



**Automatisation de la fonction de façonnage de deux
têtes d'abatteuses-façonneuses**
Effets sur la productivité et le taux de conformité des billes façonnées

Mémoire

Mathieu Bouchard

Maîtrise en sciences forestières
Maître ès sciences (M.Sc.)

Québec, Canada

© Mathieu Bouchard, 2016

**Automatisation de la fonction de façonnage de deux
têtes d'abatteuses-façonneuses**
Effets sur la productivité et le taux de conformité des billes façonnées

Mémoire

Mathieu Bouchard

Sous la direction de :

Daniel Beaudoin, directeur de recherche

Luc LeBel, codirecteur de recherche

RÉSUMÉ

Pour rester compétitives, les entreprises forestières cherchent à contrôler leurs coûts d'approvisionnement. Les abatteuses-façonneuses sont pourvues d'ordinateurs embarqués qui permettent le contrôle et l'automatisation de certaines fonctions. Or, ces technologies ne sont pas couramment utilisées et sont dans le meilleur des cas sous-utilisées. Tandis que l'industrie manifeste un intérêt grandissant pour l'utilisation de ces ordinateurs, peu de travaux de recherche ont porté sur l'apport en productivité et en conformité aux spécifications de façonnage découlant de l'usage de ces systèmes.

L'objectif de l'étude était de mesurer les impacts des trois degrés d'automatisation (manuel, semi-automatique et automatique) sur la productivité (m^3/hmp) et le taux de conformité des longueurs et des diamètre d'écimage des billes façonnées (%).

La collecte de données s'est déroulée dans les secteurs de récolte de Produits forestiers résolu au nord du Lac St-Jean entre les mois de janvier et d'août 2015. Un dispositif en blocs complets a été mis en place pour chacun des cinq opérateurs ayant participé à l'étude. Un seuil de 5 % a été employé pour la réalisation de l'analyse des variances, après la réalisation de contrastes.

Un seul cas a présenté un écart significatif de productivité attribuable au changement du degré d'automatisation employé, tandis qu'aucune différence significative n'a été détectée pour la conformité des diamètres d'écimage; des tendances ont toutefois été constatées. Les conformités de longueur obtenues par deux opérateurs ont présenté des écarts significatifs. Ceux-ci opérant sur deux équipements distincts, cela laisse entrevoir l'impact que peut aussi avoir l'opérateur sur le taux de conformité des longueurs.

ABSTRACT

All forest companies try to control their supply costs. Single-grip harvesters are equipped with onboard computers that allow control and automation of some functions. However, these technologies are not used on a regular basis and are in the best cases underutilized. While industrials are showing a growing interest in the utilization of these systems, there have been only a few studies that have documented the impacts of the use of these systems on productivity and quality conformity.

The objective of this study was to measure the impacts on productivity and on bucking quality of different degrees of automation of the bucking of a single-grip harvester head. Three different automation degrees, manual, semi-automatic and automatic, have been compared with two different teams composed of 5 operators. Each operator was a different case study.

Comparisons were realized on the obtained productivities and on the conformities of the logs lengths and topping diameters. Data collection was made on the logging sites operated by Resolute forest products, in the northern part of Lac St-Jean between January and August 2015.

A 5% significance level has been used to realise the variances analysis, where contrasts were employed. Only one case study showed a significant productivity difference linked to the in the automation degree changes. Even if the collected data did not show significant differences on the topping diameters conformities, some tendencies were detected. However, significant differences were detected on the conformity of the lengths of the logs of two operators. Because those two operators work on different harvesters, this might show that the operator can have an impact on the lengths conformity.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT.....	iv
TABLE DES MATIERES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES	ix
REMERCIEMENTS	xi
1. Introduction	1
1.1 Objectifs et hypothèses de recherche.....	3
2. Revue des connaissances.....	4
2.1 Productivité	4
2.2 Qualité et conformité des produits	9
3. Matériel et méthodes	16
3.1 Dispositif de recherche.....	16
3.1.1 Mesure de la productivité.....	21
3.1.2 Mesure de la conformité de la qualité.....	23
3.1.3 Analyses statistiques	27
3.1.4 Équipements utilisés.....	29
3.1.5 Entrevues semi-dirigées	32
4. Résultats et Discussion	34
4.1 Productivité	34
4.2 Taux de conformité de la qualité	43
4.2.1 Longueurs au seuil de tolérance de ± 5 centimètres	44
4.2.2 Longueurs au seuil de tolérance de ± 3 centimètres	48
4.2.3 Diamètre d'écimage des billes	51
4.2.4 Diamètre des cimes sur le parterre de coupe	54
4.3 Entrevues semi-dirigées.....	57
4.3.1 Expérience et méthode de travail des opérateurs	57
4.3.2 Perceptions face aux degrés d'automatisation.....	59
4.3.3 Perceptions face aux tests	60
5. Problèmes d'implantations et recommandations	61
5.1 Dispositif de collecte de données.....	61
5.2 Liste de prix.....	62
5.3 Calibration.....	64
5.4 Formation et réglages des logiciels.....	64
6. Conclusion	65
7. Références	68
ANNEXE A.....	70
ANNEXE B.....	73
ANNEXE C	77
ANNEXE D	81
ANNEXE E.....	84
ANNEXE F.....	88
ANNEXE G	90

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Longueurs utilisées lors de la mesure des billes avant le façonnage (adapté de Marshall [2005]).....	10
Tableau 3.1 : Détails des quarts de travail de chaque opérateur.....	18
Tableau 3.2 : Description des degrés d'automatisation.....	19
Tableau 3.3 : Informations sur les degrés d'automatisation selon l'opérateur.....	20
Tableau 3.4 : Sommaire du nombre d'observations visé et des contrastes à réaliser pour chaque opérateur.....	28
Tableau 3.5 : Nombre de degrés de liberté associé au modèle retenu pour la productivité pour chaque opérateur.....	28
Tableau 3.6 : Nombre de degrés de liberté associé au modèle retenu pour la conformité de la qualité pour chaque opérateur.....	28
Tableau 3.7 : Résumé des informations sur les équipements utilisés lors de la collecte de données.....	31
Tableau 4.1 : Contrastes réalisés par opérateur.....	34
Tableau 4.2 : Informations de l'échantillonnage de la productivité et sur les peuplements rencontrés : Opérateur 1B.....	35
Tableau 4.3 : Informations de l'échantillonnage de la productivité et sur les peuplements rencontrés : Opérateur 2B.....	36
Tableau 4.4 : Informations de l'échantillonnage de la productivité et sur les peuplements rencontrés : Opérateur 3B.....	36
Tableau 4.5 : Informations de l'échantillonnage de la productivité : Opérateur 4A.....	37
Tableau 4.6 : Informations de l'échantillonnage de la productivité : Opérateur 5A.....	37
Tableau 4.7 : Statistiques descriptives des données de productivité recueillies pour chaque opérateur.....	37
Tableau 4.8 : Résultats des contrastes réalisés à partir des données de productivité recueillies pour chaque opérateur.....	38
Tableau 4.9 : Données sur la productivité de l'opérateur 1B par bloc test.....	40
Tableau 4.10 : Données sur la productivité de l'opérateur 2B par bloc test.....	40
Tableau 4.11 : Données sur la productivité de l'opérateur 3B par bloc test.....	41
Tableau 4.12 : Données sur la productivité de l'opérateur 4A par bloc test.....	41
Tableau 4.13 : Données sur la productivité de l'opérateur 5A par bloc test.....	41
Tableau 4.14 : Informations de l'échantillonnage du taux de conformité de la qualité : Opérateur 1B.....	43
Tableau 4.15 : Informations de l'échantillonnage du taux de conformité de la qualité : Opérateur 3B.....	44
Tableau 4.16 : Informations de l'échantillonnage du taux de conformité de la qualité : Opérateur 4A.....	44
Tableau 4.17 : Informations de l'échantillonnage du taux de conformité de la qualité : Opérateur 5A.....	44
Tableau 4.18 : Statistiques descriptives des données de conformité des longueurs au seuil de ± 5 cm recueillies pour chaque opérateur.....	45
Tableau 4.19 : Résultats des contrastes réalisés à partir des données de conformité des longueurs au seuil de ± 5 cm recueillies pour chaque opérateur.....	45

Tableau 4.20 : Données sur le pourcentage de conformité de la longueur des billes à ± 5 centimètres de la cible de l'opérateur 1B par bloc test	46
Tableau 4.21 : Données sur la pourcentage de conformité de la longueur des billes à ± 5 centimètres de la cible de l'opérateur 3B.....	46
Tableau 4.22 : Données sur le pourcentage de conformité de la longueur des billes à ± 5 centimètres de la cible de l'opérateur 4A.....	47
Tableau 4.23 : Données sur le pourcentage de conformité de la longueur des billes à ± 5 centimètres de la cible de l'opérateur 5A.....	47
Tableau 4.24 : Statistiques descriptives des données de conformité des longueurs au seuil de ± 3 cm recueillies pour chaque opérateur	48
Tableau 4.25 : Résultats des contrastes réalisés à partir des données de conformité des longueurs au seuil de ± 3 cm recueillies pour chaque opérateur	48
Tableau 4.26 : Données sur le pourcentage de conformité des longueurs à ± 3 cm de l'opérateur 1B	49
Tableau 4.27 : Données sur le pourcentage de conformité des longueurs à ± 3 cm de l'opérateur 3B	49
Tableau 4.28 : Données sur le pourcentage de conformité des longueurs à ± 3 cm de l'opérateur 4A	50
Tableau 4.29 : Données sur le pourcentage de conformité des longueurs à ± 3 cm de l'opérateur 5A	50
Tableau 4.30 : Statistiques descriptives des données de conformité des diamètres d'écimage des billes recueillies pour chaque opérateur	51
Tableau 4.31 : Résultats des contrastes réalisés à partir des données de conformité des diamètres d'écimage des billes recueillies pour chaque opérateur	52
Tableau 4.32 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres d'écimage des billes de l'opérateur 1B	53
Tableau 4.33 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres d'écimage des billes de l'opérateur 3B	53
Tableau 4.34 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres d'écimage des billes de l'opérateur 4A	53
Tableau 4.35 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres d'écimage des billes de l'opérateur 5A	54
Tableau 4.36 : Statistiques descriptives des données de conformité des diamètres d'écimage des cimes laissées sur le parterre de coupe recueillies pour chaque opérateur ..	54
Tableau 4.37 : Résultats des contrastes réalisés à partir des données de conformité des diamètres des cimes laissées sur le parterre de coupe recueillies pour chaque opérateur ..	54
Tableau 4.38 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres des cimes sur le parterre de coupe de l'opérateur 1B	55
Tableau 4.39 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres des cimes sur le parterre de coupe de l'opérateur 3B	56
Tableau 4.40 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres des cimes sur le parterre de coupe de l'opérateur 4A	56

Tableau 4.41 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres des cimes sur le parterre de coupe de l'opérateur 5A.....	56
--	----

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Variation de la productivité lors du façonnage selon la portion de la tige qui est mesurée préalablement au façonnage (adapté de Marshall, 2005).....	11
Figure 2.2 : Variation du volume en fonction de la mesure de référence pour le bois de sciage et de pâte (tiré de Nieuwenhuis et Dooley [2006]).....	15
Figure 3.1 : Localisation des 9 secteurs d'intervention	17
Figure 3.2 : Terminologie utilisée pour référer à différentes unités spatiales opérationnelles dans les opérations forestières.....	18
Figure 3.3 : Illustration du dispositif expérimental utilisé lors de la collecte de données pour l'opérateur 1B.....	20
Figure 3.4 : Échantillon de billes étendues dans le chemin (A-1000, secteur Vermillion). Photo : M. Bouchard	24
Figure 3.5 : Schéma du processus utilisé lors de la mesure des longueurs et des diamètres d'écimage des billes sur le parterre de coupe.....	26
Figure 3.6 : Illustration d'une tête Log Max 7000 XT (Source : Log Max Service Manual TA-2011/001-EA)	30
Figure 3.7 : Tête Log Max 7000 XT (Photo : M. Bouchard)	30
Figure 3.8 : Tête Ponsse H7 (Photo : M. Bouchard)	31
Figure 3.9 : Vernier électronique Ponsse Caliper+ (Photo : M. Bouchard)	32
Figure 5.1 : Représentation d'une matrice de décision tirée du logiciel Log Mate 500..	62
Figure A.1 : Symboles utilisés par le logiciel Log Mate 500 pour indiquer le degré d'automatisation A) manuel B) automatique C) semi-automatique.....	71
Figure A.2 : Capture d'écran de l'interface du menu du degré d'automatisation dans le logiciel Opti4G.....	72

Failure is not an option
— Gene Kranz (Ed Harris), *Apollo 13* (1995)

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur, M. Daniel Beaudoin, ainsi que mon codirecteur, M. Luc LeBel pour leurs encouragements et le soutien qu'ils m'ont accordé tout au long du projet. L'atteinte des objectifs n'aurait tout simplement pas été possible sans la confiance et la latitude qui m'ont été accordées.

Je remercie le consortium de recherche FORAC et son personnel pour sa collaboration.

Je tiens à souligner le soutien financier accordé par le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et par les Fonds de recherche québécois Nature et technologie (FRQNT) par l'entremise de la bourse BMP Innovations.

Je remercie aussi Produits forestiers résolu pour son soutien financier, technique et pratique. Je tiens à remercier spécifiquement mon superviseur en milieu pratique, M. Julien Pedneault pour sa grande disponibilité, son soutien inconditionnel et sa grande motivation face au projet. Je tiens aussi à remercier les autres membres de l'équipe d'amélioration continue, M. Gilles Bouchard et M. Jérôme Fontaine, pour toutes les connaissances et le soutien qu'ils m'ont fourni. Le succès de la portion terrain de ce projet n'aurait pas été envisageable sans l'énorme contribution de ces trois individus. Je remercie aussi tous les autres membres du personnel de Produits forestiers résolu qui ont contribué de près ou de loin au succès de ce projet.

Je remercie M. Yoland Duchesne et M. Éric Dionne pour leur précieuse collaboration.

Je tiens à remercier M. Jean Plamondon de FPInnovations pour son soutien technique et sa collaboration.

Je remercie aussi M. Pierre-Serge Tremblay pour ses conseils, et avec qui j'ai eu la chance d'avoir plusieurs discussions enrichissantes. Je remercie dans la même veine mes collègues de bureau pour leur soutien, leur écoute et leurs conseils.

Je tiens finalement à remercier ma famille ainsi que ma conjointe Marie-Hélène de m'avoir accordé leur appui à travers cette épopée.

1. Introduction

La compétition pour les produits forestiers s'effectue dorénavant au niveau international, tel que c'est le cas pour la plupart des industries situées au Canada. Bien qu'il doit faire face à de la compétition provenant de divers pays, le secteur forestier de l'est du Canada reste fortement dépendant au marché américain. Les événements comme la crise du bois d'œuvre, la crise économique ou l'éclatement de la bulle immobilière américaine avec les lourdes conséquences qui en ont découlé (pertes d'emploi, ralentissement de l'activité industrielle, fermetures d'usines) illustrent bien les conséquences possibles de cette dépendance.

Deux constats peuvent dès lors être mis en évidence. Premièrement, il importe, pour toute entreprise œuvrant dans le milieu forestier ou souhaitant y œuvrer, d'être à l'avant-garde des avancées technologiques, pour être en mesure de profiter des gains potentiels qui y sont reliés. Le contrôle des coûts est aussi essentiel pour conserver ses parts de marchés. En effet, que ce soit le prix d'acquisition des équipements, le coût du pétrole, les coûts de main-d'œuvre ou le coût de la matière première elle-même, les dépenses tendent à augmenter avec le temps. Une solution envisagée face à cette réalité passe par l'augmentation de la productivité, c'est-à-dire la production d'un volume supérieur (mètres cubes, m³) pour une même période de temps productive (heure-machine productive, hmp). La qualité des produits façonnés n'en est pas moins importante, car ceux-ci doivent correspondre aux besoins précis du marché.

Aujourd'hui, les différentes machines forestières sont équipées d'une panoplie de dispositifs, logiciels et autres moyens pour assister l'opérateur dans sa tâche. Cependant, des idées préconçues sont parfois ancrées dans la culture de ces opérateurs de machinerie forestière. En effet, les commentaires recueillis sur le terrain laissent supposer qu'un nombre élevé de ceux-ci croit que l'ordinateur contribue à ralentir le rythme de prise de décisions lors du façonnage des arbres abattus. Ils ne perçoivent donc pas ces outils comme une solution, mais plutôt comme une contrainte. La valorisation de ces outils peut également être contrainte par la méfiance des propriétaires d'équipements face à l'emploi de la technologie informatique. La complexité accrue de l'activité de récolte avec une abatteuse-façonneuse, de même que l'apparition de pannes supplémentaires associées aux composantes électroniques sont aussi des limites à ce développement.

L'influence de l'opérateur sur la productivité est élevée (Erlor et Purfürst, 2011). Le procédé de récolte par bois tronçonné, employant une abatteuse-façonneuse, implique qu'une série de décisions soit prise par l'opérateur lors du façonnage à la souche de l'arbre abattu : longueurs à utiliser, diamètre au fin bout, façonnage des défauts, etc. Cela a une influence directe sur la production journalière pouvant être obtenue. Les impacts sont aussi visibles sur d'autres aspects, notamment sur les transformations subséquentes qui pourront être accomplies (panier de produits) et donc sur la valeur qui pourra en être tirée.

Cette nécessité de prise de décisions se traduit par l'activation d'environ 4000 commandes par heure (Gellerstedt. 2002), ce qui entraîne une fatigue à l'opérateur et laisse une place importante à l'erreur humaine. L'influence de l'opérateur sur la productivité peut expliquer, selon les études, entre 20 et 55 % des variations enregistrées (Glöde(1999), cité par Erlor et Purfürst. 2011). Les normes de façonnage sont aussi fréquemment modifiées pour suivre les fluctuations des marchés des différents produits. Ces modifications rapides ont des impacts majeurs sur les décisions qui doivent être prises lors du façonnage. Le risque d'erreur de façonnage augmente donc et des périodes d'adaptation deviennent nécessaires, au cours desquelles le taux de conformité aux nouvelles normes de façonnage peut fluctuer de façon importante. La qualité des produits façonnés en forêt, tout comme la productivité, s'en trouvent donc affectées, et cela crée de nombreuses problématiques une fois à l'usine de transformation. Par exemple, la non-conformité des billes livrées nuit au ratio de transformation du bois d'œuvre ($m^3/MPMP$), ce qui contribue à accroître les coûts de l'entreprise et à réduire sa compétitivité sur les marchés.

La nécessité de prise de décisions par l'opérateur limite aussi le nombre de spécifications qui peuvent être demandées, pour ne pas surcharger cognitivement ce dernier et ainsi affecter la productivité. Les normes doivent conserver une certaine « simplicité » : le potentiel de transformation en forêt semble donc sous-exploité.

Bien qu'un nombre important d'abatteuses-façonneuses soient équipées d'ordinateurs de bord performants, l'utilisation du potentiel ciblant le façonnage demeure globalement marginale. Un certain nombre de décisions et d'actions actuellement sous la responsabilité de l'opérateur pourraient être assistées par l'ordinateur. La tâche de l'opérateur s'en trouverait allégée, ce qui lui permettrait de se concentrer sur d'autres aspects de la production.

1.1 Objectifs et hypothèses de recherche

L'objectif de ce projet était d'évaluer l'impact de trois degrés d'automatisation (manuel, semi-automatique et automatique) de la fonction de façonnage des têtes d'abatteuse-façonneuse sur la performance de l'opération d'abattage-façonnage. Plus spécifiquement, le projet visait à mesurer :

- 1) les impacts de trois degrés d'automatisation sur la productivité de l'abattage-façonnage (m^3 par heure machine productive).
- 2) les impacts de trois degrés d'automatisation sur le taux de conformité des longueurs et des diamètres d'écimage des billes façonnées (%).

Deux hypothèses ont été émises pour ce projet de recherche :

- 1) La productivité de l'abattage-façonnage s'accroît avec l'accroissement du degré d'automatisation du façonnage des têtes d'abatteuse-façonneuse.
- 2) Les taux de conformité des indicateurs de qualité augmentent avec l'accroissement du degré d'automatisation du façonnage des têtes d'abatteuse-façonneuse.

En effet, il a été supposé qu'en utilisant le degré d'automatisation automatique, l'opérateur se verrait imposer une cadence de travail par l'ordinateur de bord, permettant d'augmenter sa productivité. Dans la même optique, il était initialement supposé qu'une diminution du nombre d'interventions humaines grâce à une automatisation plus importante réduirait le risque d'erreur et augmenterait les taux de conformité des indicateurs de qualité retenus.

2. Revue des connaissances

Le survol de la littérature permet de constater que quelques travaux ont été réalisés portant sur le sujet à l'étude. La plupart d'entre eux visaient à quantifier la récupération possible de valeur quant à l'utilisation de logiciels d'optimisation pour effectuer le choix du patron de façonnage à utiliser. Ce choix permettait une transformation subséquente créant plus de valeur. D'autres études ciblaient quant à elles l'impact de l'opérateur sur la productivité, en fonction de l'expérience de ce dernier. Finalement, il est pertinent de survoler la littérature visant les courbes d'apprentissage des travailleurs forestiers de même que ceux traitant de la précision pouvant être obtenue des données provenant de la tête d'abattage. Dans le premier cas, la courbe d'apprentissage représente un élément majeur étant donné que, pour les opérateurs, l'emploi de l'ordinateur de bord implique souvent un changement dans la méthode de travail s'accompagnant d'une période d'apprentissage et d'adaptation. La connaissance de la précision du système de mesure de la tête est également importante, car ce sont ces données qui seront utilisées lors des analyses.

La littérature pertinente sur l'utilisation des ordinateurs de bord a donc été regroupée en deux grandes catégories. La première catégorie regroupe les études ciblant l'aspect de la productivité, tandis que la deuxième catégorie regroupe les travaux portant sur l'aspect de la qualité et de la conformité du façonnage.

2.1 Productivité

De nombreux facteurs peuvent avoir un impact sur la productivité de l'opération de récolte du bois à l'aide d'une abatteuse-façonneuse (Hiesl et Benjamin, 2013). Par exemple, des études ont été réalisées pour vérifier l'effet du volume par tige (mètre-cube par tige) (Jiroušek et al, 2007 ; Nakagawa et al, 2010; Gerasimov et al, 2011; Spinelli et al, 2002), du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) moyen des tiges récoltées (Nakagawa et al, 2010), de la composition en essences du peuplement (Gerasimov et al, 2011) et de la longueur des produits façonnés (Spinelli et al, 2002).

Les impacts sur la productivité de l'automatisation de certaines fonctions de l'abatteuse-façonneuse ont aussi été étudiés. L'étude de Brander et al. (2004) cherchait à évaluer l'impact de l'automatisation de différentes fonctions reliées au contrôle de la flèche d'abattage sur la productivité. L'équipe de chercheurs disposait d'un simulateur : ils ont donc pu évaluer la productivité de chaque opérateur dans des conditions de travail

contrôlées. La base de comparaison est par conséquent équivalente grâce au contrôle des variables telles que la pente, la densité des tiges et les conditions climatiques, rendant plus aisées les comparaisons.

Les comparaisons ont été réalisées entre la productivité d'un opérateur d'expérience (aucune automatisation) et les productivités obtenues par des opérateurs inexpérimentés, qui ont successivement employé différentes fonctions d'automatisation du contrôle de la flèche d'abattage. Cinq fonctions ont été étudiées :

1. Alignement automatique de la tête lors du déplacement vers le prochain arbre;
2. Redressement automatique de la tête après abattage (dès que possible);
3. Positionnement pour faciliter le façonnage après la coupe;
4. Déplacement du mât pour créer de nouveaux empilements lors du façonnage de nouveaux produits;
5. Positionnement de la tête dans le sentier lorsque le diamètre non marchand est atteint.

Les résultats ont montré que le cadre actuel d'opération (contrôle manuel, sans assistance de l'ordinateur embarqué pour le contrôle de la flèche) permettait aux opérateurs débutants sur l'abatteuse-façonneuse d'atteindre une productivité moyenne correspondant à environ 25 % de celle qui était atteinte par l'opérateur expérimenté. La mesure de la productivité de ce dernier représentait l'élément comparatif dans l'étude. Cependant, l'introduction des fonctions de contrôle automatisées de la flèche permettait de réduire cet écart, les opérateurs inexpérimentés atteignant jusqu'à 80 % de la productivité de l'opérateur de référence. L'automatisation des fonctions étudiées permet donc d'atteindre plus rapidement une productivité « satisfaisante », et donc d'atténuer les effets financiers de la période d'apprentissage. Selon Gellerstedt et al. (2005) dans Purfürst (2010), la période d'apprentissage, d'une durée moyenne de 8 mois coûterait jusqu'à 75 000 \$ en perte de productivité (pertes non récurrentes). L'automatisation des fonctions de la flèche a aussi permis la réduction du temps nécessaire pour façonner un arbre de 29 %, tout en contribuant à la perception d'une charge de travail moins lourde auprès des débutants. Les effets de l'utilisation des logiciels d'automatisation de la flèche d'abattage sur la productivité d'un opérateur d'expérience n'ont toutefois pas été rapportés. La réalisation strictement en simulateur des expérimentations réalisé par Löfgren et al. (2004) limite donc la portée des résultats dans un contexte opérationnel d'application. Au Québec, étant donné la moyenne d'âge élevée du bassin d'opérateurs en place et une volonté exprimée

d'introduire les fonctionnalités d'automatisation des nouvelles têtes d'abattage, il semble pertinent d'étudier ce cas précis.

Le facteur humain sur la productivité de l'abattage-façonnage a aussi fait l'objet de quelques études. Tel qu'expliqué par cette traduction libre de Erler et Purfürst (2011), disant qu' « un opérateur d'expérience est essentiel pour qu'un entrepreneur puisse maximiser son investissement », les opérateurs œuvrant pour un entrepreneur forestier peuvent avoir un grand impact sur les résultats qui seront obtenus par l'équipe de récolte. Le recrutement d'opérateurs compétents est cependant difficile : la complexité des équipements, les changements dans les spécifications de façonnage et les standards élevés de qualité sont autant de facteurs qui complexifient le recrutement. En effet, l'accélération de la mécanisation des opérations de récolte au début des années 1960 (Silversides, 1997), a permis de pallier au manque de travailleurs compétents (spécialisation du métier), d'allonger la saison de travail, de contribuer à réduire les coûts, et a favorisé la diminution de la charge physique de travail imposée aux bûcherons. (Burman et Löfgren, 2007 ; Löfgren et Wikander, 2009). Au fil du temps, la capacité de produire s'est donc améliorée de manière continue. Cependant, l'opérateur a vu sa charge de travail cognitive augmenter significativement. L'aspect humain de l'opération de récolte à l'aide d'une abatteuse-façonneuse est maintenant considéré comme le goulot d'étranglement (*bottleneck*) de la productivité (Löfgren et Wikander, 2009 ; Hellström et al, 2009). Cela s'explique par l'environnement de travail stressant, occasionné par le haut débit de décisions à prendre. Avec une utilisation moyenne de 24 fonctions durant une période moyenne de 47 secondes de travail par arbre, l'abattage d'une tige représente près de 2000 fonctions actionnées par heure de travail productive, correspondant à autant de prises de décisions (Löfgren et Wikander, 2009). Les meilleurs opérateurs sont d'ailleurs réputés prévoir les interventions sur les 4 ou 5 prochaines tiges, ces décisions s'ajoutant à la charge de travail « immédiate », sans devoir y interférer (Purfürst et Erler, 2011). L'objectif de l'automatisation de certaines fonctions redondantes, ne nécessitant pas de prise de décisions complexes, est donc de permettre à l'opérateur de se concentrer sur les aspects où son intervention est critique. Les décisions visant la sélection des tiges, l'environnement et la qualité sont particulièrement visés par cette mesure. Ce retrait de fonctions permet aussi la création de micropauses, permettant à l'opérateur de relâcher brièvement la tension qu'il applique aux commandes. Cela diminue le risque de blessures liées au stress, particulièrement dans le cas d'automatisation de

fonctions reliées à la manipulation de la flèche d'abattage, activité qui occupe la majorité du temps de travail (Löfgren et Wikander, 2009).

Chaque nouvelle technique de travail ou nouvelle connaissance nécessite une période de mise à niveau. Une utilisation accrue du potentiel informatique embarqué entraînera donc, par exemple, une période d'adaptation (« rodage ») pour tous les opérateurs et entrepreneurs qu'il importe de considérer : l'aspect « humain » est non négligeable. La quantification de l'impact de l'opérateur sur la productivité obtenue varie en effet beaucoup selon les études, passant de 20-50 % à 40-55 % (Glöde [1999], cité par Purfürst et Eler, 2011). Même dans le cas de l'utilisation de la même pièce d'équipement, la variation du rendement offert par différents opérateurs atteint en moyenne 40 % (Kärhä et al. 2004; Ovasikainen [2005] cité par Purfürst et Eler, 2011). À titre d'exemple, Purfürst (2010) a conclu dans le cadre de ses travaux que 70 % de la variation de productivité s'expliquait par le volume par tige (m^3/ti), laissant une marge de 30 % où pouvait s'inscrire, entre autres facteurs, l'impact relié directement à la personne procédant à la récolte. Cette même nuance concernant l'importance du volume est aussi exposée par Purfürst et Eler (2011).

L'expérience possédée par l'opérateur représente une variable importante, mais qui dans la plupart des études n'est que mentionnée sans être spécifiquement étudiée. Pourtant, une très forte variation dans le niveau de performance peut être observée entre deux opérateurs possédant une expérience (années) similaire. L'hypothèse de départ fréquemment posée est qu'une augmentation du temps total passé à opérer un équipement favorisera l'acquisition d'habiletés. Le lien n'est toutefois pas direct avec la productivité, car un opérateur habile n'est pas automatiquement un opérateur productif.

Le développement professionnel de chaque individu s'effectue selon une courbe d'apprentissage, divisible en deux phases. La première phase, « sans expérience », est la plus étudiée. C'est à ce moment que les performances connaissent une forte hausse avec l'acquisition de compétence et de pratique : c'est le développement d'automatismes, permettant par la suite un meilleur traitement de l'information (éviter la considération des informations qui deviennent inutiles), de même qu'une diminution des erreurs. Il y a cependant de fortes variations entre les individus concernant la durée de la phase « sans expérience ». Cette phase nécessite en moyenne 9 mois, mais la variation demeure très forte, passant de 6 à 11 mois nécessaires selon les candidats (Purfürst [2010]). Outre les pertes de production, les frais reliés à la formation et l'entraînement d'un nouvel employé,

estimés à 15 000 euros (Gellerstedt et al. (2005) dans Purfürst, 2010]), sont des facteurs qu'il importe d'inclure dans la mesure de l'impact de l'opérateur sur les opérations de récolte. La seconde phase, « expérimenté », est celle où le niveau maximal de performance est atteint, et où une constance est assumée. Le début de cette période est aussi très variable selon les individus : l'atteinte du maximum de productivité varie en effet grandement entre chaque individu. Hogg et al (2011) indiquaient qu'un bassin six entrepreneurs ayant tous 18 mois d'expérience avec leur équipement respectif et une formation identique présentaient des écarts de production atteignant jusqu'à 58 % dans le cadre de leur étude. Il demeure aussi nécessaire de considérer les variations intra journalières et intra hebdomadaires, qui peuvent avoir de multiples causes indirectes sur la productivité mesurée.

Il n'existe donc pas, à notre connaissance, de travaux déjà effectués visant les mêmes objectifs que ce projet. Plusieurs études ont été réalisées pour vérifier l'impact de différents facteurs sur la productivité de l'abattage-façonnage. Les études sur les différents facteurs environnementaux, tels que le volume par tige, la composition en essences ou le diamètre moyen hauteur de poitrine permettent de valider l'importance du dispositif de collecte de données, pour éviter d'introduire des écarts entre les productivités mesurées attribuables à ces facteurs.

Bien que certains travaux aient été conduits sur l'automatisation de certaines fonctions de contrôle de l'abatteuse-façonneuse, aucune étude n'a spécifiquement étudié les impacts de l'automatisation de la fonction de façonnage. Les conditions de réalisation de ces études étaient toutefois fortement différentes des conditions des forêts boréales québécoises, tout comme les spécifications de façonnage. Finalement, l'impact de l'opérateur sur la production pouvant être obtenue a été étudié, tout comme les différentes phases de leur apprentissage. Ces informations permettent de mieux cerner les gains qui pourraient découler de l'emploi des ordinateurs de bord et de la fonction d'automatisation du façonnage des abatteuses-façonneuses, et de mieux comprendre les périodes d'adaptation qui seront nécessaires lors de l'introduction de nouvelles pratiques de façonnage.

2.2 Qualité et conformité des produits

La mesure de la récupération de valeur apparaît comme l'élément le plus étudié dans la littérature portant sur la qualité et la conformité des produits façonnés. Le façonnage en forêt a en effet des implications sur les transformations subséquentes de la matière, et de mauvaises décisions peuvent avoir des impacts financiers majeurs. Lorsque cette activité est réalisée en mode « manuel », c'est-à-dire non assisté par un logiciel d'optimisation et où l'opérateur prend toutes les décisions concernant le façonnage, le risque d'erreur augmente grandement, principalement sur le choix de la longueur et du diamètre d'écimage. Cette erreur se traduit par une diminution de la valeur en raison de la discordance entre les produits façonnés et les besoins de l'usine, et cette diminution de valeur peut être comparée avec les résultats obtenus lors de l'utilisation des systèmes d'optimisation. Les travaux recensés ont montré qu'il était possible d'obtenir une hausse de la valeur des produits obtenus variant entre 1 % (Corneau et Fournier, 2005), 7,5 %-19,6 % selon la précision des informations sur la qualité (Olsen et al., 1991), 3 à 23 % (Marshall et al., 2006A), 18 % (Marshall, 2005) et 21 % (Murphy [2003] dans Marshall, 2005) grâce à l'ajout de systèmes d'optimisation lors du façonnage.

De manière plus détaillée, l'étude de Marshall (2005) s'est penchée sur l'impact de 5 différentes longueurs de la tige étant mesurée avant le façonnage des billes. Ce sont ces informations qui sont par la suite utilisées pour prendre les décisions de façonnage. L'objectif était de mesurer l'impact des différentes longueurs mesurées sur la valeur créée à la transformation, mais aussi sur la productivité. Le calcul de la productivité est d'ailleurs l'élément distinctif par rapport aux autres documents consultés. L'étude a comparé la méthode conventionnelle de façonnage des billes, soit celle où l'opérateur n'utilise pas de logiciels d'optimisation et prend lui-même toutes les décisions de façonnage, avec des cas où l'arbre était soit mesuré (« scanné ») entièrement avant d'être façonné, soit partiellement mesuré avant le début du façonnage. Le « scan » correspondait à une section de la tige qui était alimentée par les rouleaux d'alimentation de la tête de l'abatteuse-façonneuse et où les informations sur celle-ci étaient collectées avant que l'ordinateur ne détermine le patron de façonnage devant être utilisé. Un scan complet se traduisait donc par le défilement complet de la tige par les rouleaux d'alimentation, puis au retour de la tête à sa position de départ. La tête faisait ensuite défiler à nouveau la tige, en procédant cette fois au façonnage des billes selon le patron de façonnage élaboré sur la base de la collecte des informations mesurée. Les scans partiels pouvaient aussi, dans

certains cas, entraîner un retour en arrière de la tête si la solution optimale implique une bille plus courte que la longueur de scan utilisée. Dans le cas des scans partiels, 4 longueurs différentes étaient utilisées (voir tableau 2.1). La longueur de la précision correspondait à la longueur de la bille sur laquelle était effectuée la prédiction. La somme de la longueur mesurée et de la longueur de la prédiction étaient égale à la longueur la plus longue pouvant être façonnée.

Tableau 2.1 : Longueurs utilisées lors de la mesure des billes avant le façonnage (adapté de Marshall [2005])

Scénario	Sapin Douglas			Pin Ponderosa		
	SCAN 6,1	SCAN 4,6	SCAN 3,0	SCAN 4,6	SCAN 3,0	SCAN 1,5
Longueur mesurée (m)	6,1	4,6	3	4,6	3	1,5
Longueur de la prévision (m)	6,7	8,2	9,8	2,1	3,7	5,2

Les résultats ont montré qu'une diminution de la longueur mesurée, et donc de la plage de diamètres scannés, diminuait la précision des diamètres projetés sur la partie non mesurée de la bille. En ce qui a trait à la productivité, celle-ci a diminuée avec l'augmentation de la portion scannée préalablement au façonnage (Figure 2.1). Cependant, certains scénarios présentés dans l'étude justifiaient amplement une vitesse de façonnage plus lente par la récupération importante de valeur lors de la transformation subséquente. Les gains estimés étaient tels que des investissements de l'ordre de plus de 2 M\$ (au maximum) dans l'équipement d'optimisation semblaient justifiés (Marshall, 2005). Il est à noter que cette étude a été réalisée sur la côte ouest américaine (Oregon et État de Washington) dans des conditions de volume par tige élevé (2.35 m³/ti [Washington] et 0,35 m³/ti [Oregon]). Dans le contexte de réalisation de la présente étude, ces données ne sont pas comparables avec celles qui seront rencontrées. Le volume par tige se chiffre à environ 0,08 m³/ti au Québec en moyenne. De plus, toutes les longueurs de mesure avant façonnage utilisées sont supérieures à celle employée dans le cadre de ce projet.

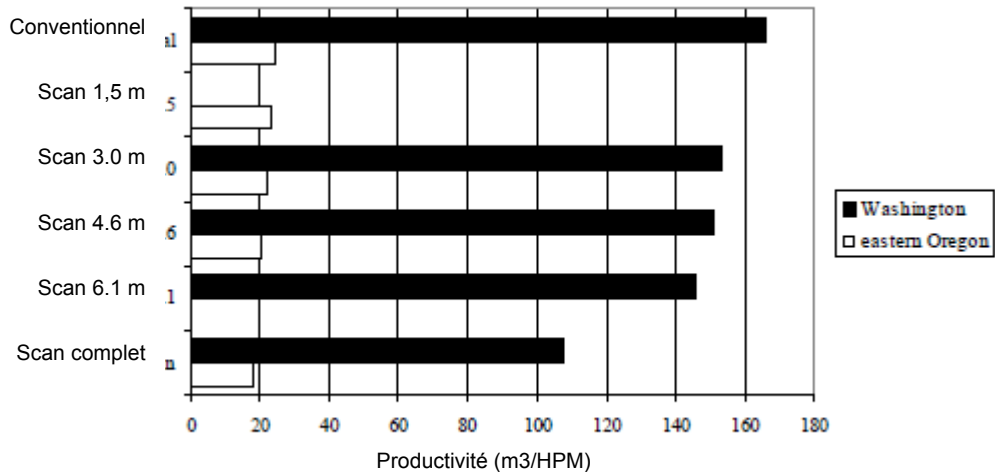


Figure 2.1 : Variation de la productivité lors du façonnage selon la portion de la tige qui est mesurée préalablement au façonnage (adapté de Marshall, 2005)

Exception faite du document de Marshall (2005), ces études apportent peu d'informations pouvant contribuer à ce projet. Le mode d'exploitation qui domine actuellement le paysage forestier au Québec est basé sur un bassin d'entrepreneurs qui possèdent leur propre machinerie. Ceux-ci récoltent la matière ligneuse en sous-traitance pour des industriels qui assurent la transformation. Les sous-traitants sont rémunérés selon un taux forfaitaire (\$/m³). Les gains potentiels en lien avec les fonctions de tronçonnage restent à définir pour le sous-entrepreneur : le système de rémunération actuel fait en sorte que la hausse de la valeur du panier de produits créé n'a pas d'impact pour ces entrepreneurs. Une solution acceptable tant pour l'industriel que pour l'entrepreneur doit s'accompagner d'une réflexion sur la relation entre la rémunération et la conformité des produits façonnés. Il est donc impératif de connaître les effets de tels systèmes sur la production des équipements, la qualité du produit, et la productivité.

Outre le fait d'employer un logiciel d'optimisation du patron de façonnage, l'objectif derrière l'emploi du logiciel doit être spécifiquement mentionné. C'est en effet toute la « mécanique » de contrôle qui permet de juger du réalisme, de l'employabilité et de la viabilité des produits qui seront obtenus. Murphy et al. (2004) comparaient, dans le cadre de leurs travaux de développement d'une heuristique de contrôle adaptatif, les deux « types » de procédés pouvant être utilisés pour prendre les décisions relatives au façonnage :

- « Bucking-to-value » : ce procédé cherche à maximiser la valeur individuelle de chacune des tiges. Cela suppose que le marché soit prêt à prendre tout le volume produit au prix qui est fixé. Il n'y a donc pas de contrainte quant au volume maximal et minimal à atteindre pour chaque produit ;
- « Bucking-to-order » : Ce processus cherche en premier lieu à rencontrer les contraintes reliées à un carnet de commandes et aux contraintes opérationnelles. La valeur de chaque arbre pris individuellement n'est donc pas nécessairement maximisée : un produit de valeur supérieure peut être rejeté si la demande maximale est déjà atteinte.

À l'intérieur du processus « buck-to-order », plusieurs modèles mathématiques peuvent être utilisés. Les travaux de Marshall et al. (2006B) ont mesuré l'impact de l'utilisation de 3 modèles mathématiques différents :

- 1) Prix du marché : La valeur de chaque tige est maximisée, en fonction des diamètres aux gros et fins bouts. Celle-ci est basée sur la valeur pouvant être obtenue à la vente.
- 2) Patron de coupe cible : L'hypothèse de base sur laquelle repose le modèle est que deux arbres ayant une qualité et des caractéristiques semblables devraient être façonnés de la même manière. Au lieu de chercher à maximiser le volume, ce modèle cherche à minimiser l'écart avec l'objectif de volume fixé au départ. Pour ce faire, le modèle utilise une base d'informations sur les tiges. Les ratios mesurés dans cette banque de données sont par la suite appliqués à l'ensemble du peuplement. Pour chacune des tiges, cela se traduit par un patron de façonnage qui est établi en fonction des tiges présentes dans la banque qui ont des caractéristiques similaires (les tiges les plus « semblables »). Une comparaison avec les quatre tiges les plus près est suffisante, car aucun gain significatif ne peut être obtenu au-delà de ce nombre selon les observations des auteurs (Marshall et al. 2006B).
- 3) Liste de prix ajustée : Cette approche cherche à optimiser l'atteinte de la commande, sans tenir compte de la valeur du marché. Le modèle fixe des valeurs « relatives » à chaque produit. Si ces prix permettent l'atteinte de la commande, avec une certaine marge, ces valeurs sont conservées pour guider le façonnage; si ce n'est pas le cas, les « prix » sont modifiés à raison d'un à la fois jusqu'à l'atteinte de la commande fixée. Ces « prix » ne reflètent pas

nécessairement la valeur monétaire réelle du produit, mais servent plutôt à indiquer à l'algorithme d'optimisation quel produit générer.

Les résultats ont montré que lorsqu'il n'y a pas de contraintes reliées aux marchés, c'est-à-dire que les volumes sont tous acceptés et qu'il est possible d'écouler les surplus sur le marché, les 3 modèles mathématiques proposent des solutions qui conduisent à un taux élevé de conformité avec la commande. Cependant, avec l'apparition de contraintes (ex. : volume maximal pouvant être écoulé sur le marché), la programmation du modèle du prix du marché ne permet pas d'ajustement car la valeur est fixe : ce modèle s'en trouve donc fortement désavantagé. Le meilleur modèle pour le respect des contraintes est le modèle #3. Cependant, la meilleure conformité à la commande de départ n'indique pas automatiquement que la valeur qui sera produite sera maximale. Le modèle #2 est celui qui permet la création de la valeur la plus élevée.

Le modèle mathématique utilisé peut avoir un impact direct sur la conformité des critères de qualité retenus dans le projet. Ce faisant, il est important de bien connaître les tenants et aboutissants de chacun des modèles, considérant les nombreuses contraintes en présence. Ces informations guident donc les résultats qui peuvent être obtenus en fonction du modèle utilisé.

L'utilisation de procédés automatisés, que ce soit dans une optique d'augmentation de la productivité, de récupération de valeur ou d'amélioration des conditions de travail, doit s'accompagner d'un certain niveau de précision sur les mesures prises. En effet, toutes les décisions de façonnage, quel que soit le modèle mathématique qui est derrière le système utilisé, sont basées sur des informations collectées par la tête de l'abatteuse-façonneuse. La tête collecte principalement des informations sur le diamètre de la tige, qui est mesuré par les couteaux d'ébranchage ou par les rouleaux d'alimentation, ainsi que sur la longueur, mesurée par des capteurs ou par une roue dentée poussée par un vérin hydraulique sur la tige.

Deux types d'informations ont été étudiés par Nieuwenhuis et Dooley (2006) : la longueur ainsi que le volume des billes. La littérature citée dans ce même article indiquait que la précision du volume global pouvait varier entre $\pm 2\%$ et $\pm 7\%$, selon les sources consultées. Les longueurs mesurées manuellement ont donc été comparées à celles mesurées par les capteurs de la tête d'abattage-façonnage. La variation moyenne, tant pour les billes de sciage que pour les billes de pâte, était de $\pm 3\%$. Les écarts moyens

étaient de ± 4 cm pour les billes de sciage et de ± 3 cm pour les billes de pâte; dans les deux cas, les mesures effectuées par l'abatteuse-façonneuse étaient significativement plus élevées que les mesures effectuées sur le parterre de coupe (seuil de confiance à 95 %).

Les volumes ont été comparés de la même manière. Contrairement à la tendance observée pour les longueurs, les volumes mesurés directement par l'abatteuse-façonneuse étaient significativement inférieurs à ceux mesurés sur le parterre de coupe. Les mesures de volume des billes de sciage étaient généralement à l'intérieur du seuil de 5 % préalablement fixé, tandis que les écarts détectés pour les billes de pâte beaucoup plus volatils, excédant à plusieurs reprises le seuil de 7 % (Figure 2.2). Lorsque les mesures excédaient ces seuils, une calibration était réalisée. Les capteurs de la tête d'abattage-façonnage étaient alors réajustés pour annuler l'écart détecté entre les mesures effectuées sur le terrain et les mesures des capteurs de la tête d'abattage-façonnage. Les mesures effectuées manuellement étaient utilisées comme valeur de référence. Leur dispositif ne leur permettait pas d'obtenir de mesures de diamètres, qui auraient permis une meilleure compréhension de cette différence entre les billes de sciage et de pâte.

Les auteurs soulignaient cependant la nécessité de pousser l'analyse au-delà de l'écart moyen, en raison du risque de voir des erreurs positives et négatives s'annuler, donnant une fausse impression de précision.

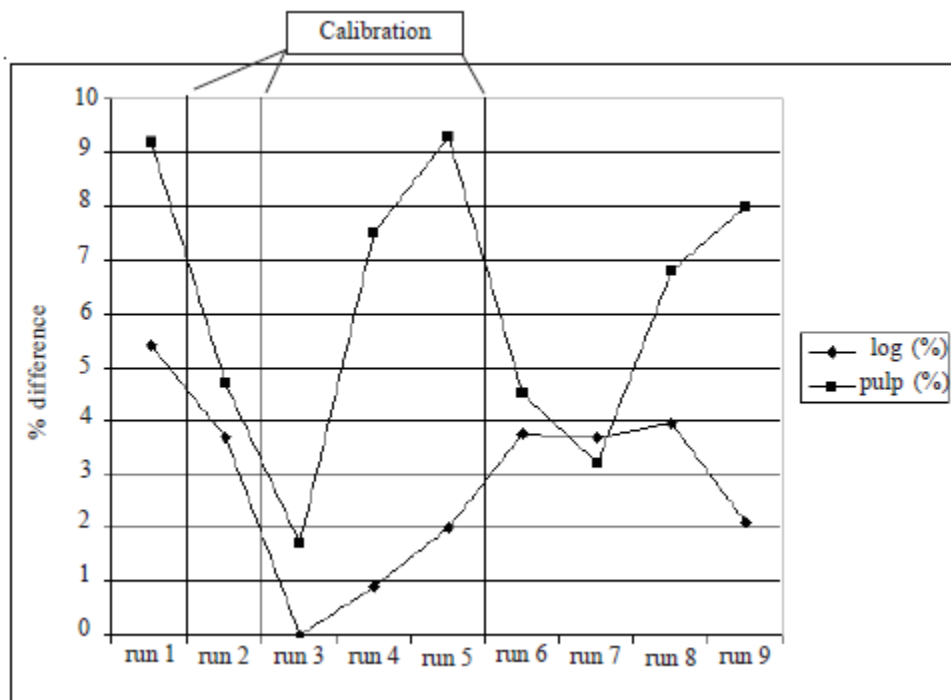


Figure 2.2 : Variation du volume en fonction de la mesure de référence pour le bois de sciage et de pâte (tiré de Nieuwenhuis et Dooley [2006]).

log = billes destinées au sciage, pulp = billes destinées aux pâtes et papiers

Cependant, le maintien d'un niveau de précision donné nécessite que les systèmes de mesurage soient entretenus et calibrés sur une base régulière. Il ne faut pas attendre d'avoir des problèmes avec la précision du travail pour accomplir un ajustement : cela doit être fait de manière proactive (Strandgard et Walsh, 2012). La littérature est cependant très mince en ce qui concerne les protocoles de calibration. Nieuwenhuis et Dooley (2006) soulignaient que, bien que leurs travaux aient permis de montrer que la calibration permettait de réduire les écarts entre les mesures de la tête et les mesures « réelles », des travaux étaient toujours nécessaires pour définir la fréquence de calibration optimale. Des projets de recherche sont d'ailleurs en cours (Nordström, 2014) dans le but de quantifier les sources de variations ayant une influence sur la précision des mesures, de concert avec le niveau de calibration accompli. Ces sources de variation sont nombreuses, mais mal documentées. L'usure de la roulette de mesurage, l'aiguisage des couteaux d'ébranchage, la pression des couteaux ne sont que quelques exemples des sources de variation potentielles devant être documentées.

3. Matériel et méthodes

La section suivante présente le matériel ainsi que les méthodes qui ont été employés pour les collectes de données nécessaires au projet. Le dispositif expérimental mis en place est d'abord présenté dans son ensemble. Suivent les détails spécifiques des collectes de données réalisées pour mesurer la productivité ainsi que le taux de conformité du façonnage.

3.1 *Dispositif de recherche*

L'étude a été réalisée dans 9 secteurs d'interventions de l'entreprise Produits forestiers résolu, au nord du Lac-Saint-Jean. Il s'agit des secteurs d'intervention Béland, Dumais, Desautels, Écarté, Mirage, Montréal, Rainsart, Travers et Vermillon. Ces secteurs sont représentés à la figure 3.1.

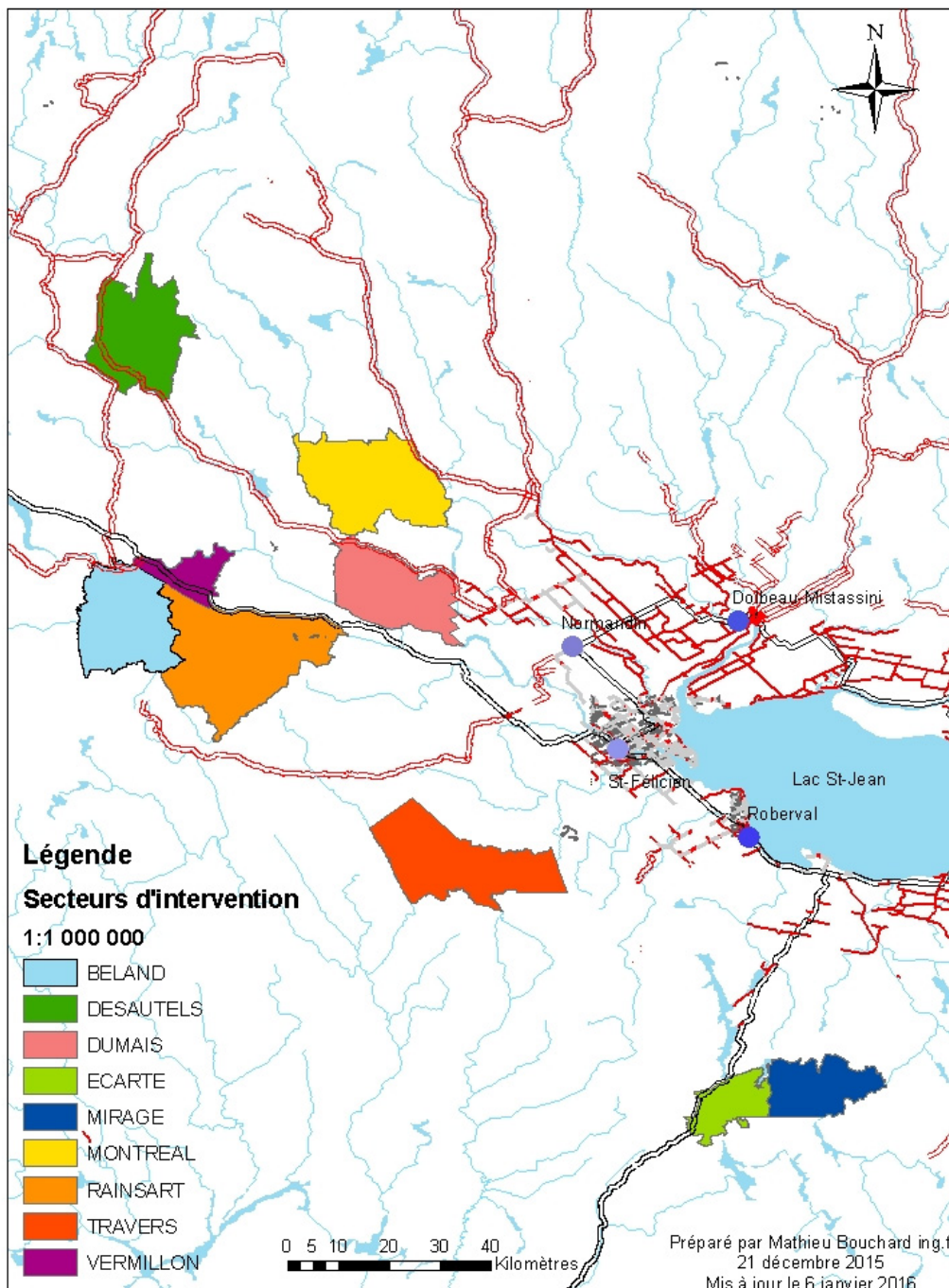


Figure 3.1 : Localisation des 9 secteurs d'intervention.

La figure 3.2 précise la terminologie utilisée pour identifier les différentes unités spatiales dans la suite du document afin d'éliminer tout risque de confusion.

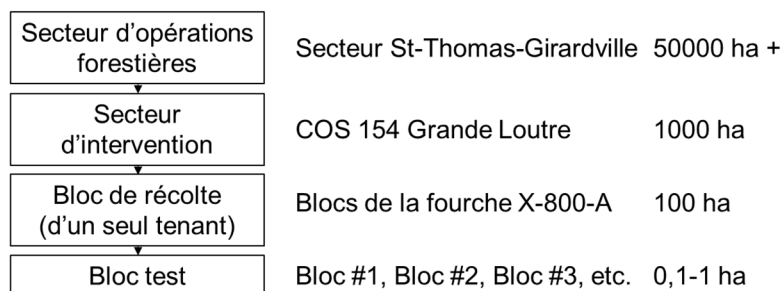


Figure 3.2 : Terminologie utilisée pour référer à différentes unités spatiales opérationnelles dans les opérations forestières.

Les opérations de Produits forestiers résolu au Lac St-Jean sont divisées en trois grands secteurs d'opérations forestières. Ces secteurs d'opérations forestières sont sous-divisés en plusieurs secteurs d'intervention, utilisés à des fins d'appellation. Les blocs de récolte sont répartis dans ces secteurs d'intervention, selon les attributions du gouvernement. Finalement, les blocs tests correspondaient à des parties de blocs de récolte, où plusieurs blocs tests ont pu se retrouver dans un même bloc de récolte.

Deux équipes de récolte ont été recrutées pour participer à l'étude. Ces deux équipes (A & B) se composaient d'un total de cinq opérateurs, où chaque opérateur était une étude de cas. L'organisation du travail choisie par chacune des équipes faisait en sorte que le même opérateur a utilisé la même abatteuse-façonneuse durant le même quart de travail (jour ou nuit) tout au long de la collecte des données, qui s'est échelonnée du 5 janvier 2015 au 8 août 2015. Les informations sur cette organisation sont présentées au tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Détails des quarts de travail de chaque opérateur

Équipe	Identifiant unique de l'opérateur	Quart de travail
B	1B	Jour
	2B	Jour
	3B	Nuit
A	4A	Jour
	5A	Nuit

Le façonnage des arbres abattus en billes est une étape du processus de récolte de l'abatteuse-façonneuse. L'Office québécois de la langue française (1992) décrit le façonnage comme étant : « la première transformation des arbres abattus en forêt, qui comprend une ou plusieurs opérations dont l'ébranchage, l'écimage, le tronçonnage, l'écorçage et le déchiquetage ». Dans le cadre de ce projet, le façonnage se limite à l'ébranchage, au tronçonnage et à l'écimage des arbres abattus. De nombreuses décisions doivent être prises lors de ce processus, tant au niveau de l'environnement de travail (exemple : positionnement des billes qui seront façonnées) que des fonctions qui doivent être activées par l'opérateur. À chaque décision peut correspondre une fonction à activer par l'opérateur : identifier et sélectionner l'essence, débiter le façonnage en actionnant les rouleaux d'alimentation, actionner la scie, contrôler le balan de la tête d'abattage-façonnage, etc. L'ordinateur embarqué offre des opportunités d'automatisation pour ce deuxième groupe de décisions de l'opérateur. Trois degrés d'automatisation du façonnage ont été retenus pour l'étude : manuel, semi-automatique et automatique. Le tableau 3.2 décrit chacun de ces degrés d'automatisation. Dans tous les cas, les rouleaux d'alimentation de la tête s'activaient automatiquement. Plus de détails sur les degrés d'automatisation sont présentés à l'annexe A.

Tableau 3.2 : Description des degrés d'automatisation

Degré d'automatisation	Niveau de contrôle de l'opérateur
Manuel (M)	Actionne manuellement la scie pour toutes les billes
Semi-automatique (S)	Actionne la scie manuellement pour la première bille seulement, les autres sont sciées automatiquement
Automatique (A)	Toutes les billes sont sciées automatiquement

Un dispositif expérimental sous forme de blocs complets (Figure 3.3) a été utilisé afin de maîtriser la variation due à des facteurs externes qu'il était impossible de contrôler (types de peuplements, terrain, etc.). Il était donc supposé dans le cadre du projet que la variation était minimale à l'intérieur du ou des peuplements forestiers qui composaient le bloc de récolte (plus petite unité opérationnelle d'un seul tenant) et que, dès lors, les blocs tests dans lesquels étaient collectées les données étaient similaires. L'homogénéité des unités expérimentales au sein d'un même bloc test garantissait une comparaison non biaisée des moyennes des traitements.

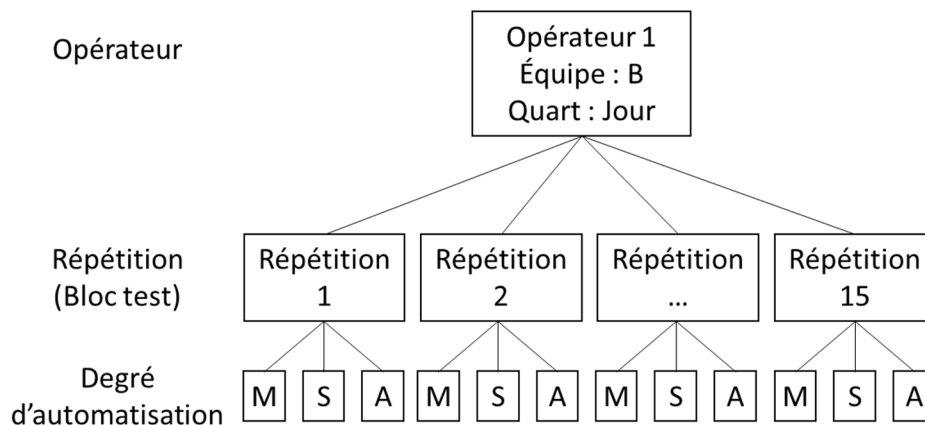


Figure 3.3 : Illustration du dispositif expérimental utilisé lors de la collecte de données pour l'opérateur 1B

Chaque bloc test devait contenir tous les degrés d'automatisation retenus pour chaque opérateur. Ces différents degrés d'automatisation ont été utilisés dans un ordre aléatoire pour éviter les erreurs systématiques. Le détail des degrés d'automatisation employés par chaque opérateur est présenté au tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Informations sur les degrés d'automatisation selon l'opérateur

Opérateur	1B	2B	3B	4A	5A
Quart de travail	Jour	Jour	Nuit	Jour	Nuit
Degré d'automatisation habituellement utilisé par l'opérateur	Automatique	Automatique	Automatique	Manuel	Semi-Automatique
Degré(s) d'automatisation utilisé(s) pour effectuer le(s) contraste(s)	Manuel et semi-automatique	Manuel et semi-automatique	Manuel et semi-automatique	Automatique	Automatique

Aucun bloc de récolte n'a été spécifiquement identifié a priori pour l'expérimentation vu la nature changeante du plan de récolte de l'entreprise. Plutôt, les blocs tests commençaient à des moments sélectionnés aléatoirement au cours de la semaine et leurs moments n'étaient jamais annoncés à l'avance. Certains blocs de coupe ont été systématiquement évités pour des raisons techniques ou de sécurité, notamment :

- Très petits blocs de forêt morcelée. Ces blocs de forêt résiduelle laissée lors du passage initial des activités de récolte étaient souvent trop petits pour avoir assez d'heures consécutives de récolte pour l'établissement d'un bloc test (< 2 heures).
- Terrains à traficabilité difficile. La conduite de la machinerie sur des pentes fortes (> 30 %) et des terrains à rugosité élevée présentait des risques en santé et sécurité autant pour l'opérateur de la machinerie que pour l'équipe de collecte de données du projet.
- Proportion de feuillus trop élevée (dominant, > 50 %). Étant donné que le feuillu n'a que peu de valeur dans le nord du Lac St-Jean, l'effort de calibration du système de mesure de la tête d'abattage-façonnage était minimal dans ces essences (bouleau à papier et peuplier faux-tremble). Les mesures de volumes obtenus pouvaient donc être biaisées.

Lorsque cela était possible, la délimitation des blocs tests et des unités expérimentales correspondaient à des délimitations existantes telles que des chemins, des ruisseaux ou la délimitation des blocs de récolte. Deux autres méthodes ont été utilisées lorsqu'aucune délimitation évidente n'était présente sur le terrain : le début d'un nouveau sentier d'abattage ou la détermination aléatoire d'un moment de début de la collecte de donnée. Cette dernière méthode a été utilisée la majorité du temps. Des communications radio indiquaient à l'opérateur le début d'un bloc test, les moments de changement de degré d'automatisation et la fin du bloc test. Dans tous les cas, les heures de début, de changement de degré d'automatisation et de fin étaient inscrites dans un journal afin de permettre l'identification des données pertinentes correspondantes dans le lot de données tiré de l'ordinateur embarqué. La durée totale d'un bloc test était inférieure à la durée d'un quart de travail.

3.1.1 Mesure de la productivité

Équipe A – Tête Ponsse

Les données utilisées pour le calcul de la productivité des opérateurs de l'équipe A provenaient d'une seule source. En effet, l'ordinateur Ponsse (logiciel Opti 4G) possédait un enregistreur de temps de travail (bavard) intégré qu'il était possible de faire fonctionner en mode « passif ». À la différence des autres systèmes, il était possible de le régler pour que l'enregistrement s'accomplisse de manière autonome sans que l'opérateur n'ait à

saisir des codes d'arrêt. Le temps de travail était comptabilisé lorsque la tête et/ou la flèche d'abattage étaient actives, c'est-à-dire que des impulsions étaient reçues des modules. Pour qu'une activité soit comptabilisée, elle devait durer au moins 1 minute, durant laquelle les impulsions étaient reçues des modules à un intervalle inférieur à 15 secondes ; ces réglages correspondaient aux exigences de Produits forestiers résolu Des essais effectués lors de l'été 2014 avaient permis de valider la justesse des informations enregistrées par le bavard intégré de l'ordinateur de bord.

Étant donné que toutes les données sont tirées de la même source, l'ordinateur proposait déjà une forme de rapport, à partir duquel les données ont été extraites. Chaque période de travail y était associée avec les tiges récoltées. Il était donc possible d'obtenir une productivité (m^3/hmp), un volume total, un volume moyen par tige et un nombre de tiges et de billes.

Équipe B – Tête Log Max

Deux sources de données différentes ont été utilisées pour le calcul de la productivité des opérateurs de l'équipe B. Les données sur les volumes récoltés ont été tirées de l'ordinateur de bord, duquel était extrait un fichier HPR (*Harvested Production Report*) après chacun des tests réalisés. Le fichier HPR est le fichier contenant toutes les données de production, où les détails sont à la fois au niveau des arbres abattus et des billes façonnées. Une coordonnée temporelle (*log time*) est rattachée à chacune des billes façonnées (date, heure minute et seconde du moment d'activation de la scie pour l'abattage ou le tronçonnage), permettant une identification subséquente.

Les données sur le temps de travail productif ont quant à elles été obtenues à partir d'un enregistreur de données FPDat qui était déjà présent dans l'équipement. Le FPDat installé dans cette abatteuse-façonneuse mesurait le temps de travail en fonction de 3 sources différentes. La première source d'information de l'enregistreur était le GPS intégré. Des enregistrements étaient pris lorsque la machine change d'état (arrêt ou travail) ou à toutes les 150 secondes lorsque le travail était continu. Les deuxième et troisième sources du bavard étaient des canaux branchés directement sur la machine. Un canal représente la connexion avec un élément de l'abatteuse-façonneuse qui montre une variation de voltage supérieure à 5 volts en fonction de son utilisation. Ces deux canaux étaient branchés aux rouleaux d'alimentation de la tête, où la période maximale d'arrêt entre deux activations

était établie à 1 minute et à la clé du contact de l'équipement. Le temps de travail productif était donc calculé lors de l'activation simultanée de ces trois sources. Ces réglages étaient fixes, car ils correspondaient à ceux exigés par Produits forestiers résolu.

3.1.2 Mesure de la conformité de la qualité

Quatre indicateurs ont été retenus pour répondre à l'objectif spécifique sur l'évaluation du taux de conformité de la qualité en fonction du degré d'automatisation utilisé. Ces quatre indicateurs correspondaient à ceux utilisés par l'entreprise dans le cadre de ses opérations et étaient :

- Pourcentage des billes mesurées à ± 5 centimètres de la longueur cible;
- Pourcentage des billes mesurées à ± 3 centimètres de la longueur cible;
- Pourcentage de conformité des diamètres d'écimage des billes;
- Pourcentage de conformité des diamètres des cimes laissées au sol.

La bille « laisser-porter » correspondait à la dernière bille façonnée dans un arbre abattu, soit la bille supérieure de l'arbre.

La collecte des données utilisées pour répondre au deuxième objectif spécifique du projet, soit de mesurer les impacts des différents degrés d'automatisation sur la qualité du façonnage, s'est déroulée à partir des blocs tests, simultanément à la collecte de données de la productivité. Une fois les bois abattus et façonnés, les mesures des longueurs et des diamètres ont été prises avant le débardage des billes. À quelques occasions, lorsque les conditions s'y prêtaient, les mesures ont été effectuées à partir d'un échantillonnage d'un chargement de transporteur étalé sur le chemin d'accès. Une attention particulière a été prise pour associer les données de conformité de qualité mesurées au bon degré d'automatisation (Figure 3.4).



Figure 3.4 : Échantillon de billes étendues dans le chemin (A-1000, secteur Vermillion). Photo : M. Bouchard

Pour la mesure des longueurs, un point aléatoire était déterminé sur le terrain pour servir de point de départ à l'échantillonnage. À partir de ce point, tous les empilements rencontrés et accessibles étaient mesurés, le déplacement étant effectué en direction opposée à l'abatteuse-façonneuse. L'accessibilité se définissait comme la capacité à mesurer la majorité des billes d'un empilement. Lorsque l'empilement était jugé inaccessible ou instable, il était exclu de l'échantillonnage. Les empilements présentant les caractéristiques suivantes ont également été exclus systématiquement de l'échantillonnage :

- Essence feuillue placée au-dessus de l'empilement;
- Tiges mal empilées (croisées);
- Empilement dont une des extrémités est inaccessible, bloquant la mesure des billes (autre empilement, obstacle sur le terrain, etc.).

Aucune distinction n'était effectuée entre les billes de 16 pieds et les billes « laisser porter ». L'objectif était de mesurer les longueurs de 80 billes pour chacun des degrés d'automatisation utilisés. Les longueurs étaient comptabilisées au centimètre le plus près. La figure 3.5 illustre le processus utilisé pour la comptabilisation des longueurs ainsi que des diamètres d'écimage mesurés lors de l'échantillonnage. Une attention particulière a été portée à certains défauts de troncs et de cimes étant donné l'impact que ceux-ci pouvaient avoir sur la précision des longueurs. Les billes affichant les défauts suivants ont été systématiquement exclues de l'échantillonnage :

- Cassé (CAS) : cime brisée par la tête d'abattage-façonnage ou naturellement;
- Tronc tordu (S) : déformation majeure du tronc;
- Fourche (FOU) : présence de plusieurs tiges, coupées ou non;
- Défaut (DEF) : présence d'un défaut naturel majeur dans le tronc, tel qu'un coude ou un bourrelet, qui bloque le mouvement de l'arbre dans la tête d'abattage-façonnage;
- Chicot (CHI) : Arbre mort dont la fibre est détériorée et qui n'aurait pas dû être récolté;
- Sec et sain (SEC) : Arbre qui est mort, mais dont la fibre est encore en bon état. Le niveau de détérioration peut influencer sur la pénétration de la roulette de mesurage (en comparaison à un arbre vert), modifiant la longueur réellement façonnée.

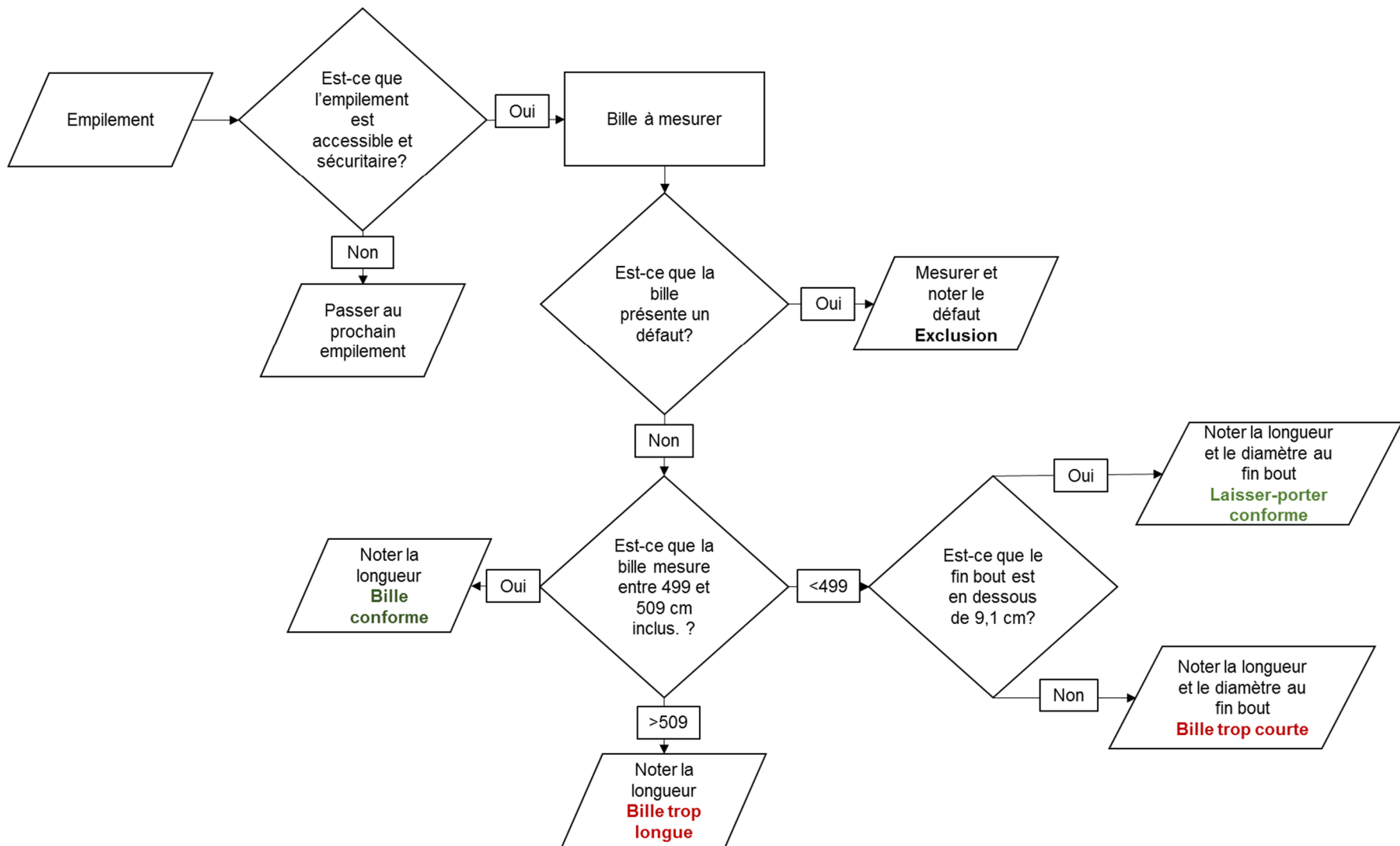


Figure 3.5 : Schéma du processus utilisé lors de la mesure des longueurs et des diamètres d'écimage des billes sur le parterre de coupe

L'échantillonnage des diamètres des cimes laissées au sol débutait à la fin de l'inventaire des longueurs et des diamètres au fin bout des billes. En revenant sur le trajet effectué précédemment, toutes les cimes visibles étaient mesurées sur écorce et parallèlement au sol. La cible était de 40 cimes par degré d'automatisation. Les cimes arrachées ou cassées étaient exclues, car il devenait hasardeux de dire s'il s'agissait bien d'une cime ou d'un tronçon intermédiaire. L'échantillonnage s'effectuait des deux côtés du sentier d'abattage, en fonction de la technique de travail employée par l'opérateur (certains ne façonnant les tiges que d'un seul côté).

Dans certaines situations, il a été impossible d'atteindre les cibles fixées quant au nombre de longueurs et de diamètres à mesurer. En effet, la présence plus importante d'essences feuillues entraînait une quantité plus importante de grosses branches qui obstruaient l'accès aux cimes qui auraient dû être mesurées. Le volume plus important de feuillus rendait aussi inaccessibles plus d'empilements de billes résineuses, en fonction des critères d'accessibilité définis précédemment. De plus, il arrivait aussi à l'occasion que l'opérateur ait à déposer les cimes des arbres abattus sous les chenilles de l'abatteuse-façonneuse, rendant impossible toute mesure subséquente, particulièrement sur les sites à faible capacité portante.

3.1.3 Analyses statistiques

La décision s'est arrêtée sur l'exécution de contrastes, car il existe une structure entre les traitements (degrés d'automatisation). Le nombre de contrastes pouvant être réalisé varie pour chaque opérateur, en fonction des degrés d'automatisation retenus pour chacun d'eux.

Le tableau 3.4 présente les cibles fixées quant au nombre d'observations visé pour chaque opérateur, de même que les contrastes devant être réalisés.

Tableau 3.4 : Sommaire du nombre d'observations visé et des contrastes à réaliser pour chaque opérateur

Opérateur	Nombre d'observations		Contraste(s) à réaliser*
	Productivité	Conformité de la qualité	
1B	15	12	M vs A; S vs A
2B	15	12	M vs A; S vs A
3B	15	12	M vs A; S vs A
4A	10	10	M vs A
5A	10	10	S vs A

*Degrés d'automatisation : M pour manuel, S pour semi-automatique et A pour automatique.

Les tableaux 3.5 et 3.6 présentent le nombre de degrés de liberté associé aux modèles en fonction du nombre d'observations planifiées pour l'analyse des données sur la productivité et la conformité de la qualité par opérateur, selon le degré d'automatisation employé.

Tableau 3.5 : Nombre de degrés de liberté associé au modèle retenu pour la productivité pour chaque opérateur

Opérateur	Modèle pour la productivité			
	Bloc	Traitement	Erreur	Total
1B	14	2	13	29
2B	14	2	13	29
3B	14	2	13	29
4A	9	1	9	19
5A	9	1	9	19

Tableau 3.6 : Nombre de degrés de liberté associé au modèle retenu pour la conformité de la qualité pour chaque opérateur

Opérateur	Modèle pour la conformité de la qualité			
	Bloc	Traitement	Erreur	Total
1B	11	2	10	23
2B	11	2	10	23
3B	11	2	10	23
4A	9	1	9	19
5A	9	1	9	19

Le logiciel d'analyse statistique SAS a été utilisé pour effectuer les tests statistiques. Des analyses de variance (ANOVA) ont été réalisées pour chacune des 5 situations, avec la procédure GLM. Le respect des postulats de la variance, soit le postulat de l'homogénéité des variances et le postulat de la normalité des résidus, a aussi été vérifié. L'analyse graphique des résidus de même que la procédure UNIVARIATE ont été utilisées. Les quatre indicateurs présentés précédemment de même que la productivité ont fait l'objet d'analyses successives séparées. Dans tous les cas, un seuil de significativité de 5 % a été utilisé.

3.1.4 Équipements utilisés

La section suivante présente les différents équipements utilisés lors de la collecte de données. Le matériel utilisé pour effectuer la prise de mesures sur le parterre de coupe est tout d'abord présenté, suivi d'une description deux têtes d'abattage-façonnage qui ont été observées au cours de l'étude : une tête Log Max (équipe B) et une tête Ponsse (équipe A).

Matériel utilisé pour l'inventaire terrain

Les mesures de longueur ont été effectuées avec un ruban à mesurer forestier (*logger tape*) gradué en centimètres. Les mesures de diamètre de cimes ont été mesurées à l'aide d'un ruban à mesurer standard, gradué en millimètres.

Têtes d'abattage-façonnage

Log Max 7000XT

La mesure du diamètre des tiges sur les têtes de la série 7000 est effectuée par deux rouleaux d'alimentation qui se déplacent de manière latérale (Figure 3.6). L'information est donc collectée sur un seul axe, pouvant occasionner un biais lors de la comparaison avec des mesures prises sur le terrain. En effet, la tête n'est pas en mesure de détecter des arbres de forme ovale ou ellipsoïdale.

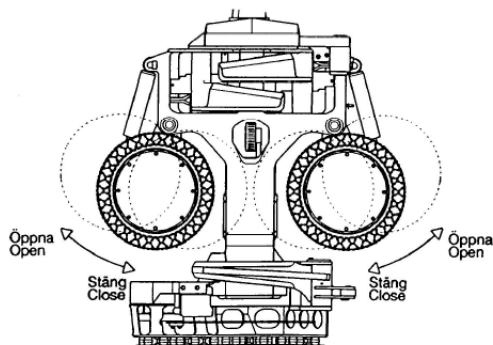


Figure 3.6 : Illustration d'une tête Log Max 7000 XT (Source : Log Max Service Manual TA-2011/001-EA)

Toutefois, le déplacement latéral des rouleaux permet d'atteindre des diamètres d'écimage très faible (environ 40 mm), et la mesure des diamètres lors de la calibration est aisée, puisque les traces des rouleaux sont visibles de chaque côté de la bille. Dans le présent cas, les potentiomètres (capteurs) étaient fixés sur les rouleaux d'alimentation.



Figure 3.7 : Tête Log Max 7000 XT (Photo : M. Bouchard)

Ponsse H7

La tête d'abattage H7 (Figure 3.8) est équipée de deux rouleaux d'alimentation qui se déplacent de manière oblique. Le diamètre est donc mesuré par une fonction de triangulation, les trois points de référence étant les deux rouleaux de même que le fond

de la tête d'abattage. Les potentiomètres (mécaniques, actionnés avec une chaîne) sont fixés directement sur les bras des rouleaux d'alimentation : la mesure effectuée du diamètre peut donc prétendre à mieux évaluer les formes non circulaires des billes façonnées. Cependant, cela force, au moment de la calibration, une double mesure de diamètre, idéalement à 90 degrés l'une par rapport à l'autre, pour avoir une mesure équivalente à celle de la tête.



Figure 3.8 : Tête Ponsse H7 (Photo : M. Bouchard)

Le tableau 3.7 présente un sommaire des différents systèmes employés par les deux équipes. Noter que l'équipe A a changé de porteur en cours de projet, en conservant la même tête d'abattage-façonnage. Le logiciel a été mis à jour, tout en conservant les mêmes réglages.

Tableau 3.7 : Résumé des informations sur les équipements utilisés lors de la collecte de données

Équipe	B	A	
Marque	Log Max	Ponsse	Ponsse
Modèle	7000 XT	H7	H7
Porteur	TigerCat H855C	Timbco 445	Landrich HC-310
Logiciel	Log Mate 500	Opti4G	Opti4G
Version du logiciel	1.05.0020	7.10	7.15
Vernier	Haglöfs 1.5	Ponsse Caliper +	Ponsse Caliper +
Ruban à mesurer	Ruban Digitech Tape	Standard	Standard

Lors du déroulement de la collecte de données, les deux têtes d'abattage-façonnage ont été calibrées hebdomadairement à l'aide d'un vernier électronique (Figure 3.9). Les

capteurs de la tête d'abattage-façonnage étaient calibrés pour toutes les essences résineuses rencontrées. Des procédures internes de calibration ont été élaborées et sont présentées aux annexes B (Log Max) et C (Ponsse). L'objectif de ces calibrations était d'assurer une meilleure précision des données obtenues et d'éliminer les erreurs systématiques. Les décisions quant au patron de façonnage reposent en effet sur les mesures effectuées par les capteurs de la tête d'abattage-façonnage.



Figure 3.9 : Vernier électronique Ponsse Caliper+ (Photo : M. Bouchard)

3.1.5 Entrevues semi-dirigées

Une rencontre individuelle a aussi été réalisée avec quatre des cinq opérateurs ayant participé au projet. Au fil de la collecte de données, il est apparu qu'il serait nécessaire de noter les observations des personnes travaillant avec les logiciels. En effet, elles sont les mieux placées pour expliquer les avantages et les inconvénients, de même que pour décrire les conditions idéales d'utilisation des différents degrés d'automatisation. Leurs commentaires peuvent permettre une meilleure interprétation des données obtenues par les dispositifs de collecte de données, en plus de contribuer à montrer des aspects de l'utilisation des différents degrés d'automatisation qui n'ont pas pu être détectés à travers l'analyse des données.

Le questionnaire utilisé pour guider la discussion se retrouve en annexe D. Les quatre rencontres se sont déroulées du 26 novembre 2015 au 9 décembre 2015, où chacune avait une durée moyenne de 30 minutes.

Le numéro d'approbation du comité d'éthique plurifacultaire est le 2015-252. Le modèle de formulaire de consentement utilisé se trouve à l'annexe E, suivi de la lettre utilisée pour le recrutement à l'annexe F.

4. Résultats et Discussion

Cette section présente dans un premier temps les résultats des analyses de variance (ANOVA) pour les moyennes de productivité et pour les quatre indicateurs retenus de la qualité, réalisés à l'aide de contrastes. Un sommaire des informations obtenues lors des entrevues individuelles est ensuite présenté. Ces informations sont mises en relation et utilisées pour tenter d'expliquer certains des résultats obtenus à l'aide de contrastes.

4.1 Productivité

Les données recueillies dans chaque bloc test ont permis d'évaluer une productivité mesurée en mètres-cubes par heure-machine productive (m^3/hmp) pour chaque degré d'automatisation utilisé.

Pour les opérateurs 1, 2 et 3, seuls les degrés d'automatisation manuel et automatique ont pu faire l'objet d'une collecte de données. Des problèmes techniques liés à l'ordinateur embarqué ont empêché la collecte de données pour le degré d'automatisation semi-automatique pour ces opérateurs. Le contraste « semi-automatique – automatique » qui avait été identifié au tableau 3.4 n'a donc pas pu être réalisé. Les degrés d'automatisation ciblés pour les opérateurs 4 et 5 sont restés inchangés. Le tableau 4.1 présente les contrastes réellement réalisés pour chaque opérateur.

Tableau 4.1 : Contrastes réalisés par opérateur

Opérateur	Contraste*
1B	M vs A
2B	M vs A
3B	M vs A
4A	M vs A
5A	S vs A

*Degrés d'automatisation : M pour manuel, S pour semi-automatique et A pour automatique.

Tel que cela a été mentionné précédemment, seul l'opérateur 5A utilise le degré d'automatisation semi-automatique quotidiennement, les autres utilisant uniquement les degrés manuel ou automatique. Les contrastes ont été réalisés à partir du degré habituellement utilisé par les opérateurs.

Il est également à noter que les cibles quant au nombre d'observations de productivité souhaité par opérateur présentées à la section 3.1.3 n'ont été atteintes que pour les opérateurs 1B et 3B. L'opérateur 2B a souhaité diminuer sa participation en cours de projet. Dans le cas des opérateurs 4 et 5, les cibles d'échantillonnage n'ont pas été atteintes en raison de plusieurs facteurs : bris d'équipements, problèmes d'horaires, types de peuplement non propices à la collecte de données et problèmes informatiques. Les tableaux 4.2 à 4.6 procurent des informations sur le nombre de bloc tests réalisés pour chaque opérateur, ainsi que les dates et les secteurs d'interventions où ils se sont déroulés. Chaque opérateur représentant une étude de cas séparée, les blocs tests sont propres à chaque individu (le bloc #1 de l'opérateur 1B est différent du bloc #1 de l'opérateur 2B, etc.). Tous les blocs ont été considérés indépendants les uns des autres et ont été traités individuellement. Des données sur les peuplements forestiers rencontrés sont aussi présentées pour les opérateurs 1B, 2B et 3B. Les données n'étaient pas disponibles pour les opérateurs 4A et 5A.

Tableau 4.2 : Informations de l'échantillonnage de la productivité et sur les peuplements rencontrés : Opérateur 1B

Bloc test	Date	Secteur	DHP moyen (mm)	Volume par tige (m ³ /ti)	Densité (ti/ha)	Volume par ha (m ³ /ha)
1	21-01-2015	Travers	173	0,185	757	140
2	18-03-2015	Vermillon	151	0,124	1027	127
3	19-05-2015	Rainsart (Loutres)	149	0,250	1293	323
4	16-06-2015	Mirage	151	0,140	482	67
5	23-06-2015	Mirage	165	0,149	433	65
6	25-06-2015	Mirage	179	0,208	555	116
7	14-07-2015	Mirage	187	0,210	513	108
8	21-07-2015	Mirage	159	0,147	805	118
9	22-07-2015	Mirage	159	0,139	940	131
10	23-07-2015	Mirage	145	0,114	872	99
11	06-08-2015	Mirage	187	0,243	513	125
12	10-08-2015	Mirage	187	0,259	666	172
13	11-08-2015	Mirage	161	0,146	629	92
14	13-08-2015	Écarté	213	0,298	489	146
15	18-08-2015	Écarté	204	0,300	615	185

Tableau 4.3 : Informations de l'échantillonnage de la productivité et sur les peuplements rencontrés : Opérateur 2B

Bloc test	Date	Secteur	DHP moyen (mm)	Volume par tige (m ³ /ti)	Densité (ti/ha)	Volume par ha (m ³ /ha)
1	16-02-2015	Travers	183	0,228	998	228
2	25-02-2015	Béland	142	0,092	1093	101
3	25-03-2015	Rainsart (Duteau)	172	0,193	1035	200
4	19-05-2015	Rainsart (Loutres)	161	0,297	1231	365
5	16-06-2015	Mirage	156	0,128	623	80
6	21-07-2015	Mirage	148	0,112	865	97
7	18-08-2015	Écarté	213	0,314	598	187

Tableau 4.4 : Informations de l'échantillonnage de la productivité et sur les peuplements rencontrés : Opérateur 3B

Bloc test	Date	Secteur	DHP moyen (mm)	Volume par tige (m ³ /ti)	Densité (ti/ha)	Volume par ha (m ³ /ha)
1	03-03-2015	Vermillon	124	0,068	1307	88
2	04-03-2015	Vermillon	128	0,075	1414	106
3	17-03-2015	Rainsart	157	0,141	1006	142
4	26-03-2015	Rainsart (Duteau)	165	0,180	919	165
5	28-05-2015	Rainsart (Loutres)	151	0,134	1385	186
6	23-06-2015	Mirage	148	0,133	1089	144
7	25-06-2015	Mirage	172	0,173	501	87
8	16-07-2015	Mirage	179	0,221	960	213
9	22-07-2015	Mirage	149	0,115	911	105
10	22-07-2015	Mirage	152	0,129	998	129
11	28-07-2015	Mirage	143	0,111	948	105
12	29-07-2015	Mirage	156	0,132	605	80
13	04-08-2015	Mirage	166	0,152	662	101
14	13-08-2015	Écarté	174	0,202	532	107
15	18-08-2015	Écarté	218	0,322	496	160

Tableau 4.5 : Informations de l'échantillonnage de la productivité : Opérateur 4A

Bloc test	Date	Secteur
1	02-06-2015	Dumais
2	09-06-2015	Desautels
3	24-06-2015	Desautels
4	16-07-2015	Desautels
5	20-07-2015	Desautels

Tableau 4.6 : Informations de l'échantillonnage de la productivité : Opérateur 5A

Bloc test	Date	Secteur
1	09-06-2015	Desautels
2	25-06-2015	Desautels
3	20-07-2015	Desautels
4	21-07-2015	Desautels
5	28-07-2015	Desautels
6	30-07-2015	Desautels
7	04-08-2015	Desautels
8	06-08-2015	Desautels

Le tableau 4.7 présente les statistiques descriptives des données recueillies pour la mesure de la productivité. Le tableau 4.8 présente quant à lui les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA), effectuée par l'utilisation de contrastes, des productivités obtenues par les cinq opérateurs. Les données de l'opérateur 4A ont nécessité une transformation pour assurer le respect des postulats d'homogénéité de la variance et de la normalité des résidus. La transformation logarithmique s'est avéré la plus concluante. La valeur F associée aux blocs s'est révélée significative, confirmant que la mise en place d'un dispositif de blocage était nécessaire. Les tableaux détaillés des ANOVA se trouvent à l'annexe G.

Tableau 4.7 : Statistiques descriptives des données de productivité recueillies pour chaque opérateur

Opérateur	Nombre de blocs tests	Transfo.	Productivité moyenne	Erreur-type
1B	15		23,28	3,468
2B	7		35,97	3,206
3B	15		18,85	2,219
4A	5	Logarithmique	31,90	3,847
5A	8		21,08	1,282

Tableau 4.8 : Résultats des contrastes réalisés à partir des données de productivité recueillies pour chaque opérateur

Opérateur	Contraste	D.L.	S.C	M.Quad.	F	Prob > F
1B	M vs A	1	2,080	2,080	0,170	0,684
2B	M vs A	1	0,183	0,183	0,020	0,898
3B	M vs A	1	5,376	5,376	1,090	0,314
4A	M vs A	1	0,576	0,576	0,040	0,853
5A	S vs A	1	15,016	15,016	9,140	0,019

Aucun effet significatif du degré d'automatisation sur la productivité n'a été détecté pour les opérateurs 1B ($P=0,68$), 2B ($P=0,90$), 3B ($P=0,31$) et 4A ($P=0,85$). Seules les productivités obtenues par l'opérateur 5A ont présenté un écart significativement différent ($P<0,05$). Les tableaux 4.9 à 4.13 (un tableau par opérateur) présentent les productivités observées dans chaque bloc test sous chacun des degrés d'automatisation utilisés, ainsi que les écarts de productivité en résultant.

Le tableau 4.13 présente le détail des observations pour l'opérateur 5A, pour qui une différence significative de productivité a été détectée. Dans les 8 blocs test effectués, la productivité s'est avérée supérieure lors de l'utilisation du degré d'automatisation automatique avec des écarts minimal, maximal et moyen de $0,2 \text{ m}^3/\text{hmp}$, $5 \text{ m}^3/\text{hmp}$ et $1,94 \text{ m}^3/\text{hmp}$ respectivement. L'effet du degré d'automatisation semble toutefois moins prononcé dans les blocs test 4, 5 et 6 où les écarts de productivité se sont tous établis à moins de $0,5 \text{ m}^3/\text{hmp}$.

Pour les autres opérateurs (1B à 4A), l'expérimentation n'a pas permis de déceler de différence significative entre les moyennes des productivités enregistrées sous chaque degré d'automatisation. Cependant, l'analyse des données laisse entrevoir un possible effet des conditions de peuplement et de terrain rencontrées.

En prenant en exemple l'opérateur 3B (tableau 4.10), on constate qu'il a atteint des productivités moyennes de $19,3 \text{ m}^3/\text{hmp}$ (écart-type= $4,9$) et $18,4 \text{ m}^3/\text{hmp}$ (écart-type= $4,6$) pour les degrés d'automatisation manuel et automatique respectivement. Même sans différence significative entre les moyennes de productivité, deux constats émanent du tableau. Tout d'abord, aucun degré d'automatisation ne procure systématiquement une meilleure productivité. De plus, l'amplitude des écarts entre les degrés d'automatisation est très variable d'un bloc test à un autre. En fait, pour cet

opérateur, le degré automatique n'a été bénéfique que dans 4 blocs test sur 15. Pour ces 4 blocs test, les gains minimal, maximal et moyen ont été de 0,1 m³/hmp, 7,5 m³/hmp et 2,6 m³/hmp respectivement. Pour les 11 blocs tests où l'automatisation a résulté en une diminution de productivité, les pertes minimale, maximale et moyenne ont été de 0,1 m³/hmp, 7,4 m³/hmp et 2,1 m³/hmp respectivement.

La littérature technique et scientifique est unanime sur l'impact des conditions de peuplement et de terrain telles que le volume par tige des arbres abattus, la hauteur des arbres, la densité du peuplement, la rugosité du terrain et autres facteurs similaires sur la productivité d'une abatteuse-façonneuse. Les résultats obtenus par les ANOVA réalisées pour les cinq opérateurs confirment cet impact, la valeur F étant significative dans tous les cas pour le blocage (Annexe G). Les conditions intrablocs n'ont toutefois pas été étudiées.

Les résultats laissent entrevoir qu'il pourrait être intéressant d'adapter le degré d'automatisation en fonction des caractéristiques de peuplement et de terrain plutôt que d'appliquer un degré systématiquement à tous les blocs de récoltes. Malheureusement, le dispositif expérimental ne permettait pas de tester cette hypothèse. Des analyses au niveau des secteurs d'intervention ne sont d'aucune utilité puisque la superficie moyenne d'un secteur d'intervention est importante, pouvant atteindre plus de 1 000 ha et contenir différents types de peuplements et de conditions de terrain. L'échantillonnage n'a pas pris en compte ces facteurs.

Il est à noter qu'il est aussi possible qu'un opérateur soit simplement plus efficace avec un degré d'automatisation plutôt qu'un autre. Encore une fois, le dispositif expérimental ne permettait pas de tester cette hypothèse.

Tableau 4.9 : Données sur la productivité de l'opérateur 1B par bloc test

Bloc test	Productivité (m ³ /hmp)		Écart (m ³ /hmp)	Écart (%)
	Manuel	Automatique		
1	27,0	27,4	0,4	1,5 %
2	20,9	19,4	-1,5	-7,9 %
3	43,9	45,5	1,6	3,6 %
4	17,6	17,6	0	-0,3 %
5	17,0	15,6	-1,4	-9,0 %
6	31,7	17,9	-13,8	-77,1 %
7	23,3	17,6	-5,7	-32,2 %
8	21,0	22,2	1,2	5,4 %
9	20,3	17,1	-3,3	-19,0 %
10	14,5	16,2	1,6	10,2 %
11	21,7	23,9	2,2	9,2 %
12	21,5	24,8	3,4	13,5 %
13	20,0	16,3	-3,7	-22,6 %
14	24,3	28,0	3,8	13,4 %
15	28,4	35,7	7,3	20,4 %

Tableau 4.10 : Données sur la productivité de l'opérateur 2B par bloc test

Bloc test	Productivité (m ³ /hmp)		Écart (m ³ /hmp)	Écart (%)
	Manuel	Automatique		
1	40,2	48,4	8,2	17,0 %
2	18,1	21,0	2,9	14,0 %
3	36,9	36,9	0	0,1 %
4	65,7	62,0	-3,7	-5,9 %
5	25,1	19,8	-5,3	-26,7 %
6	21,1	19,1	-2,0	-10,5 %
7	43,9	45,4	1,5	3,3 %

Tableau 4.11 : Données sur la productivité de l'opérateur 3B par bloc test

Bloc test	Productivité (m ³ /hmp)		Écart (m ³ /hmp)	Écart (%)
	Manuel	Automatique		
1	12,5	12,4	-0,1	-1,0 %
2	14,2	12,3	-1,9	-15,9 %
3	23,2	19,7	-3,5	-17,9 %
4	25,1	24,0	-1,0	-4,3 %
5	27,0	19,6	-7,4	-37,7 %
6	19,3	17,4	-1,9	-11,0 %
7	14,2	21,7	7,5	34,6 %
8	24,7	26,4	1,7	6,5 %
9	14,9	16,1	1,2	7,4 %
10	17,3	15,8	-1,5	-9,3 %
11	16,6	15,9	-0,7	-4,5 %
12	17,1	15,8	-1,3	-8,4 %
13	18,9	16,3	-2,6	-16,0 %
14	17,2	16,0	-1,2	-7,3 %
15	26,9	27,0	0,1	0,4 %

Tableau 4.12 : Données sur la productivité de l'opérateur 4A par bloc test

Bloc test	Productivité (m ³ /hmp)		Écart (m ³ /hmp)	Écart (%)
	Manuel	Automatique		
1	44,9	41,7	-3,2	-7,7 %
2	37,2	31,7	-5,5	-17,3 %
3	13,7	13,2	-0,5	-3,6 %
4	41,5	49,7	8,2	16,5 %
5	21,0	24,4	3,4	14,0 %

Tableau 4.13 : Données sur la productivité de l'opérateur 5A par bloc test

Bloc test	Productivité (m ³ /hmp)		Écart (m ³ /hmp)	Écart (%)
	Semi-automatique	Automatique		
1	25,5	26,6	1,1	4,1 %
2	12,7	16,9	4,2	24,9 %
3	22,6	27,6	5	18,1 %
4	23,1	23,5	0,4	1,7 %
5	19,5	19,9	0,4	2,0 %
6	23,9	24,1	0,2	0,8 %
7	24	26,1	2,1	8,0 %
8	9,6	11,7	2,1	17,9 %

La méthode des blocs test utilisée pour la collecte de données pourrait limiter la capacité du dispositif à détecter des différences de productivité entre les degrés d'automatisation. L'échantillonnage a été réalisé de manière aléatoire à l'intérieur d'un quart de travail plutôt que sur un quart en entier. Il est possible qu'en fin de quart de travail le gain en productivité associé au degré automatique soit plus prononcé dû à l'accumulation de la fatigue.

Pour mettre en perspective l'importance de la productivité de l'opération d'abattage-façonnage, il s'agit de regarder aux résultats de l'opérateur 5A, qui présentaient un écart de productivité significatif. Un gain moyen de 1,93 m³/hmp a été enregistré en sélectionnant le meilleur degré d'automatisation pour les conditions rencontrées. En utilisant les hypothèses suivantes :

- 1 mètre cube est rémunéré à 15 \$;
- Un opérateur travaille 45 heures par semaine;
- Le taux d'efficacité moyen d'un opérateur d'abatteuse-façonneuse est de 85 %;
- Une saison de récolte dure en moyenne 40 semaines,

le gain en productivité reliée à l'emploi du meilleur degré d'automatisation, dans ce cas-ci le degré automatique, entraîne un gain du volume annuel récolté théorique de 3 060 m³. Un tel volume représente des revenus de près de 46 000 \$ pour l'entrepreneur. Ces revenus supplémentaires pourraient être générés sans nécessiter d'investissement. Il s'agit en effet de choisir le bon degré d'automatisation du façonnage fourni par le logiciel d'exploitation de la tête d'abatteuse-façonneuse, qui est inclus lors de l'achat de tout équipement récent.

La première hypothèse de recherche énoncée, soit que la productivité s'accroît avec l'utilisation de la fonction d'automatisation du façonnage, est donc rejetée. En effet, un seul des cinq opérateurs a présenté des productivités significativement supérieures lors de l'utilisation du degré d'automatisation automatique par rapport au degré semi-automatique. De plus, l'étude détaillée des productivités des quatre autres opérateurs permet de constater une large amplitude dans les écarts de productivités (jusqu'à 36%) entre les différents degrés d'automatisation. Cela laisse supposer que des facteurs externes, outre le degré d'automatisation sélectionné, peuvent aussi influencer sur la productivité obtenue.

4.2 Taux de conformité de la qualité

Les données recueillies dans chaque bloc test ont permis d'évaluer les taux de conformité des quatre indicateurs de qualité retenus :

- Pourcentage des billes mesurées à ± 5 centimètres de la longueur cible;
- Pourcentage des billes mesurées à ± 3 centimètres de la longueur cible;
- Pourcentage de conformité des diamètres d'écimage de la bille supérieure;
- Pourcentage de conformité des diamètres des cimes laissées au sol.

Pour chacun de ces indicateurs, l'analyse de la variance a été réalisée à l'aide de contrastes. L'opérateur 2B n'a pas participé à cette portion de la collecte de données, préférant se retirer du projet. Aussi, les cibles initialement prévues quant au nombre d'observations n'ont pas pu être atteintes. Le principal obstacle était la distance minimale de sécurité à respecter avec l'abatteuse (100 m), sans toutefois nuire à l'opération de débardage. De plus, les inventaires terrain pour les opérateurs de nuit ont aussi été limités en nombre pour des questions de sécurité. Les tableaux 4.14 à 4.17 présentent, pour chaque opérateur, le nombre d'observations réalisé, de même que la date et le secteur associé. Il faut noter qu'à certaines occasions pour les opérateurs 4A et 5A, l'inventaire terrain avait été réalisé alors que des problèmes techniques avaient empêché la mesure de la productivité. Il n'y a donc pas de correspondances possibles avec les données de productivité dans ces situations.

Tableau 4.14 : Informations de l'échantillonnage du taux de conformité de la qualité : Opérateur 1B

Numéro d'observation	Bloc test correspondant (Tableau 4.2)	Date	Secteur
1	2	18-03-2015	Vermillon
2	3	19-05-2015	Rainsart (Loutres)
3	5	23-06-2015	Mirage
4	6	25-06-2015	Mirage
5	7	14-07-2015	Mirage
6	8	21-07-2015	Mirage
7	15	18-08-2015	Mirage

Tableau 4.15 : Informations de l'échantillonnage du taux de conformité de la qualité : Opérateur 3B

Numéro d'observation	Bloc test correspondant (Tableau 4.4)	Date	Secteur
1	2	04-03-2015	Vermillon
2	6	23-06-2015	Mirage
3	7	25-06-2015	Mirage
4	8	16-07-2015	Mirage
5	10	22-07-2015	Mirage
6	12	29-07-2015	Mirage
7	15	18-08-2015	Mirage

Tableau 4.16 : Informations de l'échantillonnage du taux de conformité de la qualité : Opérateur 4A

Numéro d'observation	Bloc test correspondant (Tableau 4.5)	Date	Secteur
1	**	11-02-2015	Montréal
2	**	17-02-2015	Montréal
3	1	02-06-2015	Dumais
4	2	09-06-2015	Desautels
5	3	24-06-2015	Desautels
6	5	20-07-2015	Desautels

Tableau 4.17 : Informations de l'échantillonnage du taux de conformité de la qualité : Opérateur 5A

Numéro d'observation	Bloc test correspondant (Tableau 4.6)	Date	Secteur
1	1	09-06-2015	Desautels
2	2	25-06-2015	Desautels
3	**	08-07-2015	Desautels
4	5	28-07-2015	Desautels
5	8	06-08-2015	Desautels

4.2.1 Longueurs au seuil de tolérance de ± 5 centimètres

Les données collectées à partir de l'échantillon terrain ont permis de comparer le taux de conformité des billes dans une fenêtre de 5 centimètres autour de la cible. Seules les données de l'opérateur 3B ont nécessité une transformation réciproque pour respecter

les postulats de l'ANOVA d'homogénéité des variances et de normalité des résidus. Le tableau 4.18 présente des statistiques descriptives sur les données collectées des quatre opérateurs. Les résultats de l'ANOVA, réalisée à l'aide de contrastes, des taux de conformité obtenus sont présentés au tableau 4.19.

Tableau 4.18 : Statistiques descriptives des données de conformité des longueurs au seuil de ± 5 cm recueillies pour chaque opérateur

Opérateur	Nombre d'échantillons	Transfo.	Conformité moyenne	Erreur-type
1B	7		92,12 %	3,466
3B	7	Réciproque	93,15 %	3,393
4A	6		95,76 %	1,936
5A	5		95,48	2,935

Tableau 4.19 : Résultats des contrastes réalisés à partir des données de conformité des longueurs au seuil de ± 5 cm recueillies pour chaque opérateur

Opérateur	Contraste	D.L.	S.C	M. Quad.	F	Prob > F
1B	M vs A	1	2,326	2,326	0,190	0,673
3B	M vs A	1	1,03E+08	1,03E+08	6,980	0,038
4A	M vs A	1	27,301	27,301	7,280	0,043
5A	S vs A	1	5,476	5,476	0,640	0,470

L'effet du degré d'automatisation sur le taux de conformité des longueurs à un seuil de ± 5 cm est significatif pour les opérateurs 3B ($P=0,038$) et 4A ($P=0,043$), mais non significatif pour les opérateurs 1B ($P=0,673$) et 5A ($P=0,470$). Les tableaux 4.20 à 4.23 présentent les taux de conformité observés pour chaque échantillon, sous chacun des degrés d'automatisation utilisés.

Les tableaux 4.21 et 4.22 présentent le détail des résultats de conformité obtenus par les opérateurs 3B et 4A. On y constate qu'aucun degré d'automatisation n'enregistre systématiquement un taux de conformité supérieur à l'autre. Pour ces deux opérateurs, le degré manuel atteint un taux de conformité supérieur à celui du degré automatique dans 5 échantillons sur 7 pour l'opérateur 3B et dans 5 observations sur 6 pour l'opérateur 4A. L'amplitude des écarts du taux de conformité est aussi variable d'un échantillon à l'autre. Les écarts enregistrés oscillent de 1,1 % à 9,1 % et de 1 % à 5,8 % pour les opérateurs 3B et 4A respectivement. Cette variabilité des écarts peut

également être observée pour les opérateurs 1 et 5 (tableaux 4.20 et 4.23) pour lesquels l'expérimentation n'a pas permis de déceler de différence significative entre les moyennes des taux de conformité sous chaque degré d'automatisation. Encore une fois, l'analyse des données laisse entrevoir un possible effet des conditions de peuplement et de terrain rencontrés.

Tableau 4.20 : Données sur le pourcentage de conformité de la longueur des billes à ± 5 centimètres de la cible de l'opérateur 1B par bloc test

Numéro d'échantillon	Conformité des longueurs ± 5 cm (%)		Écart (%)
	Manuel	Automatique	
1	94,1	100	5,9
2	95,7	86,4	-9,3
3	96,2	93	-3,2
4	90,9	95	4,1
5	90,3	91,2	0,9
6	96,2	91,7	-4,5
7	88	86,7	-1,3

Tableau 4.21 : Données sur le pourcentage de conformité de la longueur des billes à ± 5 centimètres de la cible de l'opérateur 3B

Numéro d'échantillon	Conformité des longueurs ± 5 cm (%)		Écart (%)
	Manuel	Automatique	
1	98,5	90,7	-7,8
2	93,8	96,5	2,7
3	89,1	85,5	-3,6
4	100	90,9	-9,1
5	100	91,4	-8,6
6	97	98,1	1,1
7	89,7	82,9	-6,8

Tableau 4.22 : Données sur le pourcentage de conformité de la longueur des billes à ± 5 centimètres de la cible de l'opérateur 4A

Numéro d'échantillon	Conformité des longueurs ± 5 cm (%)		Écart (%)
	Manuel	Automatique	
1	100	94,2	-5,8
2	95,8	91,8	-4
3	98,5	96,8	-1,7
4	100	94	-6
5	98,2	96,6	-1,6
6	91,1	92,1	1

Tableau 4.23 : Données sur le pourcentage de conformité de la longueur des billes à ± 5 centimètres de la cible de l'opérateur 5A

Numéro d'échantillon	Conformité des longueurs ± 5 cm (%)		Écart (%)
	Semi-Auto	Automatique	
1	100	100	0
2	98,2	90,1	-8,1
3	98,5	97,2	-1,3
4	90,3	93,6	3,3
5	94,1	92,8	-1,3

Il faut constater que les écarts significatifs des taux de conformité ne peuvent pas seulement être attribuables à l'effet du changement de degré d'automatisation. En effet, les opérateurs 3B et 4A opèrent dans des équipes différentes et sur des équipements différents ; il n'est pas possible d'attribuer ces écarts à un effet relié à l'équipement utilisé. Une différence significative a donc été exposée seulement pour 1 des 2 opérateurs opérant sur le même équipement. La machine, les réglages et les calibrations étant les mêmes, ces différences significatives laissent supposer que l'opérateur pourrait aussi avoir un impact sur la précision des longueurs pouvant être obtenue. Ces différences pourraient être attribuables à un changement dans la méthode de travail des opérateurs en réaction au degré d'automatisation différent. L'effet du quart de travail n'a pas pu être analysé, étant donné que les travailleurs ont gardé le même horaire durant toute la durée des tests. Cependant, il faut noter que l'opérateur 3B opère de nuit, tandis que l'opérateur 4A travaille sur le quart de jour. Ces résultats laissent supposer que le quart n'a peut-être pas d'influence sur le taux de conformité de la longueur des billes à ± 5 cm de la cible.

4.2.2 Longueurs au seuil de tolérance de ± 3 centimètres

Le tableau 4.24 présente des statistiques descriptives sur les données mesurées de conformité des longueurs des billes à ± 3 cm de la cible. Quant à lui, le tableau 4.25 présente les résultats de l'ANOVA, en fonction des contrastes réalisés. Toutes les données respectant les postulats de l'ANOVA (homogénéité des variances et de normalité des résidus), aucune transformation ne s'est avérée nécessaire.

Tableau 4.24 : Statistiques descriptives des données de conformité des longueurs au seuil de ± 3 cm recueillies pour chaque opérateur

Opérateur	Nombre d'échantillons	Transfo.	Conformité moyenne	Erreur-type
1B	7		79,2 %	11,312
3B	7		78,64 %	7,488
4A	6		90,71 %	4,690
5A	5		86,73 %	3,019

Tableau 4.25 : Résultats des contrastes réalisés à partir des données de conformité des longueurs au seuil de ± 3 cm recueillies pour chaque opérateur

Opérateur	Contraste	D.L.	S.C	M.Quad.	F	Prob > F
1B	M vs A	1	0,391	0,391	0,000	0,958
3B	M vs A	1	128,411	128,411	2,290	0,181
4A	M vs A	1	71,541	71,541	3,250	0,131
5A	S vs A	1	95,481	95,481	10,480	0,032

Le changement de degré d'automatisation a entraîné un écart significatif entre les taux de conformité mesurés pour l'opérateur 5A ($P=0,032$), mais pas pour les opérateurs 1B ($P=0,958$), 3B ($P=0,181$) et 4A ($P=0,131$). Le détail des taux de conformité mesurés lors de l'utilisation des degrés d'automatisation retenus pour chaque opérateur est présenté aux tableaux 4.26 à 4.29.

Les données des opérateurs 1B et 3B (tableaux 4.26 et 4.27) montrent des taux de conformités supérieurs répartis également entre les degrés d'automatisation comparés. Dans les deux cas, les données respectives de chaque opérateur montrent en effet un taux de conformité supérieure avec le degré automatique dans trois observations contre quatre avec le degré manuel. Les données de l'opérateur 4A (Tableau 4.28) montrent toutefois une tendance nette malgré l'absence de significativité des écarts détectés. En

effet, cinq des six observations montrent une conformité supérieure lors de l'utilisation du degré d'automatisation manuel.

L'étude du détail des données de l'opérateur 5A (Tableau 4.29) permet de constater que le degré d'automatisation semi-automatique a offert un taux de conformité supérieur au degré automatique. Quatre des cinq observations réalisées montrent une conformité supérieure, tandis que l'écart de l'échantillon #3, pour lequel le degré automatique présente une meilleure conformité, est minime.

Encore une fois, aucun degré d'automatisation n'enregistre systématiquement un taux de conformité supérieur à un autre pour tous les opérateurs. L'amplitude des écarts de conformité entre les degrés d'automatisation est encore très variable d'un échantillon à un autre. Les écarts varient d'environ 1 % à près de 20 % pour les opérateurs 1B et 2B et d'environ 1 % à 10 % pour les opérateurs 4A et 5A, d'un côté comme de l'autre.

Tableau 4.26 : Données sur le pourcentage de conformité des longueurs à ± 3 cm de l'opérateur 1B

Numéro d'échantillon	Conformité des longueurs ± 3 cm (%)		Écart (%)
	Manuel	Automatique	
1	87,1	100	12,9
2	78,7	72,9	-5,8
3	81,1	73,7	-7,4
4	68,2	85	16,8
5	79	84,2	5,2
6	92,3	80	-12,3
7	82	62,2	-19,8

Tableau 4.27 : Données sur le pourcentage de conformité des longueurs à ± 3 cm de l'opérateur 3B

Numéro d'échantillon	Conformité des longueurs ± 3 cm (%)		Écart (%)
	Manuel	Automatique	
1	89,6	69,8	-19,8
2	70,8	71,9	1,1
3	70,9	72,6	1,7
4	96,8	81,8	-15
5	89,7	80	-9,7
6	74,6	84,6	10
7	79,3	68,6	-10,7

Tableau 4.28 : Données sur le pourcentage de conformité des longueurs à ± 3 cm de l'opérateur 4A

Numéro d'échantillon	Conformité des longueurs ± 3 cm (%)		Écart (%)
	Manuel	Automatique	
1	96,5	86,5	-10
2	90,3	79,5	-10,8
3	97,1	95,2	-1,9
4	100	89,6	-10,4
5	87,5	93,1	5,6
6	87,5	85,7	-1,8

Tableau 4.29 : Données sur le pourcentage de conformité des longueurs à ± 3 cm de l'opérateur 5A

Numéro d'échantillon	Conformité des longueurs ± 3 cm (%)		Écart (%)
	Semi-Auto	Automatique	
1	88,9	80	-8,9
2	91,2	84,5	-6,7
3	88,1	88,7	0,6
4	88,7	78,2	-10,5
5	92,2	86,8	-5,4

Le faible nombre de degrés de liberté pour tous les opérateurs est cependant à prendre en considération dans l'interprétation des résultats. En effet, la loi de Fisher requiert, lorsque le nombre de degrés de liberté diminue, un écart extrêmement important pour être en mesure de le considérer comme étant significatif. Il est donc probable que des écarts de moindre importance n'aient pas été détectés en raison du faible échantillonnage. L'interprétation doit en être d'autant plus prudente.

Il n'est pas possible de cerner un effet d'opérateur. Étant donné que le seul écart significatif que le dispositif a été en mesure de détecter concerne l'opérateur 5A et que seul celui-ci utilise le degré d'automatisation semi-automatique, la comparaison n'est pas possible avec les autres opérateurs qui n'utilisent pas ce degré d'automatisation. La tendance détectée quant à un taux de conformité inférieur lors de l'utilisation du degré automatique dans les données de l'opérateur 4A doit toutefois être considérée, laissant envisager un effet attribuable à l'équipement. En effet, les opérateurs 4A et 5A travaillent dans la même équipe.

Les écarts significatifs qui ont été captés par le dispositif tant pour les longueurs à ± 5 et ± 3 centimètres de la cible ont donc tous indiqué des conformités moins élevées des longueurs façonnées avec le degré d'automatisation automatique. Il semble donc y avoir une tendance à ce que l'augmentation du degré d'automatisation entraîne une réduction de la conformité des longueurs des billes façonnées. Il faut cependant rappeler que dans la majorité des cas, le dispositif n'a pas été en mesure de détecter de gains ou de pertes attribuables au changement de degré d'automatisation sur le taux de conformité des longueurs des billes. De plus, d'autres facteurs dont le dispositif ne pouvait pas tenir en compte, soit l'effet du peuplement forestier (ex. : présence importante de défauts à façonner) et l'effet de l'opérateur, peuvent aussi avoir eu un impact sur cette tendance de conformité à la baisse.

4.2.3 Diamètre d'écimage des billes

Les données sur les diamètres au fin bout des billes ont permis de comparer les taux de conformité obtenus avec l'emploi des différents degrés d'automatisation. Le tableau 4.30 présente un sommaire de statistiques descriptives sur les données recueillies pour chacun des quatre opérateurs, tandis que le tableau 4.31 présente les résultats des ANOVA réalisées à l'aide de contrastes.

Seules les données de l'opérateur 1B ont nécessité une transformation pour corriger leur hétérogénéité. La transformation réciproque s'est révélé la plus efficace à cet effet. Des signes laissant croire à de l'hétérogénéité des variances des données de l'opérateur 4A ont aussi été constatés. Ces signes découlaient toutefois de la présence d'une donnée extrême, et la vérification de la base de données n'a pas permis de trouver de motif valable pour la retirer étant donné que rien ne pouvait laisser croire qu'elle était erronée. Les données de l'opérateur 4A ont donc été conservées et analysées telles quelles.

Tableau 4.30 : Statistiques descriptives des données de conformité des diamètres d'écimage des billes recueillies pour chaque opérateur

Opérateur	Nombre d'échantillons	Transfo.	Conformité moyenne	Erreur-type
1B	7	Réciproque	84,18 %	8,611
3B	7		86,33 %	11,696
4A	4		92,01 %	11,497
5A	5		86,62 %	7,732

Tableau 4.31 : Résultats des contrastes réalisés à partir des données de conformité des diamètres d'écimage des billes recueillies pour chaque opérateur

Opérateur	Contraste	D.L.	S.C	M.Quad.	F	Prob > F
1B	M vs A	1	0,047	0,047	2,770	0,140
3B	M vs A	1	248,643	248,643	1,820	0,226
4A	M vs A	1	0,032	0,032	2,390	0,220
5A	S vs A	1	0,013	0,013	2,190	0,213

Le dispositif mis en place n'a pas permis de détecter de différences significatives (gains ou pertes) dans la conformité des diamètres d'écimage des billes façonnées en fonction du degré d'automatisation utilisé. En effet, les valeurs P de tous les opérateurs se sont révélées supérieures au seuil fixé de 0,05. Le faible nombre de répétitions doit cependant inciter à la prudence dans l'analyse des données, tel que cela a été expliqué précédemment.

Une tendance nette se dessine toutefois. En effet, seules les données de l'opérateur 1B (tableau 4.32) présentaient un nombre égal de conformités supérieures obtenues avec l'utilisation du degré automatique (4/7) et du degré manuel (3/7).

Les données provenant des opérateurs 3B, 4A et 5A (tableaux 4.33 à 4.35) montrent quant à elles une conformité des diamètres nettement inférieure sous l'utilisation du degré d'automatisation automatique. Un échantillonnage plus important pourrait permettre la confirmation de cette tendance, de même que son explication par un meilleur diagnostic vis-à-vis certains facteurs externes, tels que les conditions environnementales (densité des tiges et diamètre à hauteur de poitrine moyen par exemple). Il semble donc que la hausse du degré d'automatisation, de concert avec d'autres facteurs à identifier, puisse diminuer la conformité des diamètres d'écimage des billes façonnées.

Il faut aussi noter l'importance des amplitudes des écarts entre les taux de conformités obtenus lors de l'utilisation des différents degrés d'automatisation. Les écarts varient de -12,5 % à 16,5 % pour l'opérateur 1B, de -35,3 % à 11,8 % pour l'opérateur 3B, de -35,3 % à -0,1 % pour l'opérateur 4A et de -21 % à 7,1 % pour l'opérateur 5A. Ces variations pourraient s'expliquer par l'interaction d'autres facteurs, tels que les peuplements ou les terrains rencontrés (ex. : pentes).

Tableau 4.32 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres d'écimage des billes de l'opérateur 1B

Numéro d'échantillon	Conformité des diamètres d'écimage des billes (%)		Écart (%)
	Manuel	Automatique	
1	83,9	100	16,1
2	100	87,5	-12,5
3	92,6	92	-0,6
4	78,9	90,9	12
5	79,2	95,7	16,5
6	95	83,3	-11,7
7	54,5	66,7	12,2

Tableau 4.33 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres d'écimage des billes de l'opérateur 3B

Numéro d'échantillon	Conformité des diamètres d'écimage des billes (%)		Écart (%)
	Manuel	Automatique	
1	100	90,5	-9,5
2	88,2	100	11,8
3	87,5	79,2	-8,3
4	100	93,8	-6,2
5	100	64,7	-35,3
6	86,7	96,6	9,9
7	71,4	50	-21,4

Tableau 4.34 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres d'écimage des billes de l'opérateur 4A

Numéro d'échantillon	Conformité des diamètres d'écimage des billes (%)		Écart (%)
	Manuel	Automatique	
3	100	86,7	-13,3
4	100	64,7	-35,3
5	97,2	97,1	-0,1
6	96	94,4	-1,6

Tableau 4.35 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres d'écimage des billes de l'opérateur 5A

Numéro d'échantillon	Conformité des diamètres d'écimage des billes (%)		Écart (%)
	Semi-Auto	Automatique	
1	100	100	0
2	96	75	-21
3	92,9	100	7,1
4	82,1	70,6	-11,5
5	95,2	84,4	-10,8

4.2.4 Diamètre des cimes sur le parterre de coupe

Le sommaire des informations sur le taux de conformité des cimes laissées sur le parterre de coupe est présenté au tableau 4.36. Aucune transformation n'a été nécessaire, les données des quatre opérateurs respectant déjà les postulats de l'ANOVA (homogénéité des variances et normalité des résidus). Le tableau 4.37 présente les résultats des analyses de variance réalisées à l'aide de contrastes pour chacun des opérateurs.

Tableau 4.36 : Statistiques descriptives des données de conformité des diamètres d'écimage des cimes laissées sur le parterre de coupe recueillies pour chaque opérateur

Opérateur	Nombre d'échantillons	Transfo.	Conformité moyenne	Erreur-type
1B	6		91,17 %	6,420
3B	7		86,38 %	4,259
4A	6		94,18 %	5,185
5A	4		91,67 %	5,458

Tableau 4.37 : Résultats des contrastes réalisés à partir des données de conformité des diamètres des cimes laissées sur le parterre de coupe recueillies pour chaque opérateur

Opérateur	Contraste	D.L.	S.C	M.Quad.	F	Prob > F
1B	M vs A	1	14,811	14,811	0,360	0,571
3B	M vs A	1	44,083	44,083	2,430	0,180
4A	M vs A	1	0,163	0,163	0,010	0,941
5A	S vs A	1	0,008	0,008	2,520	0,211

Le dispositif n'a pas permis de détecter de différences significatives dans la conformité des diamètres d'écimage des cimes laissées sur le terrain selon le degré

d'automatisation au seuil de significativité retenu ($P > 0,05$). Le nombre peu élevé de degrés de liberté associé au nombre de répétitions limite ici aussi la portée des analyses.

Les meilleurs taux de conformité sont répartis de manière presque égale entre les degrés d'automatisation manuel et automatique pour les opérateurs 1B, 3B et 4A. Les données de ces opérateurs se retrouvent aux tableaux 4.38 à 4.40. Les données de l'opérateur 5A (tableau 4.41) semblent présenter un taux de conformité supérieur avec l'emploi du degré d'automatisation semi-automatique (trois cas sur quatre).

Le facteur humain pour l'indicateur de conformité des diamètres d'écimage des cimes sur le parterre de coupe est à considérer attentivement. En effet, l'opérateur peut, par sa technique de travail ou volontairement en cas de doute, contribuer à rendre inaccessibles des cimes qui ne sont pas conformes. C'est l'opérateur qui choisit où sera déposée la cime sur le parterre, et, s'il doute de sa conformité, il peut la placer d'une manière à rendre sa mesure difficile voire impossible. Il peut par exemple placer un empilement par-dessus, ou bien la placer en dessous de ses chenilles pour l'enfoncer dans le sol. Un biais peut donc avoir été introduit volontairement. L'interprétation des résultats doit donc être très prudente.

Tableau 4.38 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres des cimes sur le parterre de coupe de l'opérateur 1B

Numéro d'échantillon	Conformité des diamètres d'écimage des cimes (%)		Écart (%)
	Manuel	Automatique	
1	97,8	85,4	-12,4
2	95	93	-2
3	100	97	-3
4	96,3	97,5	1,2
5	73,5	85	11,5
6	90	95	5

Tableau 4.39 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres des cimes sur le parterre de coupe de l'opérateur 3B

Numéro d'échantillon	Conformité des diamètres d'écimage des cimes (%)		Écart (%)
	Manuel	Automatique	
1	95	87,8	-7,2
2	97	97	0
3	86,7	90,3	3,6
4	96	85,7	-10,3
5	71,8	61,9	-9,9
6	83,3	84,1	0,8

Tableau 4.40 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres des cimes sur le parterre de coupe de l'opérateur 4A

Numéro d'échantillon	Conformité des diamètres d'écimage des cimes (%)		Écart (%)
	Manuel	Automatique	
1	87,1	100	12,9
2	91,9	87,2	-4,7
3	91,3	92,3	1
4	100	91,3	-8,7
5	98	98,1	0,1
6	97,5	95,5	-2

Tableau 4.41 : Données sur le pourcentage de conformité des diamètres des cimes sur le parterre de coupe de l'opérateur 5A

Numéro d'échantillon	Conformité des diamètres d'écimage des cimes (%)		Écart (%)
	Semi-Auto	Automatique	
1	88,9	*	*
2	100	96	-4
3	88,2	82,4	-5,8
4	97,6	81	-16,6
5	94,5	96,4	1,9

Bien qu'aucun écart significatif n'ait été détecté lors de l'analyse des données pour les deux indicateurs de conformité des diamètres d'écimage, une tendance semble se dessiner. En effet, la grande majorité des conformités les plus élevées sont attribuables aux degrés d'automatisation manuel et semi-automatique : 6/13 pour l'opérateur 1B, 9/14 pour l'opérateur 3B, 7/10 pour l'opérateur 4A et 7/9 pour l'opérateur 5A. Cela laisse

croire qu'une automatisation plus élevée pourrait tendre à diminuer la conformité des diamètres d'écimage. Cependant, il demeure nécessaire de mettre en contexte les degrés d'automatisation employés avec les autres sources potentielles de variation que sont le facteur humain et les facteurs de peuplement et de terrain. Un échantillonnage supplémentaire et plus important serait nécessaire à cet effet, tel qu'expliqué précédemment

La deuxième hypothèse de recherche doit donc être rejetée. En effet, le taux de conformité ne s'est pas amélioré significativement lors de l'utilisation de la fonction d'automatisation du façonnage des têtes d'abattage-façonnage. Les écarts significatifs détectés présentaient tous des conformités supérieures dans les degrés manuel et semi-automatique. De plus, les tendances détectées dans les cas non significatifs étaient toutes similaires, présentant des taux de conformités supérieures lors de l'utilisation de degrés d'automatisation autres que le degré automatique.

4.3 Entrevues semi-dirigées

Cette section présente un sommaire des informations recueillies lors des entrevues individuelles réalisées avec les opérateurs ayant participé à l'ensemble du projet, soit les opérateurs 1B, 3B, 4A et 5A. Les informations sont divisées selon les différents aspects abordés lors des rencontres. Tout d'abord, l'expérience de travail des opérateurs est présentée, suivie de leurs perceptions face aux différents degrés d'automatisation utilisés durant les tests. Finalement, les perceptions des opérateurs face aux tests qui ont été réalisés sont présentées.

4.3.1 Expérience et méthode de travail des opérateurs

Les quatre opérateurs ayant accepté de participer aux entrevues individuelles cumulaient une expérience totale de 106 années dans l'opération d'équipements forestiers (moyenne de 26,5 années) et tous cumulaient plus de 20 ans individuellement.

Ces opérateurs peuvent être séparés en deux groupes distincts. Deux de ces opérateurs ont à ce jour opéré durant plus de 20 ans des abatteuses-façonneuses et sont considérés comme des opérateurs « expérimentés ». Les deux autres ont quant à eux accumulé la majorité de leur expérience sur d'autres équipements, principalement des ébrancheuses. Ces opérateurs sont donc considérés comme étant « moins

expérimentés », étant donné que la majorité de leur expérience n'a pas été acquise lors d'activités de récolte à l'aide d'une abatteuse-façonneuse.

Le degré d'automatisation employé sur une base régulière semble au premier abord avoir un lien avec l'importance de l'expérience acquise avec une abatteuse-façonneuse par les opérateurs ayant accepté de participer aux entrevues. En effet, les deux opérateurs « expérimentés » n'emploient pas le degré automatique dans leurs opérations quotidiennes, ce qui n'est pas le cas des deux autres opérateurs qui utilisent exclusivement ce degré d'automatisation.

Cependant, les commentaires des opérateurs ont permis de constater que leur choix est principalement guidé par une raison externe au façonnage en tant que tel. Les deux opérateurs « expérimentés » ont explicité la nécessité d'être en mesure de mieux contrôler les billes pour fournir à l'opération de débardage des empilements de meilleure qualité, car c'est cette opération qui est le goulot de leur processus de récolte. Le contrôle de la scie permettrait de réaliser des empilements plus égaux, soit par le contrôle de la première bille (semi-automatique) ou par la possibilité de synchroniser le façonnage des billes avec le balan de la tête d'abattage-façonnage (manuel) facilitant la tâche de chargement du débardage. De plus, ceux-ci ont aussi expliqué que les anciens systèmes de contrôle des abatteuses-façonneuses nécessitaient un nombre beaucoup plus important d'interventions manuelles. Ce faisant, ils ont donc acquis des aptitudes qui, selon les remarques qu'ils ont formulées, leur permettent de compenser un nombre plus important de décisions à prendre à une cadence élevée. Cette expérience peut donc justifier, du moins en partie, le choix de degré d'automatisation effectué par ces deux opérateurs.

À l'opposé, les deux opérateurs ayant un historique moins important avec les abatteuses-façonneuses ont vu la complexité du système qu'ils opéraient augmenter significativement lors de leurs passages de l'ébrancheuse vers l'abatteuse-façonneuse. La principale préoccupation que ces opérateurs ont soulevée est la diminution du nombre de fonctions à actionner lors du façonnage : le potentiel de l'ordinateur a donc permis de leur « simplifier » la tâche en diminuant le nombre d'interventions manuelles. Ces commentaires laissent donc présager que l'utilisation des fonctions automatisées puisse avoir un impact bénéfique plus important pour les opérateurs novice que pour les opérateurs expérimentés.

4.3.2 Perceptions face aux degrés d'automatisation

Avant de présenter les résultats obtenus, chaque opérateur a été questionné pour connaître sa prédiction des résultats et, ce faisant, sa perception face aux différents degrés d'automatisation. Ces perceptions face aux possibilités de gain ou de perte de productivité et en taux de conformité de la qualité en fonction du degré d'automatisation utilisé varient selon les opérateurs. Aucun d'entre eux ne croyait qu'une perte de productivité était envisageable en utilisant le degré automatique. Cependant, 2 opérateurs ont indiqué qu'ils ne croyaient pas qu'une différence serait détectée entre les différentes productivités mesurées, tandis que les 2 autres anticipaient une productivité plus élevée avec l'utilisation du degré automatique. Ce gain s'expliquerait du fait que la machine impose une cadence de production à l'opérateur, qui ne pourrait pas prendre de « pauses » comme avec le degré manuel.

Du côté de l'impact sur la conformité, 1 seul opérateur a affirmé penser que le degré automatique pourrait peut-être permettre d'obtenir une conformité supérieure des longueurs. Les autres opérateurs ont quant à eux spécifié ne pas s'attendre à voir d'écarts de productivité importants. Aucun n'a mentionné la conformité des diamètres d'écimage, les commentaires étant plutôt dirigés vers des considérations de qualité de la fibre (ex. : billes fendues) qui ont un impact financier direct pour les entrepreneurs. Ces aspects n'ont toutefois pas été étudiés dans la cadre du projet.

Les opérateurs « moins expérimentés » croient que le degré automatique peut être utilisé en tout temps, dans n'importe quel peuplement ou n'importe quel type de traitement sylvicole. À l'opposé, les deux autres opérateurs ont énuméré des conditions d'opération spécifiques favorisant l'utilisation du degré d'automatisation automatique. Ceux-ci ont indiqué que les peuplements monospécifiques, avec une régénération faible (peu d'obstruction latérale), un diamètre à hauteur de poitrine « moyen » (15 à 20 cm au diamètre à hauteur de poitrine) et des tiges permettant le façonnage de 2 billes de 5 mètres (16 pieds) sont idéaux à cet effet. Cette opinion des opérateurs plus expérimentés viendrait appuyer l'hypothèse soulevée lors de l'analyse des données que des facteurs de sites ou peuplement pourraient avoir un effet sur les indicateurs retenus. De plus, ces opérateurs ont aussi mentionné que le seul traitement favorable à l'emploi du degré automatique est la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS).

L'effort demandé lors de l'utilisation de chaque degré d'automatisation est aussi perçu différemment selon chaque opérateur. Tandis que le premier opérateur rencontré n'a pas constaté, lors des tests, de différences majeures lors des changements de degré, le deuxième opérateur a constaté que son utilisation des commandes différait en fonction du degré utilisé. Le troisième opérateur rencontré a quant à lui soulevé la charge mentale plus importante lors de l'emploi du degré automatique, alors que c'est la charge physique de l'utilisation du degré manuel qui a été mentionnée par l'opérateur participant à la dernière rencontre. Les perceptions d'effort sont donc propres à chacun des individus rencontrés.

4.3.3 Perceptions face aux tests

Des commentaires ont été formulés sur la période d'adaptation nécessaire lors du changement de degré d'automatisation, car cela revenait à modifier leur technique de travail. Plusieurs ont indiqué croire que cela avait pu avoir un impact sur la productivité. Cette période a été quantifiée à 30 minutes par un opérateur. Comme l'ordre dans lequel les degrés d'automatisation ont été réalisés a été déterminé aléatoirement, ce possible effet n'aurait pas causé de biais systématique. La majorité des opérateurs (3/4) croyait que des blocs tests d'une durée plus longue auraient permis d'obtenir un constat différent. De même, le moment où les tests ont été réalisés (début vs fin de quart de travail) a aussi été soulevé, car l'effet de fatigue pourrait contribuer à influencer de manière significative sur la productivité en fin de quart, selon deux des opérateurs consultés.

Dans l'ensemble, tous les opérateurs ont exprimé leur satisfaction quant au déroulement des tests sur le terrain, mais ont tous mentionné ne pas vouloir changer de degré d'automatisation en dehors de ces tests.

5. Problèmes d'implantations et recommandations

Cette section présente un sommaire des principales problématiques rencontrées lors de la mise en place du dispositif de collecte de données et lors de la collecte de données elle-même. Quelques recommandations sont aussi énumérées quant aux solutions pouvant être apportées. Les problèmes reliés aux matrices de décisions (« liste de prix ») sont tout d'abord présentées. Les problèmes détectés quant à la calibration sont ensuite énumérés, suivis de ceux liés aux enjeux de formations des propriétaires de machinerie forestière.

5.1 Dispositif de collecte de données

La mise en place d'un dispositif de collecte dans un contexte opérationnelle en opérations forestières représentait un défi majeur et soit. Il est tout d'abord très difficile d'avoir quelque prévisibilité que ce soit quant aux secteurs de récolte qui seront visités par une équipe de récolte donnée. La planification des opérations des opérations forestières est réalisée à très court terme et est très volatile, par exemple en fonction de la météo et de l'état du réseau routier.

Le nombre d'intervenants est un autre facteur à considérer : le partage des rôles entre les représentants du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP), des superviseurs de récolte, de transport et de construction de chemins, des membres de la direction de l'entreprise (surintendants, directeurs, équipe des projets spéciaux) ainsi que des entrepreneurs et ses opérateurs contribue à la faible prévisibilité des opérations forestières. Tous peuvent en effet demander des changements à la planification à court terme des opérations de récolte.

Finalement, l'évolution rapide des besoins des usines de transformations entraîne des changements aux normes de façonnage qui créent une certaine instabilité dans les opérations. Bien qu'il ait été annoncé au début du projet que les normes de façonnage allaient demeurer fixes pour la durée de la collecte de données, celles-ci ont quand même dû être modifiées en raison de l'évolution des marchés.

Toutes ces contraintes expliquent donc la difficulté d'atteindre le nombre de répétitions visé dans le cadre de la collecte de données. La mise en place d'un dispositif rigoureux et sous contrôle de collecte de données en opérations forestières peut, à elle seule, représenter un objectif à atteindre dans le cadre d'un projet

5.2 Liste de prix

Les logiciels d'optimisation des ordinateurs de bord des abatteuses-façonneuses permettent l'automatisation des fonctions de façonnage grâce à l'utilisation d'une matrice de décision souvent identifiée à comme la « liste de prix » (Figure 5.1). Ces prix sont en fait une pondération accordée pour chaque combinaison de diamètre au fin bout et de longueur qui est autorisée pour le façonnage. Ces pondérations sont utilisées pour favoriser ou prioriser certains produits en forêt. L'optimisation peut avoir deux objectifs distincts. Le premier vise à maximiser l'utilisation de la fibre, c'est-à-dire à utiliser la plus longue partie marchande de l'arbre abattu. Le second vise plutôt à façonner l'arbre abattu en la combinaison de billes qui a la plus grande valeur, d'après la liste de prix utilisée dans l'ordinateur.

	Diamètre au fin bout																			
	70	75	80	85	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	250	300	400	500
256	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	20	20	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
319	60	60	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
350	200	200	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
380	500	500	500	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
411	900	900	900	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
441	1300	1300	1300	1300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
472	1700	1700	1700	1700	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
501	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5000	5000	5000
504	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	0	0	0

Figure 5.1 : Représentation d'une matrice de décision tirée du logiciel Log Mate 500

Dans cette figure, il est possible de constater que ce sont les billes de 504 centimètres qui sont priorisées. En effet, l'ordinateur ne peut prendre la décision de façonner une autre longueur que 504 centimètres pour les billes de plus de 9 cm au fin bout et de 501 cm pour les billes de plus de 30 cm au fin bout étant donné que toutes les autres pondérations sont fixées à zéro. Si la bille est plus petite, les pondérations décroissantes font en sorte que l'ordinateur cherchera à façonner la longueur la plus longue possible parmi celles qui sont autorisées, jusqu'à une longueur minimale de 256 centimètres.

Dans le cadre de ce projet, une seule longueur cible était permise pour le façonnage des billes destinées au sciage. Les usines de sciage de l'entreprise partenaire sont conçues pour être alimentées exclusivement en billes de 16 pieds (5 mètres).

Nieuwenhuis et Dooley (2006) ont étudié la précision des mesures effectuées par une tête d'abattage-façonnage. Les auteurs rapportent des niveaux de précision variables en fonction des différentes longueurs de billes façonnées. Il est donc possible qu'une modification à la liste de prix engendre des résultats différents à ceux observés dans cette étude.

Aucune documentation n'a pu être identifiée pour aider à générer des listes de prix. Les équipementiers fournissent la procédure à suivre pour entrer et modifier les listes de prix dans l'ordinateur de bord, mais aucun outil n'est disponible pour faciliter la génération d'une liste qui fasse le lien entre les données dendrométriques des arbres dans un peuplement et les produits désirés par l'entreprise. Même si un tel outil avait été accessible, aucune donnée dendrométrique précise n'était disponible. Pour obtenir des réglages satisfaisants aux besoins de l'entreprise, il a été nécessaire de procéder par essais et erreurs lors de l'opération de récolte pour obtenir des réglages acceptables. Par la suite, un suivi des opérations est crucial pour s'assurer de générer les produits désirés parce qu'une même liste de prix appliquée dans deux peuplements différents ne générera pas nécessairement les mêmes produits.

Il pourrait être pertinent de développer un utilitaire informatique permettant de développer des listes de prix sur la base des produits désirés et des peuplements récoltés, plutôt que de procéder par essais et erreurs.

Finalement, l'utilisation des ordinateurs de bord nécessite la formation des propriétaires et des opérateurs des abatteuses-façonneuses. En premier lieu, il est important qu'au moins le propriétaire de l'équipement soit en mesure d'entrer et de modifier la liste de prix afin de contrôler les produits façonnés et de réagir aux changements de spécifications exigées par l'entreprise. En cours de projet, les chercheurs se chargeaient de cet élément et apportaient les modifications dans les ordinateurs de bord. Dans le cadre des opérations courantes, il est souhaitable que le propriétaire (ou dans certains cas un opérateur) soit en mesure d'effectuer lui-même ces modifications à la liste de prix pour s'adapter aux demandes de l'entreprise, mais aussi en fonction des conditions de peuplement rencontrées. Aussi, les équipements sont mis à rude épreuve en forêt et il a été nécessaire de réinstaller les listes de prix suite à des problèmes informatiques. La capacité du propriétaire à intervenir directement sur ces aspects permettrait aussi de limiter les impacts négatifs sur la production de l'abatteuse-façonneuse en cas de problème.

5.3 Calibration

La calibration est un élément essentiel du processus d'automatisation du façonnage. Les décisions prises par l'ordinateur quant au patron de façonnage sont prises en fonction des informations mesurées par les capteurs de la tête d'abattage-façonnage, et sont donc tributaires de la précision de ces informations.

Les équipementiers fournissent les procédures à suivre pour calibrer la tête. Cependant, aucune étude n'a pu être identifiée qui documente ou identifie des facteurs influençant la précision des mesures et dans quelles conditions une nouvelle calibration serait nécessaire. Il est donc difficile dans un contexte opérationnel de définir un protocole de calibration garantissant un niveau de précision désiré ou de jauger l'effort de calibration à déployer. Des travaux supplémentaires sur ces points pourraient s'avérer utiles.

5.4 Formation et réglages des logiciels

Une formation supplémentaire est nécessaire pour les propriétaires qui procèdent à l'acquisition d'un équipement possédant un ordinateur de bord récent. En effet, les commentaires recueillis sur le terrain montrent que ceux-ci ne se sentent pas en contrôle de leurs systèmes avec les informations reçues de leurs fournisseurs respectifs lors de l'acquisition de leurs équipements. Ce manque d'information crée de l'incertitude et de la méfiance face aux possibilités de ces logiciels.

Ce faisant, il a été nécessaire de développer des procédures écrites pour assister les opérateurs et les propriétaires dans leurs modifications de réglages hebdomadaires, que ce soit pour régler les pressions des rouleaux d'alimentation sur la bille, pour changer la matrice de décision du façonnage ou bien pour calibrer leur équipement. L'introduction de ces procédures représente le premier pas à accomplir pour accompagner les entrepreneurs et leurs opérateurs vers une plus grande autonomie et un plus grand contrôle vis-à-vis leurs systèmes embarqués.

6. Conclusion

L'objectif de ce projet était de mesurer les impacts de trois différents degrés d'automatisation de la fonction de façonnage de têtes d'abatteuses-façonneuses. Spécifiquement, les performances de ces trois degrés d'automatisation (manuel, semi-automatique et automatique) ont été mesurées sur la productivité et le taux de conformité de la qualité. Pour atteindre cet objectif, un dispositif expérimental a été établi dans les opérations forestières de l'entreprise Produits forestiers résolu, au nord du Lac St-Jean.

Au début du projet, deux hypothèses de recherche ont été formulées. La première hypothèse émise, qui était que la productivité de l'abattage-façonnage s'accroît lorsque la fonction d'automatisation du façonnage des têtes d'abatteuse-façonneuse est utilisée, n'a pas été validée. Les résultats présentés à la section 4.1 n'ont pas permis de détecter de différences significatives entre les productivités mesurées de quatre des cinq opérateurs observés. L'opérateur 5A a présenté une productivité significativement plus élevée lors de l'emploi du degré d'automatisation automatique par rapport au degré semi-automatique. Cette différence semble s'expliquer davantage par la méthode de travail de l'opérateur que par le degré d'automatisation. Lors des entrevues, l'opérateur a admis que les délais occasionnés par le contrôle manuel de la scie avec le degré semi-automatique lui permettaient de mieux contrôler le balan de la tête et ainsi créer des empilements plus droits, diminuant toutefois sa cadence de production. L'opérateur ne peut réduire sa cadence lorsqu'il utilise le degré automatique puisqu'elle est dictée par l'ordinateur.

Aucun degré d'automatisation évalué ne permet systématiquement d'accroître la productivité. Pour un même opérateur sur la même abatteuse-façonneuse, le degré d'automatisation offrant la meilleure productivité variait d'un bloc test à l'autre, de même que l'amplitude des écarts entre les degrés d'automatisation. Les résultats obtenus laissent entrevoir le possible effet d'autres facteurs (caractéristiques dendrométriques des arbres, caractéristiques de peuplements et de terrains) qui n'ont pas été examinés dans ce projet.

La deuxième hypothèse énonçait que les taux de conformité des indicateurs de qualité s'améliorent lorsque la fonction d'automatisation du façonnage des têtes d'abatteuse-

façonneuse est utilisée. Les quatre critères de qualité suivants ont été retenus pour l'étude : le taux de conformité des longueurs à ± 5 et ± 3 cm de la longueur cible, ainsi que les taux de conformité des diamètres d'écimage des billes et des cimes laissées sur le parterre de coupe. Les résultats présentés à la section 4.2 permettent de répondre à cette hypothèse.

Plusieurs écarts significatifs et tendances ont été détectés dans l'analyse des variances des taux de conformité des longueurs, tant à ± 5 qu'à ± 3 cm de la cible. Dans tous les cas, autant les écarts significatifs que les tendances observées montraient des taux de conformités inférieurs lors de l'emploi du degré d'automatisation automatique. Ces résultats laissent présager que l'opérateur a un impact sur le taux de conformité des longueurs, étant donné que les taux de conformité de deux opérateurs opérant sur le même équipement avec les mêmes réglages ont présenté des résultats différents. Les conditions de terrain et de peuplement pourraient aussi avoir un impact sur ces taux de conformité. Le dispositif n'a pas permis de détecter de gains ou de perte de conformité des diamètres d'écimage tant des billes que des cimes résiduelles sur le parterre de coupe. Toutefois, des tendances ont ici aussi été détectées quant à une conformité inférieure lors de l'utilisation du degré automatique. Les amplitudes importantes entre les différents taux de conformité laissent aussi présager de l'interaction de facteurs externes. Un nombre plus important de répétitions serait nécessaire pour confirmer ces tendances et ces interactions.

Des travaux futurs seront donc nécessaires pour vérifier l'impact des nombreuses variables qui n'ont pas pu être prises en compte lors de l'analyse. Les conditions de peuplement, les quarts de travail, les différents types d'équipements et les opérateurs eux-mêmes sont autant de sources de variations qui devraient faire l'objet de collecte de données et d'analyses particulières. Plusieurs de ces points ont d'ailleurs été soulevés par les opérateurs lors des entrevues individuelles effectuées après la collecte des données.

Il sera aussi essentiel dans le futur de consacrer des énergies à mieux comprendre les processus de calibration des équipements. En effet, la compréhension des effets des différents degrés d'automatisation sur la productivité et la conformité des produits façonnés est intimement liée à la précision des informations qui sont captées par la tête, car ce sont ces informations qui sont à la base de la prise des décisions de façonnage.

Ce faisant, la calibration prend toute son importance, particulièrement dans un contexte d'utilisation accrue des technologies disponibles. L'automatisation du façonnage réalisé avec une tête d'abattage-façonnage ne représente qu'une première étape d'un processus plus large d'utilisation des systèmes embarqués des abatteuses-façonneuses par les entrepreneurs et les industriels forestiers. Ces systèmes offrent encore des possibilités inexploitées qui pourraient permettre des gains supplémentaires en productivité, en conformité de la qualité des produits façonnés et en efficacité, critères essentiels dans un contexte de marchés de plus en plus compétitifs.

7. Références

- Brander, M., Eriksson, D. et Löfgren, B. 2004. Automation of knuckleboom work can increase productivity. RESULTS from Skogforsk (4), SWEDEN. 4 p.
- Burman, L. et Löfgren, B. 2007. Human-Machine interaction improvements of forest machines. Skogforst report, Uppsala, Sweden. 6 p.
- Corneau, Y. et Fournier, F. 2005. Efficacité du tronçonnage en forêt à l'aide de multifonctionnelles. Forintek Canada Corp, Ste-Foy, Québec. Projet General Revenue No 4496. 27 p.
- Gellerstedt, S. 2002. Operation of the Single-Grip Harvester: Motor-Sensory and Cognitive Work. International Journal of Forest Engineering. P 35-47.
- Gerasimov, Y. Senkin, V. & Väätäinen, K. 2011. Productivity of single-grip harvesters in clear-cutting operations in the northern European part of Russia. European Journal of Forest Research, Vol. 131 (3), 647–654.
- Hellström, T., Lärkeryd, P., Nordfjell, T. & Ringdahl, O. 2009. Autonomous Forest Vehicles: Historic, envisioned and state-of-the-art. International journal of Forest Engineering 20(1) : 31-38.
- Hiesl, P & Benjamin, J.G. 2013. Applicability of International Harvesting Equipment Productivity Studies in Maine, USA: A Literature Review. FORESTS. Vol. 4 (4). 898–921
- Hogg, G. Pulkki, R. & Ackerman, P. 2011 Excavator-based processor operator productivity and cost analysis in Zululand, South Africa. Southern Forests: a Journal of Forest Science, 73:2. 109-115. DOI: 10.2989/20702620.2011.610874
- Jiroušek, R. Klvač, R. & Skoupý, A. 2007. Productivity and costs of the mechanised cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. Journal of Forest Science. Vol. 57 No. 10. 476-482.
- Kärhä, K. Rönkkö, E. & Gumse, S-I. 2004 Productivity and Cutting Costs of Thinning Harvesters. International Journal of Forest Engineering. 15:2. 43-56.
- Löfgren, B. et Wikander, J. 2009. Kinematic Control of Redundant Knuckle Booms. International Journal of Forest Engineering 20(1) : 22-30.
- Marshall, H. M. 2005. An Investigation of Factors Affecting the Optimal Output Log Distribution from Mechanical Harvesting and Processing Systems. Thesis, Forest Engineering Department, Oregon State University, Corvallis (Oregon). 210 p.
- Marshall, H.D., Murphy, G. & Boston, K. 2006A. Three mathematical models for bucking-to-order. Silva Fennica 40(1) : 127–142.
- Marshall, H.D., Murphy, G.E. et Boston, K.. 2006B. Evaluation of the economic impacts of length and diameter measurement error on mechanical harvesters and processors in pine stands. Can. J. For. Res. 36 : 1661–1673. Doi:10.1139/X06-064

Murphy, G., Marshall, H. et Chad Bolding, M. 2004. Adaptative control of bucking on harvesters to meet order book constraints. *Forest Products Journal* 54(12) : 114-121.

Nakagawa, M. Hayashi, N. & Narushima, T. 2010. Effect of tree size on time of each work element and processing productivity using an excavator-based single-grip harvester or processor at a landing. *Journal of Forest Research*, Vol. 15 (4). 226–233.

Nieuwenhuis, M. et Dooley, T.. 2006. The Effect of calibration on the Accuracy of Harvester Measurements. *International Journal of Forest Engineering*, 17(2) : 25-33.

Nordström, M. 2014. Communications personnelles.

Olsen, E., Pilkerton, S., Garland, J., et Sessions J. 1991. Computer Aided Bucking on Mechanized Harvester. *Journal of Forest Engineering* 2(2) : 25-32. DOI : 10.1080/08435243.1991.10702625

Purfürst, F. T. 2010. Learning curves of Harvester Operators. *Croatian journal of Forest Engineering*. 31(2) : 89-97.

Purfürst, F.T. et Eler, J. 2011. The Human Influence on Productivity in Harvester Operations. *International Journal of Forest Engineering* 22(2). 8 p.

Silversides, C.R. 1997. Broadaxe to flying shear : the mechanization of forest harvesting East of the Rockies. Transformation series. National museum of Science and Technology, Ottawa, Ontario. 174 p.

Spinelli, R. Owende, P.M.O. & Ward, S.M. 2002. Productivity and cost of CTL harvesting of *Eucalyptus globulus* stands using excavator-based harvesters. *Forest Products Journal* vol. 52 no.1. 67-77.

Strandgard, M. et Walsh, D. 2012. Maintaining harvester measurement of forest machines. *Cooperative Research Center for Forestry Bulletin* 28. 3 p.

ANNEXE A

Détails des degrés d'automatisation

Cette annexe présente les détails des degrés d'automatisation utilisés par les deux équipes lors de la collecte de données.

Log Max

Degré manuel

Le contrôle de la scie est effectué exclusivement par l'opérateur. Tant que celle-ci est actionnée, elle va sortir jusqu'au maximum de sa course s'il y a lieu, et se rétracte lorsque le bouton n'est plus actionné. Cela est vrai tant pour l'abattage que pour la coupe des billes.

Degré automatique

Lorsque la tête est en position inclinée (« tilt down »), le cycle complet de façonnage s'accomplit de manière autonome après la sélection par l'opérateur de l'essence de la tige abattue. La scie s'active sans commande lorsque la tête est parvenue à la fenêtre de coupe, qui fixée dans les réglages de l'ordinateur de bord. L'action peut être arrêtée en tout temps à l'aide de la touche d'arrêt.

Degré semi-automatique

Le degré d'automatisation semi-automatique est une combinaison des degrés manuel et automatique. Un diamètre minimal est défini dans les réglages, en dessous duquel la tête opère en mode automatique. Tant que le diamètre de la tige est supérieur à cette valeur, l'opérateur doit actionner manuellement la scie.

Exemple : Un arbre doit être façonné en trois billes, dont les diamètres au fin bout seront respectivement de 146, 109 et 65 millimètres. La valeur du diamètre minimal est fixée à 110 millimètres. L'opérateur devra activer manuellement la scie pour la première bille (supérieur à 110 mm), mais les deux autres billes seront sciées automatiquement.



Figure A.1 : Symboles utilisés par le logiciel Log Mate 500 pour indiquer le degré d'automatisation A) manuel B) automatique C) semi-automatique

Ponsse

Degré manuel (Sciage d'effleurement)

Le sciage d'effleurement est un dérivé du degré d'automatisation manuel, où l'opérateur doit activer la scie à chaque occasion. Cependant, il est possible pour l'opérateur, lorsqu'il juge que les conditions sont propices, d'appuyer en avance sur le bouton d'action de la scie. Celle-ci se déclenche seulement une fois située dans la fenêtre de coupe.

Degré semi-automatique (Sciage automatique de bois industriel)

Après la sélection par l'opérateur de l'essence de l'arbre abattu, la première bille est alimentée dans la tête d'abattage-façonnage. L'opérateur doit toutefois actionner manuellement la scie pour façonner cette première bille. Les autres billes de la tige sont sciées automatiquement, sans que l'opérateur ait besoin d'activer la scie.

Degré automatique (Sciage automatique)

Une fois l'arbre abattu, l'opérateur actionne le bouton de l'essence concernée. Par la suite, l'ensemble du cycle de façonnage se déroule de manière autonome, tant que les produits sont enregistrés dans le même groupe d'articles dans la liste de prix (fichier APT).

Peu importe le degré d'automatisation employé, la scie ne peut aller plus loin que le déplacement nécessaire pour passer à travers l'arbre, qui est établi en fonction du diamètre mesuré.

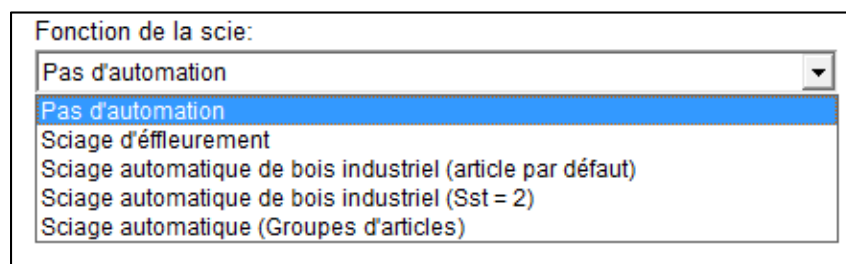


Figure A.2 : Capture d'écran de l'interface du menu du degré d'automatisation dans le logiciel Opti4G

ANNEXE B

Procédure de calibration – Log Max

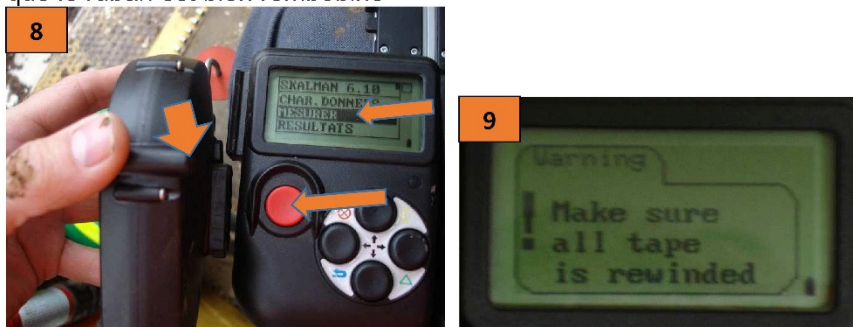
- 1- Brancher le vernier dans l'abatteuse
- 2- Appuyer sur le bouton « **Enter** » pour ouvrir le vernier. « Kermit server » s'affiche.



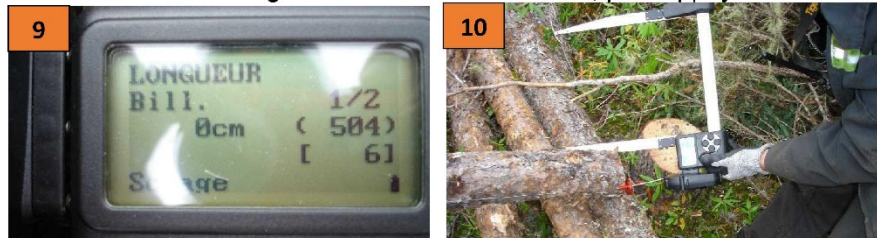
- 3- Dans l'ordinateur, sélectionner le menu « Réglages »
- 4- Sélectionner « Étalonnage », puis « Tige->compas »



- 5- Attendre que le vernier « BIP » avant de le débrancher.
- 6- Brancher le ruban à mesurer électronique
- 7- Si « KERMIT SERVER » est TOUJOURS AFFICHÉ, appuyer sur « **Enter** »
- 8- Dans le menu du vernier, sélectionner « Mesurer », puis appuyer sur « **Enter** »
- 9- Vérifier que le ruban est bien rembobiné



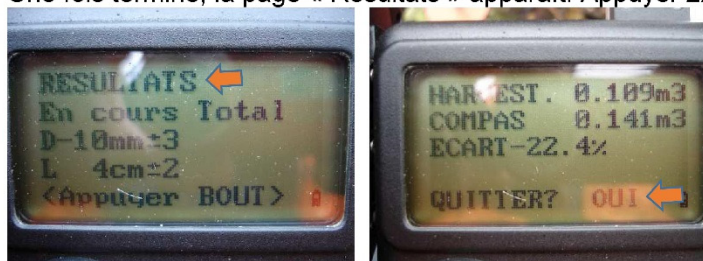
- 10-Appuyer sur « **Enter** » jusqu'à ce que la fenêtre longueur s'affiche
 11- Attacher le ruban au gros bout et mesurer la bille, puis appuyer sur « **Enter** »



- 12-Mesurer le diamètre du fin bout et appuyer 2x sur « **Enter** »
 13-Prendre des mesures tout le long de la bille, en appuyant toujours 2x sur « **Enter** »



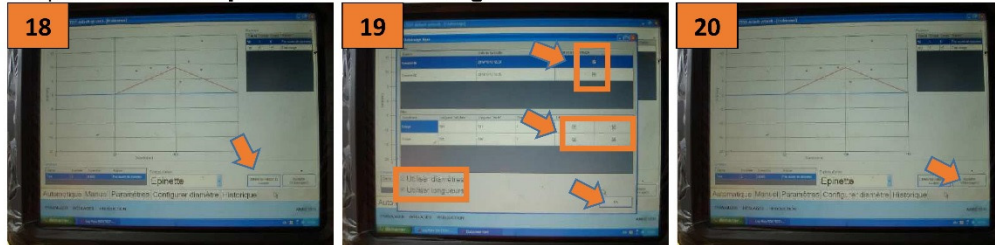
- 14-Répéter la mesure de la longueur et des diamètres pour toutes les autres billes, en respectant l'ordre.
 15- Une fois terminé, la page « Résultats » apparaît. Appuyer 2x sur « **Enter** » pour quitter



- 16-Débrancher le ruban à mesurer numérique
 17-Retourner dans l'abatteuse et brancher le vernier
 18-Sélectionner les menus « Réglages », « Étalonnage » puis « Étalonner »



- 19-Cliquer sur « **Obtenir les valeurs du compas** »
- 20-S'assurer que toutes les cases sont cochées, puis cliquer sur « **OK** »
- 21-Cliquer sur « **Accepter l'échantillonnage** »



- 22-Cliquer sur « **Travailler** » pour retourner à la production

ANNEXE C

Procédure de calibration – Ponsse

- 1- Ouvrir le vernier en cliquant sur « **Enter** »
- 2- Sélectionner le menu « **Effacer mémoire** ». Cliquer sur **Enter**, puis sélectionner « **Oui** » avec la gâchette. Répéter 2 fois.



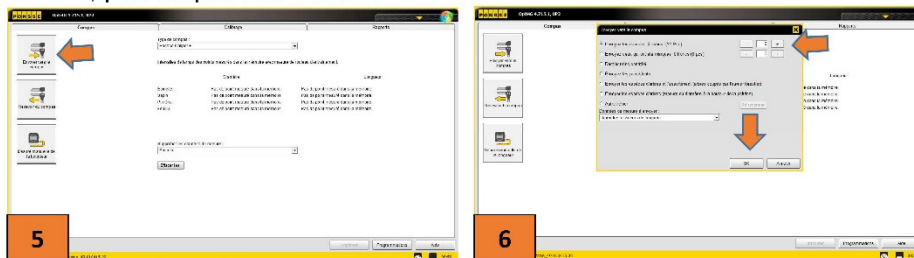
- 3- Placer le vernier dans sa base et le brancher dans l'abatteuse. « **Kermit server** » s'affiche.



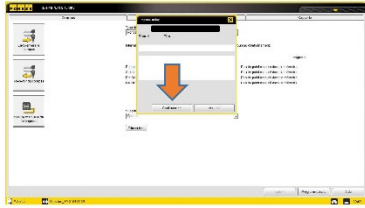
- 4- Ouvrir le menu; Cliquer sur « **Maintenance** », puis sur « **Calibrage** ».



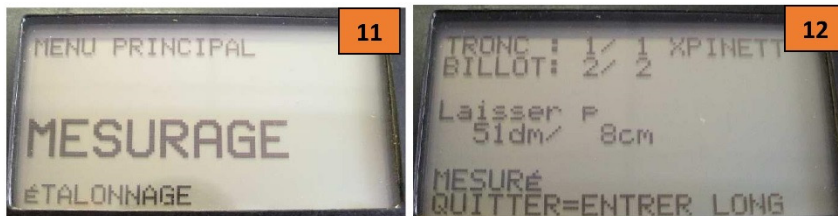
- 5- Cliquer sur « **Envoyer vers le compas** »
- 6- Inscrire le nombre d'arbres qui seront mesurés pour la calibration avec les boutons « **+** » et « **-** », puis cliquer sur « **OK** ».



- 7- Cliquer sur « **Continuer** », puis sur « **OK** » lorsque le transfert est terminé



- 8- Attendre que le vernier « BIP » avant de le débrancher.
- 9- Descendre de l'abatteuse pour aller mesurer.
- 10- Cliquer sur « Enter ». « Kermit server » va disparaître, retour au menu principal.
- 11- Sélectionner le menu « Mesurage » puis appuyer sur « Enter »
- 12- Les informations sur les billes s'affichent. Appuyer sur « Enter »
Ex. : Épinette : 1/1 Billots 2/2...



- 13- Mesurer en suivant les instructions du vernier. Commencer par la **dernière bille façonnée**, et « reconstruire » les arbres. Toujours commencer par le **gros bout**. Exemple avec 1 arbre, 2 billes :

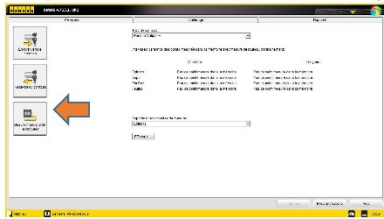


- 14- Les résultats apparaissent. Cliquer sur « Enter ». Attendre que le fichier KTR soit créé. Le vernier va faire « BIP »



- 15- Replacer le vernier dans sa base et rebrancher dans l'abatteuse. « Kermit server » s'affiche.

16-Cliquer sur « Recevoir du compas »



17-Cliquer sur « Suivant », puis sur « OK »

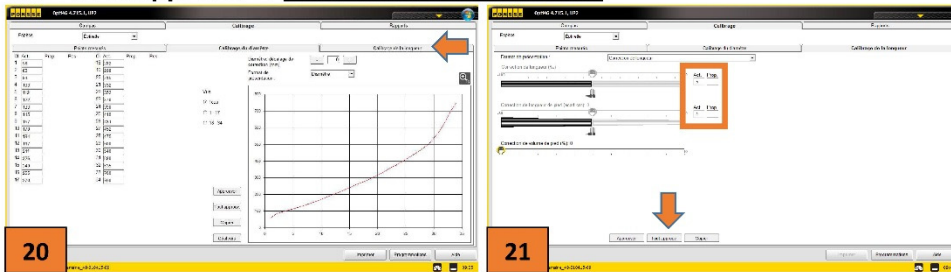
18-Sélectionner l'onglet « Calibrage du diamètre »

19-Les points bleus représentent les modifications qui seront apportées à la courbe. Cliquer sur « Tout approuv. »

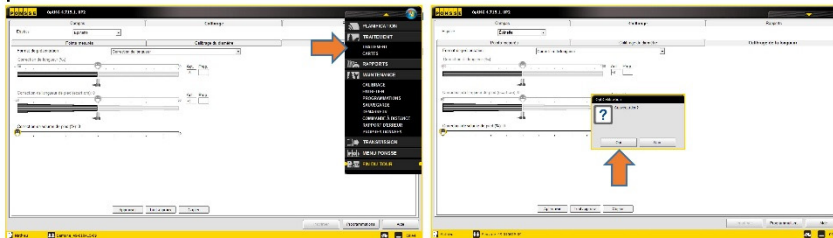


20-Sélectionner l'onglet « Calibrage de la longueur »

21-La valeur dans la case « Prop » est le nouveau facteur proposé par l'ordinateur. Cliquer sur « Tout approuv. ». Faire preuve de jugement.



22-Ouvrir le menu, puis sélectionner « Traitement », puis « Traitement ». Cliquer sur « OUI », puis sur « OK ».



ANNEXE D

Questionnaire

Rencontre avec les opérateurs à la fin du test

1. Nom de l'opérateur : _____ Numéro : _____
2. Années d'expérience (abatteuse multi/autre) : _____
3. Mode de travail habituel : _____
4. Raison du choix du mode (degré) habituel. Changement ou toujours le même? _____

5. Opinion sur les modes (degrés d'automatisation)
 - a. Crois-tu que le mode automatique est plus productif? Toujours?
Pourquoi? _____

 - b. Appréciation générale : quels étaient les gains et les inconvénients
lorsqu'on changeait de mode en période de test (s'il y en a)? _____

 - c. Possibilité de changement : Qu'est-ce qui pourrait faire en sorte que tu
changes (ou pas) de mode? Pourquoi? _____

 - d. Confort en opération : Est-ce que l'utilisation d'un mode entraîne un
mouvement supplémentaire, une position sur les commandes

différentes? Plus « exigeant » (physique/mental)? _____

e. Est-ce que l'automatique peut avoir un impact sur la qualité des produits?

f. Limites de chaque mode : Y a-t-il des situations qui se prêtent plus que d'autres à un degré d'automatisation en particulier ? Ex. : Manuel dans le très gros bois _____

6. Durée du test : est-ce que les blocs étaient trop courts? Trop longs? Pourquoi? _____

7. Limites du test : est-ce que notre méthodologie a fait en sorte que tu penses qu'on a manqué des informations? Qu'est-ce qu'on aurait dû faire différemment et pourquoi?

8. Prochaines étapes : selon toi, quelle serait la prochaine étape de développement dans l'équipement forestier (prochain projet de recherche)? Ex. : roulette de mesurage? Aiguillage des couteaux? Capteurs optiques? Diagnostic de la machine?

9. Commentaires généraux (section fourre-tout) _____

ANNEXE E

Formulaire de consentement

Présentation du chercheur

Cette recherche est réalisée dans le cadre du projet de maîtrise de Mathieu Bouchard, dirigé par Daniel Beaudoin et codirigé par Luc LeBel, du département des Sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval.

Avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, veuillez prendre le temps de lire et de comprendre les renseignements qui suivent. Ce document vous explique le but de ce projet de recherche, ses procédures, avantages, risques et inconvénients. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles à la personne qui vous présente ce document.

Nature de l'étude

Au cours de 2014 et de 2015, nous avons mis en place un dispositif de collecte de données pour évaluer l'impact sur la productivité de l'utilisation de différents degrés d'automatisation (« mode »). Nous avons donc collecté différents fichiers de production de votre ordinateur de bord pour calculer les productivités obtenues. De plus, nous avons simultanément réalisé un mesurage des longueurs et des diamètres d'étagage sur le parterre de coupe afin d'évaluer l'impact des degrés d'automatisation sur la conformité de la qualité des produits que vous avez façonné.

Pour faire suite à la collecte de données, nous souhaitons donc maintenant connaître vos impressions quant à l'emploi de ces différents degrés d'automatisation. Vos perceptions en tant que professionnel peuvent contribuer à voir des aspects de ces impacts qui n'ont pas été rendus visibles par la collecte de données réalisée.

Déroulement de la participation

Votre participation à cette recherche consiste à participer à une entrevue, d'une durée d'environ une heure, qui portera sur les éléments suivants:

- Questions sur votre expérience et sur vos habitudes de travail avant le début des tests;
- Vos opinions et perceptions sur les différents degrés d'automatisation que vous avez utilisés durant les tests;
- Vos attentes quant à l'automatisation du façonnage ;
- Vos impressions quant aux limites du projet que nous avons réalisé (où sont nos faiblesses ?);
- Vos impressions sur les prochains tests qui devraient être réalisés avec les abatteuses-façonneuse.

Participation volontaire et droit de retrait

Vous êtes libre de participer à ce projet de recherche. Vous pouvez aussi mettre fin à votre participation sans conséquence négative ou préjudice et sans avoir à justifier votre décision. Si vous décidez de mettre fin à votre participation, il est important d'en prévenir le chercheur dont les coordonnées sont incluses dans ce document. Tous les renseignements personnels vous concernant seront alors détruits.

Confidentialité et gestion des données

Les mesures suivantes seront appliquées pour assurer la confidentialité des renseignements fournis par les participants:

- les noms des participants ne paraîtront dans aucun rapport;
- les divers documents de la recherche seront codifiés et seul le chercheur aura accès à la liste des noms et des codes;
- les résultats individuels des participants ne seront jamais communiqués;
- les matériaux de la recherche, incluant les données et les enregistrements, seront conservés à l'Université Laval sous clé. Ils seront détruits 2 ans après la fin de la recherche, soit en février 2018;
- si la recherche fera l'objet de publications dans des revues scientifiques, aucun participant ne pourra y être identifié ;
- un court résumé des résultats de la recherche sera expédié aux participants qui en feront la demande en indiquant l'adresse où ils aimeraient recevoir le document, juste après l'espace prévu pour leur signature.

Remerciements

Votre collaboration est précieuse pour nous permettre de réaliser cette étude et nous vous remercions d'y participer.

Plaintes ou critiques

Toute plainte ou critique sur ce projet de recherche pourra être adressée au Bureau de l'Ombudsman de l'Université Laval :

Pavillon Alphonse-Desjardins, bureau 3320
2325, rue de l'Université
Université Laval
Québec (Québec) G1V 0A6
Renseignements - Secrétariat : (418) 656-3081
Ligne sans frais : 1-866-323-2271
Courriel : info@ombudsman.ulaval.ca

Signatures

Je soussigné(e) _____ consens librement à participer à la recherche intitulée : « Évaluation des impacts sur leur productivité et leur qualité de façonnage de différents degrés d'automatisation d'une tête d'abatteuse-multifonctionnelle ». J'ai pris connaissance du formulaire et j'ai compris le but, la nature, les avantages, les risques et les inconvénients du projet de recherche. Je suis satisfait(e) des explications, précisions et réponses que le chercheur m'a fournies, le cas échéant, quant à ma participation à ce projet.

Signature du participant, de la participante

Date

Un court résumé des résultats de la recherche sera expédié aux participants qui en feront la demande en indiquant l'adresse où ils aimeraient recevoir le document. **Les résultats ne seront pas disponibles avant le 28 février 2016. Si cette adresse changeait d'ici cette date, vous êtes invité(e) à informer la chercheuse de la nouvelle adresse où vous souhaitez recevoir ce document.**

L'adresse (électronique ou postale) à laquelle je souhaite recevoir un court résumé des résultats de la recherche est la suivante :

J'ai expliqué le but, la nature, les avantages, les risques et les inconvénients du projet de recherche au participant. J'ai répondu au meilleur de ma connaissance aux questions posées et j'ai vérifié la compréhension du participant.

Signature du chercheur

Date

Renseignements supplémentaires

Si vous avez des questions sur la recherche, sur les implications de votre participation ou si vous souhaitez vous retirer de la recherche, veuillez communiquer avec Mathieu Bouchard, au numéro de téléphone suivant : (418) _____, ou à l'adresse courriel suivante : mathieu.bouchard.21@ulaval.ca.

Copie du participant

Ce projet a été approuvé par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université Laval : N° d'approbation 2015-252 / 13-11-2015
Initiales _____

ANNEXE F

Titre de la recherche : Évaluation des impacts sur la productivité et la qualité de façonnage de différents degrés d'automatisation d'une tête d'abatteuse-multifonctionnelle

Lettre de recrutement

Bonjour,

Je vous contacte à la suite de votre implication dans le cadre de la partie terrain du projet « Évaluation des impacts sur la productivité et la qualité de façonnage de différents degrés d'automatisation d'une tête d'abatteuse-façonneuse ». Ce projet est sous la direction de M. Daniel Beaudoin et la codirection de M. Luc LeBel (Université Laval).

Entre les mois de janvier et d'août 2015, nous avons procédé à la récolte de fichiers provenant de l'ordinateur de bord de votre abatteuse-façonneuse, de même qu'à un inventaire terrain ciblant les longueurs et les diamètres d'écimage. Ce faisant, nous avons pu mesurer les impacts sur la productivité et sur la conformité de la qualité du degré d'automatisation qui était utilisé.

Nous croyons que vos impressions et vos commentaires sur ces différents degrés d'automatisation de même que sur les tests réalisés seraient complémentaires aux analyses que nous désirons réaliser. C'est pourquoi nous souhaiterions réaliser avec vous une entrevue d'une durée d'environ une heure où seraient abordées :

- Votre expérience et vos habitudes de travail avant le début des tests;
- Vos opinions et perceptions sur les différents degrés d'automatisation que vous avez utilisés durant les tests;
- Vos attentes quant à l'automatisation du façonnage ;
- Vos impressions quant aux limites du projet que nous avons réalisé (où sont nos forces et nos faiblesses ?);
- Vos impressions sur les prochains tests qui devraient être réalisés avec les abatteuses-façonneuse.

Si vous êtes intéressé à participer à cette entrevue ou que vous avez besoin d'informations supplémentaires, vous pouvez communiquer avec :

Mathieu Bouchard (chercheur)

mathieu.bouchard.21@ulaval.ca

Merci de l'intérêt que vous portez à notre projet,

Mathieu Bouchard ing.f.

Étudiant à la maîtrise en sciences forestières

Université Laval, Québec

Ce projet a été approuvé par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université Laval : N° d'approbation 2015-252 / 13-11-2015

Initiales _____

ANNEXE G

Productivité

Opérateur 1B

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	15	1549,439	103,295933	8,59	0,0001
Error	14	168,334667	12,023905		
Corrected Total	29	1717,773667			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	m3 Mean
0,902004	14,89711	3,46755	23,27667

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	2,080333	2,080333	0,17	0,6838
bloc	14	1547,358667	110,525619	9,19	<, 0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	2,080333	2,080333	0,17	0,6838
bloc	14	1547,358667	110,525619	9,19	<, 0001

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
man vs auto	1	2,08033333	2,08033333	0,17	0,6838

Opérateur 2B

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	7	3254,491429	464,927347	45,24	<, 0001
Error	6	61,657143	10,27619		
Corrected Total	13	3316,148571			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	m3 Mean
0,981407	8,911655	3,20565	35,97143

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,182857	0,182857	0,02	0,8982
bloc	6	3254,308571	542,384762	52,78	<, 0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,182857	0,182857	0,02	0,8982
bloc	6	3254,308571	542,384762	52,78	<, 0001

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
man vs auto	1	0,18285714	0,18285714	0,02	0,8982

Opérateur 3B

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	15	562,5563333	37,5037556	7,61	0,0002
Error	14	68,9586667	4,925619		
Corrected Total	29	631,515			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	m3 Mean
0,890804	11,77387	2,219374	18,85

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	5,3763333	5,3763333	1,09	0,3138
bloc	14	557,18	39,7985714	8,08	0,0002

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	5,3763333	5,3763333	1,09	0,3138
bloc	14	557,18	39,7985714	8,08	0,0002

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
man vs auto	1	5,37633333	5,37633333	1,09	0,3138

Opérateur 4A

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	1498,966	299,7932	20,26	0,0061
Error	4	59,194	14,7985		
Corrected Total	9	1558,16			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	m3 Mean
0,96201	12,05919	3,846882	31,9

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,576	0,576	0,04	0,8532
bloc	4	1498,39	374,5975	25,31	0,0042

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,576	0,576	0,04	0,8532
bloc	4	1498,39	374,5975	25,31	0,0042

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
man vs auto	1	0,576	0,576	0,04	0,8532

Opérateur 4A – Transformation logarithmique

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	0,36196932	0,07239386	37,59	0,0019
Error	4	0,00770442	0,0019261		
Corrected Total	9	0,36967374			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	m3 Mean
0,979159	2,967549	0,043887	1,478911

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,000063	0,000063	0,03	0,8653
bloc	4	0,36190632	0,09047658	46,97	0,0013

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,000063	0,000063	0,03	0,8653
bloc	4	0,36190632	0,09047658	46,97	0,0013

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
man vs auto	1	0,000063	0,000063	0,03	0,8653

Opérateur 5A

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	455,425	56,928125	34,65	<, 0001
Error	7	11,499375	1,6427679		
Corrected Total	15	466,924375			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	m3 Mean
0,975372	6,079834	1,281705	21,08125

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	15,015625	15,015625	9,14	0,0193
bloc	7	440,409375	62,915625	38,3	<, 0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	15,015625	15,015625	9,14	0,0193
bloc	7	440,409375	62,915625	38,3	<, 0001

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
S vs A	1	15,015625	15,015625	9,14	0,0193

Qualité - Longueur ± 5 cm

Opérateur 1B

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	139,335	17,416875	1,45	0,3187
Error	7	84,069375	12,0099107		
Corrected Total	15	223,404375			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_conf ormite Mean
0,62369	3,762027	3,465532	92,11875

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	2,325625	2,325625	0,19	0,6732
bloc	7	137,009375	19,5727679	1,63	0,2674

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	2,325625	2,325625	0,19	0,6732
bloc	7	137,009375	19,5727679	1,63	0,2674

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
M vs A	1	2,325625	2,325625	0,19	0,6732

Opérateur 3B

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	7	310,4007143	44,3429592	3,85	0,0605
Error	6	69,0542857	11,5090476		
Corrected Total	13	379,455			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_con formite Mean
0,818017	3,641974	3,392499	93,15

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	73,6007143	73,6007143	6,4	0,0447
bloc	6	236,8	39,4666667	3,43	0,0796

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	73,6007143	73,6007143	6,4	0,0447
bloc	6	236,8	39,4666667	3,43	0,0796

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
M vs A	1	73,60071429	73,60071429	6,4	0,0447

Opérateur 3B – Transformation réciproque

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	7	4,43E-06	6,33E-07	4,31	0,0473
Error	6	8,81E-07	1,47E-07		
Corrected Total	13	5,31E-06			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_c on formitel Mean
0,834265	3,557577	0,000383	0,01077

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	1,03E-06	1,03E-06	6,98	0,0384
bloc	6	3,41E-06	5,68E-07	3,87	0,0621

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	1,03E-06	1,03E-06	6,98	0,0384
bloc	6	3,41E-06	5,68E-07	3,87	0,0621

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
M vs A	1	1,03E-06	1,03E-06	6,98	0,0384

Opérateur 4A

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	88,785	14,7975	3,95	0,0767
Error	5	18,7441667	3,7488333		
Corrected Total	11	107,5291667			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_co nformite Mean
0,825683	2,021955	1,93619	95,75833

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	27,30083333	27,30083333	7,28	0,0429
bloc	5	61,48416667	12,29683333	3,28	0,1091

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	27,30083333	27,30083333	7,28	0,0429
bloc	5	61,48416667	12,29683333	3,28	0,1091

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
M vs A	1	27,30083333	27,30083333	7,28	0,0429

Opérateur 5A

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
--------	----	----------------	-------------	---------	--------

Model	5	94,272	18,8544	2,19	0,234
Error	4	34,464	8,616		
Corrected Total	9	128,736			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_co nformite Mean
0,732289	3,074259	2,935302	95,48

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	5,476	5,476	0,64	0,47
bloc	4	88,796	22,199	2,58	0,1908

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	5,476	5,476	0,64	0,47
bloc	4	88,796	22,199	2,58	0,1908

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
S vs A	1	5,476	5,476	0,64	0,47

Qualité – Longueur ± 3 cm

Opérateur 1B

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	660,75	82,59375	1,06	0,4777
Error	7	547,27	78,181429		
Corrected Total	15	1208,02			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_cof nformite Mean
0,546969	11,02497	8,842026	80,2

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	11,56	11,56	0,15	0,712
bloc	7	649,19	92,7414286	1,19	0,4138

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	11,56	11,56	0,15	0,712
bloc	7	649,19	92,7414286	1,19	0,4138

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
M vs A	1	11,56	11,56	0,15	0,712

Opérateur 3B

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	7	682,125714	97,446531	1,74	0,2589
Error	6	336,448571	56,074762		
Corrected Total	13	1018,574286			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_cof nformite Mean
0,669687	9,521918	7,488308	78,64286

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	128,4114286	128,4114286	2,29	0,181
bloc	6	553,7142857	92,2857143	1,65	0,2801

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	128,4114286	128,4114286	2,29	0,181
bloc	6	553,7142857	92,2857143	1,65	0,2801

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
M vs A	1	128,4114286	128,4114286	2,29	0,181

Opérateur 4A

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	267,065	44,5108333	2,02	0,2281
Error	5	109,9641667	21,9928333		
Corrected Total	11	377,0291667			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_conformite Mean
0,70834	5,170034	4,689652	90,70833

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	71,5408333	71,5408333	3,25	0,1312
bloc	5	195,5241667	39,1048333	1,78	0,2715

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	71,5408333	71,5408333	3,25	0,1312
bloc	5	195,5241667	39,1048333	1,78	0,2715

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
M vs A	1	71,54083333	71,54083333	3,25	0,1312

Opérateur 5A

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	150,827	30,1654	3,31	0,1347
Error	4	36,454	9,1135		
Corrected Total	9	187,281			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_conformite Mean
0,805351	3,480753	3,018857	86,73

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	95,481	95,481	10,48	0,0318
bloc	4	55,346	13,8365	1,52	0,3478

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	95,481	95,481	10,48	0,0318
bloc	4	55,346	13,8365	1,52	0,3478

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
S vs A	1	95,481	95,481	10,48	0,0318

Qualité – Écimage des billes

Opérateur 1B

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	0,1982475	0,02478094	3,34	0,065
Error	7	0,05190894	0,00741556		
Corrected Total	15	0,25015644			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_conformite Mean
0,792494	10,22955	0,086114	0,841813

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,01282556	0,01282556	1,73	0,23
bloc	7	0,18542194	0,02648885	3,57	0,057

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,01282556	0,01282556	1,73	0,23
bloc	7	0,18542194	0,02648885	3,57	0,057

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
M vs A	1	0,01282556	0,01282556	1,73	0,23

Opérateur 1B – Transformation réciproque

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	0,63527634	0,07940954	4,71	0,028
Error	7	0,11798566	0,01685509		
Corrected Total	15	0,753262			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_conformite Mean
0,843367	10,64528	0,129827	1,219575

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,04665817	0,04665817	2,77	0,14
bloc	7	0,58861817	0,08408831	4,99	0,025

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,04665817	0,04665817	2,77	0,14
bloc	7	0,58861817	0,08408831	4,99	0,025

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
M vs A	1	0,04665817	0,04665817	2,77	0,14

Opérateur 3B

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	7	2171,811429	310,258776	2,27	0,169
Error	6	820,797143	136,799524		
Corrected Total	13	2992,608571			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_conformite Mean
0,725725	13,54839	11,69613	86,32857

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	248,642857	248,642857	1,82	0,226
bloc	6	1923,168571	320,528095	2,34	0,162

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	248,642857	248,642857	1,82	0,226
bloc	6	1923,168571	320,528095	2,34	0,162

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
M vs A	1	248,6428571	248,6428571	1,82	0,226

Opérateur 4A

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	4	0,0579675	0,01449187	1,1	0,49
Error	3	0,03965137	0,01321712		
Corrected Total	7	0,09761887			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_conformite Mean
0,593814	12,49458	0,114966	0,920125

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,03162613	0,03162613	2,39	0,22
bloc	3	0,02634137	0,00878046	0,66	0,628

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,03162613	0,03162613	2,39	0,22
bloc	3	0,02634137	0,00878046	0,66	0,628

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
M vs A	1	0,03162613	0,03162613	2,39	0,22

Opérateur 5A

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	0,082603	0,0165206	2,76	0,173
Error	4	0,0239106	0,00597765		
Corrected Total	9	0,1065136			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_conformite Mean
0,775516	8,62701	0,077315	0,8962

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,0131044	0,0131044	2,19	0,213
bloc	4	0,0694986	0,01737465	2,91	0,163

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,0131044	0,0131044	2,19	0,213
bloc	4	0,0694986	0,01737465	2,91	0,163

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
S vs A	1	0,0131044	0,0131044	2,19	0,213

Qualité – Écimage des cimes sur le parterre de coupe

Opérateur 1B

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	7	557,47	79,6385714	1,93	0,2201
Error	6	247,3185714	41,2197619		
Corrected Total	13	804,7885714			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_conformite Mean
0,692691	7,041967	6,420262	91,17143

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	14,8114286	14,8114286	0,36	0,5708
bloc	6	542,6585714	90,4430952	2,19	0,1808

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	14,8114286	14,8114286	0,36	0,5708
bloc	6	542,6585714	90,4430952	2,19	0,1808

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
M vs A	1	14,81142857	14,8114286	0,36	0,5708

Opérateur 3B

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	1146,21	191,035	10,53	0,0103
Error	5	90,686667	18,137333		
Corrected Total	11	1236,896667			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_conformite Mean
0,926682	4,930112	4,258795	86,38333

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	44,083333	44,083333	2,43	0,1797
bloc	5	1102,126667	220,425333	12,15	0,008

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	44,083333	44,083333	2,43	0,1797
bloc	5	1102,126667	220,425333	12,15	0,008

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
M vs A	1	44,08333333	44,08333333	2,43	0,1797

Opérateur 4A

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	100,2	16,7	0,62	0,712
Error	5	134,4366667	26,8873333		
Corrected Total	11	234,6366667			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_conformite Mean
0,427043	5,505539	5,1853	94,18333

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,1633333	0,1633333	0,01	0,9409
bloc	5	100,0366667	20,0073333	0,74	0,6232

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,1633333	0,1633333	0,01	0,9409
bloc	5	100,0366667	20,0073333	0,74	0,6232

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
M vs A	1	0,1633333	0,1633333	0,01	0,9409

Opérateur 5A

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	0,02838063	0,00567612	1,91	0,316
Error	3	0,00893737	0,00297912		
Corrected Total	8	0,037318			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pourcentage_conformite Mean
0,760508	5,95433	0,054581	0,916667

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,0053138	0,0053138	1,78	0,274
bloc	4	0,02306682	0,00576671	1,94	0,3071

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trait	1	0,00750312	0,00750312	2,52	0,2107
bloc	4	0,02306682	0,00576671	1,94	0,3071

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
S vs A	1	0,00750312	0,00750312	2,52	0,2107