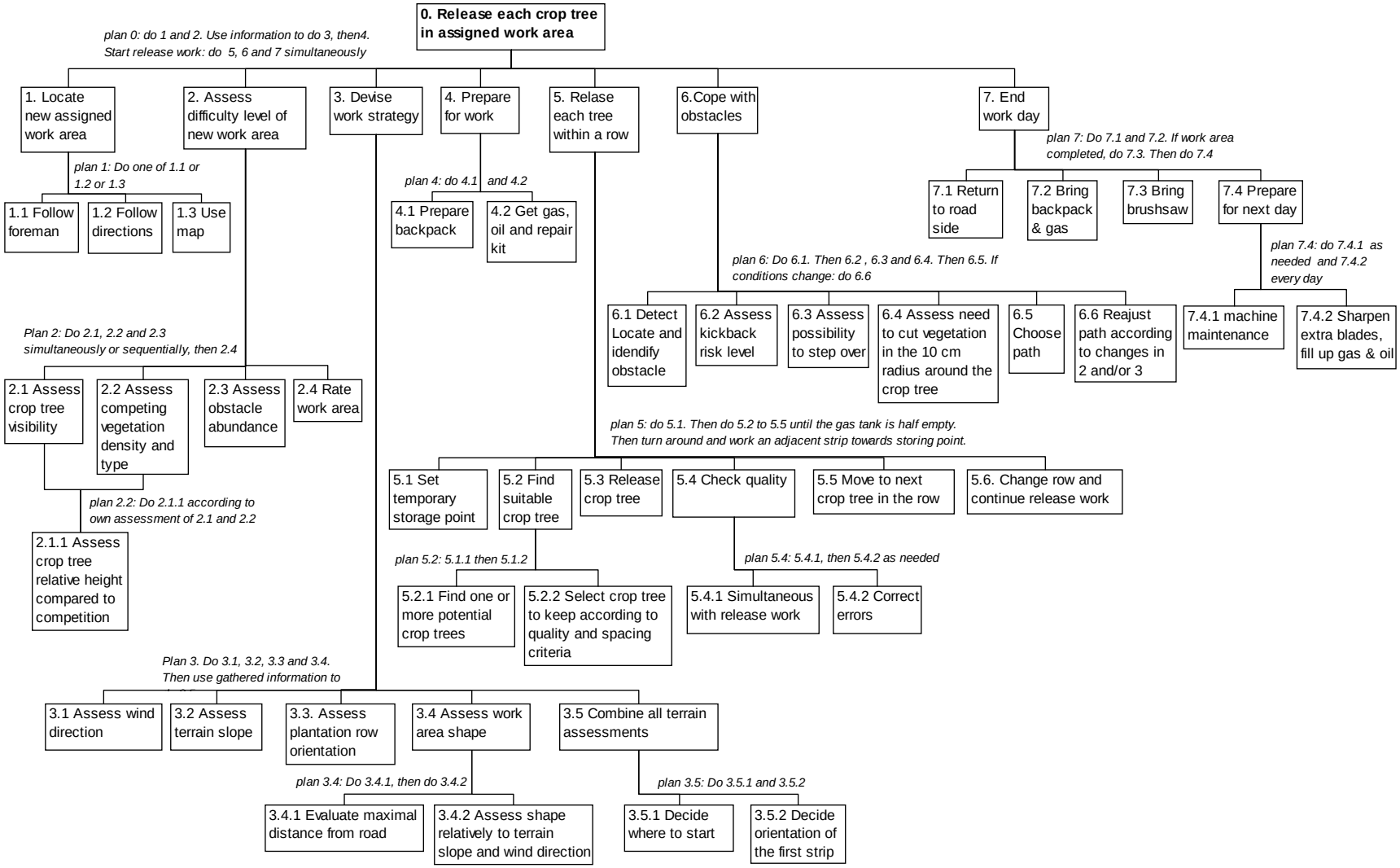


Figure 4-5 Hierarchical task analysis of regeneration release work. Boxes describe goals and sub-goals. Plans describe grouping and sequencing or simultaneity of goal achievement.

Tableau 4-1 SRK analysis of regeneration release work. S= skill-based operation, R= rule- based, K=knowledge based.

Goals and sub-goals	SRK	Rules / Knowledge description	Rationale
1. Locate new assigned work area			
1.1 Follow foreman	R	Follow foreman to the work area.	- Locating a new work area can be done by following the foreman or the directions he provides, or by using a map of the area locating roads and the work area to treat.
1.2 Follow directions	R	Understand and follow directions.	- Using the map, the foreman gives specific information to the worker about the area to treat: its size and global orientation from road side, sometimes with a general appraisal of the difficulty level to expect.
1.3 Use map	K	Abstract knowledge of how to read a map, self-location, how to navigate according to cues from map elements, and how roads are oriented relatively to terrain .	- The worker has to find the work area according to its location on the map and some information provided by the foreman (which road, how far from a creek, locate flags, starting on the road or not)
2. Assess difficulty level of work area			
2.1 Assess crop tree visibility	S	Recognize crop tree species and remember which are desired species.	- Workers generally evaluate their work area from the road to limit walking without cutting trees.
2.2 Assess competing vegetation density and type	K	If competing vegetation is mostly trees and shrubs, use circular blade. If mostly brush, use triangular grass blade.	- The most important factor is crop tree relative height compared to competing vegetation height. - Manufacturers recommend using grass blades only for grass and shrubs under 2 cm diameter.
2.1.1 Assess crop tree relative height compared to competition	K	If crop trees are higher than vegetation, it will take more time to release the work area.	
2.3 Assess obstacle abundance	K	If many (number unspecified by workers) snags and hardwood trees are in the field, there are more fallen trees and woody residue on the ground.	- From the road, the worker can get an initial judgement of obstacle abundance by looking for snags and remnant trees. When these are abundant, the number of fallen trees, slash and slash piles is often higher. This usually corresponds with initial proportions of softwood *vs*, hardwood of the harvested stand
2.4 Rate work area difficulty level	K	Involves diagnosis and abstract knowledge. Worker forms a general image of work area to treat.	
3. Devise work strategy			
3.1 Assess wind direction	R	Work with side wind, never with wind coming from the back. Limit work facing wind.	- Wind direction affects falling direction of cut vegetation. Impact is more important for vegetation higher than 2 meters. Choose a direction so that cut vegetation falls into the treated part of the area. Never work in wind direction. If cut vegetation falls into untreated area, visibility is compromised and the probability of cutting crop trees increases.
3.2 Assess terrain slope	R	Work perpendicular to terrain slope.	- Working up and down terrain slope requires more effort than working perpendicularly to it. Cutting in ascending slope increases physical workload. Cutting in descending slope is risky because the blade is close to the feet. Also, descending makes it harder to see the blade, and forces the worker to bend knees to cut vegetation low enough (15 cm or lower).

Tableau 4 1 SRK analysis of regeneration release work. S= skill-based operation, R= rule- based, K=knowledge based. (continued)

Goals and sub-goals	SRK	Rules / Knowledge description	Rationale
3.3 Assess plantation row orientation	R	Follow plantation rows.	- It is easier to follow plantation rows when possible, because the worker can anticipate the next crop tree location. This reduces visual search difficulty.
3.4 Assess terrain shape	K	Based on past experience.	
3.4.1 Evaluate maximal depth from road	R	If work area is deep and narrow, then start from the deep end and work towards the road.	- The worker uses the map provided by the foreman to make these assessments.
3.4.2 Assess work area's shape relatively to terrain slope and wind direction	K	Combine information about slope, terrain shape and wind to get a complete picture of the situation.	- Maximal depth affects how the worker is going to take on his work area. When the work area is deep, workers look for ways to minimize walking without cutting distances.
3.5 Combine all terrain assessments to make decision	K	Construct a mental map for the situation including plantation row orientation.	
3.5.1 Decide where to start release treatment	K	Imagine best scenario based on mental map of the four variables.	- With training and experience, workers make more efficient decisions about where to start and the orientation of the cutting strips
3.5.2 Decide orientation of the first strip	K	Use knowledge about effect of slope and wind on tree falling orientation.	
4. Prepare for work			
4.1 Prepare lunch, water, first aid kit	R	Bring just enough to last for the day and avoid transporting of unnecessary weight.	- Take all you need without bringing too much (lightest load)
5. Release each tree within a row			
5.1 Set up temporary storage point	K	Worker has to estimate where he will run out of gas to set his temporary spot according to the path he has chosen. This knowledge comes with experience.	R 5. One fundamental rule : minimize walking without cutting vegetation to achieve maximum daily production. - The worker brings his lunch, gas and repair kit to the location where he thinks the brushsaw will be empty.
5.2 Find suitable crop tree	S	Recognize crop tree (top-down visual search).	
5.2.1 Find one or more potential crop trees	R	Follow crop tree selection criteria: desired species, health.	- Worker follows planting rows when wind and slope make it possible, to find crop trees more easily.
5.2.2 Select crop tree to keep according to quality and spacing criteria	R	No other crop tree in a 1,4-meter radius around the selected tree. Leave less than 10% vegetation cover in the 1-meter radius around the released crop tree.	
5.3 Release crop tree	S	Master precise control of blade position and movements.	- Worker cuts competing vegetation in a 1-meter radius around the crop tree and simultaneously verifies quality.
5.4 Check quality	R	Verify if crop tree is free, not covered by cut vegetation, no more than 10% cover in 1-m radius, and no other crop tree in 1,4-m radius.	- Worker makes a quick visual inspection to the released crop trees in the path of the felled vegetation.
5.4.1. Simultaneous with release work	S		

Tableau 4 1 SRK analysis of regeneration release work. S= skill-based operation, R= rule- based, K=knowledge based. (continued)

Goals and sub-goals	SRK	Rules / Knowledge description	Rationale
5.4.2. Correct errors	S	If a released crop tree is covered by cut vegetation: either go back with the blade to clear the vegetation, or kick it with his foot, or take it away with his hand.	- Remove competing vegetation that covers crop trees if the case
5.5 Move to next crop tree in the row	S		
5.6 Change row and continue release work towards temporary storage point	R	If conditions did not change (wind or slope) then go to next row. Otherwise, reassess to choose a new work direction.	
6. Cope with obstacles	S	Master precise control of blade position and movements.	- Obstacles are often hidden under competing vegetation.
6.1 Detect, locate and identify obstacle	K	Recognize terrain features or vegetation changes indicating the presence of rocks, holes or woody residue.	- When obstacles are in the path of the blade, workers have to make quick decisions (sometimes in less than 1 second) as to how to work the zone.
6.2 Assess kickback risk level	K	Effects of hitting an obstacle. Ways to prevent kickback. Distance to keep between blade and obstacle.	- If obstacles are lower than 60 cm, worker chooses either to step over or work around the obstacle. This choice applies to bigger obstacles like slash and slash piles.
6.3 Assess possibility to step over	K	Maximal height that can be stepped over. Ground firmness, presence of hidden holes or other obstacles influences maximal height that can be stepped over.	- In the presence of rocks, workers are more careful because consequences of hitting a rock with the blade are costly, in time and money, changing blade or sharpening it.
6.4 Assess need to cut vegetation in the 10-cm radius around the obstacle	K	Refer to 6.2 if obstacles are in blade's path.	- When a crop tree is close to an obstacle, the risk of cutting the crop tree is higher because the blade can kick back on the obstacle. This situation requires more attention from the worker.
6.5 Choose path	K	Refer to 6.2 if obstacles are in blade's path.	- Path is chosen according to obstacle dimensions and configuration.
6.6 Readjust path according to changes in 2 and/or 3.1 and/or 3.2	K	Pre-estimate potential impact of changing direction to cope with an obstacle in relation to wind and slope orientation.	- Worker has to return to his original path after dealing with an obstacle, to ensure complete treatment of the whole area.
7. End workday			
7.1 Return to road side	S	Orientation skills to find direction of the road.	- The brushsaw is often left in the field when treating the far end of the work area.
7.2 Bring backpack & gas	S	Remember to take backpack	
7.3 Bring brushsaw	R	To save energy, minimize transported weight. If safe (not too many people present in the zone), leave the brushsaw hidden in the field weeknights.	
7.4 Prepare for next workday	R	Preparing for next day reduces time losses during workdays.	
7.4.1 machine maintenance	K	Know how to repair brushsaw, to pose diagnostic on parts' wear.	- Machine maintenance is usually done on Fridays, or during business hours only if replacement parts are needed.
7.4.2 Sharpen blades, fill up gas and oil	S	Master sharpening technique	- If needed, maintenance and small repairs are done weeknights. Efficient brushcutters file blades in the evening and quickly refresh sharpening as needed. Check if needed when the gas tank is empty.

Tableau 4-2 Adaptation of work patterns to cope with obstacles

Obstacle type or situation	Effect	Strategies used by workers to adapt
Vegetation		
Competing vegetation density	High density, reduces productivity.	- work faster when possible (i.e., low density).
Lack of visibility of crop trees and / or ground (Figure 4-1a)	Increases risk of cutting crop tree, hitting an obstacle or falling.	- slow down. - cut vegetation in two passes: over crop tree height, then 15 cm over ground or obstacles.
Crop tree relative height compared to competing vegetation. (Figure 4-1b)	Small crop trees and higher competing vegetation increase risk of accidentally cutting crop trees.	- slow down.
Competing vegetation basal diameter	With basal diameter higher than 3 cm, it is harder to cut and more demanding for the operator and the machine.	- keep the blade well sharpened. - use wood blade (8 to 24 teeth) instead of grass blade (3 teeth) when diameter of stems to cut is higher than 2 cm.
Rocks		
Rocks (small) (Figure 4-1c)	Hitting a rock, causes time loss to sharpen or replace blade. Hitting a rock or slowing down while approaching it reduces productivity. Hitting a rock and continuing working without replacing the blade, increases physical demand on worker.	- slow down when rocks are present. - have extra blades on hand and change as soon as possible.
Boulders (rocks bigger than 30 cm diameter) (Figure 4-1d)	Site preparation can create holes close to the boulder because the heavy machinery slightly moves the boulder. Crop trees or competition that are close to boulder increase the risk of hitting it.	
Woody obstacles		
Stumps	Stumps close to a crop tree to release increase risk of hitting it and causing a kickback, which would result in accidentally cut the crop tree.	- Increase care when this situation occurs.
Stump sprouts	Competing vegetation around stump sprouts make it harder to do quality release work.	- change work method: clear competing vegetation around and then cut the sprouts.
Slash	Slash is slippery when wet. If lower than 60cm, it can be stepped over. Branches increase kickback risk.	- slow down. Cut branches to prevent kickback. - change path if obstacles >60 cm over ground.
Slash piles	High residue over ground, increases risk of falling.	- change path to bypass obstacles.
Woody residue	Long residue in the way, forces worker to change trajectory. High residue over ground, forces worker to change trajectory. Slippery when wet.	- cut competing vegetation on one side, then go back to original trajectory. Deal with second side when returning in the next row. - slow down.
Snags and residual trees	Snags or residual trees are often accompanied by, other residue on the ground.	- cut competing vegetation on one side, then go back to original trajectory.

Tableau 4 2 Adaptation of work patterns to cope with obstacles. (continued)

Obstacle type or situation	Effect	Strategies used by workers to adapt
Windfall	High windfall over ground forces worker to change trajectory.	- cut competing vegetation on one side, then go back to original trajectory. - slow down to prevent hitting branches. Cut branches if possible.
Other variables		
Obstacle height	If obstacles are higher than 60 cm, worker cannot keep the same trajectory.	- cut competing vegetation on one side, then go back to original trajectory. Deal with second side when returning in the next row.
Holes and ruts	If hidden by vegetation, they increase risks of tripping and falling.	- walk in cut vegetation - look where to set foot
Ground softness	If ground too soft, then lower stability and higher physical effort.	- walk carefully. Ensure solid balance by careful feet placement before cutting.
Insects	Workers must slow down around a bee nest.	- place flag to locate it for him and others
Terrain slope and wind orientation		
wind and terrain slope towards the far end of the work area	If wind comes from the back, cut vegetation falls onto untreated area and causes time loss and higher risk of accidentally cutting a crop tree. With facing wind, cut vegetation falls on the worker and causes time loss to get rid of it.	- start from the road, do one strip towards the end of the work area, then start working perpendicularly to the wind and slope from the far end, following planting rows if possible.
wind direction opposite to slope. Wind towards road	Slope causes extra physical work. The highest physical demand is when climbing a hill. Working uphillwith slope demands an extra effort to keep good balance.	- start from the road, work perpendicularly to the slope towards the end of the work area, following planting rows if possible.
wind direction perpendicular to slope		- start from the road, do one strip towards the end of the work area, then start working diagonally to the wind and slope from the far end towards the road, following planting rows if possible.
no wind, slope perpendicular to road		- start from the road, do one strip towards the end of the work area, then start working perpendicularly to the slope from the far end towards the road, following planting rows if possible.
Wind, no slope		- start from the road, do one strip towards the end of the work area, then start working perpendicularly to the wind and slope from the far end, following planting rows if possible.
no wind, no slope		- start from the road, do one strip towards the end of the work area; - work in the planted rows direction, which makes it easier to find the next crop tree

Tableau 4-3 Proportion of observation time and total duration per participant to cope with obstacles, extracted from head-mounted video analyses (n = 18 valid video sequences)

		Proportion of observation time (%)				Total duration in video sequence			
Obstacle type	Number of observations	Mean	Standard deviation	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Minimum	Maximum
Slash pile	18	16.3	9.3	4.3	41.1	443.8	351.9	118.6	1492
Slash	18	14.7	10.1	5.1	45	414.3	395.4	114	1564.1
Stumps	18	6.1	3.7	1.9	14.8	173.6	143.9	29.7	602.6
Small rocks	16	3.2	3.5	0.1	12.7	104.4	132.8	2.1	502.3
Boulders	16	2.8	3.6	0.1	10.6	88.7	128.2	5.9	383.2
Snags	7	0.8	0.7	0.1	2	28.3	21.7	3.9	57
Multiple obstacles	14	3.1	5.1	0.2	16.8	100.7	155.1	4.7	476
Holes	2	0.7	0.4	0.4	1	24.7	15.1	14.1	35.4
Bumps	2	0.2	0.2	0.1	0.4	9.4	9.3	2.8	16
Wasphive	1	0.8	.	0.8	0.8	29	.	29	29
Walking without cutting	10	1.5	1.2	0.2	3.5	46.4	40	10.1	123.3
No obstacles	18	53.9	13	32.2	76.7	1567.2	816.4	225	3260.9

Tableau 4-4 Cognitive workload ratings for frequent combinations of obstacles or factors. Scale: 0= none; 1= very low; 3= low; 5= median; 7= high; 9= very high; 10= maximum possible.

Description	Number of simultaneous variables to consider	Difficulty	Uncertainty	Controllability	Time constraint	Frequency (number / day)
Terrain slope, wind and plantation row orientation						
Wind and terrain slope towards the far end of the work area	3	3	1	0	0	>1
Wind direction opposite to slope and towards road	3	3	1	0	0	>1
Wind direction perpendicular to slope	3	3	1	0	0	>1
No wind, slope perpendicular to road	3	2	1	0	0	>1
Wind, no slope	2	2	1	0	0	>1
No wind, no slope	1	0	0	0	0	>1
Combinations of factors added to terrain slope, wind and plantation row orientation						
High density of competing vegetation (low visibility of ground and crop trees)	4	5	6	0	7	≅1000
High density of competing vegetation + rocks	5	6	7	0	8	≅ 200
High density of competing vegetation + woody residue	5	6	7	0	8	≅ 300
High density of competing vegetation + rocks + woody residue	6	7	8	0	9	≅ 200
High density of competing vegetation + rocks + woody residue + soft ground	7	8	9	0	9	0 to 200
High density of competing vegetation + small crop trees + rocks + woody residue + no plantation rows	8	10	10	0	10	≅ 50

CHAPITRE 5 EFFET DES OBSTACLES DE TERRAIN SUR LA VITESSE DE DÉPLACEMENT DES DÉBROUSSAILLEURS

Denise Dubeau[1], Daniel Imbeau[2], Luc G. LeBel[3]

1. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la Recherche forestière, Québec (Qc), Canada
2. École Polytechnique de Montréal, Département de mathématiques et de Génie industriel, Montréal (Qc), Canada
3. Université Laval, Département des Sciences du bois et de la forêt, Québec (Qc), Canada

Mots clé

Dégagement de la régénération, obstacles de terrain, productivité, vitesse de déplacement, travail à forfait,

5.1 Résumé

Ce projet visait à mesurer la relation entre la productivité et le type d'obstacles que le débroussailleur trouve sur son chemin pendant qu'il effectue le dégagement de la régénération afin de permettre d'ajuster les taux forfaitaires accordés pour ce traitement. Des études de temps ont été effectuées avec la participation de 19 sujets employés par 11 entrepreneurs sylvicoles différents sur des sites répartis dans la province de Québec. Les trajectoires empruntées par les débroussailleurs ont été enregistrées pendant une période d'observation. Les heures exactes du début des activités observées (débroussaillage, le remplissage du réservoir de gaz, limage de la lame, repos) ont été enregistrées ainsi que les obstacles qui ont entravé la progression du débroussailleur. Une caméra légère était fixée sur le casque de sécurité du débroussailleur pour capter la zone de travail de la débroussailleuse. Des études de temps ont été effectuées sur les séquences vidéo pour mesurer l'heure précise de début et la durée du travail autour de chaque type d'obstacle ainsi que le temps en l'absence d'obstacle. Les données de toutes les sources ont été appariées pour permettre des croisements. Les tests statistiques ont révélé que seulement les résidus et les amas de résidus réduisent significativement la vitesse de marche de 41 mètres / heure ($p = 0,0042$), et par conséquent réduisent la productivité du débroussailleur. Plus de la moitié du temps de travail observé était sans obstacle.

5.2 Introduction

Le dégagement de la régénération est une opération nécessaire après la plantation ou la récolte sur les sites où la repousse végétale est agressive afin de permettre la survie et la croissance des arbres reboisés ou poussant naturellement (Jobidon et al. 2003; Thompson et Pitt 2003). Ce traitement survient entre 3 et 8 ans après la récolte ou la plantation (Thiffault et Roy 2010). Les méthodes utilisées pour dégager la régénération sont le dégagement chimique, le dégagement mécanique effectué à l'aide d'outils mécaniques montés sur des machines à chenilles ou sur roues, ou le dégagement manuel effectué par des travailleurs sylvicoles portant une débroussailleuse. À l'échelle canadienne, le dégagement manuel est privilégié sur environ 29% des superficies dégagées, soit 57 000 ha sur 196 500 ha (Canadian Council of Forest Ministers 2010). Au Québec, les herbicides chimiques ne sont plus employés depuis 2001 et le dégagement de la régénération repose exclusivement sur le travail des débroussailleurs manuels (Thiffault et Roy 2010). Une superficie moyenne de 11 000 hectares par an a fait l'objet d'un dégagement de la régénération chaque année au Québec entre 2002 et 2008 (Parent et Fortin 2010).

Les travailleurs sylvicoles qui effectuent ce traitement sont généralement payés sur une base forfaitaire (prix à l'hectare traité). Ce mode de rémunération génère une pression à produire qui peut être aggravée lorsque le taux forfaitaire est insuffisant ou ne tient pas compte des variations dans les conditions du terrain (Bender et al. 2010; Toupin 2004). Le travail de débroussailleur est saisonnier parce qu'il doit être réalisé en l'absence d'accumulation importante de neige au sol et pendant que les chemins forestiers sont praticables, ce qui implique une période de chômage d'environ six mois par année. En conséquence, les travailleurs adoptent des stratégies pour maximiser leurs revenus pendant la

période de travail. Ces stratégies peuvent augmenter les risques pour leur santé et sécurité au travail (Bender et al. 2010; Johansson et al. 2010).

Les stratégies adoptées pour maximiser la productivité dépendent de la possibilité d'atteindre l'objectif salarial qu'ils se fixent et du niveau de difficulté que représentent les terrains à traiter (Paarsch et Shearer 1996, 2009; Toupin et al. 2007). Les principaux critères définissant la difficulté du terrain selon les débroussailleurs sont la densité végétale, l'encombrement par des résidus ligneux et autres obstacles, la pente du terrain (Langlois 2004; Toupin et al. 2007).

Des recherches antérieures ont montré que la productivité des débroussailleurs en dégagement de la régénération était reliée à la densité de la végétation et à l'abondance d'obstacles nuisibles présents sur le terrain (Dubeau et al. 2011b; Toupin et al. 2007). Dans le modèle statistique le plus robuste, l'abondance de végétation compétitrice explique plus de la moitié (R^2=0,54) de la variabilité de temps effectif requis pour traiter un hectare et le nombre d'obstacles nuisibles explique 7% lorsqu'intégré en 3e position dans une régression contenant la densité de végétation compétitrice. Cette variable explique 18% des variations de productivité des débroussailleurs dans une régression simple. Dans cette étude, une analyse en composantes principales (ACP) suggérait que les principaux obstacles reliés aux variations de productivité étaient les résidus et les souches. Cependant, la prédiction du temps sur la base des composantes est peu robuste et nécessite plusieurs mesures sur le terrain. Une méthode moins coûteuse devrait être développée à partir d'une connaissance plus précise des relations entre les types d'obstacles et la productivité du travailleur. D'autres recherches se sont intéressées à la quantité d'ostacles, mais aucune ne présente de modèle reliant les obstacles présents sur le terrain avec la productivité (Needham et Hart 1991; Samset 1986; Svensson 1971). Ces recherches mesuraient l'ensemble des obstacles présents sur le terrain.

Une sélection d'obstacles ciblée vers ceux qui produisent un effet sur la productivité pourrait donner de meilleurs résultats.

Au point de vue cognitif, des entrevues et observations de 41 débroussailleurs ont révélé que le travail de débroussailleur se complique lorsque la végétation compétitrice est dense. Tous les débroussailleurs ont mentionné que la perte de visibilité des arbres à dégager et du sol qui est causée par une densité forte de compétition végétale avait un impact sur leur production. Aucune autre variable n'a été mentionnée par tous les participants. Il a également été observé que la présence d'obstacles complique encore davantage le travail cognitif du débroussailleur lorsque la densité végétale est importante, ce qui appuie les modèles statistiques (Dubeau et al. 2011a).

Cependant, l'effet réel des différents types d'obstacles sur la productivité des débroussailleurs n'est pas connu. Une telle connaissance pourrait permettre de cibler les obstacles ou configurations réellement influentes et d'en tenir compte dans les modèles de prédiction de la productivité servant à déterminer la rémunération des débroussailleurs ou de tenter d'éliminer ces situations à la source. Des débroussailleurs ont été observés sur le terrain durant leur travail, puis des analyses détaillées de la productivité en fonction du type d'obstacle de terrain rencontré ont été effectuées pour tenter de répondre à cette question.

5.3 Matériel et méthodes

5.3.1 Participants

Un total de 19 débroussailleurs ont participé à l'étude, dont huit en 2005 et onze en 2007. Ces débroussailleurs provenaient de onze entreprises sylvicoles et les observations ont été réparties dans six régions du Québec (Figure 5-1). Tous les participants ont lu et signé un

formulaire de consentement informé décrivant les objectifs et le déroulement de l'étude, ainsi que la façon dont ils étaient compensés pour les pertes de temps occasionnées par leur implication dans le projet de recherche. Les critères de sélection des participants étaient : 1) avoir une expérience d'au moins une saison complète afin que la majorité des apprentissages soient maîtrisés; 2) avoir une productivité se situant dans la moyenne parmi les travailleurs de leur entreprise afin d'obtenir un échantillon représentatif de la moyenne générale au Québec et de faciliter l'application des résultats, le cas échéant; 3) avoir une technique de travail stable afin de minimiser la variabilité intra-sujet. Les participants étaient âgés de 43 ans en moyenne (20 à 60, s=10). Leur niveau d'expérience moyen était de 8 ans (2 à 20, s=6).

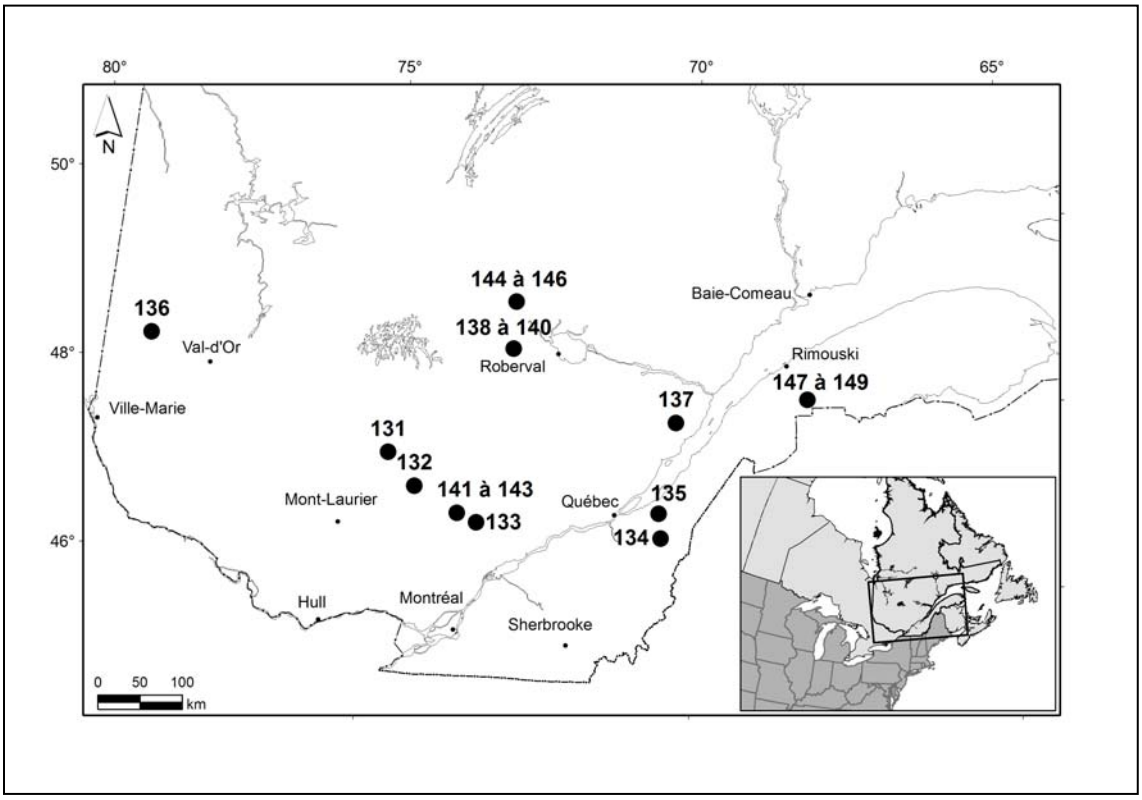


Figure 5-1 Localisation des sites d'études visités en 2005 (# 131 à 137) et en 2007 (# 138 à 149)

En 2005, chaque participant était observé à trois reprises sur trois journées consécutives pendant lesquelles les mesures étaient répétées. Cette méthode visait à obtenir des données sur un maximum possible de combinaisons d'obstacles pour un même travailleur et à mesurer les changements apportés par ces obstacles dans les stratégies adoptées par le débroussailleur. En 2007, trois participants par semaine étaient sélectionnés afin d'augmenter suffisamment le nombre de participants pour assurer la validité statistique des résultats de l'étude.

5.3.2 Inventaire avant traitement

Un inventaire avant traitement était effectué par l'équipe de recherche selon les pratiques habituelles au moment de l'arrivée sur le terrain afin de caractériser les terrains et être en mesure de situer les nouveaux sujets en comparaison avec ceux de l'étude précédente (Québec 2004). Des placettes d'échantillonnage circulaires étaient disposées systématiquement dans la zone de travail prévue par le débroussailleur pour les 3 journées de la semaine. Les variables mesurées étaient le pourcentage de couverture par les framboisiers, les fougères et les épilobes (FFE), la couverture de l'ensemble des espèces, le nombre d'arbres et d'arbustes par hectare, une estimation subjective de la visibilité des plants à 1 mètre du centre de la placette (l'observateur voit ou ne voit pas le plant à 1 m de distance). À la fin de la période d'observation, les obstacles numérotés étaient mesurés en mètres à l'aide d'un ruban à mesurer (longueur, largeur et hauteur moyenne au-dessus du sol).

5.3.3 Observations

Les activités de chaque participant étaient observées pendant qu'il effectuait le dégagement de la régénération. L'observateur se tenait à une distance sécuritaire du

débroussailleur (>25 m). Les activités enregistrées étaient: temps de travail principal (temps effectif de débroussaillage), temps d'entretien (limage de la lame), temps de remplissage (remplissage du réservoir d'essence), temps personnel (pauses), et temps d'interruption (relié au projet de recherche) (Bjorheden et Thompson 1995). Les périodes de temps associées au projet de recherche étaient retranchées lors de l'analyse des données. L'observateur notait la nature des obstacles que le travailleur croisait sur son chemin et numérotait l'obstacle avec de la peinture pour pouvoir le mesurer après l'étude.

En 2005, la période d'observation durait le temps nécessaire pour compléter deux cycles de travail afin de ne pas influencer l'organisation du travail du débroussailleur. Un cycle correspond au temps nécessaire pour vider le réservoir d'essence (entre 45 et 75 minutes), prendre une courte pause, faire le plein et limer au besoin. Suite à des problèmes concernant le calcul des superficies pour certains secteurs, la méthode a été changée en 2007. Les participants étaient observés pendant le débroussaillage d'une zone de 0,12 ha, soit 30x40 m ou 20*60 m selon la configuration du terrain, afin d'obtenir des mesures de productivité les plus précises possible et de faciliter la localisation des placettes d'échantillonnage nécessaires à l'inventaire avant traitement. Le dégagement de cette surface durait entre 1 et 2 cycles.

5.3.4 Point de vue du travailleur

Une caméra était fixée sur le casque du participant et dirigée vers l'avant de sorte que la lame de la débroussailleuse soit au centre de l'image lorsqu'il était en position de travail (Sony HQ2 550 TVL Headset Camera) (Figure 5-2). Les données vidéo étaient enregistrées à l'aide d'un appareil portatif de petite taille (12,4 cm x 7,9 cm x 2,5 cm) muni d'un disque dur (Archos PVR-AV480). La fréquence d'enregistrement était de 30 images par seconde et le logiciel d'enregistrement compressait les vidéos à 2 Go par heure. Un nouveau fichier était

enregistré chaque heure. Le dispositif d'enregistrement était relié à la caméra fixée sur le casque et porté par le débroussailleur dans un sac d'hydratation. Afin de faciliter l'appariement de l'ensemble des sources de données, l'heure de tous les appareils était synchronisée avec l'heure exacte via les récepteurs de signal de positionnement global (Global Positioning System ou GPS) utilisés dans l'étude (Garmin GPSmap 60cx et 76). Les séquences vidéo obtenues de la caméra fixée au casque visaient à mesurer le temps requis pour composer avec chaque type d'obstacle ainsi que les stratégies de déplacement employées par les débroussailleurs en présence et en absence d'obstacles. La durée moyenne de temps effectif valide capté pendant une séquence vidéo était de 44 minutes (min= 8, max= 92 minutes). Les 41 séquences vidéo de la caméra fixées sur le casque du débroussailleur totalisaient 57 heures disponibles, dont 36 étaient valides.

Figure 5-2 Débroussailleur portant les appareils de mesure (caméra fixée au casque et enregistreur, récepteur GPS)

Les séquences vidéo de la caméra fixée au casque ont été analysées afin d'extraire le temps passé à interagir avec un obstacle. Un logiciel spécialisé d'étude de temps sur vidéo était utilisé à cette fin (Chappe Software 2007). Chaque heure de vidéo nécessitait entre trois et quatre heures d'analyse, selon le nombre d'obstacles et leur configuration. Le temps pendant lequel le travailleur travaillait autour d'un obstacle était comptabilisé pour les périodes pendant lesquelles l'obstacle était situé dans le rayon d'action de la lame de la débroussailleuse, soit le double du diamètre de la lame (Figure 5-3). Ainsi, pour une souche, le temps de traitement était généralement comptabilisé d'un seul tenant parce que le débroussailleur faisait le tour de la souche et poursuivait ensuite son chemin. Par contre, le débroussailleur longeait généralement les obstacles longs et surélevés en dégageant une bande de 2 mètres d'un côté de l'obstacle, puis en dégageant l'autre côté lors de son retour. Dans ces cas, le mouvement de balayage de gauche à droite était composé de portions de temps pendant lesquelles l'obstacle était dans la zone d'action de la lame et d'autres portions de temps pendant lesquelles il n'y avait pas d'obstacle. Le dégagement autour de cet obstacle était donc composé de la somme des courtes périodes pendant lesquelles un obstacle était dans le rayon d'action de la lame. Le faible champ de vision de la caméra (82°) ainsi que les fréquents changements de direction des débroussailleurs empêchaient l'analyste d'avoir une vue d'ensemble suffisante pour déterminer clairement le début et la fin d'un obstacle de grandes dimensions.

a) Espace restreint et risque de rebond | b) Amas de résidus

Figure 5-3 Captures d'écran extraites de séquences vidéo de la caméra fixée au casque du débroussailleur.

5.3.5 Vue d'ensemble

Pour obtenir une vue d'ensemble des activités du débroussailleur et faciliter l'interprétation des séquences vidéo provenant de la caméra fixée au casque, des séquences vidéo complémentaires étaient captées. Celles-ci étaient enregistrées sur bande magnétique à l'aide d'une caméra externe opérée par un autre observateur pendant toute la période d'observation, ainsi que pendant les entrevues qui étaient menées après la période d'observation (Caméra vidéo Sony DCR-TRV730 Digital8 Handycam). La caméra était fixée sur un monopode de façon à permettre à l'observateur de suivre aisément les déplacements des débroussailleurs. Afin de faciliter l'appariement des séquences vidéo, l'affichage de date et heure d'une montre préalablement synchronisée avec l'heure des récepteurs de position GPS utilisés dans l'étude était filmée pendant 5 à 10 secondes au début de toutes les séquences vidéo. Les séquences enregistrées sur bande magnétique étaient ensuite numérisées à l'aide du logiciel Videowave 7 (Roxio 2004) et compressées à environ 2,8 Go par heure d'enregistrement. Au total, 63 heures de vidéo étaient disponibles pour supporter les analyses.

5.3.6 Enregistrement des trajectoires des débroussailleurs

Des récepteurs de signaux de positionnement global par satellite (GPS) étaient installés sur le sac d'hydratation contenant l'enregistreur vidéo que portait le débroussailleur et enregistraient la position du travailleur toutes les 15 secondes pendant la période d'observation (Garmin GPSmap 60cx et 76). Les coordonnées de position étaient enregistrées en mode point (tracklog). À la fin de la journée, les données de position étaient exportées et sauvegardées à l'aide du logiciel DNR Garmin {Department of Natural Ressources of Minnesota, 2005 #2175} pour analyse ultérieure.

5.3.7 Description des variables

Les fichiers mis en forme à partir des données du récepteur GPS comprenaient les coordonnées géographiques des points enregistrés toutes les 15 secondes ou 20 secondes (Latitude et Longitude en degrés avec 8 décimales), altitude au-dessus du niveau de la mer en mètres Date (aa/mm/jj) et heure (hh:mm:ss) de collecte des données. La vitesse était ramenée à une échelle commune pour les besoins de l'analyse, soit en mètres par heure de travail.

Les fichiers des analyses extraites des séquences vidéos provenant de la caméra montée sur le casque comprenaient l'identification du participant, l'identification du type d'obstacle (résidu, amas de résidus, souche, pierre, boulder, chicots, dépression ou bosse) (variable catégorique), l'heure de début, l'heure de fin et la durée (variable continue) de traitement d'obstacles ou en l'absence d'obstacles en secondes depuis le début de la séquence vidéo. L'heure de début de la séquence était ensuite utilisée pour situer la séquence vidéo au bon moment de la journée. Pour les besoins de l'analyse, les temps mesurés étaient ramenés sur une échelle commune, soit en minutes par heure de travail.

Les fichiers d'observation contenaient l'heure de début et la durée de chaque activité effectuée par le débroussailleur durant la période d'observation. Les activités étaient : temps de travail principal (temps effectif de débroussaillage), temps d'entretien (limage de la lame), temps de remplissage (remplissage du réservoir d'essence), temps personnel (pauses), et temps d'interruption (relié au projet de recherche). Également, la base de données contenait l'heure (hh:mm:ss) et le type d'obstacle lorsque le débroussailleur était confronté avec un obstacle, ainsi que la réaction du débroussailleur face à l'obstacle en question..

5.3.8 Appariement des données des différentes sources

La figure 5-4 schématise les relations entre les variables, les analyses et les résultats obtenus. Des données avaient été recueillies entre 2000 et 2002 avec la participation de 91 débroussailleurs (Dubeau et al. 2011b). Des mesures avaient été recueillies sur la consommation de temps (temps effectif requis pour traiter un hectare) ainsi que sur les facteurs de site, la densité de végétation et les obstacles nuisibles. Cette étude visait à élaborer un modèle de prédiction de la productivité des débroussailleurs effectuant du dégagement de la régénération. Il était destiné à ajuster les taux forfaitaires accordés par le gouvernement pour ce traitement. Cette base de données a été réanalysée avec des méthodes d'analyse multivariée afin d'examiner plus avant les relations mathématiques entre les obstacles et le temps effectif requis pour traiter un hectare . Les résultats de ces analyses ont orienté les collectes de données effectuées au cours des années 2005 et 2007.

Lors de ces collectes, une attention spéciale portée sur les obstacles au moyen de mesures plus fines (trajectoires, angle de vision du travailleur, entrevues). Les observations obtenues en 2005 et 2007 ont été utilisées pour effectuer des études de temps sur séquences vidéo afin d'obtenir des mesures détaillées du temps total requis pour traiter avec chaque type d'obstacle ou en absence d'obstacle.

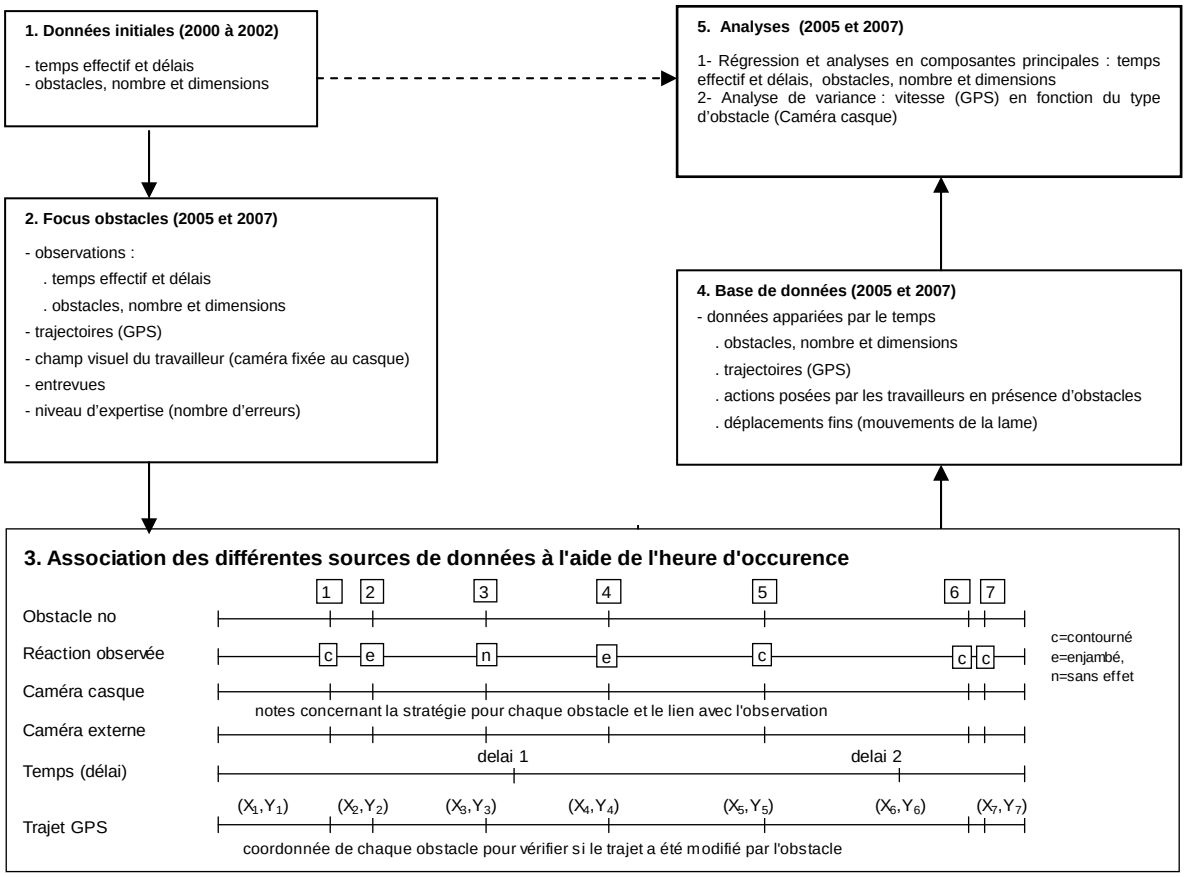


Figure 5-4 Relations entre les sources de données et analyses effectuées

Au total, quatre bases de données temporelles ont été obtenues lors des observations effectuées en 2005 et en 2007, les données de position, les données d'observation, les données descriptives sur la végétation et la densité d'obstacles, et enfin la durée passée à composer avec les obstacles obtenue à partir des analyses vidéo. L'appariement de ces quatre bases de données à partir de l'heure (hh:mm:ss) a été effectué à l'aide du logiciel Excel, au

moyen d'une fonction de recherche de la valeur la plus proche {Microsoft Corporation, 2003 #2155}. Cette opération a permis de relier la vitesse d'avancement du travailleur aux obstacles qu'il rencontrait sur son chemin, à ceux qui étaient identifiés par l'observateur et aux données descriptives (Figure 5-5). Des analyses de variance ont ensuite été effectuées sur les données appariées dans le temps, puis comparées avec les résultats de l'étude précédente (2000 à 2002) et ceux issus de l'analyse des entrevues..

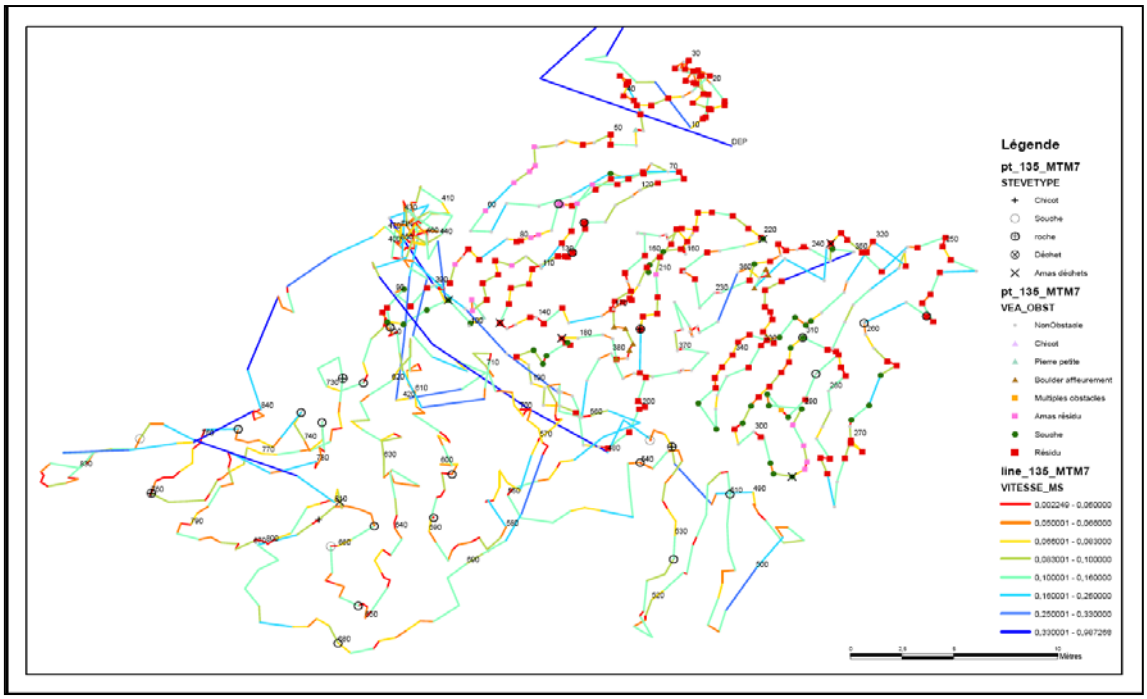


Figure 5-5. Superposition de la trajectoire empruntée par les débroussailleurs, des observations extraites de la caméra fixée au casque, et des obstacles identifiés par l'observateur pendant l'étude.

5.3.9 Trajectoires empruntées par les débroussailleurs

Les tracés des trajectoires empruntées par les débroussailleurs ont été examinés pour tenter de faire la correspondance entre la présence d'obstacles et des changements de

direction, mais l'analyse n'est pas allée plus loin à cause de l'intervalle de temps trop élevé entre les positions enregistrées (Figure 5-5).

5.3.10 Analyses statistiques

Une analyse de variances a été effectuée en intégrant un effet fixe du type d'obstacle et un effet aléatoire de la corrélation entre les observations d'un même sujet (procédure MIXED du progiciel SAS) (SAS Institute Inc. 2004). La variable dépendante était le temps d'interaction avec un obstacle en minutes par heure effective et la variable indépendante était le type d'obstacle.

Une seconde analyse de variances a été effectuée en intégrant un effet fixe du type d'obstacle et un effet aléatoire de la corrélation entre les observations d'un même sujet. La variable dépendante était la vitesse en mètres par heure effective. L'analyse a été effectuée avec la procédure MIXED du progiciel SAS (SAS Institute Inc. 2004). La vitesse moyenne d'avancement du débroussailleur a été comparée entre les différents types d'obstacles et en l'absence d'obstacles à l'aide de contrastes.

5.4 Résultats

5.4.1 Facteurs de site et productivité

Le tableau 5-1 présente les statistiques descriptives concernant les terrains étudiés en 2005 et en 2007. Deux superficies n'ont pu être calculées en 2005 à cause d'une défaillance non détectée du récepteur GPS qui était posé sur le dos du travailleur. Les calculs découlant de la superficie ne pouvaient donc pas être effectués. Les participants ont été en moyenne plus productifs de 5,1 heures/ha que ce que prédit le modèle actuellement en application au

Québec malgré des densités équivalentes d'arbres et arbustes ainsi que d'obstacles (Dubeau et al. 2011b). Le pourcentage moyen de couverture de framboisiers, fougères et épilobes (FFE) est de 10% supérieur à la moyenne observée dans l'étude précédente, ce qui hausse le temps de travail principal prédit de 2,6 heures/ha par rapport à des couvertures équivalentes (Dubeau et al. 2011b).

Tableau 5-1 Statistiques descriptives des terrains étudiés

Variable	N	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Pourcentage de couverture de FFE[a]	19	27,72	22,31	3	74
Densité d'arbres et arbustes de hauteur > 1 m[b]	19	21700	21870	0	77500
Densité d'obstacles nuisibles[b]	17	255	107,2	100	543
Superficie traitée pendant la période d'observation[c]	17	0,14	0,07	0,04	0,36
Temps de travail principal observé[d]	17	13,11	7,46	6,07	32,01
Temps de travail principal prédit (modèle)[d]	17	18,6	6,47	9,47	29,85

[a] FFE = Framboisiers, fougères et épilobes ; [b] densité = nombre/hectare ; [c] hectares ; [d] temps de travail principal = heures / hectare; Modèle de prédiction employé : temps effectif = 3,06 +(0,26 * couverture de FFE) +(0,00012*densité de tiges de hauteur supérieure à 1m)+(0,0022*densité d'obstacles) (Dubeau et al. 2011)

Le tableau 5-2 présente la durée moyenne d'interaction avec les obstacles et la durée en absence d'obstacle estimée (minutes par heure). Les données concernent 17 participants ayant une ou deux séquences vidé provenant o de la caméra fixée sur le casque. Les 17 participants ont passé en moyenne plus de la moitié du temps à travailler dans des zones sans obstacles (37,6 minutes/heure). Le test sur les effets fixes était significatif ($p<0,0001$).

Tableau 5-2 Durée d'interaction par type d'obstacles en minutes par heure (N=28 séquences vidéo de 17 participants).

Évènement	Valeur estimée	Écart-type	Degrés de liberté	Valeur du test t	Pr > |t|
Absence d'obstacles	37,6	0,9986	191	37,65	<,0001
Amas de résidus	8,0	1,0568	191	7,61	<,0001
Résidus	7,2	0,9986	191	7,16	<,0001
Multiples obstacles	2,3	1,1816	191	1,92	0,0562
Boulders	1,6	1,1266	191	1,39	0,1668
Pierres	1,6	1,1018	191	1,47	0,1434
Souches	3,3	0,9986	191	3,31	0,0011
Chicots	0,4	1,671	191	0,23	0,8152

5.4.2 Obstacles et vitesse d'avancement

Le tableau 5-3 présente la vitesse moyenne d'avancement du travailleur, estimée pour chaque type d'obstacle (mètres par heure). Seulement quatre journées étaient valides, c'est-à-dire pour lesquelles tous les appareils de mesure ont fonctionné correctement. Pour les 15 autres participants, soit des coordonnées GPS étaient manquantes, soit des séquences vidéo étaient inutilisables ou manquantes.

Tableau 5-3 Moyenne des moindres carrés de la vitesse (m/heure) par type d'obstacles (N=4 participants)

Catégorie d'obstacle	Moyenne estimée	Erreur type	DDL	Valeur du test t	Pr > |t|
Absence d'obstacle	331,52	42,9795	4,07	7,71	0,0014
Amas de résidus	275,54	49,5591	7,19	5,56	0,0008
Résidu	292,41	44,7347	4,77	6,54	0,0015
Multiples obstacles	317,13	93,6267	87	3,39	0,0011
Petite pierre	354,69	81,9835	52,6	4,33	<,0001
Boulder	276,89	73,0632	33,5	3,79	0,0006
Souche	330,93	48,3532	6,51	6,84	0,0003

Pour cet échantillon restreint, aucun des contrastes entre la vitesse de déplacement en présence des types d'obstacles n'était significativement différent de la vitesse sans obstacles (p= 0.1314) (contrastes non présentés). La petite taille de l'échantillon pour certains types d'obstacles réduisait la puissance du test statistique.

Les types d'obstacles présentés au tableau 5-3 ont été regroupés selon leur similitude afin de réduire le nombre de catégories et permettre une comparaison des vitesses (Tableau 5-4). La vitesse en absence d'obstacles reste inchangée; la classe nommée « Résidus » renferme les résidus, les amas de résidus, ainsi que les obstacles multiples; la classe nommée « Pierres » comprend les pierres et les boulders; et les souches forment la dernière classe. L'effet aléatoire du sujet n'était pas significatif (p=0,0825). Le test sur les effets fixes (classes de types d'obstacles) était significatif (p= 0.0341). Un contraste était significatif, l'absence d'obstacles comparée avec la classe nommée « Résidus ». La vitesse de déplacement du débroussailleur en l'absence d'obstacles était en moyenne de 41,6 mètres par heure plus rapide qu'en présence de résidus, d'amas de résidus ou d'obstacles multiples.

Tableau 5-4 Comparaisons entre les classes d'obstacles et l'absence d'obstacles (N=4 participants).

Contrastes	Différence estimée	Erreur type	Degrés de liberté	Valeur du test t	Pr > |t|
Sans obstacle – Pierres[1]	22,6	45,9407	1106	0,49	0,6222
Sans obstacle – Résidus[2]	41,6	14,5226	1109	2,87	0,0042
Sans obstacle – Souches[3]	0,48	24,1146	1107	0,02	0,9841

1. La catégorie « Pierres » inclut les boulders. 2. La catégorie « Résidus » inclut les résidus, les amas de résidus et les obstacles multiples. 3. La catégorie « Souches » contient uniquement les souches

Enfin, l'analyse graphique des trajectoires révèle que la correspondance entre les observations issues de la caméra fixée au casque correspondent imparfaitement aux obstacles identifiés par l'observateur (Figure 5-5). Pour ce travailleur, les changements de direction

semblent reliés à la présence de résidus, mais pour d'autres cas, les trajectoires sont plus systématiques malgré la présence d'obstacles (Annexe).

Il n'était donc pas possible d'associer avec précision les mesures de dimensions des obstacles recueillies sur le terrain avec les observations extraites de la caméra fixée au casque. Cependant, les mesures de vitesse en fonction des obstacles étaient utilisables et ont permis d'estimer les différences de vitesse de déplacements entre les classes d'obstacles et l'absence d'obstacles présentées plus haut.

5.5 Discussion

Cette étude a permis de mesurer pour la première fois les effets directs des obstacles sur la vitesse de déplacement des débroussailleurs en dégagement de la régénération, ainsi que de discriminer entre les types d'obstacles ceux qui ont le plus d'impact sur le travail des débroussailleurs. La plupart des études publiées à ce jour concernent l'éclaircie précommerciale, Ces études n'ont pas trouvé de relation significative entre les obstacles et la productivité et aucune d'elles ne présente la vitesse de déplacement en fonction des obstacles (Bell et al. 1997; Miller et Glover 1993; Seymour et Gadzik 1985). L'éclaircie précommerciale est un traitement qui arrive plus tard sans la vie d'un peuplement forestier. Comparativement au dégagement de la régénération, les secteurs traités en éclaircie précommerciale présentent un environnement végétal moins dense, un diamètre moyen à couper plus important qu'en dégagement, et des résidus en décomposition plus avancée.

La présente étude a révélé que les résidus et les amas de résidus étaient les types d'obstacles ayant le plus d'impact sur la productivité des débroussailleurs. Ce résultat renforce les résultats précédents selon lesquels une analyse en composantes principales avait identifié

les résidus comme le type d'obstacle le plus fortement relié à la productivité (Dubeau et al. 2011b).

La vitesse d'avancée en l'absence d'obstacles était en moyenne de 41,6 mètres par heure plus rapide qu'en présence de résidus ou d'amas de résidus (Tableau 5-3). Les débroussailleurs de l'échantillon passaient 15,2 minutes par heure à interagir avec des résidus ou des amas de résidus (Tableau 2). Pour un travailleur ayant une productivité moyenne de 0,5 ha/jour durant 7,2 heures effectives, la superficie couverte en moins serait de 150 m^2/jour. À 4,5 jours par semaine, ce sont 675 m^2/semaine et 1,1 ha pour une saison de 17 semaines. Environ 11 000 ha sont dégagés annuellement au Québec en 17 semaines, ce qui signifie qu'à chaque semaine, 675 hectares sont dégagés. Si un travailleur dégage 2,25 ha/semaine, il faut 300 débroussailleurs pour faire ce travail durant le temps imparti. Si la production est augmentée de 1,1 ha par travailleur pour la saison, il faudrait 660 journées*personne en moins pour faire le travail (300 travailleurs*1.1ha*2 jours par hectare). Cependant, cette estimation ne tient pas compte de l'effet de multiples interruptions de rythme causées par l'alternance entre les zones sans obstacles et les zones encombrées. Le fait que la moitié du temps de travail soit libre d'obstacles ne signifie pas que le débroussailleur peut relâcher son attention puisqu'il ne sait jamais quand un nouvel obstacle apparaîtra dans la zone d'action de sa lame.

L'enlèvement des résidus ligneux au moment de la récolte pourrait générer une augmentation de la productivité des débroussailleurs et serait susceptible de réduire l'exigence cognitive reliée au travail autour des obstacles et aux interruptions dans le rythme de travail (Gellerstedt 2002). La vraie différence de productivité est certainement supérieure à l'estimation obtenue de cette étude.

Il serait également utile de quantifier les économies qui pourraient être générées par l'enlèvement des obstacles ligneux sur les sites les plus encombrés en considérant les augmentations potentielles de la productivité lors de la préparation du terrain, du reboisement et du dégagement de la régénération, la diminution des risques pour la santé et la sécurité. Ces économies pourraient contribuer à amortir les coûts de l'opération de récolte de la biomasse.

En terminant, la méthode d'étude développée pour ce projet a généré des résultats intéressants et semble prometteuse une fois validée avec de nouvelles données. Cette méthode pourrait permettre de quantifier de façon plus robuste la perte de productivité associée à la présence d'obstacles et d'intégrer ce résultat aux modèles de prédiction existants.

5.5.1 Vulnérabilité des systèmes d'acquisition de données

Des problèmes avec l'équipement ont rendu inutilisables plusieurs jeux de données. L'enregistreur Archos était sensible aux chocs, de sorte qu'il s'est détérioré vers la fin de la première saison et qu'il a fallu le remplacer pendant la deuxième saison. Les récepteurs GPS se sont également avérés peu fiables, surtout en bordure de forêt. L'examen visuel des données lors du transfert en fin de journée ne permettait pas de révéler des problèmes. Cependant, des pertes de signal de plusieurs minutes survenaient et perduraient parfois jusqu'à la fin de la période d'observation. Il n'était pas possible d'interrompre le travail du débroussailleur sans interférer avec les mesures de productivité et les observations. Pour pallier à ce genre de problème, il faudrait utiliser un système de contrôle sans fil de tous les appareils de mesure afin que l'observateur puisse détecter les pannes d'appareils. Ces problèmes ont fait en sorte

qu'il n'y ait pas assez de jeux de données complets (N=4) pour permettre de généraliser les résultats de vitesse en fonction des types d'obstacles.

L'intervalle d'enregistrement de 15 secondes était insuffisant pour obtenir une trajectoire précise avec les récepteurs GPS. Le mieux serait enregistrer une position toutes les secondes afin de plus facilement pouvoir apparier les différentes bases de données à partir de l'heure des évènements. Avec une position à toutes les secondes, les trajectoires seraient également lissées et il serait plus facile de relier les changements de direction du débroussailleur avec les obstacles qu'il a rencontré.

5.6 Conclusion

Cette étude a permis d'estimer que la présence de résidus et d'amas de résidus est associée avec une baisse de la vitesse moyenne de déplacement du débroussailleur de 41,6 mètres par heure pendant le dégagement de la régénération. Ce résultat, une fois validé avec des observations supplémentaires, pourrait être utilisé pour moduler les taux forfaitaires dans les sites les plus encombrés ou pour amortir une partie des coûts de prélèvement de la biomasse à partir des économies générées dans les travaux sylvicoles suivant la récolte.

5.7 Remerciements

Les auteurs désirent remercier Steve Lemay pour sa contribution experte aux diverses collectes de données et à leur préparation, Isabelle Auger pour le support statistique (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune of Québec, Canada). Nous remercions également Philippe-Antoine Dubé pour sa contribution technique et scientifique au cours des collectes de données, ainsi que Yeni Arias qui a généreusement effectué des heures d'analyses vidéo (École Polytechnique de Montréal). Nous sommes également reconnaissants envers les

débroussailleurs qui ont participé à cette étude. Puissent ces résultats vous être utiles. Ce projet a bénéficié d'un financement multicentres : le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, le Fonds Québécois pour la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT), le Laboratoire d'opérations forestières of Université Laval, et le Natural Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC) via la Chaire de recherche du Canada en ergonomie de l'École Polytechnique de Montréal.

5.8 Références

Bell, F. W., K. R. Ride, M. St-Amour et M. Ryans (1997). "Productivity, cost, efficacy and cost effectiveness of motor-manual, mechanical and herbicide release of boreal spruce plantations." The Forestry Chronicle 73(1): 39-46.

Bender, K. A., C. Green et J. S. Heywood. (2010). "Piece Rates and Workplace Injury: Does Survey Evidence Support Adam Smith?" SSRN eLibrary Retrieved march, 25, 2010, from http://ssrn.com/paper=1632260

Bjorheden, R. et M. A. Thompson (1995). An international nomenclature for forest work study. IUFRO 1995, 20th world congress; S3:04 subject area, Tampere, Finland, University of Maine, Orono Me.

Canadian Council of Forest Ministers. (2010, march 11th, 2011). "Base de données nationale sur les forêts - National forestry database." from http://nfdp.ccfm.org/silviculture/national_f.php.

Chappe Software (2007). Video Event Analysis.

Department of Natural Ressources of Minnesota (2005). DNR Garmin. St. Paul.

Dubeau, D., D. Imbeau et L. Lebel (2011a). "A hierarchical task analysis to uncover cognitive work in forest regeneration release operations." Soumis à Applied Ergonomics.

Dubeau, D., L. LeBel, D. Imbeau et I. Auger (2011b). "Impacts of vegetation abundance and terrain obstacles on brushcutter performance during regeneration release." Northern Journal of Applied Forestry: in final revision.

Gellerstedt, S. (2002). "Operation of the Single-Grip Harvester: Motor-Sensory and Cognitive Work." International Journal of Forest Engineering 13(2).

Jobidon, R., V. Roy et G. Cyr (2003). "Net effect of competing vegetation on selected environmental conditions and performance of four spruce seedling stock sizes after eight years in Québec (Canada)." Ann. For. Sci. 60: 691-699.

Johansson, B., K. Rask et M. Stenberg (2010). "Piece rates and their effects on health and safety - A litterature review." Applied Ergonomics 41: 607-614.

Langlois, J. (2004). Intégration des facteurs humains dans l'étude du travail de débroussailleur: dégagement de la régénération naturelle et artificielle (Integration of human factors in brushcutters' work study: natural and artificial regeneration release). Faculté de foresterie et géomatique, Département des sciences du bois et de la forêt. Sainte-Foy, QC, Université Laval: 142 p.

Microsoft Corporation (2003). Microsoft Office Excel: Part of Microsoft Office Professional 2003.

Miller, J. H. et G. R. Glover (1993). Worker productivity and herbicide usage for pine release with manual application methods. Proceedings of the 46th Annual Meeting Southern Weed Science Society, Charlotte, NC, Southern Weed Science Society.

Parent, B. et C. Fortin. (2010). "Ressource et industrie forestières - Portrait statistique - Édition 2010 (Ressource and forest industries - Statistical profile - 2010 Edition)." Statistiques annuelles Retrieved 2008-10-06, from http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-statistiques-complete.jsp.

Québec, G. d. (2004). Méthodes d'échantillonnage pour les inventaires d'intervention (inventaire avant traitement) et pour les suivis des interventions forestières (après martelage, après coupe et années antérieures): exercice 2004-05. M. Blanchette. Québec, QC, Ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de l'assistance technique, Division des traitements sylvicoles: 389 p.

Roxio (2004). VideoWave 7 professionnal. Santa Clara, CA 95050, Roxio, Inc. : video capture and edition software.

Seymour, R. S. et C. J. Gadzik (1985). "A Nomogram for predicting precommercial thinning costs in overstocked spruce-fir stands." Northern journal of applied forestry 2(Juin 1985): 37-40.

Thiffault, N. et V. Roy (2010). "Living without herbicides in Québec (Canada): historical context, current strategy, research and challenges in forest vegetation management." European Journal of Forest research 130(1): 117-133.

Thompson, D. G. et D. G. Pitt (2003). "A review of Canadian forest vegetation management research and practice." Annals of Forest science 60: 559-572.

Toupin, D. (2004). Étude multidisciplinaire des débroussailleurs forestiers au Québec: intégration des mesures de l'effort du travailleur dans le système de rémunération. Faculté de foresterie et géomatique, Département des sciences du bois et de la forêt. Sainte-Foy, QC, Université Laval: 110 p.

Toupin, D., L. LeBel, D. Dubeau, D. Imbeau et L. Bouthillier (2007). "Measuring the productivity and physical workload of brushcutters within the context of a production-based pay system." Forest Policy and Economics 9(8): 1046-1055.

CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE

6.1 Les résultats obtenus

L'objectif principal de cette recherche était de développer une méthode de mesure de l'effet des obstacles sur la productivité des débroussailleurs afin d'intégrer cette variable dans les modèles de prédiction utilisés pour établir la valeur des traitements sylvicoles. Cela nécessitait de comprendre comment les obstacles affectent la productivité du débroussailleur. Il fallait aussi élaborer et tester des méthodes permettant de mesurer précisément les relations entre la productivité et les obstacles.

La première étape a été de dégager une relation entre la productivité et les obstacles à partir d'une base de données existante, obtenue grâce à la participation de 91 débroussailleurs observés dans leur territoire de travail à travers le Québec (Chapitre 3). Ces études de productivité ont été réalisées sous la supervision de l'auteure. Un modèle statistique a d'abord été développé pour prédire la productivité des débroussailleurs en fonction de la densité de végétation et du nombre d'obstacles à l'hectare. Dans le but d'identifier quels types d'obstacles étaient les mieux reliés à la productivité, une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée sur ce même jeu de données. Deux types d'obstacles avaient une relation significative avec la productivité dans cette analyse : les résidus ligneux laissés au sol, et les souches qui forcent le débroussailleur à changer de trajectoire. L'ACP apportait une information nouvelle et utile pour aiguiller le travail des étapes subséquentes, en révélant l'intérêt et la possibilité de discriminer entre les types d'obstacle. En complément, le croisement de ces résultats avec les entrevues de 22 débroussailleurs, recueillies en 2004, laissait entrevoir la possibilité que, lorsqu'il arrivait devant un obstacle, le débroussailleur absorberait la nouvelle difficulté en fournissant un effort cognitif plus élevé afin de maintenir son rythme si possible. Ceci pourrait contribuer à expliquer la

variabilité de productivité intra- et inter-sujets pour des obstacles similaires, et le fait que très peu d'études ont trouvé des relations significatives entre la productivité et l'abondance d'obstacles.

En effet, au total, douze recherches mesurant la productivité des débroussailleurs ont été recensées, incluant celles des auteurs (Bell et al. 1997; Dampier et al. 2006; De Franceschi et Bell 1990; LeBel et Dubeau 2007; Needham et Clements 1989; Needham et Hart 1991; O'Brien 1994; Samset 1986; Seymour et al. 1984; Seymour et Gadzik 1985; Svensson 1971; Toupin et al. 2007).

Parmi ces douze recherches, cinq ont mesuré au moins un des trois facteurs suivants : l'abondance d'obstacles, la pente et la rugosité du terrain (micro-topographie du terrain, soient les dépressions et aspérités du terrain susceptibles de ralentir les déplacements du travailleur). Seulement deux établissent une relation significative entre la productivité et au moins un de ces facteurs.

La première montrait que l'interaction entre la pente du terrain et le nombre de résidus ligneux à l'hectare était significative (p=0,0241) dans un modèle de prédiction intégrant la densité d'arbres à couper, et que cette interaction ajoutait 0,02 par rapport au coefficient de détermination du modèle basé sur la densité d'arbres à couper seulement (LeBel et Dubeau 2007). Il est intéressant de constater que la méthodologie employée pour le mesurage des obstacles a été modifiée comparativement aux recherches précédentes dans le but de mesurer les obstacles susceptibles d'influencer la productivité et non tous les obstacles. En effet, à la suite d'entrevues avec des travailleurs, nous avions émis l'hypothèse que les débroussailleurs enjambaient les obstacles jusqu'à 30 cm de hauteur, et il avait été décidé de compter exclusivement les obstacles dépassant cette hauteur. Dans les études où tous les obstacles au sol étaient comptabilisés, cette variable n'était pas significativement reliée à la productivité. Cette constatation suggérait que des méthodes de mesure plus précises pourraient capter des fluctuations de faible envergure dans la productivité lorsqu'en présence d'obstacles, et révéler les relations entre les

obstacles et la productivité, si elles existaient. Ce thème sera repris plus loin dans le passage de la discussion portant sur l'analyse du travail cognitif (chapitre 5).

L'autre recherche publiée qui identifie les obstacles est basée sur un sous-ensemble de 48 des 91 données utilisées dans la présente recherche, qui avaient été appariées avec des mesures de fréquence cardiaque simultanées (Dubeau et al. 2011; Toupin et al. 2007). Le modèle qui y est présenté prédit une augmentation du temps requis pour dégager un hectare d'environ 2 heures pour chaque augmentation de 100 obstacles, soit l'équivalent du résultat obtenu avec les données des 91 débroussailleurs. Dans cette recherche, les obstacles nuisibles étaient identifiés par l'observateur en fonction des changements dans le comportement du débroussailleur (contourner ou enjamber l'obstacle, ou aucun changement lorsque l'obstacle était aligné avec la trajectoire du débroussailleur). Cette façon de faire a permis de trouver pour la première fois une relation significative robuste entre la productivité et l'abondance d'obstacles nuisibles, basée sur l'étude de 91 débroussailleurs grâce à une méthode d'observation ciblant les réactions des débroussailleurs en présence d'obstacles.

Cependant, il était difficile de décrire exactement les caractéristiques des obstacles nuisibles identifiés dans cette recherche puisque deux obstacles de dimensions similaires ne produisaient pas nécessairement les mêmes comportements chez les débroussailleurs (Dubeau et al. 2011). Il y a une infinité de configurations d'obstacles possibles et le comportement à adopter pour un cas particulier dépend de l'angle par lequel le débroussailleur arrive sur cet obstacle, ce qui est impossible à prédire. L'application et la valorisation des résultats n'étaient pas envisageables. En revanche, ces résultats suggéraient que d'autres facteurs influençaient la productivité en présence d'obstacles. L'étude du travail cognitif supplémentaire à fournir en présence d'obstacles semblait l'avenue naturelle à investiguer pour mieux comprendre les fluctuations de productivités observables pour des obstacles semblables.

Le chapitre 4 était dédié à l'étude de cette question. Le travail cognitif associé aux obstacles et aux activités de travail du dégagement de la régénération a été recensé au moyen d'entrevues avec la participation d'un nouvel échantillon de 41 débroussailleurs provenant de 19 entreprises sylvicoles réparties dans les régions du Québec. Les analyses présentées dans ce chapitre sont basées sur des techniques connues, mais présentent ce qui semble être la première description détaillée des aspects cognitifs du travail de dégagement de la régénération naturelle et artificielle. Ce résultat nous a permis de mieux comprendre les mécanismes cognitifs du travail de débroussailleur et jette les bases pour développer des modèles plus performants pour prédire la productivité des débroussailleurs.

L'analyse hiérarchique de tâches révèle que la tâche de dégagement de la régénération est généralement assez simple, mais qu'elle se complique lorsque des obstacles entravent la route du débroussailleur. L'analyse SRK (skills-rules-knowledge ou compétences-règles-connaissances) inspirée de Phipps et al. (2011) a révélé que le travailleur doit composer avec des situations complexes, principalement lorsqu'il rencontre des obstacles pendant son travail et qu'il déménage vers une nouvelle zone à traiter. Les changements de zones à traiter surviennent environ une fois par semaine alors que les interactions avec les obstacles sont très fréquentes, soit jusqu'à 500 fois par jour. Plusieurs débroussailleurs interrogés indiquent que l'action combinée de la végétation compétitrice dense et de la présence d'obstacles constitue ce qui ralentit le plus leur progression sur le terrain.

L'analyse hiérarchique de tâches présentée dans cette thèse devrait être validée et enrichie avec la participation de nouveaux travailleurs afin qu'elle puisse servir de base pour des recherches futures ainsi que pour la mise-à-jour de programmes de formation en débroussaillage. Les résultats des analyses SRK dépendent du niveau d'expertise des participants. Dans la présente étude, tous les travailleurs étaient expérimentés. Un résultat différent pourrait être obtenu avec des débroussailleurs débutants. Les analyses effectuées avec le formalisme SRK devraient être accompagnées d'une évaluation quantitative et fiable du niveau d'expertise du sujet afin de permettre de discriminer entre les stratégies

cognitives des experts comparativement à celles employées dans les autres niveaux d'expertise. Les méthodes d'évaluation des débroussailleurs actuellement utilisées reposent sur l'observation qualitative : de l'entretien de la débroussailleuse, de l'organisation générale du travail et des techniques d'abattage directionnel. Le cadre d'évaluation des compétences utilisé actuellement est fondé sur des critères qualitatifs et mal définis, et donc requièrent un expert pour juger de la compétence des travailleurs. Une méthode d'évaluation devrait être développée pour quantifier le niveau d'expertise en incluant également les stratégies d'économie d'énergie déployées par les travailleurs, les stratégies d'adaptation aux obstacles et aux variations de la densité de compétition végétale. Également, une taxonomie des gestes propres à chaque niveau d'expertise devrait être développée afin de pouvoir mesurer ce niveau d'expertise chez un travailleur. Une telle approche pourrait à son tour permettre d'ajuster individuellement les programmes de formation en fonction du niveau d'expertise atteint par l'élève. Une méthode quantitative basée sur l'observation de la fréquence des gestes inefficients ou dangereux pour une période de temps fixe par travailleur a été ébauchée pour les besoins de cette recherche (chapitre 4). Elle semble présenter un potentiel pour l'évaluation des compétences et il serait intéressant de la développer et de la valider avec la participation de formateurs et d'experts débroussailleurs.

Cette recherche représente un premier pas dans l'investigation du travail cognitif du débroussailleur qui pourrait servir de pierre d'assise pour pousser plus loin la compréhension du travail ainsi que pour identifier les méthodes de travail les plus efficaces. Les analyses de tâches et de contenu cognitif présentées au chapitre 4, une fois validées tel que décrit ci-haut, pourraient être associées à des séquences vidéo de ce que voit un débroussailleur pour appuyer l'enseignement des méthodes de travail efficaces. Ce genre d'approche favoriserait un apprentissage plus rapide des techniques de travail efficace et une progression plus rapide de la productivité qui pourrait s'avérer rentable pour le travailleur et l'entrepreneur (Mercier 2002). Un travailleur efficace se fatiguerait moins, et, par

conséquent serait moins incommodé par les obstacles. Ceci contribuerait à son tour à diminuer les risques pour la santé et la sécurité, puisque le travailleur sentirait moins de pression à produire s'il atteignait régulièrement ses objectifs de production grâce à une technique plus efficace. Plus confiant d'atteindre ses objectifs, il pourrait se permettre de prendre le temps qu'il faut pour composer avec les variations de densité végétale, d'abondance d'obstacles et de topographie qui se présentent à lui. En somme, la réduction des risques pour la santé et la sécurité passe par l'acquisition de techniques de travial efficaces et l'ajustement adéquat de la rémunération.

En dernier lieu, le chapitre 5 présente la première analyse détaillée des effets de chaque type d'obstacles sur la vitesse de déplacement des débroussailleurs. Cette recherche a permis de mesurer la vitesse par type d'obstacles. Les vitesses observées se situaient entre 276 et 331 m/heure pour les souches et l'absence d'obstacles respectivement. Il a été constaté que les résidus et amas de résidus réduisent significativement la vitesse de progression des débroussailleurs sur le terrain (41 m/heure plus lent que sans obstacle). L'échantillon restreint révèle une relation significative entre les résidus et amas de résidus et la vitesse de déplacement, ce qui démontre que cette méthode fonctionne. Étonnamment, l'abondance de végétation compétitrice n'était pas une covariable significative dans ce modèle. L'examen des méthodes suggère que le nombre d'échantillons mesurés sur le terrain pour estimer l'abondance de compétition végétale était insuffisant pour permettre le lien direct avec des données de position géographiques, qui étaient enregistrées à toutes les 15 secondes. Il aurait fallu un système de mesure automatique de la densité végétation qui puisse prendre des mesures aux mêmes intervalles de temps que les récepteurs GPS, pendant que le travailleur dégage les semis. L'autre résultat surprenant était que la vitesse de déplacement près des souches ne changeait pas significativement par rapport aux zones sans obstacles alors que les débroussailleurs indiquent qu'ils font plus attention en présence de souches.

En somme, deux constats se dégagent de cette étude. D'abord, elle confirme et enrichit les résultats des études précédentes qui avaient trouvé que les résidus et amas de résidus ont un impact significatif sur la productivité des débroussailleurs (Dubeau et al. 2011; LeBel et Dubeau 2007; Toupin et al. 2007). En deuxième lieu, cette recherche a démontré que la mesure de la relation entre les obstacles et la productivité est possible avec cette méthode. Cependant, les résultats ne sont pas généralisables actuellement à cause du faible nombre d'échantillons valides. L'ajout de nouveaux cas permettrait de quantifier le temps et la productivité associés à chaque type d'obstacle avec fiabilité.

Globalement, cette thèse représente une avancée puisque le lien direct entre la productivité et le type d'obstacle a été expliqué pour la première fois. Plusieurs techniques jamais combinées auparavant dans une recherche ont été utilisées pour y arriver. Cette recherche a permis de développer et de tester des méthodes de mesure plus précises, directement adaptées à l'étude des mouvements du débroussailleur. Le défi consistait à trouver une méthode adéquate pour capter les déplacements d'un travailleur qui parcourt une distance variant entre 1500 m et 3000 m par jour dans un milieu encombré, dans des conditions atmosphériques changeantes.

Ce résultat, une fois enrichi de cas supplémentaires, permettrait d'atteindre l'objectif général du projet, soit d'intégrer l'effet des obstacles dans l'établissement des taux forfaitaires attribués au dégagement. Il pourrait également s'avérer utile pour effectuer des analyses économétriques sur la pertinence de concentrer la récolte de biomasse dans les aires de récolte qu'il est prévu de reboiser en regard des économies générées par une meilleure productivité dans les opérations subséquentes : préparation de terrain, reboisement et gestion de la végétation. En effet, le prélèvement de la biomasse réduirait la quantité d'obstacles ligneux. L'efficacité et la qualité de la préparation de terrain seraient meilleures s'il y avait moins d'obstacles. Les sillons de plantation seraient plus visibles et moins encombrés, espacés de façon plus homogène, rendant les déplacements plus faciles pour les planteurs, ce qui pourrait réduire le risque de blessures chez les reboiseurs. Le dégagement de la régénération qui

intervient quelques années plus tard serait également facilité : les semis seraient distribués plus régulièrement (moins de trouées et espacement plus régulier entre les semis et entre les rangées), la circulation est facilitée par l'absence d'obstacles sur le terrain. Le niveau de risque de rebond, de blessures et de chutes est diminué pour le travailleur qui peut atteindre ses objectifs salariaux en maintenant son rythme de travail naturel. La charge cognitive serait également susceptible de diminuer puisque le débroussailleur n'aurait pas à composer avec autant d'obstacles si les résidus ligneux sont prélevés.

Un travail de fond a également été fait pour décrire et comprendre le travail cognitif associé au débroussaillage. Ce résultat pourrait être utile pour réviser et alimenter les programmes de formation offerts aux débroussailleurs.

6.2 Examen critique des méthodes employées

Parmi le vaste choix de méthodes d'extraction des connaissances, l'entrevue semi-structurée semblait la mieux adaptée pour examiner le travail cognitif parce qu'elle permettait d'obtenir une base de connaissances uniforme tout en permettant au débroussailleur d'ajouter des informations utiles que le chercheur n'avait pas anticipé (Cooke 1994; Crandall et al. 2006). Également, c'est une méthode bien adaptée pour le cas du travail en forêt puisqu'elle ne nécessite pas de technologies complexes.

Les entrevues enregistrées sur bandes vidéo ont été utilisées afin de saisir les réponses dans une carte heuristique regroupant les obstacles par types et de classifier les informations sur les stratégies (Mueller et al. 2010). Ce mode de représentation des données permettait d'obtenir rapidement une vue d'ensemble des thèmes abordés par les débroussailleurs et de relier les commentaires à des photos illustrant leurs propos. Il est également possible d'exporter les données de la carte heuristique dans un tableur pour les codifier et les analyser avec un logiciel statistique. Un total de 42 heures d'entrevues ont été recueillies et chaque heure nécessitait 2 à 3 heures de traitement pour saisir toute l'information. La

carte heuristique s'est avérée facilitante pour réaliser l'analyse hiérarchique de tâches puisque une partie du travail de classification avait été fait lors du regroupement des informations et qu'il était facile d'avoir une vue d'ensemble des données. Au bout d'un certain nombre d'entrevues, les tendances se dessinent et il devient difficile de tirer de nouvelles informations. L'utilisation d'autres méthodes pour compléter l'extraction des données devrait être privilégiée pour permettre une meilleure validation des résultats et une analyse plus en profondeur du travail cognitif.

La méthode d'extraction des connaissances appelée « penser-tout-haut » (Cooke 1994) semblait prometteuse pour comprendre comment le travailleur prend ses décisions, mais elle n'a pas donné les résultats escomptés. Les quelques travailleurs dont la bande sonore était valide et qui ont réussi à « penser-tout-haut » pendant toute la durée d'un cycle (durée entre deux pleins d'essence, plein d'essence, limage et pause) ont coupé accidentellement plus de plants qu'à l'habitude. Elle semblait interférer avec le travail cognitif du débroussailleur. Plusieurs n'appréciaient pas cette technique, soit par timidité ou parce qu'ils ne trouvaient rien à dire. Par ailleurs, l'analyse hiérarchique de tâches et l'analyse SRK se sont avérées bien adaptées au type de données recueillies et à l'état des connaissances sur le domaine.

La fréquence d'acquisition du signal satellite GPS avait été fixée à 15 secondes parce que les déplacements du débroussailleurs sont généralement lents. Cet intervalle s'est révélé insuffisant pour obtenir une trajectoire exacte puisque les logiciels d'analyse géographiques tracent une ligne droite entre les points, ce qui diminue la fiabilité de l'analyse des changements de trajectoire. Considérant que l'erreur de positionnement intrinsèque du système GPS peut varier entre 3 et 10 mètres d'un instant à l'autre, une densité de points supérieure permettrait un meilleur lissage des trajectoires et une analyse plus précise des changements de trajectoires.

L’utilisation de la caméra fixée au casque du débroussailleur en lien avec le captage des déplacements des débroussailleurs à l’aide du récepteur GPS a permis une étude de temps détaillée qui n’aurait pas été possible autrement. Cependant, plusieurs problèmes ont été rencontrés avec ces équipements, ce qui a fait en sorte que beaucoup de données ont été perdues (soit les séquences vidéo, soit les données de position étaient inexistantes ou corrompues), limitant la portée des analyses. Étant donné le prix abordable des récepteurs GPS et avec l'expérience acquise dans cette recherche, il apparaît opportun d'installer deux récepteurs enregistrant simultanément le signal GPS sur le travailleur pendant la période d’observation. Un système de traçage en temps réel pourrait également être utile parce qu’il permettrait de détecter une panne dès le moment où elle survient. En ce qui concerne la caméra vidéo, elle avait un angle de champ de 82 degrés, ce qui fait qu’elle offrait une vision tunnel. Parfois, il était évident que le débroussailleur regardait à l’extérieur du champ de vision de la caméra et, il était difficile de comprendre ce qui attirait son attention. L’idéal serait de pouvoir utiliser un système de traçage de la direction du regard, si ce type d’appareil était assez robuste pour être utilisé en forêt. Cet appareil pourrait aider à détecter précisément les objets qui attirent l’attention du travailleur et permettrait de l’interroger sur ses intentions. Une autre façon serait de visionner immédiatement la séquence vidéo de la dernière heure avec le travailleur en utilisant la technique des rapports verbaux (Cooke 1994; Crandall et al. 2006).

Le système d’enregistrement des vidéos était pratique puisqu’il était possible de visionner immédiatement la séquence vidéo enregistrée, mais son disque dur résistait mal à la chaleur et aux chocs (par exemple lorsque la scie débroussailleuse heurtait un obstacle et produisait un mouvement de rebond). Les caméras légères adaptées pour le sport qui sont maintenant disponibles seraient probablement beaucoup plus fiables puisqu’elles sont conçues pour l’action et enregistrent sur une carte mémoire au lieu d'un disque dur. Par exemple, les caméras de marques GoPro et BiosAction sont des

caméras robustes à haute définition ayant un grand angle de 170 degrés. La GoPro est protégée par un boitier et la caméra BiosAction est résistante à l'eau.

Enfin, en ce qui concerne le choix des sites, il serait préférable de regrouper les études dans une même région lorsque possible et d'assurer la représentativité à l'échelle provinciale en impliquant des travailleurs de toutes les régions au moment de la validation des résultats.

Les modèles présentés dans cette thèse n'ont pas tous été validés. Seuls les modèles présentés au tableau 3-3 ont été validés en vue de la mise en application du deuxième modèle dans les forêts du Québec (Annexe 1). Après 5 ans d'utilisation (soit en 2014), une validation des effets de ce modèle sur les comportements des travailleurs devrait être faite auprès des entreprises et des travailleurs. Ont-ils ralenti la cadence à un niveau naturel ou conservé un rythme de travail non sécuritaire (CCR > 30%) Imbeau, Dubeau, & Farbos, 2007; Toupin, Lebel, Dubeau, Imbeau, & Bouthillier, 2007; Chengalur, Rodgers, & Bernard, 2004)? Est-ce que l'application du modèle opérationnel rend leur salaire plus équitable? Les résultats du chapitre 4 devraient être validés au moyen de nouvelles entrevues avec des experts et des formateurs en dégagement de la régénération. Les séquences vidéo disponibles devraient être utilisées comme outil pour développer une méthode quantitative d'évaluation de la technique de travail et du niveau d'expertise. Les résultats du chapitre 5 sont prometteurs, mais ne peuvent pas être mis en application sans augmenter leur robustesse. Il faudrait ajouter des travailleurs dans l'échantillon et tester des approches statistiques différentes (explorer une approche bayesienne par exemple).

6.3 Exigences des études en milieu forestier.

Les études en milieu forestier sont coûteuses et exigeantes pour les chercheurs. Généralement, les sites sont éloignés des centres urbains et nécessitent plusieurs heures de déplacement pour s'y rendre. Il est préférable de loger le plus près possible du lieu de l'étude afin de limiter les déplacements pendant la semaine. Nos études étaient organisées suivant la semaine de travail des débroussailleurs. Il

était plus avantageux de changer de chantier une fois par semaine seulement étant donné les pertes de temps occasionnées par les grandes distances à parcourir. Également, les débroussailleurs arrivent sur le site vers 6 heures et terminent vers 16 heures. L'heure du lever oscille entre 3h45 et 4h30 selon la distance à parcourir pour se rendre au site. Une journée entière d'observations est exigeante pour l'équipe de recherche puisqu'il faut télécharger les données recueillies chaque soir, les inspecter et préparer le matériel pour le lendemain matin.

Mener une étude en milieu forestier exige une excellente préparation puisque les distances sont grandes. L'oubli d'un appareil de mesure, d'un chargeur ou le bris de matériel peuvent faire perdre des journées entières d'observation. La recherche en milieu forestier demande également une connaissance claire des conséquences que peuvent entraîner un changement au protocole lorsque nécessaire et de la flexibilité pour s'adapter rapidement aux différentes situations qui se présentent.

6.4 Recherches futures

L'étude de l'effet de chaque type d'obstacle sur la productivité devrait être enrichie de nouveaux cas en modifiant la méthode de manière à minimiser le risque de perte de données. Premièrement, une validation des résultats de l'analyse hiérarchique des tâches serait effectuée au moyen de rencontres individuelles ou de focus groupes. Une fois cette validation faite, le résultat de l'analyse hiérarchique des tâches serait utilisé pour cibler les gestes ou attitudes qui témoignent d'un travail cognitif pour pouvoir les relever pendant l'observation d'un travailleur.

Une étude terrain suivrait. L'observation du travail durerait seulement pendant un cycle. Pendant la période d'observation, les indices de travail cognitif développés à l'étape précédente pour les obstacles nuisibles devraient être numérotés comme dans les études précédentes. Cependant, lorsque le travailleur a terminé son cycle, tous les obstacles présents (nuisibles ou non) devraient être mesurés et positionnés (relever la position avec un récepteur GPS). Ensuite, les obstacles seraient photographiés

selon un angle précis et constant (par exemple toujours vers le nord pour éviter les effets de contrejour) et à une distance uniforme de l'obstacle afin de pouvoir créer une mosaïque replaçant ces photos au bon endroit et à la bonne échelle sur le parcours GPS cartographié. Cette méthode permettrait l'analyse exacte des raisons des changements de direction. Le projet devrait également inclure des mesures pour quantifier la biomasse utilisable afin de permettre les calculs proposés plus haut. Idéalement, l'étude devrait être combinée avec une étude sur les bénéfices de la récolte de la biomasse dans les secteurs destinés à être reboisés, ce qui nécessiterait une planification du projet 5 à 7 ans avant l'observation du dégagement. La récolte de biomasse exécutée dans le cadre d'une telle étude fournirait des données utiles pour estimer le ratio coûts/bénéfices lorsque le scénario sylvicole est considéré. La productivité des machines de préparation de terrain, puis celle des reboiseurs serait comparée dans ce dispositif, en plus de comparer la productivité des débroussailleurs

L'utilisation d'un dispositif expérimental dans lequel le même travailleur serait observé dans quatre conditions de terrains pourrait donner des résultats robustes avec aussi peu que 12 ou 16 participants puisque ce genre de dispositif permet de contrôler l'effet aléatoire du sujet, rendant le test plus puissant pour détecter des différences entre traitements. Les conditions à croiser seraient deux niveaux de densité de compétition et deux niveaux d'encombrement par les obstacles pour un total de 4 combinaisons. Quatre travailleurs par chantier seraient étudiés à quatre reprises dans l'une des séquences possibles. La cueillette de données initiale serait terminée après 4 semaines. Ensuite, les données seraient préparées et analysées, puis une tournée de quelques entreprises serait effectuée pour valider les résultats auprès d'autres débroussailleurs.

Deux récepteurs GPS et deux caméras fixées au casque enregistreraient simultanément pendant l'observation. L'observation devrait être suivie d'une tournée de la zone dégagée avec le débroussailleur comme dans l'étude précédente. Au cours de cette tournée, le débroussailleur reverrait la séquence

vidéo associée à chaque obstacle et serait questionné sur la stratégie particulière qu'il a utilisée dans chaque cas.

Une autre avenue à poursuivre serait d'identifier les besoins d'amélioration des programmes de formation en débroussaillage pour bien cadrer la poursuite de l'analyse du travail cognitif. Les analyses du travail cognitif pourraient être enrichies en utilisant d'autres techniques avec des groupes de travailleurs. Par exemple, l'utilisation de séquences vidéo pour demander aux débroussailleurs de commenter ce qu'ils voient (protocoles verbaux), l'utilisation d'autres méthodes d'analyse du travail cognitif pour dégager les meilleures méthodes de travail et celles à éviter (Zsambok et Klein, 1997). Une fois l'analyse complétée, il serait intéressant et utile de développer et de tester un programme de formation proposant des adaptations du travail qui tiennent compte des caractéristiques humaines, adapté aux besoins de la clientèle visée et attrayant pour les jeunes.

Enfin, le développement de meilleures techniques de travail en présence d'obstacles pourrait permettre au débroussailleur de se fatiguer moins, ce qui aurait pour effet de réduire les risques pour sa santé et sa sécurité. Nos travaux, en plus d'apporter des réponses précises sur les facteurs qui affectent la productivité des débroussailleurs, ont permis d'identifier plusieurs pistes de recherche qui mériteraient d'être explorées.

CHAPITRE 7 CONCLUSION

Cette thèse visait à quantifier l'effet des obstacles sur la productivité des débroussailleurs afin de pouvoir intégrer ce facteur dans les modèles statistiques utilisés pour établir les taux forfaitaires du traitement de dégagement de la régénération naturelle ou artificielle. La première partie de l'étude a révélé que les résidus et les souches étaient les mieux reliés à la productivité des débroussailleurs. La deuxième partie de l'étude s'est intéressée au travail cognitif du débroussailleur pendant le dégagement de la régénération. L'étude a révélé que le travail cognitif le plus important semblait associé à la présence d'obstacles et que cette charge était maximale lorsque de la végétation compétitrice dense dissimule les semis, le sol et les obstacles. Cette analyse a aussi permis de dresser un portrait précis du travail de débroussailleur. Un portrait aussi complet n'avait jamais été présenté auparavant. Les résultats permettent également de jeter des bases solides pour des travaux plus approfondis. La troisième partie de l'étude a permis d'atteindre un objectif que nous poursuivons activement depuis 10 ans, soit développer une méthode permettant de mesurer l'effet individuel des types d'obstacles sur la productivité des débroussailleurs. Les analyses statistiques ont révélé que les résidus et amas de résidus avaient un effet significatif sur la productivité des débroussailleurs en réduisant leur vitesse de déplacement de 12%, soit 41 mètres par heure. L'augmentation du nombre de cas serait nécessaire pour être en mesure de trouver une méthode peu coûteuse pour appliquer ce résultat.

Cette recherche devrait être poursuivie pour approfondir les connaissances sur le travail cognitif et les valoriser dans un programme de formation adapté aux capacités humaines. Une autre recherche portant sur cinq ans permettrait d'évaluer la valeur socio-économique d'une stratégie sylvicole favorisant la récolte de biomasse dans les secteurs où le reboisement est prévu.

ANNEXE 1 – Démarche d'analyses statistiques et étapes de validation des modèles de prédiction de la productivité des débroussailleurs

Cette annexe présente la démarche analytique ainsi que les opérations de validation des modèles effectuées sur les données recueillies entre 2000 et 2002, et dont les résultats sont présentés dans l'article scientifique formant le chapitre 3 de la présente thèse (Table 3-3). Les autres modèles présentés au chapitre 3 n'ont pas fait l'objet de validations poussées puisqu'ils visaient l'exploration des caractéristiques des obstacles et n'étaient pas applicables en conditions opérationnelles.

L'objectif de l'étude était de développer un modèle de prédiction applicable dans des conditions opérationnelles. Dans un tel cas, il faut chercher à capturer toute l'étendue possible de valeurs pour chaque variable mesurée afin de permettre une prédiction fiable lorsque le modèle de prédiction construit à partir de ces variables est appliqué à de nouveaux cas (Bergstrand, 1991; Chatterjee & Price, 1991). La stratégie employée pour obtenir la plus vaste étendue de valeurs pour les variables mesurées a été de couvrir l'ensemble des régions où sont effectués des travaux de dégagement de la régénération au Québec et d'observer les débroussailleurs participant à l'étude à l'intérieur du secteur en cours de traitement.

Dans cette étude, 91 débroussailleurs ont fait l'objet d'observations pendant le traitement d'une zone de 0,12 ha délimitée par l'équipe de recherche. Les variables mesurées sont présentées en détails au chapitre 2. Ces variables comprennent le temps effectif requis pour dégager un hectare de terrain ainsi que le temps non travaillé (temps personnel, limage de la lame, plein d'essence et d'huile, réparations sommaires). Également, des mesures ont été recueillies avant et après le traitement de la

zone d'observation. Les mesures recueillies avant l'observation concernaient la végétation tandis que les mesures après concernaient les obstacles et l'évaluation de la qualité du travail observé.

Une fois les données saisies et validées, l'analyse statistique a été effectuée selon les étapes suivantes : 1) exploration des données; 2) construction de modèles; 3) sélection des modèles pertinents pour la mise en application; 4) validation des modèles retenus.

1. Exploration des données

Les statistiques descriptives ont été compilées pour chaque variable mesurée : moyenne, écart type, minimum et maximum (Tableaux A1.1, A1.2, A1.3). Un échantillon initial de 110 variables était disponible. De plus, certaines variables ont été transformées (log ou racine carrée) et ajoutées au jeu de données pour analyse : temps effectif, couverture de FFE, couverture de toutes les espèces de compétition végétale. L'utilisation de variables transformées visait à détecter la présence de relations non linéaires entre les variables indépendantes et la variable dépendante (temps effectif) lorsque la distribution le suggérait. Une seule variable non linéaire figurait parmi les meilleurs modèles : racine carrée de la couverture des FFE (framboisiers, fougères et épilobes à feuilles étroites). Enfin, une variable binaire était incluse dans l'analyse. Cette variable était nommée « mode de régénération » (0 = plantation; 1= régénération naturelle). Un total de 66 zones d'observation ont été installées dans des plantations et 25 dans des peuplements régénérés naturellement.

Le tableau A1.1 présente les statistiques descriptives concernant les variables utilisées dans la confection des modèles. La première section du tableau concerne le temps moyen par activité, nécessaire pour dégager un hectare de terrain. Le temps total pour dégager un hectare s'élevait à deux jours de travail en moyenne dont 84,4% était consacré au débroussaillage (temps effectif). Ces proportions sont comparables à celles présentées dans d'autres études publiées concernant le dégagement de la régénération et l'éclaircie précommerciale pour des travailleurs payés à forfait, soit

des proportions de temps effectif entre 77% et 87% (Anonyme, 1992; LeBel & Dubeau, 2007; Needham & Hart, 1991; Samset, 1986; Seymour & Gadzik, 1985; Svensson, 1971)..

La seconde section du tableau A1.1 présente les variables de site mesurées. Elles comprenaient la pente du terrain ainsi que les obstacles nuisant au travail de débroussailleur. L'étendue des valeurs observées pour la pente moyenne du terrain correspond aux niveaux de pentes classés comme accessibles pour la machinerie forestière, soit 35% pour des machines sur roues, 40% pour des machines à chenille et 50% pour des machines spécialement conçues pour opérer en pentes abruptes (WorkSafeBC, 2008).

Pour leur part, les étendues de valeurs observées pour obstacles nuisibles présentées au Tableau A1.1 n'ont pas de comparatif dans la littérature puisque la méthode employée pour sélectionner les obstacles à mesurer a été utilisée pour la première fois dans ce type d'étude.

Tableau A1.1 Statistiques descriptives concernant les temps observés et les variables de site

Variable	Unités	N	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
Temps observés						
Temps total pour dégager un hectare	hres/ha	91	17,57	8,88	3,3	56,9
Temps de délais opérationnels	hres/ha	91	2,38	2,64	0,0	18,0
Temps de délais mécaniques	hres/ha	91	0,20	1,57	0,0	14,8
Temps personnel	hres/ha	91	0,14	0,49	0,0	2,8
Temps total non travaillé (délais et temps personnel)	hres/ha	91	2,73	3,20	0,0	21,9
Temps effectif (la débroussailleuse est en opération)	hres/ha	91	14,83	6,81	3,3	35,0
Variables de site						
Pente du terrain						
Pente moyenne de la zone traitée	%	91	12	6,82	3	34
Pente maximale de la zone traitée	%	91	24	11,91	5	60
Pente minimale de la zone traitée	%	91	4	4,59	0	27
Obstacles						
Densité d'obstacles observés par hectare	nbre/ha	91	211	85	58	508
Nombre d'occurrences où un obstacle provoque l'arrêt des opérations	nbre/ha	91	22	28,09	0	108

Tableau A1.1 Statistiques descriptives concernant les temps observés et les variables de site. (suite)

Variable	Unités	N	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
Nombre d'occurrences où un obstacle ne provoque pas l'arrêt des opérations	nbre/ha	91	189	89,59	20	425
Proportion des obstacles provoquant un arrêt	%	91	13	18,18	0	83
Nombre d'occurences où un obstacle oblige le travailleur à dévier de sa trajectoire	nbre/ha	91	125	67,14	8	292
Nombre d'occurences où un obstacle n'oblige pas le travailleur à dévier de sa trajectoire	nbre/ha	91	87	48,10	8	242
Proportion des obstacles provoquant un changement de trajectoire	%	91	58	20,56	6	95
Surface totale des obstacles						
Obstacles mesurés par hectare	M^2/ha	91	948	954,18	66	5121
Obstacles provoquant l'arrêt des opérations	M^2/ha	91	123	270,04	0	1642
Obstacles ne provoquant pas l'arrêt des opérations	M^2/ha	91	838	911,07	10	5081
Obstacles provoquant un changement de trajectoire	M^2/ha	91	498	504,75	0	2263
Surface totale ds obstacless ne provoquant pas de changement de trajectoire	M^2/ha	91	462	723,29	2	5055
Surface moyenne des obstacles						
Obstacles mesurés	M^2/ha	91	4,6	5,62	0	43
Obstacles provoquant l'arrêt des opérations	M^2/ha	60	7,36	17,74	0	125
Obstacles ne provoquant pas l'arrêt des opérations	M^2/ha	91	4,96	9,17	0	76
Obstacles provoquant un changement de trajectoire	M^2/ha	91	4,06	4,90	0	29
Obstacles ne provoquant pas de changement de trajectoire	M^2/ha	91	4,9	7,38	0	55
Volume total des obstacles						
Obstacles mesurés par hectare	M^3/ha	91	916	1114,	27	5848
Obstacles provoquant l'arrêt des opérations	M^3/ha	91	121	338,74	0	2280
Obstacles ne provoquant pas l'arrêt des opérations	M^3/ha	91	807	1072,98	3	5848
Obstacles provoquant un changement de trajectoire	M^3/ha	91	587	860,01	0	4590
Obstacles ne provoquant pas de changement de trajectoire	M^3/ha	91	340	519,99	1	2181
Volume moyen des obstacles						
Obstacles mesurés par hectare	M^3/ha	91	4,6	6,06	0	29
Obstacles provoquant l'arrêt des opérations	M^3/ha	60	7,7	22,65	0	162
Obstacles ne provoquant pas l'arrêt des opérations	M^3/ha	91	4,6	7,57	0	41
Obstacles provoquant un changement de trajectoire	M^3/ha	91	4,7	7,94	0	53
Obstacles ne provoquant pas de changement de trajectoire	M^3/ha	91	3,8	6,28	0	29

Le Tableau A1.2 décrit la végétation trouvée dans les zones d'observation. La liste d'espèces qu'il faut dénombrer lors des inventaires est présentée dans le guite pour l'estimation de la productivité des débroussailleurs (Dubeau, LeBel, & Imbeau, 2009). Ces espèces ne se retrouvent pas sur tous les sites visités parce que la variété des types de sols, des régimes hydriques et des conditions climatiques favorise certaines espèces au détriment des autres. Cependant, certaines espèces compétitrices poussent dans la majorité des régions du Québec, telles que le cerisier de pensylvanie (Prunus Pensylvanica), l'érable à épis (Acer Spicatum), le noisetier à long bec (Corylus Cornuta), les aulnes (Alnus Rugosa et Alnus Crispa), les framboisiers (Rubus Idaeus), les fougères (Pteridium Aquilinum principalement), les épilobes à feuilles étroites (Épilobium Angustifolium), et dans les zones plus nordiques le thé du Labrador (Rhododendron Groenlandicum) et enfin, le Kalmia (Kalmia angustifolia) (Thiffault & Roy, 2010). Sauf pour les deux espèces à distribution nordique, toutes ces espèces ont été trouvées dans la majorité des sites étudiés, ce qui suggère que les conditions possibles ont été couvertes par l'étude.

Tableau A1.2 Statistiques descriptives concernant la végétation compétitrice et les espèces recherchées

Variable	Unités	N	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Espèces d'arbres et d'arbustes dénombrés						
Toutes les espèces d'arbres et d'arbustes						
Densité de tiges de 0,15 <= hauteur < 1,0 m	nbre/ha	91	52528	41997,26	7500	329583
Densité de tiges de 1 <= hauteur < 2,0 m	nbre/ha	91	19776	15319,13	417	65833
Densité de tiges de 2 <= hauteur <3,0	nbre/ha	91	4095	4408,71	0	18542
Densité de tiges de hauteur >= 3,0 m	nbre/ha	91	2153	3416,58	0	20000
Densité de tiges de hauteur >= 1,0 m	nbre/ha	91	26033	19819,82	417	7620
Densité de tiges de hauteur >= 0,15 m	nbre/ha	91	78553	50764,98	16667	393750,00
Aulnes						
Densité de tiges de 0,15 <= hauteur < 1,0 m	nbre/ha	91	4506	22234,00	0	196875
Densité de tiges de 1 <= hauteur < 2,0 m	nbre/ha	91	1919	5980,45	0	33542
Densité de tiges de 2 <= hauteur <3,0	nbre/ha	91	272	1156,09		7500
Densité de tiges de hauteur >= 3,0 m	nbre/ha	91	37	231,53	0	2083
Densité de tiges de hauteur >= 1,0 m	nbre/ha	91	2228	7081,34	0	43125

Tableau A1.2 Statistiques descriptives concernant la végétation compétitrice et les espèces recherchées. (suite)

Variable	Unités	N	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Densité de tiges de hauteur >= 0,15 m	nbre/ha	91	6735	27244,92	0	226042
Espèces d'arbres et d'arbustes feuillus sans les aulnes						
Densité de tiges de 0,15 <= hauteur < 1,0 m	nbre/ha	91	41687	27630,60	1667	132708
Densité de tiges de 1 <= hauteur < 2,0 m	nbre/ha	91	15873	12957,28	417	62917
Densité de tiges de 2 <= hauteur <3,0	nbre/ha	91	3309	4149,23	0	18542
Densité de tiges de hauteur >= 3,0 m	nbre/ha	91	1738	3127,75	0	20000
Densité de tiges de hauteur >= 1,0 m	nbre/ha	91	20929	17604,33	417	75833
Densité de tiges de hauteur >= 0,15 m	nbre/ha	91	62616	35349,93	2917	157292
Toutes les espèces d'arbres et d'arbustes feuillus						
Densité de tiges de 0,15 <= hauteur < 1,0 m	nbre/ha	91	46193	39699,81	3750	320833
Densité de tiges de 1 <= hauteur < 2,0 m	nbre/ha	91	17792	14237,73	417	62917
Densité de tiges de 2 <= hauteur <3,0	nbre/ha	91	3582	4233,41	0	18542
Densité de tiges de hauteur >= 3,0 m	nbre/ha	91	1775	3123,60	0	20000
Densité de tiges de hauteur >= 1,0 m	nbre/ha	91	23156	18750,86	417	75833
Densité de tiges de hauteur >= 0,15 m	nbre/ha	91	69350	48255,29	12708	383333
Toutes les espèces d'arbres et d'arbustes résineux						
Densité de tiges de 0,15 <= hauteur < 1,0 m	nbre/ha	91	6326	8678,27	208	52708
Densité de tiges de 1 <= hauteur < 2,0 m	nbre/ha	91	1984	3859,25	0	30833
Densité de tiges de 2 <= hauteur <3,0	nbre/ha	91	514	832,47	0	5208
Densité de tiges de hauteur >= 3,0 m	nbre/ha	91	379	797,23	0	4375
Densité de tiges de hauteur >= 1,0 m	nbre/ha	91	2876	4787,53	0	37708
Densité de tiges de hauteur >= 0,15 m	nbre/ha	91	9203	12232,29	1111	90417
Espèces résineuses recherchées						
Densité d'arbres résineux	nbre/ha	91	9095	12225,53	1111	90417
Densité d'arbres résineux visibles	nbre/ha	89	5252	6638,45	417	51042
Proportion d'arbres résineux non visibles	%	89	63	21,31	14	100
Végétation compétitrice (excluant les arbres et arbustes dénombrés)						
Toutes les espèces de végétation compétitrice non dénombrées						
Pourcentage de couverture moyen	%	91	34	17,41	2,00	77
Hauteur moyenne pondérée par le pourcentage de couverture par espèce	cm	91	46	17,41	10	103
Moyenne des hauteurs maximales	Cm	91	56	15,98	12	91
Hauteur maximale	Cm	91	124	36,17	40	200

Tableau A1.2 Statistiques descriptives concernant la végétation compétitrice et les espèces recherchées. (suite)

Variable	Unités	N	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Épilobes à feuilles étroites						
Pourcentage de couverture moyen	%	91	2	2,81	0,00	15
Hauteur moyenne	Cm	75	59	23,97	19	130
Moyenne des hauteurs maximales	Cm	75	74	30,94	26	169
Hauteur maximale	Cm	75	100	40,38	40	195
Framboisiers						
Pourcentage de couverture moyen	%	91	10	13,31	0	60
Hauteur moyenne	Cm	79	44	19,39	15	107
Moyenne des hauteurs maximales	Cm	79	62	29,22	15	139
Hauteur maximale	Cm	79	93	46,08	15	200
Fougères						
Pourcentage de couverture moyen	%	91	4	5,87	0	36
Hauteur moyenne	Cm	69	43	22,62	15	115
Moyenne des hauteurs maximales	Cm	70	55	27,12	0	130
Hauteur maximale	Cm	70	77	34,36	0	160
Framboisiers, fougères et épilobes à feuilles étroites (FFE)						
Pourcentage de couverture moyen	%	91	15	14,93	0	62
Hauteur moyenne	Cm	91	51	18,69	18	105
Moyenne des hauteurs maximales	Cm	91	63	20,49	24	105
Hauteur maximale	Cm	91	110	42,04	30	200

Des histogrammes de fréquence ont été générés pour chaque variable dans le but de vérifier la continuité des distributions et les valeurs potentiellement aberrantes. Les graphiques pour les principales espèces sont présentés aux figures A1.1 et A1.2.

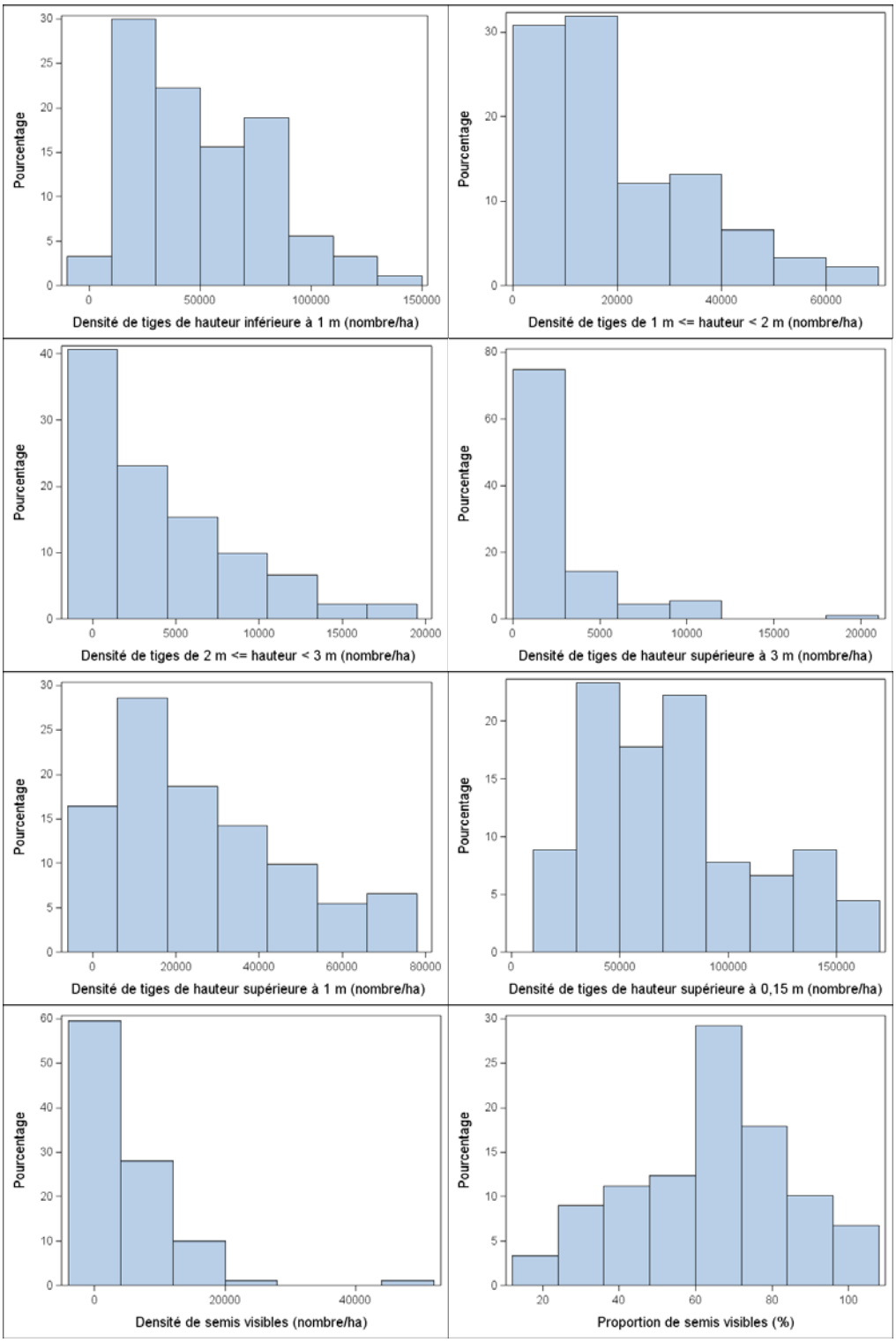


Figure A1.1. Distribution des données pour les principaux groupes d'espèces d'arbres et d'arbustes

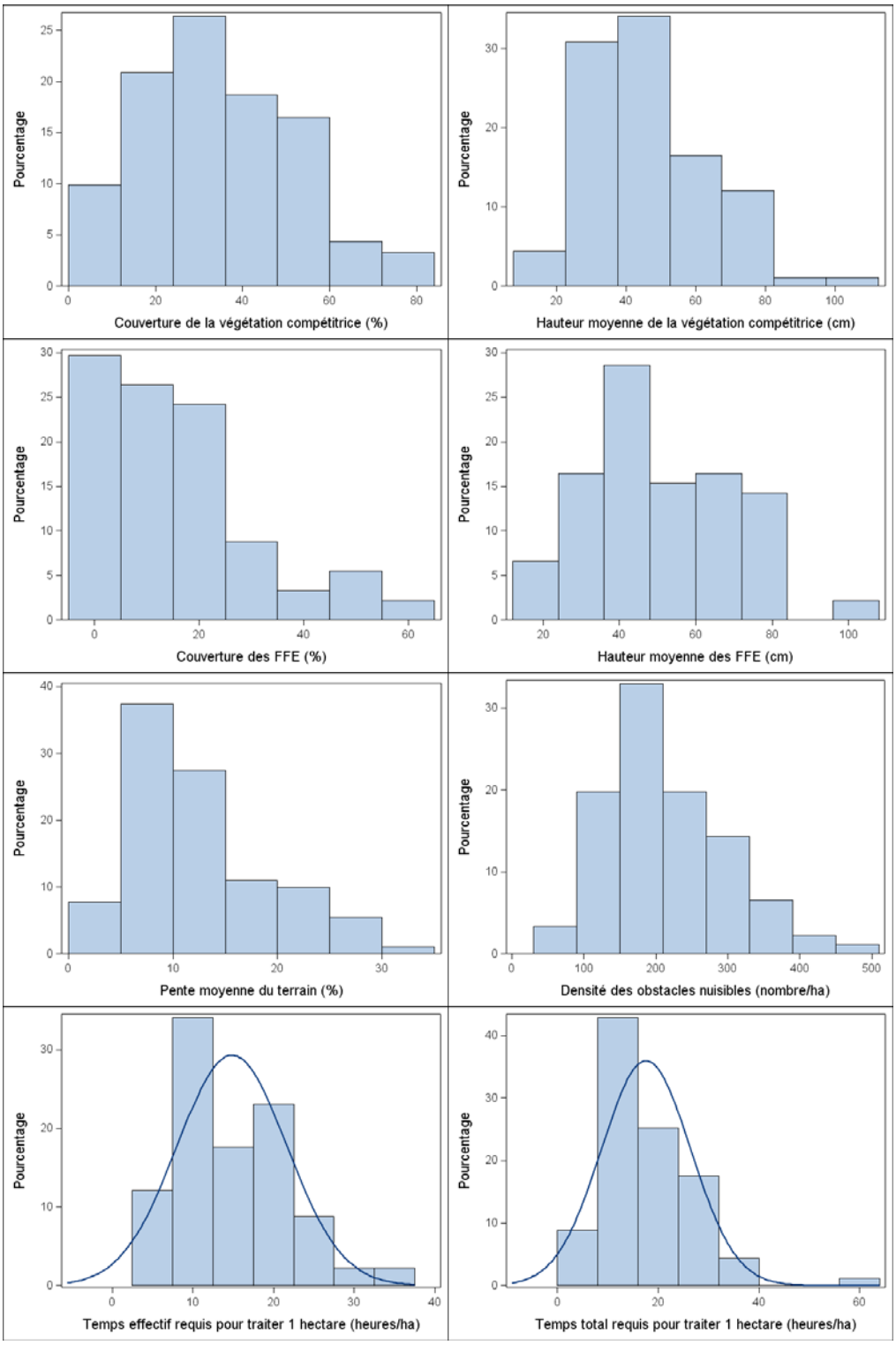


Figure A1.2. Distribution des données pour les principaux groupes de végétation compétitrice, la pente du terrain, la densité d'obstacles et le temps requis pour traiter un hectare.

Enfin, des graphiques présentant le temps effectif en fonction des valeurs observées pour ont été construits pour identifier les variables ayant le meilleur potentiel de prédiction de la variable dépendante (temps effectif).

La figure A1.3 présente les relations entre les principales variables et le temps effectif. Elle montre que le temps effectif requis pour traiter un hectare augmente lorsque la densité de végétation augmente. La relation va dans le même sens lorsque la couverture d'espèces compétitrices ou la densité d'obstacles nuisibles augmentent. Au contraire, la consommation de temps effectif diminue lorsque la pente du terrain augmente et lorsqu'il y a une proportion plus élevée de semis visibles.

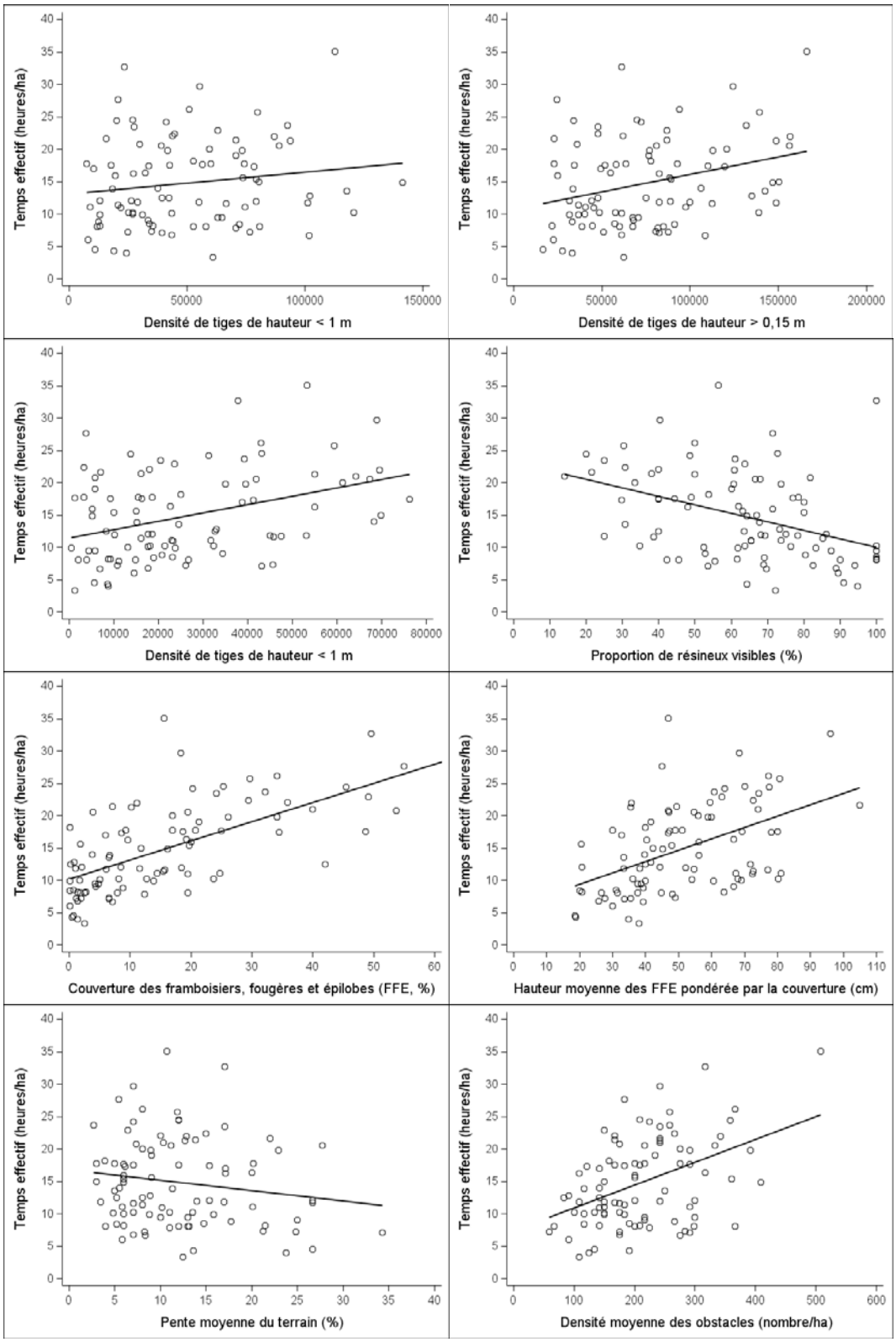


Figure A1.3. Relations entre le temps effectif observé et les principales variables mesurées

Le Tableau A.1.3 présente les résultats d'un échantillonnage complémentaire effectué en 2002, dans cinq placettes d'échantillonnage de 50 m^2 par zone d'observation, pour estimer le nombre total d'obstacles ainsi que le nombre d'obstacles par catégories, peu importe qu'il ait ou non nui au travail du débroussailleur. Les valeurs présentées au Tableau A1.1 comprennent exclusivement les obstacles ayant nui au travail du débroussailleur. La comparaison des deux échantillonnages suggère qu'environ 7% des obstacles nuisaient au travail des débroussailleurs.

Tableau A1.3. Échantillonnage effectué en 2002 dans des placettes d'échantillonnage de 50 m^2

Variable	Unités	N	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Nombre total de résidus par hectare	nbre/ha	19	1140	868	0	3333
Nombre total d'amas de résidus par hectare	nbre/ha	19	153	217	0	625
Nombre total de pierres et boulders par hectare	nbre/ha	19	252	299	0	833
Nombre total de souches par hectare	nbre/ha	19	1075	748	0	2708
Nombre total de chicots par hectare	nbre/ha	19	0	0	0	0
Nombre total de trous par hectare	nbre/ha	19	603	861	0	2708
Nombre total de bosses par hectare	nbre/ha	19	0	0	0	0
Nombre total d'obstacles par hectare	nbre/ha	19	3224	1014	1250	5208

2. Construction des modèles

Des modèles à une, deux, trois et quatre variables ont été construits à partir des variables décrites dans la section précédente. La variable dépendante était le temps effectif requis pour dégager un hectare de terrain (heures/ha). Le tableau A1.4 contient les variables explicatrices qui ont un R^2 supérieur à 10 %. Toutes les variables sont significatives (α = 5 %). Dans les modèles de régression simple, les variables dépendantes les mieux reliées à la productivité étaient celles qui décrivaient la densité de végétation.

Parmi ces variables, la couverture de framboisiers, de fougères et d'épilobes à feuilles étroites (FFE) avait les meilleurs coefficients de détermination (R^2) et les plus faibles racines carrées de l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

Tableau A1.4. Modèles de régression à une variable, 2000-2002

Variable	R^2 (%)	RMSE
Racine carrée (couverture des FFE +1)	44,5	5,10
Couverture des FFE	41,5	5,24
Hauteur moyenne des plantes[1]	36,8	5,44
Hauteur moyenne du framboisier[1]	34,8	5,53
Hauteur maximale des plantes[1]	30,8	5,70
Couverture du framboisier	30,3	5,72
Hauteur maximale moyenne des plantes	30,2	5,72
Hauteur maximale moyenne des FFE	30,2	5,72
Racine carrée (couverture x hauteur des plantes)	29,7	5,74
Couverture x hauteur des plantes	29,0	5,77
Hauteur maximale des FFE	27,1	5,85
Hauteur moyenne des FFE [1]	23,3	6,00
Nombre d'obstacles	19,2	6,16
Nombre de tiges > 1 m	14,3	6,34
Nombre de feuillus > 1 m	11,5	6,44
Couverture des plantes	11,4	6,45
Hauteur moyenne des épilobes[1]	11,2	6,45

1 : hauteur pondérée par le couverture

Le tableau A1.5 contient les modèles à deux variables avec R^2 > 50% lorsqu'on ajoute les observations de 2002. Toutes les variables sont significatives (α = 5 %). Les meilleurs modèles sont ceux avec la

couverture des FFE couplées avec une variable de densité. Le modèle linéaire basé sur la couverture des FFE est équivalent à celui basé sur la racine carrée de cette variable.

Tableau A1.5. Modèles de régression à deux variables, 2000-2002

Variable 1	Variable 2	R^2 (%)	RMSE
Couverture des FFE	Tiges > 1 m	54,1	4,67
Racine carrée (couverture des FFE+1)	Tiges > 1 m	54,0	4,67
Racine carrée (couverture des FFE +1)	Résineux < 1 m	53,1	4,72
Racine carrée (couverture des FFE +1)	Log(nombre de tiges)	51,2	4,81
Racine carrée (couverture des FFE +1)	Feuillus > 1 m	50,6	4,84
Racine carrée (couverture des FFE +1)	Nombre d'obstacles	50,4	4,85

Le tableau A1.6 contient les modèles de régression à trois variables qui un ont R^2 supérieur à 60% et dont toutes les variables sont significatives (α = 5 %). Les meilleurs modèles sont ceux avec la couverture des FFE. Les meilleurs modèles comprenant la couverture des FFE sont les modèles linéaires (sans racine carrée), comme dans le cas du modèle à deux variables.

Tableau A1.6. Modèles de régression à trois variables, 2000-2002

Variable 1	Variable 2	Variable 3	R^2 (%)	RMSE
Couverture des FFE	Tiges > 1 m	Nombre d'obstacles	61,2	4,31
Couverture des FFE	Tiges > 1 m	Résineux visibles	61,2	4,36
Couverture des FFE	Tiges > 1 m	Résineux < 1 m	59,3	4,47
Couverture des FFE	Tiges > 0,15 m	Mode de régénération	58,5	4,51

Aucun modèle à quatre variables n'a été retenu parce que la quatrième variable était colinéaire avec l'une des trois autres ou bien n'apportait pas suffisamment d'information supplémentaire pour

justifier les frais de mesurage de cette variable lors de l'application du modèle en conditions opérationnelles.

3. Sélection des modèles les plus prometteurs

Puisque les résultats de cette recherche étaient destinés à une application sur le terrain en conditions opérationnelles, il faut garder à l'esprit que chaque variable incluse dans le modèle retenu doit être mesurée sur le terrain pour prédire le temps effectif. Le principe de parcimonie s'applique donc dans le choix du nombre de variables. Les modèles les plus intéressants s'avéraient être ceux ayant trois variables.

Les équations 1 et 2 ci-dessous donnent les paramètres des modèles qui ont été retenus pour la validation. L'équation 1 correspond au meilleur modèle statistique disponible (nommé « statistical model » dans le chapitre 3). L'équation 2 correspond à un modèle statistique équivalent mais qui était utilisable immédiatement en conditions opérationnelles (nommé « operational model » dans le chapitre 3). Le deuxième modèle comprenant trois variables n'a pas été retenu parce qu'il contenait deux variables colinéaires : la densité de tiges ayant une hauteur supérieure à 1 m et la densité de résineux visibles (Tableau A1.6). La densité de tiges de hauteur dépassant un mètre inclut une partie des résineux visibles. Le troisième modèle de ce tableau était basé uniquement sur des variables concernant la végétation, ce qui apportait peu d'information nouvelle. Il n'a pas été retenu pour validation. Le quatrième modèle semblait utile pour l'utilisation dans des conditions opérationnelles puisqu'il intégrait une distinction entre la plantation et la régénération naturelle, un facteur souvent mentionné par les débroussailleurs comme affectant leur productivité.

Équation 1 Temps effectif = 3,06 + (0,26 • Couverture FFE) + (0,00012 • Densité H>1 m) + (0,022 • Nbre Obstacles/ha)

Équation 2 Temps effectif = 4,98 + (0,32 • Couverture FFE) + (0,0000536 • Densité H>0,15 m) + (3,12 • Mode de régénération)

4. Validation des modèles sélectionnés

Les modèles présentés ci-dessus (équations 1 et 2) ont été validés en utilisant la statistique PRESS qui permet de tester l'applicabilité d'un modèle à de nouveaux cas (Green, 1983). Ensuite, une seconde validation a été effectuée au moyen d'une validation croisée en 10 groupes (Pothier & Auger, 2011; Schneider, Riopel, Pothier, & Côté, 2008).

La statistique PRESS est obtenue en retranchant une donnée pour construire un modèle sans cette donnée (n-1 données), puis en prédisant la variable dépendante de la donnée retranchée avec ce modèle. L'erreur résiduelle est calculée en faisant la différence entre la valeur observée et la valeur prédite pour chaque donnée. Cette opération est répétée pour toutes les données de l'échantillon. La statistique PRESS est calculée en faisant la somme des carrés des erreurs de toutes les prédictions (équation 3) (Green, 1983).

Équation 3 PRESS = $\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \hat{Y}_i)$

où : Y_i = la i^{ième} observation de la variable dépendante

$\hat{Y}_i$ = l'estimateur de E(Y_i) excluant la i^{ième} observation

n = taille de l'échantillon

La validation croisée en 10 groupes est un test plus sévère que la statistique PRESS. Cette technique consiste à prélever aléatoirement 10% des données, et à construire un modèle à partir du

reste des données (les 90% restantes). Ce modèle est ensuite utilisé pour prédire la variable dépendante pour chacune des données prélevées. Une régression est ensuite construite pour comparer la valeur observée à la valeur prédite pour l'ensemble des données (valeur observée = $\beta_0 + \beta_1$*valeur prédite). Le coefficient de détermination (R^2) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de ce modèle sont utilisés pour l'interprétation de sa performance en prédiction.

Les résultats obtenus pour les deux méthodes de validation ont ensuite été comparées avec les résultats des équations. Une baisse trop forte du coefficient de détermination (R^2) et une augmentation trop importante du RMSE indique des problèmes de fiabilité du modèle lors de l'application à d'autres cas.

Le tableau A1.7 compare le R^2 et le RMSE des équations 1 et 2 avec la statistique PRESS. La réduction du R^2 est de 4% et de 3% pour les équations 1 et 2 respectivement. L'augmentation du RMSE est également faible dans les deux cas (0,17 et 0,11).

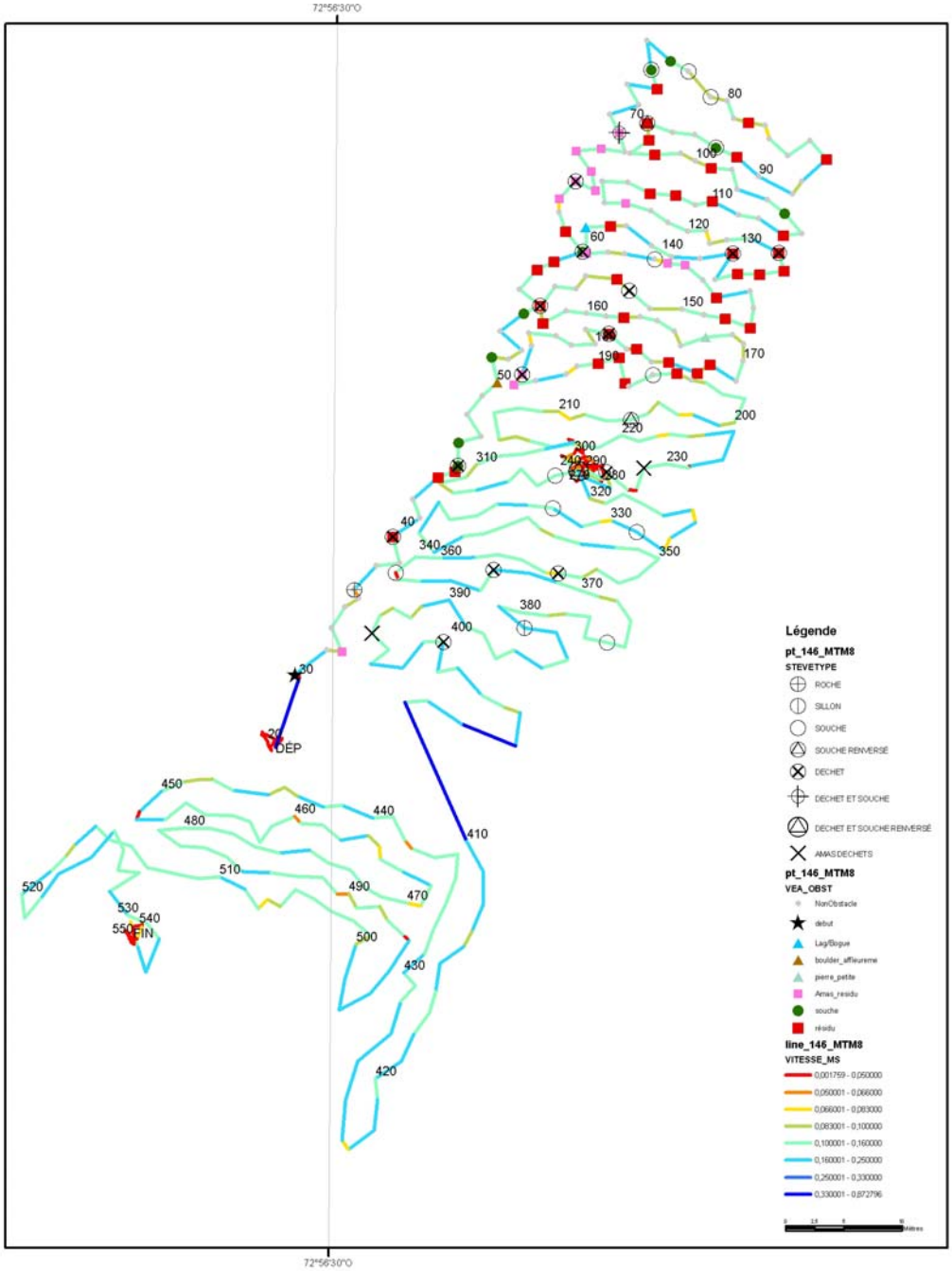
Tableau A1.7. Estimation de la capacité des modèles à prédire pour de nouveaux cas par la méthode de la statistique PRESS et par la validation croisée en 10 groupes

Modèle	Test	R^2	RMSE
Équation 1	Modèle avec toutes les données	61,4	4,30
	PRESS (modèles avec n-1 données)	56,9	4,50
	Validation croisée en 10 groupes aléatoires	57,4	4,47
Équation 2	Modèle avec toutes les données	58,2	4,48
	PRESS (modèles avec n-1 données)	54,1	4,64
	Validation croisée en 10 groupes aléatoires	55,2	4,59

Conclusion

Ces résultats suggèrent que les modèles présentés aux équations 1 et 2 sont adéquats pour prédire de nouveaux cas et qu'ils ne sont pas trop ajustés au jeu de données (overfitted). Les modèles seraient donc prédictifs et pourraient théoriquement être utilisés en conditions opérationnelles. Cependant, l'estimation du nombre d'obstacles nuisibles n'est pas pratique et coûterait trop cher puisqu'il faudrait observer le travailleur pour déterminer le taux unitaire à lui accorder. Il a donc été décidé d'utiliser le modèle de l'équation 2. Un guide d'utilisation de ce modèle a été produit pour assister sa mise en application en conditions opérationnelles (Dubeau et al., 2009).

ANNEXE 2 - Trajectoire quasi-systématique malgré la présence d'obstacles



RÉFÉRENCES

Akaike, H. (1973). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. Proceedings of the 2nd International Symposium of Information Theory, Budapest, Hungary.(pp. 267-281): Akademiai Kiado.

Annett, J., & Stanton, N. (2000). Task analysis. London: Taylor & Francis.

Anonyme. (1987). Stand improvement reimbursement rate determination for softwood stands in New Brunswick. Tiré de Department of Natural Resources.

Anonyme. (1992). Worker productivity in precommercial thinnings. Tiré de N.S. Department of Natural Resources, Forestry Branch, Forest Research Section.

Australian Government. (2011). FPIFGM2207B Undertake brushcutting operations. Consulté le November 12, Tiré de http://training.gov.au/Training/Details/FPIFGM2207B

Batty, D., & Kamel, M. S. (1995). Automating knowledge acquisition: a propositional approach to representing expertise as an alternative to repertory grid technique. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 7(1), 53-67.

Bell, F. W., Ride, K. R., St-Amour, M., & Ryans, M. (1997). Productivity, cost, efficacy and cost effectiveness of motor-manual, mechanical and herbicide release of boreal spruce plantations. The Forestry Chronicle, 73(1), 39-46.

Bellefleur, P., & Parent, G. (2009). Les biomes forestiers de la terre. In ORDRE DES INGÉNIEURS FORESTIERS DU QUÉBEC (dir.), Manuel de Foresterie. (2e éd., pp. 3-46). Québec.

Bellemare, C., & Shearer, B. (2010). Sorting, incentives and risk preferences: Evidence from a field experiment. Economics Letters, 108(3), 345-348.

Bender, K. A., Green, C., & Heywood, J. S. (2010). Piece Rates and Workplace Injury: Does Survey Evidence Support Adam Smith? SSRN eLibrary. Consulté le march, 25, Tiré de http://ssrn.com/paper=1632260

Berger, C. (2003). Mental stress on harvester operators. High tech forest operations for mountainous terrain, October 5-9, 2003.(pp. 1-10): Schlaegl - Austria.

Bergstrand, K.-G. (1991). Planning and analysis of forestry operation studies. Kista, Sweden: Forskningsstiftelsen Skogsarbeten (The Forest Operations Institute of Sweden).

Berthelette, D., & Abenhaim, L. L. (1984). La rémunération au rendement et la sécurité du travail: recherche synthèse. (E-005). Tiré de IRSST.

Bjorheden, R., & Thompson, M. A. (1995). An international nomenclature for forest work study. IUFRO 1995, 20th world congress; S3:04 subject area, Tampere, Finland.(Vol. Misc. Rep.

422, pp. 190-215): University of Maine, Orono Me. Tiré de http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/15500 access date: july 16, 2008

Blumenfeld, H. (2010). Neuroanatomy through clinical cases (Seconde éd.). Sunderland, MA 01375 U.S.A.: Sinauer Associates Inc.

Brais, S., Bélanger, N., Camiré, C., Drouin, P., Paré, D., Robitaille, A. (2009). Géolologie, dépôts de surface et sols forestiers. In ORDRE DES INGÉNIEURS FORESTIERS DU QUÉBEC (dir.), Manuel de Foresterie. (2e éd., pp. 47-124). Québec.

Bureau de normalisation du Québec. (2011). Programme de certification des pratiques de gestion des entreprises sylvicoles. Consulté le 10 novembre Tiré de http://www.bnq.qc.ca/fr/es/service.html#amenagement

Canadian Council of Forest Ministers. (2010). Base de données nationale sur les forêts - National forestry databasela dir. de.): Gouvernement du Canada,.

Carter, P. D., Patrick, J. D., & Deane, F. P. (2001). EXCOVE and using video in knowledge elicitation. Int. J. Human-computer studies, 54, 301-317.

Chabris, C., & Simons, D. (2010). The invisible gorilla - And other ways our intuitions deceive us. New York, USA: Crown publishers.

Chappe Software. (2007). Video Event Analysis. Tiré de http://chappesoftware.com/

Chatterjee, S., & Price, B. (1991). Regression analysis by example (2nd ed.e éd.). New York; Chichester; Brisbane; Toronto; Singapore: John Wiley & Sons, Inc.

Chengalur, S. N., Rodgers, S. H., & Bernard, T. E. (2004). Kodak's Ergonomic design for people at work (2e éd.): John Wiley & sons.

Collectif. (1996). Manuel de foresterie (Communications Science-Impacte éd.). Saint-Nicholas, QC: Les Presses de l'Université Laval.

Comité sectoriel de Main-d'oeuvre en aménagement forestier. (2004). Norme professionelle pour le métier d'ouvrière ou d'ouvrier sylvicole - débroussailleur. Consulté le June 22, Tiré de http://emploiquebec.net/publications/Pages-statiques/00_fnfmo_NP_TravauxSylvicolesDebroussailleur.pdf

Cooke, N. J. (1994). Varieties of knowledge elicitation techiques. International Journal of Human-Computer Studies, 41, 801-849.

Cordingley, E. S. (1989). Knowledge elicitation techniques for knowledge-based systems. In D. Diaper (dir.), Knowledge elicitation : principles, techniques, and applications. (pp. 270). New York: Ellis Horwood ltd.

Coulombe, G., Huot, J., Arseneault, J., Bauce, E., Bernard, J.-T., Bouchard, A. (2004). Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise - Rapport. http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/consultation/consultation-commission.jsp

Crandall, B., Klein, G., & R., H. R. (2006). Working minds - A Practitioner's Guide to Cognitive Task Analysis (MIT Presse éd.). Cambridge, Ma.

Dampier, J. E. E., Bell, F. W., St-Amour, M., Pitt, D. G., & Luckai, N. J. (2006). Cutting versus herbicides: Tenth-year volume and release cost-effectiveness of sub-boreal conifer plantations. The Forestry Chronicle, 82(4), 521-528.

De Franceschi, J. P., & Bell, F. W. (1990). Labor productivity and costs of motor-manual release of spruce from hardwoods in Manitoba. (NOR-X-312). Tiré de Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre.

Del Degan, B., & Dupuis, P. (2002). Enquête sur les coûts de la sylviculture en forêt publique 2000-2001 (Survey on silviculture costs on public land 2000-2001). Tiré de Del Degan, Massé & Associés inc.

Del Degan Massé et Ass., & Associés de recherche Ekos inc. (1996). DIAGNOSTIC SECTORIEL DE MAIN-D'OEUVRE EN AMÉNAGEMENT FORESTIER AU QUÉBEC. Consulté le 13 janvier 2012, Tiré de http://www.csmoaf.com/pdf/etudes/Diagnostic_sect.pdf

Department of Natural Ressources of Minnesota. (2005). DNR Garmin. St. Paul. Tiré de http://www.dnr.state.mn.us/mis/gis/tools/arcview/extensions/DNRGarmin/DNRGarmin.html

deVries, M. J., & Gordon, S. E. (1994). Estimating cognitive complexity and the need for cognitive task analysis. Proceedings of the 38th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society. Part 2 (of 2), Oct 24-28 1994, Nashville, TN, USA.(Vol. 2, pp. 1023-1027): Human Factors and Ergonomics Society, Inc., Santa Monica, CA, USA.

Diaper, D. (1989). Knowledge elicitation : principles, techniques, and applications. New York: Ellis Horwood Ltd.

Diederich, J., Ruhmann, I., & May, M. (1987). KRITON: a knowledge acquisition tool for expert systems. International Journal of Man-Machine Studies, 26, 29-40.

Doll, T. J., W., M. S., & E., S. D. (1992). Visual Search and Detection in Background Clutter. Innovations for Interactions. Proceedings of the Human Factors Society 36th Annual Meeting, Atlanta, Georgia, October 12-16, 1992. The Human Factors Society, Santa Monica, California, Volume 2.(pp. 1420 - 1424).

Doucet, R. (1973). Comparaison de deux méthodes d'éclaircie précommerciale applicables aux jeunes sapinières. Tiré de Ministère desTerres et forêts, Direction générale des forêts, Service de la recherche.

Doumanidis, H. (2004). Materials processing and manufacturing at the nanoscale: fundamental research and commercialization opportunities, Charlotte, NC, USA.(pp. 259): TMS.

Draper, N., & Smith, H. (1981). Applied Regression Analysis (Second Editione éd.). New York: John Wiley & Sons.

Dubeau, D., Imbeau, D., & Lebel, L. (2011). A hierarchical task analysis to uncover cognitive work in forest regeneration release operations. Applied Ergonomics.

Dubeau, D., LeBel, L., Imbeau, D., & Auger, I. (2011). Impacts of vegetation abundance and terrain obstacles on brushcutter performance during regeneration release. Northern Journal of Applied Forestry, in final revision.

Dubeau, D., LeBel, L. G., & Imbeau, D. (2009). Guide - Estimation de la productivité des débroussailleurs - Dégagement de la régénération -2e édition (Guide - Estimation of brushcutters productivity - Regeneration release - 2nd edition). Tiré de http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Dubeau-Denise/Guide-terrain2eEdition.pdf

Ellingsen, J. (1987). Productivity and cost variables in precommercial thinning. Precommercial Thinning Workshop, Fredericton, N.B.(pp. 105): Canadian Forestry Service - Maritimes.

Farrington-Darby, T., & Wilson, J. R. (2006). The nature of expertise: A review. Applied Ergonomics, 37(1), 17-32.

Ford, K. M., Petry, F. E., Adams-Webber, J. R., & Chang, P. J. (1991). An approach to knowledge acquisition based on the structure of personal construct systems. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 3(1), 78-88.

Fortier, J., & Messier, C. (2006). Are chemical or mechanical treatments more sustainable for forest vegetation management in the context of the TRIAD. The Forestry Chronicle, 82(6), 806-818.

Foulsham, T., & Underwood, G. (2011). If Visual Saliency Predicts Search, Then Why? Evidence from Normal and Gaze-Contingent Search Tasks in Natural Scenes. Cognitive Computation, 3(1), 48-63.

Gellerstedt, S. (1997). Mechanized cleaning of young forest - the strain on the operator. International Journal of Industrial Ergonomics, 20(2), 137-143.

Gellerstedt, S. (2002). Operation of the Single-Grip Harvester: Motor-Sensory and Cognitive Work. International Journal of Forest Engineering, 13(2).

Gordon, S. E. (1995). Cognitive task analysis using complementary elicitation methods. Proceedings of the 39th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society. Part 1 (of 2), Oct 9-13 1995, San Diego, CA, USA.(Vol. 1, pp. 525-529): Human Factors and Ergonomics Society, Inc., Santa Monica, CA, USA.

Gordon, S. E., & Gill, R. T. (1997). Cognitive task analysis. In C. E. Z. e. G. A. Klein (dir.), Naturalistic decision making. (pp. 131-140). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates inc.

Loi sur les Forêts, L.R.Q., chapitre F-4.1 C.F.R. (1986).

Gouvernement du Québec. (2000). Instructions relatives à l'application du règlement sur la valeur des traitements sylvicoles admissibles en paiement des droits : exercice 2000-2001 (Instructions for application of the rule and regulation establishing silvicultural treatments value : year of 2000-2001)la dir. de.), (pp. 67 p.). Québec, QC: Ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de l'assistance technique, Division des traitements sylvicoles.

Gouvernement du Québec. (2007). Instructions relatives à l'application du règlement sur la valeur des traitements sylvicoles admissibles en paiement des droits : exercice 2007-08la dir. de.). Québec, QC: Ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de l'assistance technique, Division des traitements sylvicoles.

Gouvernement du Québec. (2009). Chiffres-Clé du Québec forestier - 2009. Consulté le 15 octobre, Tiré de http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/chiffres-cles.pdf

Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier, L.R.Q., chapitre A-18.1 C.F.R. (2010).

Gouvernement du québec. (2011, avril 2011). Lois et Règlements - Les forêts. Tiré de http://www.mrn.gouv.qc.ca/lois/lois-forets.jsp

Green, E. J. (1983). Evaluating the Predictive Abilities of Regressions with PRESS. Forest Science, 29(4), 712-714.

Hartley, M. J. (2002). Rationale and methods for conserving biodiversity in plantation forests. Forest Ecology and Management, 155, 81-95.

Hoffman, B. F., Jr. (1987). Precommercial thinning. Journal of Forestry(Mars 1987), 16-18.

Hoffman Robert R., Shadbolt Nigel R., Burton A. Mike, & Klein Gary. (1995). Eliciting Knowledge from Experts: A Methodological Analysis. Organizational Behavior and Human Decision Processes, 62(2), 129-158.

Hoffman, R. R., Shadbolt, N. R., Burton, A. M., & Klein, G. (1995). Eliciting Knowledge from Experts: A Methodological Analysis. Organizational Behavior and Human Decision Processes, 62(2), 129-158.

Imbeau, D., Dubeau, D., & Farbos, B. (2007). Étude ergonomique d'un nouveau traitement sylvicole. (Études et recherches / Rapport R-540). Tiré de Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. www.irsst.qc.ca

Infopolis. (2007). Task Analysis Methods: Interview Techniques. Consulté le 18 avril, Tiré de http://www.ul.ie/~infopolis/methods/interv.html

Inoue, K. (1996). Operators' mental strain in operating the high proficient forestry machine. Journal of Forest Research, 1(4), 195-197.

Itti, L., Gold, C., & Koch, C. (2001). Visual attention and target detection in cluttered natural scenes. Optical Engineering, 40(9), 1784-1793.

Itti, L., & Koch, C. (2000). A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention. Vision Research, 40(10-12), 1489-1506.

Jobidon, R., Cyr, G., & Thiffault, N. (2004). Plant species diversity and composition along an experimental gradient of northern hardwood abundance in Picea mariana plantations. Forest Ecol. Manage., 198, 209-221.

Jobidon, R., Roy, V., & Cyr, G. (2003). Net effect of competing vegetation on selected environmental conditions and performance of four spruce seedling stock sizes after eight years in Québec (Canada). Ann. For. Sci., 60, 691-699.

Johansson, B., Rask, K., & Stenberg, M. (2010). Piece rates and their effects on health and safety - A litterature review. Applied Ergonomics, 41, 607-614.

Johnson, P. E., Zualkernan, I., & Garber, S. (1987). Specification of expertise. International Journal of Man-Machine Studies, 26(2), 161-181.

Jolliffe, I. T. (2002). Principal Component Analysis, Second Edition. New York: Springer-Verlag New York.

Kaila, S., Kiljunen, N., Miettinen, A., & Valkonen, S. (2006). Effect of timing of precommercial thinning on the consumption of working time in Picea abies stands in Finland. Scandinavian Journal of Forest Research, 21(6), 496-504.

Klein, G., Ross, K. G., Moon, B. M., Klein, D. E., Hoffman, R. R., & Hollnagel, E. (2003). Macrocognition. Intelligent Systems, IEEE [see also IEEE Intelligent Systems and Their Applications], 18(3), 81-85.

Klein, G. A., Calderwood, R., & MacGregor, D. (1989). Critical decision method for eliciting knowledge. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 19(3), 462-472.

Kowalski, B., & VanLehn, K. (1988). Cirrus: inducing subject models from protocol data. 10th Annual Conference of the Cognitive Science Society, Québec, Canada.(pp. 623-629).

Lacey, R. J., Lewis, M., & Sim, J. (2007). Piecework, musculoskeletal pain and the impace of workplace psychososial factors. Occupational medicine, 57, 430-437.

Langlois, J. (2004). Intégration des facteurs humains dans l'étude du travail de débroussailleur: dégagement de la régénération naturelle et artificielle (Integration of human factors in brushcutters' work study: natural and artificial regeneration release). (Mémoire de maîtrise), Université Laval, Sainte-Foy, QC.

LeBel, L., & Mercier, Y. (2000). Silvicultural contracting : a performance evaluation analysis of planting and spacing operations in Quebec. Technologies for the New Millenium Forestry, Kelowna, British Columbia.(pp. 4).

LeBel, L. G., & Dubeau, D. (2007). Predicting the productivity of motor-manual workers in precommercial thinning operations. The Forestry Chronicle, 83(2), 215-220.

Li, F. F., VanRullen, R., Koch, C., & Perona, P. (2002). Rapid natural scene categorization in the near absence of attention. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 99(14), 9596-9601.

Ligné, D., Eliasson, L., & Nordfjell, T. (2005). Time consumption and damage to the remaining stock in mechanised and motor manual pre-commercial thinning. Silva Fennica, 39 (3), 455-464.

McIlroy, R. C., & Stanton, N. A. (2011). Getting past first base: Going all the way with cognitive work analysis. Applied Ergonomics, 42, 358-370.

Mercier, Y. (2002). Étude des facteurs qui influencent la performance des entreprises sylvicoles par une approche de "benchmarking" (Study of factors influencing silvicultural contractor performance using benchmarking). Maîtrise, Université Laval, Québec.

Microsoft Corporation. (2003). Microsoft Office Excel (Version 2003 (11.8341.8341) SP3).

Miller, J. H., & Glover, G. R. (1993). Worker productivity and herbicide usage for pine release with manual application methods. Proceedings of the 46th Annual Meeting Southern Weed Science Society, Charlotte, NC.(Vol. 46): Southern Weed Science Society.

Mueller, J., Polanski, D., Foltin, C., & Polivaev, D. (2010). Freemind (Version 0.9.0). Tiré de http://freemind.sourceforge.net

Myers, R. H. (1990). Classical and modern regression with applications. Duxbury, California.

National Proficiency Tests Council (NPTC). (2006). Level 2, Certificate of competence in brushcutting operations - Assessment schedule. Consulté le November 11, Tiré de http://www.nptc.org.uk/

Needham, T., & Clements, S. (1989). Stand Factors Affecting Precommercial Thinning Productivity on Small Woodlots in New Brunswick. Tiré de Faculty of Forestry, University of New Brunswick.

Needham, T., & Hart, D. (1991). Forest stand factors affecting precommercial thinning productivity. Tiré de University of New Brunswick, Department of Forest Engineering.

O'Brien, T. (1994). The productivity of a modified method of pre-commercial thinning. Tiré de Nova Scotia Department of Natural Resources, Forestry Branch, Forest Research Section.

O'Hare, D., Wiggins, M., Williams, A., & Wong, W. (1998). Cognitive task analyses for decision centred design and training. Ergonomics, 41(11), 1698-1718.

O'Brien, K. S., & O'Hare, D. (2007). Situational awareness ability and cognitive skills training in a complex real-world task Ergonomics, 50(7), 1064-1091.

Ovaskainen, H., Uusitalo, J., & Väätäinen, K. (2004). Characteristics and significance of a harvester operators' working technique in thinnings. International Journal of Forest Engineering, 15(2), 67-77.

Paarsch, H. J., & Shearer, B. S. (1996). Fixed wages, piece rates and intertemporal productivity : a study of tree planters in British Columbia. Tiré de University of Iowa, Department of Economics.

Paarsch, H. J., & Shearer, B. S. (1997). On the elasticity of effort for piece rates : evidence from the British Columbia tree-planting industry. Tiré de University of Iowa, Department of Economics.

Paarsch, H. J., & Shearer, B. S. (2009). The response to incentives and contractual efficiency: Evidence from a field experiment. European Economic Review, 53(5), 481-494.

Paillé, P. (1994). L'analyse par théorisation ancrée. Cahiers de recherche sociologique, 147-181.

Parent, B., & Fortin, C. (2006). Ressource et industrie forestières - Portrait statistique - Édition 2005-2006. Consulté le 2006-12-15, Tiré de http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/stat_edition_complete/complete.pdf

Parent, B., & Fortin, C. (2007). Ressource et industrie forestières - Portrait statistique - Édition 2007. (ISBN 978-2-550-49780-6 (PDF)). Tiré de Ministère des Ressources naturelles, Direction des communications. http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/stat_edition_complete/complete.pdf

Parent, B., & Fortin, C. (2010). Ressource et industrie forestières - Portrait statistique - Édition 2010 (Ressource and forest industries - Statistical profile - 2010 Edition). Statistiques annuelles. Consulté le 13 janvier 2012, Tiré de http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-statistiques-complete.jsp

Phipps, D. L., Meakin, G. H., & Beatty, P. C. W. (2011). Extending hierarchical task analysis to identify cognitive demands andÂ information design requirements. Applied Ergonomics, 42(5), 741-748.

Pothier, D., & Auger, I. (2011). NATURA-2009 : un modèle de prévision de la croissance à l'échelle du peuplement pour les forêts du Québec.

Québec, G. d. (2004). Méthodes d'échantillonnage pour les inventaires d'intervention (inventaire avant traitement) et pour les suivis des interventions forestières (après martelage, après coupe et années antérieures): exercice 2004-05. In M. Blanchette (éd.), la dir. de.), (pp. 389 p.). Québec, QC: Ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de l'assistance technique, Division des traitements sylvicoles.

Rasmussen, J. (1983). Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, smc. 13(3), 257-266.

Roxio. (2004). VideoWave 7 professionnal. Santa Clara, CA 95050: Roxio, Inc. . Tiré de http://www.roxio.com/

Samset, I. (1986). Tidsstudier av avstandsregulering med motorrydningssag i ung granskog = Time studies of juvenile thinning with motorpowered brush-saw in young stands of Norway Spruce. Tiré de Norsk institutt for skogforskning (Norwegian Forest Research Institute).

Sanderson, P. M., James, J. M., & Seidler, K. (1989). SHAPA: an interactive software environment for protocol analysis. (EPRL-89-08). Tiré de University of Illinois at Urbana-Champaign.

Sanderson, P. M., Verhage, A. G., & Fuld, R. B. (1989). Cognitive engineering and continuous process control: empirical methods for a compex world. (EPRL-89-01). Tiré de University of Illinois at Urbana-Champaign.

SAS Institute, I. (2004). SAS/STAT User's Guide Release 9.1.3 (Edition. Carye éd.): NC : SAS Institute Inc.

Schneider, R., Riopel, M., Pothier, D., & Côté, L. (2008). Predicting decay and round-wood end use volume in trembling aspen (Populus tremuloides Michx.). Ann. For. Sci., 65(6), 608.

Services Canada. (2011, juin). Perspectives sectorielles 2011-2013 - Région du Saguenay-Lac-St-Jean. Tiré de http://www.servicecanada.gc.ca/fra/qc/perspectives_sectorielles/ps_SaguenayPartie2A.shtml

Seymour, R. S., Ebeling, R. A., & Gadzik, C. J. (1984). Operationnal density control in spruce-fir sapling stands : production of a mechanical swath cutter and brush-saw workers. Tiré de University of Maine, Maine Agricultural Experimentation Station, College of forest resources, Cooperative Forestry Research Unit.

Seymour, R. S., & Gadzik, C. J. (1985). A Nomogram for predicting precommercial thinning costs in overstocked spruce-fir stands. Northern journal of applied forestry, 2(Juin 1985), 37-40.

Shaw, M. L. G., & Woodward, J. B. (1990). Modeling expert knowledge. Knowledge Acquisition, 2(3), 179-206.

Shepherd, A. (2001). Hierarchical task analysis. London: Taylor and Fancis.

Stanton, N. A. (2006). Hierarchical task analysis: developments, applications and extensions. Applied Ergonomics 55-79.

Sullman, M., & Kirk, P. (1998). Mental workload of mechanised processing with a single grip harvester. Tiré de New Zealand Logging Industry Research Organisation.

Sundström-Frisk, C. (1984). Behavioural control through piece-rate wages. Journal of Occupational Accidents, 6, 49-59.

Svensson, S. A. (1971). Time functions for cleaning in young stands with brush saw. Tiré de Forskningsstiftelsen (Logging Research Foundation).

Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2001). Using multivariate statistics. Needham Heights, MA: Allyn and Bacon.

Ter-Mikaelian, M. T., Wagner, R. G., Bell, F. W., & Shropshire, C. (1999). Comparison of photosynthetically active radiation and cover estimation for measuring the effects of interspecific competition on jack pine seedlings. Can. J. For. Res., 29, 883-889.

Thiffault, N., & Roy, V. (2010). Living without herbicides in Québec (Canada): historical context, current strategy, research and challenges in forest vegetation management. European Journal of Forest research, 130(1), 117-133.

Thompson, D. G., & Pitt, D. G. (2003). A review of Canadian forest vegetation management research and practice. Annals of Forest science, 60, 559-572.

Toupin, D. (2004). Étude multidisciplinaire des débroussailleurs forestiers au Québec: intégration des mesures de l'effort du travailleur dans le système de rémunération. (Mémoire de maîtrise), Université Laval, Sainte-Foy, QC.

Toupin, D., Lebel, L., Dubeau, D., Imbeau, D., & Bouthillier, L. (2007). Measuring the productivity and physical workload of brushcutters within the context of a production-based pay system. Forest Policy and Economics, 9(8), 1046-1055.

Underwood, G., Foulsham, T., van Loon, E., & Underwood, J. (2005). Visual attention, visual saliency, and eye movements during the inspection of natural scenes, Berlin, Germany.(pp. 459-468): Springer-Verlag.

Vicente, K. J. (1995). Task analysis, cognitive task analysis, cognitive work analysis: what's the difference? Proceedings of the 39th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society. Part 1 (of 2), Oct 9-13 1995, San Diego, CA, USA.(Vol. 1, pp. 534-537): Human Factors and Ergonomics Society, Inc., Santa Monica, CA, USA.

Wang, G. G., Su, J., & Wang, J. R. (2000). Height growth of planted black spruce seedlings in response to interspecific vegetation competition: a comparison of four competition measures at two measuring positions Can. J. For. Res. , 30, 573-579.

Waterman, D. A., & Newell, A. (1971). Protocol analysis as a task for artificial intelligence. Artificial Intelligence, 2, 285-318.

WorkSafeBC. (2008). Guidelines for Workers Compensation Act and OHS Regulation - Guidelines Part 26 - Forestry Operations. Consulté le January 11, Tiré de http://www2.worksafebc.com/Publications/OHSRegulation/GuidelinePart26.asp#SectionNumber:G26.16

Wyatt, S., Rousseau, M.-H., Nadeau, S., Thiffault, N., & Guay, L. (2011). Social concerns, risk and the acceptability of forest vegetation management alternatives: Insights for managers. The Forestry Chronicle, 87(2), 274-289.

Zsambok, C. E., & Klein, G. A. (1997). Naturalistic decision making. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates inc.