



NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

La simulation graphique 3D comme outil efficace de formation en téléopération forestière

Lapointe, Jean-François; Robert, J.-M.

This publication could be one of several versions: author's original, accepted manuscript or the publisher's version. /
La version de cette publication peut être l'une des suivantes : la version prépublication de l'auteur, la version
acceptée du manuscrit ou la version de l'éditeur.

NRC Publications Record / Notice d'Archives des publications de CNRC:

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=29c43fc6-02fb-4347-8b50-2522f69f9ea1>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=29c43fc6-02fb-4347-8b50-2522f69f9ea1>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at

PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.



National Research
Council Canada

Conseil national de
recherches Canada

Canada



National Research
Council Canada

Institute for
Information Technology

Conseil national
de recherches Canada

Institut de Technologie
de l'information

NRC-CNRC

*La Simulation Graphique 3D Comme Outil Efficace de Formation en Téléopération Forestière**

J.-F. Lapointe et J.-M. Robert

**Published in "Actes du 3e Congrès International de Génie Industriel,
Montréal, Québec. 26-28 Mai 1999."*

Copyright 1999 by
National Research Council of Canada

Permission is granted to quote short excerpts and to reproduce figures and tables from this report,
provided that the source of such material is fully acknowledged.

LA SIMULATION GRAPHIQUE 3D COMME OUTIL EFFICACE DE FORMATION EN TÉLÉOPÉRATION FORESTIÈRE

Jean-François Lapointe†

Jean-Marc Robert‡

† Conseil national de recherches du Canada
Institut de technologie de l'information
1500 chemin de Montréal, Édifice M-50
Ottawa, Canada K1A 0R6
Jean-Francois.Lapointe@iit.nrc.ca

‡ École Polytechnique de Montréal
Dép. de math. et de génie industriel
C.P. 6079, succ. centre-ville
Montréal, Québec H3C 3A7
jmrobert@courrier.polymtl.ca

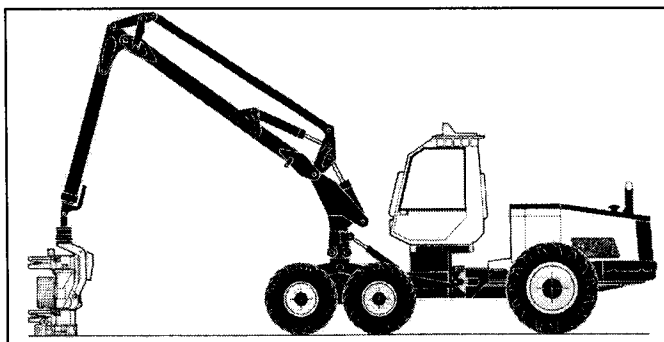
Résumé: Cet article présente les résultats obtenus lors de la mise en essai d'un simulateur graphique 3D de machine forestière pour la formation des opérateurs en abattage et façonnage des bois. Les résultats indiquent que 25 heures de formation sur simulateur permettent d'augmenter de 23 % le volume de bois récolté et de réduire les coûts d'entretien et de réparation de 26 % lors des quatre premières semaines d'opération en forêt.

Publié dans les actes du 3e Congrès international de génie industriel, Montréal, Québec, 26-28 mai 1999, pp. 1057-1066.

1. Introduction

L'industrie forestière est la plus importante au Canada pour ce qui est de la contribution nette à l'économie et du nombre d'emplois qui lui sont directement et indirectement reliés [3]. Cependant, pour faire face à la mondialisation des marchés et à la compétition féroce des différents pays producteurs de bois, elle doit constamment accroître sa productivité. De plus, l'adoption de normes environnementales plus sévères bouleverse les façons de faire traditionnelles et force l'adoption de nouvelles méthodes de travail.

Ces facteurs réunis ont favorisé l'apparition récente sur le marché d'une nouvelle génération de machines forestières qui servent à récolter le bois en forêt. Ces machines, appelées abatteuses-façonneuses, sont des téléopérateurs munis d'une tête d'abattage



multifonctionnelle qui permet d'abattre, d'ébrancher, de mesurer, de tronçonner et d'écimer un arbre sur pied en une série d'opérations (figure 1). Ils permettent ainsi de transformer ainsi un arbre sur pied en une pile de billes de la longueur désirée, prêtes à être utilisées en moins de 30 secondes.

Figure 1 Abatteuse-façonneuse typique

En raison de leurs multiples fonctions, ces nouvelles machines forestières sont plus chères (près d'un demi-million de dollars l'unité) et plus difficiles à opérer que les machines forestières classiques (abatteuses, débusqueuses, ébrancheuses). Il en résulte que typiquement, un opérateur doit opérer une machine entre 4 et 6 mois avant d'atteindre un niveau de productivité rentable (grosso modo 80 tiges récoltées par heure) [6]. Il y a donc place à amélioration.

Afin de réduire la période d'apprentissage permettant d'atteindre un niveau de productivité rentable sur ce type de machine, une avenue possible est d'utiliser la simulation graphique 3D pour former les opérateurs [7]. En effet, le développement formidable et la forte réduction des coûts des systèmes informatiques rendent maintenant cette technologie abordable pour la formation des opérateurs de machines forestières.

Vu la nouveauté de ces machines forestières, peu d'études se sont intéressées à la performance des opérateurs lors de l'apprentissage de l'opération de ces véhicules. Ainsi, dans un premier temps, cette étude¹ mesure l'évolution de la performance des opérateurs lors de leur formation sur simulateur afin d'évaluer le temps de formation optimal sur simulateur. Elle compare ensuite la performance des opérateurs lors de leur formation subséquente en forêt entre ceux qui ont suivi le programme de formation conventionnel (sans simulateur) et ceux qui ont suivi le programme de formation avec simulateur. Cette étude comparative de la performance en forêt a pour but de mesurer l'efficacité de la formation sur simulateur comparativement au programme de formation conventionnel.

2. Description du cours de formation

L'apparition des abatteuses-façonneuses est relativement récente. Ainsi, en Amérique du nord, seuls sept centres offrent une formation pour opérer ces machines. Ces centres sont apparus progressivement depuis 1995 et cinq d'entre eux sont situés au Québec [5].

2.1 Cours de formation conventionnel

Le cours offert au Québec par le ministère de l'Éducation est intitulé «abattage et façonnage des bois» et dure 26 semaines au cours desquelles l'étudiant se familiarise avec les notions de base essentielles à l'opération, l'entretien, la réparation et le dépannage des machines d'abattage et de façonnage des bois, principalement les abatteuses-façonneuses. Les 11 dernières semaines du cours sont consacrées à un stage en forêt où les étudiants apprennent à tour de rôle à opérer, entretenir et dépanner les machines dans des conditions de coupe réelles. Chaque étudiant passe ainsi l'équivalent de quatre semaines à temps complet (40 h/ semaine) sur une abatteuse-façonneuse en alternant les quarts de jour et de nuit.

¹ Cet article présente les résultats d'une étude qui a eu lieu dans le cadre du projet ATREF [11] au centre de formation professionnelle Mont-Laurier, situé à Mont-Laurier, Québec.

2.2 Cours de formation avec simulateur

Dans le cadre de notre étude, le cours conventionnel fut allongé d'une semaine, insérée avant le stage en forêt, pour permettre aux étudiants de suivre leurs séances de formation sur simulateur. Ainsi dans le cours conventionnel, les deux semaines qui précèdent le stage en forêt sont destinées au diagnostic de panne et à la réparation des machines. Cependant, dans le cours avec formation sur simulateur le stage en forêt est maintenant précédé de trois semaines où les étudiants alternent les séances de formation sur simulateur avec les exercices de diagnostic de panne et de réparation de machine.

Quatre classes de 11 étudiants ont participé à la mise en essai du simulateur en 1997 et 1998. Chaque étudiant suivait 25 séances de formation d'une heure sur simulateur avant de passer en forêt sur les vraies machines.

3. Description de la formation sur simulateur

Les séances de formation sur simulateur visent à former les étudiants aux différentes tâches relatives à la récolte des arbres en forêt. L'analyse de la tâche des opérateurs a permis de déterminer que ces tâches sont: la saisie, l'abattage, le façonnage (ébranchage et tronçonnage), l'empilage et la planification des coupes [6].

L'analyse de la tâche permet d'appliquer les principes pédagogiques importants que sont la formation par tâche partielle et la formation adaptative (de l'anglais « part-task training » et « adaptive training » [10]). Le premier principe vise à décomposer la tâche principale en sous-tâches qui peuvent être enseignées séparément, alors que le deuxième principe vise à regrouper progressivement ces sous-tâches, selon le rythme d'apprentissage, jusqu'à la reconstitution de la tâche initiale.

Ces informations ont servi à mettre au point un simulateur graphique d'abatteuse-façonneuse qui simule le comportement réel de la machine et permet de réaliser, étape par étape, les différentes tâches relatives à la récolte des arbres en forêt. Six modules de formation ont ainsi été produits et validés par deux opérateurs experts (également formateurs pour le cours). Ces modules forment progressivement les opérateurs novices aux tâches de saisie, d'abattage, de maîtrise des touches de fonctions, de façonnage, d'empilage et de planification des coupes. De cette façon, on augmente progressivement la complexité des tâches, qui à chaque fois incorporent les éléments de la tâche précédente auxquels on ajoute un nouvel élément de difficulté.

3.1 Système

Le simulateur recrée les principaux éléments de l'interface de commande d'une abatteuse-façonneuse, soit les deux manettes situées au bout des accoudoirs du siège de l'opérateur et qui servent à commander le bras manipulateur (figure 2).

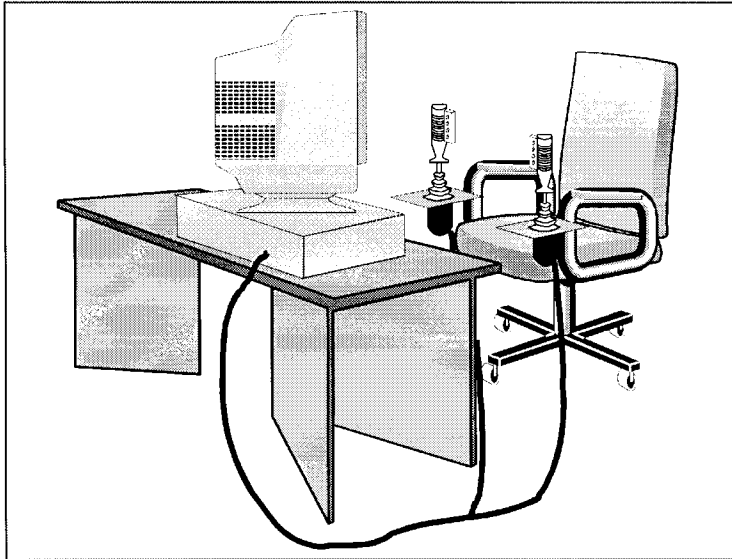


Figure 2 Illustration du simulateur graphique 3D

Chaque manette de commande est munie de six boutons (quatre pour les doigts et deux pour le pouce) qui activent les différentes fonctions de la tête d'abattage multifonctionnelle (ex. : ouvrir/fermer les pinces, actionner la scie, etc.).

L'interface visuelle est composée d'un écran couleur de 21 pouces de diagonale (20 pouces visibles) et d'une résolution de 1280x1024 pixels (horizontal x vertical).

Finalement, l'interface auditive utilise un haut-parleur ou un casque d'écoute pour reproduire les éléments sonores de la simulation (comptes à rebours, bruits de collision, de scie à chaîne, etc.).

La simulation graphique est effectuée sur un poste de travail O2 de Silicon Graphics muni d'un processeur R5000 cadencé à 180 MHz et de 128 Mo de mémoire vive. Le simulateur est programmé en langage C, utilise la bibliothèque de fonctions graphiques OpenGL, le système d'exploitation IRIX 5.2 et l'interface graphique X-Windows pour les fonctions de fenêtrage et d'interface utilisateur. Pour plus de détails, consulter [4].



Figure 3 Illustration d'une scène affichée lors de la simulation

Plusieurs indices visuels sont utilisés pour améliorer la perception 3D de la scène à l'écran, tels que la projection perspective, les ombrages, la texture, une grille au sol et un curseur projeté sur le sol sous la tête d'abattage. Le tout est bien illustré à la figure 3 ci-contre.

3.2 Modules de formation

Les étudiants passent progressivement à travers six modules de formation qui comprennent chacun de trois à sept séances de formation selon le degré de difficulté du module (tableau 1).

Tableau 1 Répartition des séances de formation selon les modules

Modules	Tâches	Nombre de séances
1	Saisie	6
2	Abattage	3
3	Touches de fonction	3
4	Façonnage	3
5	Empilage	3
6	Planification des coupes	7
Total		25 ($\approx$ 25 heures)

Chaque séance de formation consiste à exécuter une tâche (saisie, abattage, etc.) un certain nombre de fois en variant certains paramètres (ex.: la position et l'orientation des éléments de la scène). Ce nombre est ajusté en fonction de la tâche et de l'expérience des opérateurs (mesurée par le nombre de pratiques antérieures) pour que chaque séance dure en moyenne une heure environ. Chaque tâche est précédée d'un compte à rebours sonore de deux secondes durant lesquelles la scène apparaît à l'écran mais où l'opérateur ne peut effectuer aucune commande.

La figure 3 illustre la scène qui apparaît à l'écran lors de la réalisation d'une tâche de saisie (module 1). On y aperçoit le bras manipulateur de l'abatteuse-façonneuse au bout duquel on retrouve la tête d'abattage multifonctionnelle qui permet de saisir, d'abattre et de façonner l'arbre.

4. Étude de la performance sur simulateur

La performance des étudiants est évaluée à l'aide de différents critères qui varient selon le module de formation. Comme la tâche de saisie (module 1) est à la base de toutes les autres tâches qui nécessitent la manipulation des manettes (abattage, façonnage et empilage), c'est elle qui a été retenue pour observer l'évolution de la performance des étudiants sur simulateur.

Nous avons ainsi demandé aux onze étudiants d'une classe d'exécuter une tâche de saisie après 13, 181, 349, 517, 685, 917, 1149 et 2452 pratiques de cette tâche depuis le début de leur formation sur simulateur (huit niveaux d'expériences). Deux distances de cible (position et orientation de l'arbre à saisir) étaient utilisées et six répliques étaient réalisées pour chaque distance pour un total de 12 essais par étudiant à chacun des huit niveaux d'expériences. Les essais étaient réalisés au début des séances et précédés d'une pratique.

La tâche à exécuter consistait à saisir l'arbre à une certaine hauteur (indiquée par une bande rose, figure 4) à l'aide des pinces de la tête d'abattage, de façon à ce que l'orientation de la tête permette un abattage dans une direction donnée (indiquée par une bande bleue située au sol à l'écran, figure 5). Les figures 4 et 5 présentent de façon schématique les positions initiale et finale du bras manipulateur lors de l'exécution de la tâche de saisie.

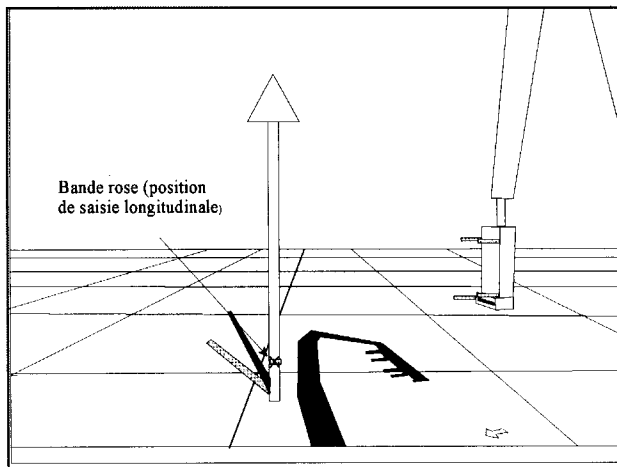


Figure 4 Tâche de saisie (début)

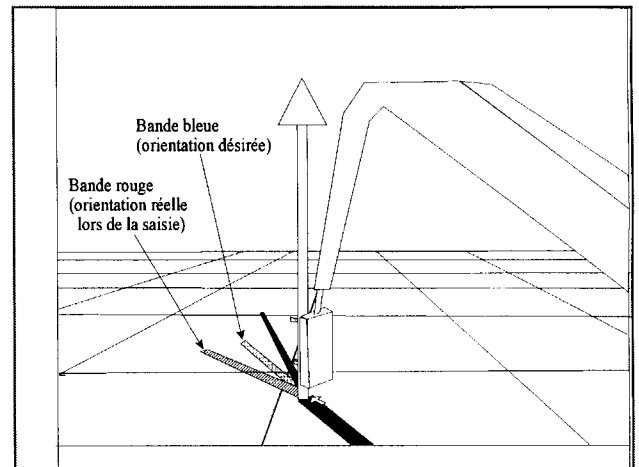


Figure 5 Tâche de saisie (fin)

4.1 Critères de performance

Les quatre critères utilisés pour évaluer la performance lors des tâches de saisie sont le temps d'exécution de la saisie, le taux d'erreur et la précision de positionnement de la pince de saisie, mesurée par l'écart d'orientation et l'écart longitudinal.

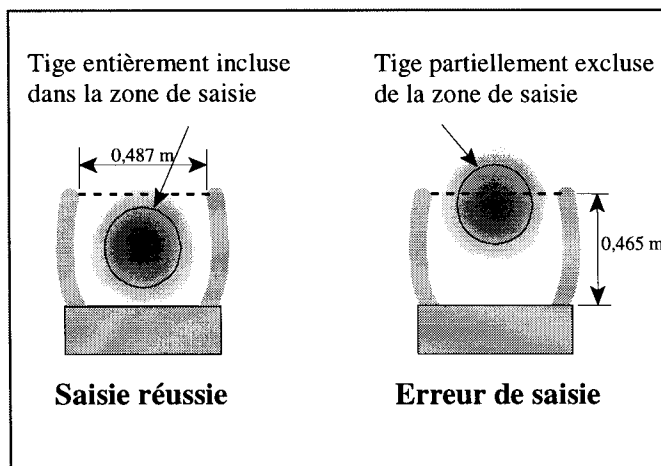


Figure 6 Illustration de l'erreur de saisie

Le temps d'exécution est le temps écoulé entre la fin du compte à rebours et la saisie de l'arbre (qui a lieu lorsque l'opérateur appuie sur le bouton de fermeture des pinces). À noter que seul le temps d'exécution des saisies réussies est comptabilisé.

Le taux d'erreur est le rapport entre le nombre d'erreurs de saisie et le nombre d'essais de saisie. Une erreur de saisie survient lorsque la pince n'enserme pas complètement l'arbre au moment de sa fermeture (fig. 6).

L'écart d'orientation représente l'écart angulaire entre l'orientation réelle de la pince lors de la saisie et l'orientation désirée pour permettre à l'arbre de tomber en direction de la bande bleue sur le sol lors de l'abattage (figure 5). L'écart d'orientation est important car les opérateurs doivent apprendre à bien positionner la pince d'abattage de manière à orienter la chute de l'arbre lors de son abattage. Pour cette raison, une bande rouge apparaît sur le sol lors d'une saisie réussie pour indiquer à l'opérateur l'orientation réelle lors de la saisie comparativement à l'orientation désirée (figures 5 et 7).

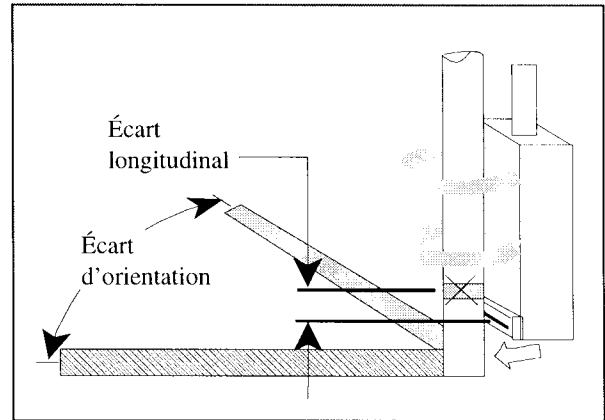


Figure 7 Illustration des critères de précision

Finalement, l'écart longitudinal représente la distance verticale qui sépare la scie à chaîne de la position de saisie longitudinale désirée lors de la saisie (figures 4 et 7). Il s'agit donc d'une mesure de la précision de coupe le long de la tige de l'arbre, d'où le nom d'écart longitudinal.

4.2 Résultats

Les figures 8 à 11 ci-dessous illustrent l'évolution de la performance des étudiants lors de leur formation sur simulateur, pour chacun des quatre critères de performance définis précédemment pour la tâche de saisie.

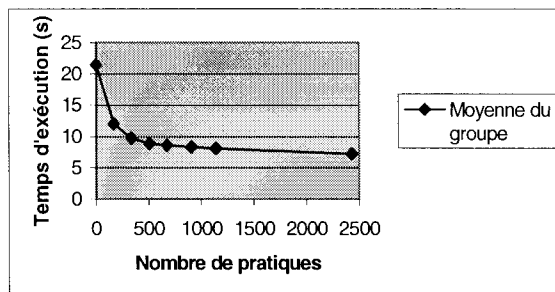


Figure 8 Temps d'exécution vs pratique

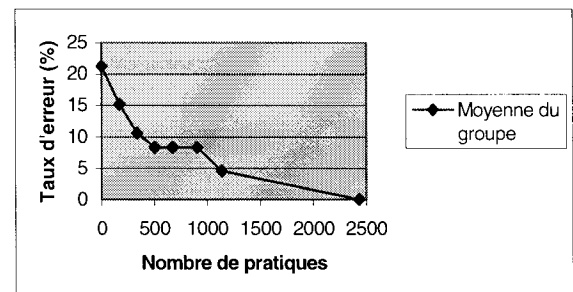


Figure 9 Taux d'erreur vs pratique

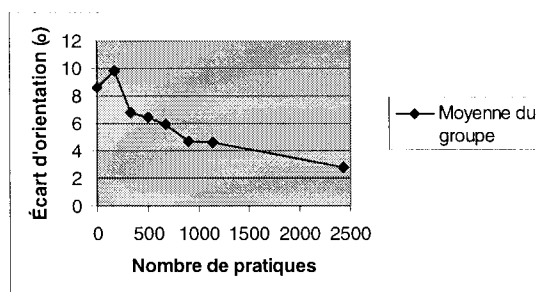


Figure 10 Écart d'orientation vs pratique

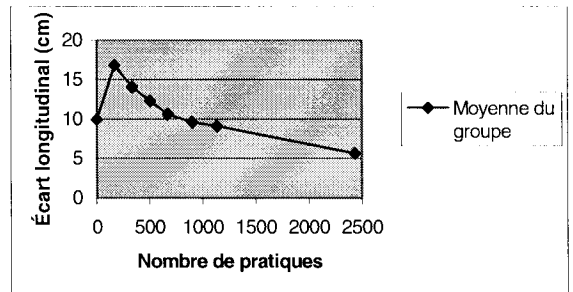


Figure 11 Écart longitudinal vs pratique

Les résultats obtenus pour les tâches des autres modules suivent la même tendance, à savoir que la performance s'améliore avec le nombre de pratiques, tel que prévu par la loi de la pratique [1, 2, 9]. D'ailleurs, il est possible de modéliser la performance des tâches de saisie pour chacun de ces quatre critères [8].

Comme on peut le constater sur ces figures, la performance moyenne du groupe tend vers une asymptote après 2500 pratiques de la tâche de saisie. C'est alors le moment pour les étudiants de passer du virtuel au réel, c'est-à-dire de la classe à la forêt.

5. Étude de la performance en forêt

Le tableau 2 ci-dessous montre le volume total de bois récolté chaque année par les deux classes d'étudiants du centre de formation depuis le début des cours d'abattage et façonnage des bois en 1995. À noter que le mesurage du bois ne s'effectue qu'à la fin de l'année d'où le regroupement des données pour chaque année.

Tableau 2 Récolte des cohortes d'étudiants du cours d'abattage et façonnage des bois

	Volume de bois récolté (m ³)	
	Sans formation sur simulateur	Avec formation sur simulateur
	9901 (été-automne 1995)	12677 (été-automne 1997)
	12272 (été-automne 1996)	14500 (été-automne 1998)
Moyenne	11087	13589

L'analyse de la variance de ces données montre que les groupes qui ont bénéficié de la formation sur simulateur accroissent leur productivité de façon significative ($F_{1,2} = 2,80$; $p = 0,236$) avec une augmentation moyenne de 23 % du volume de bois récolté.

Il est important de souligner que le volume de bois récolté est tributaire non seulement de la formation reçue mais aussi de plusieurs facteurs tels que le type de forêt (maturité, densité, répartition des essences), la topologie et le type de terrain (plat, en pente, rocheux, marécageux, etc.), les longueurs de billes désirées (8 pi, 12 pi, 16 pi, 24 pi, bois long), l'habileté des opérateurs et les conditions météorologiques.

Ces facteurs, combinés au petit nombre de données disponibles (il n'y a que deux classes par année) expliquent vraisemblablement le faible niveau de confiance obtenu, dû aux fortes variations observées d'une année à l'autre. Les résultats illustrent néanmoins une hausse de la productivité qui est corroborée par les cinq formateurs du centre.

Les observations effectuées par ces derniers indiquent également que les gains les plus importants sont effectués lors des premiers jours d'opération en forêt. Par la suite, les étudiants ayant reçu une formation sur simulateur augmentent leur performance au même rythme que ceux qui ont suivi la formation conventionnelle, tout en maintenant une avance constante. Les formateurs estiment également que le rendement final est amélioré

d'environ 10 %, soit 55 tiges à l'heure comparativement à 50 tiges à l'heure pour les classes précédentes.

À cette augmentation sensible de la production, s'ajoutent les économies résultant de la réduction des bris, un facteur non négligeable des coûts d'exploitation. En effet, une comparaison des coûts d'entretien et de réparation entre les classes ayant utilisé la formation sur simulateur et celles qui ne l'ont pas fait révèle une diminution de 26 % de ces coûts, qui sont de l'ordre de 40 000 dollars par année (pour deux classes de 11 étudiants)². Ces économies sont réalisées principalement au niveau des bris fréquents tels que les chaînes de scie, les guides-chaînes, les boyaux hydrauliques, ainsi qu'au niveau des composantes hydrauliques à remplacer et du volume de fluide hydraulique à utiliser (qui se répand fréquemment lors de bris).

Une bonne partie des coûts d'entretien et de réparation est due à l'entretien périodique et à l'usure normale des pièces. Par conséquent, la réduction réelle des coûts reliés directement à une mauvaise manipulation est largement supérieure à 25 % même si elle est difficile à estimer en raison de la méthode comptable utilisée (on ne calcule que le coût total des pièces utilisées).

6. Discussion

Nous avons présenté les résultats obtenus suite à une série d'essais réalisés sur quatre classes de onze étudiants en abattage et façonnage des bois en 1997 et 1998. Ces résultats démontrent que la formation des opérateurs d'abatteuses-façonneuses sur simulateur graphique 3D permet d'augmenter la productivité des nouveaux opérateurs d'abatteuse-façonneuse et de réduire les bris reliés à l'opération de ces machines forestières. On constate ainsi que l'ajout d'une formation sur simulateur d'environ 25 heures au cours de formation conventionnel entraîne une augmentation moyenne du volume de bois récolté de 23 % et une réduction de 26 % des coûts d'entretien et de réparation.

Il est intéressant de noter que les étudiants qui ont obtenu une mauvaise performance sur simulateur obtenaient également une mauvaise performance en forêt. Il y a donc lieu d'étudier l'utilisation du simulateur graphique comme outil de sélection des candidats lors des entrevues de sélection qui précèdent chaque cours.

Quant à la durée de formation sur simulateur, il semble que 25 séances d'une heure environ optimise le transfert de connaissances pour les modules de formation développés jusqu'ici. En effet, l'essai de séances de formation d'une durée de plus d'une heure a engendré différents problèmes allant du manque d'attention à des cas de rougeoiement des yeux. Finalement, après les 25 séances de formation, les étudiants sont prêts à passer à la vraie machine. Cette constatation émane non seulement des résultats qui plafonnent

² Source : Centre de formation professionnelle Mont-Laurier, comparaison des années 1996 et 1997.

au niveau de la performance, mais également de la baisse d'intérêt et de l'engagement des étudiants à réaliser leurs séances de formation sur simulateur.

Nous croyons cependant que l'ajout de modules de formation supplémentaires, permettant entre autres de déplacer la base mobile de l'abatteuse-façonneuse à travers les scènes forestières, donnerait une valeur ajoutée au simulateur et permettrait d'acquérir d'autres habiletés qui sont nécessaire pour l'opération en forêt.

Finalement, comme l'interface de commande du bras manipulateur des abatteuses-façonneuses est généralement identique à celle d'autres téléopérateurs forestiers tels que les porteurs et les chargeuses, on peut également s'attendre à ce que la formation sur simulateur engendre des hausses de performance similaires sur ces machines.

7. Références

- [1] Card, S. K., English, W. K., Burr, B. J., "Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystick, step keys, and text keys for text selection on a CRT", *Ergonomics*, Vol. 26, No. 8, 1978, pp. 601-613.
- [2] Card, S. K., Moran, T. P., Newell, A., "The psychology of human-computer interaction", Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 1983.
- [3] Courteau, J., "Robotics in Canadian Forestry", *IEEE Canadian Rev.*, Winter 1994, pp. 10-13.
- [4] Freedman, P., MacKenzie, P., Lapointe, J.-F., "A Computer-based training environment for forestry telemanipulation". *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'97)*, Grenoble, France, September 7-11 1997, pp. 1826-1831.
- [5] Freedman, P., "Forestry machine simulators: looking for added value in training", *Proceedings of the Canadian Woodlands Forum Annual Meeting*, Montréal, Québec, March 1998, pp. 19-22.
- [6] Lapointe, J.-F., Robert, J.-M., Freedman, P., "Analyse ergonomique du travail de l'opérateur d'abatteuse-tronçonneuse", *Comptes-rendus du 27e congrès annuel de l'Association Canadienne d'Ergonomie*, Québec, octobre 1995, pp. 111-116.
- [7] Lapointe, J.-F., Freedman, P., Mackenzie, P., Robert, J.-M., "Using VE for training and augmenting human performance in forestry teleoperation", *Proceedings of SPIE Photonics East '96 - Telemanipulator and Telepresence Technologies III*, Vol. 2910, Boston, USA, November 1996, pp. 147-155.
- [8] Lapointe, J.-F., "Étude de la performance humaine en téléopération : le cas forestier", thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 1999.
- [9] Snoddy, G. S., "Learning and stability", *Journal of Applied Psychology*, Vol. 10, No.1, 1926, pp.1-36.
- [10] Wickens, C. D., "Engineering psychology and human performance", 2nd ed., Harper-Collins, 1992.
- [11] Turcotte, P., "Applications des Technologies Robotiques aux Équipements Forestiers (ATREF)", communiqué tech. Général-63, Inst. canadien de rech. en génie forestier, mai 1998.