

Contenu

- 1 Introduction
- 2 Objectifs
- 2 Méthodes d'étude
- 5 Résultats et discussion
- 15 Conclusions
- 18 Mise en application
- 20 Références
- 20 Remerciements

Évaluation de designs de routes forestières d'accès utilisées par des camions grumiers équipés de CTI – phase II : routes d'accès vieilles

Résumé

Une opération forestière dans le nord de l'Alberta se sert de matériaux à texture fine trouvés sur place pour construire ses routes d'accès temporaires, lesquelles sont utilisées dans des conditions de gel et de non-gel. Les véhicules de transport qui y circulent sont équipés de systèmes de gonflage central des pneus afin de réduire les dommages à la route et d'améliorer la mobilité. Ce deuxième de trois rapports décrit une évaluation du design et de la construction de routes d'accès temporaires mises en usage un an après leur construction; il quantifie les économies d'entretien par nivelage résultant du vieillissement de la route et de l'emploi de pressions de pneu optimisées; enfin il discute de la validation d'un modèle d'orniérage du USDA Forest Service et de son potentiel d'utilisation dans d'autres applications.

Mots clés

Transport routier, Camions grumiers, Pneus, Système de gonflage central des pneus, Routes, Routes forestières, Routes vieilles, Routes nouvellement construites, Compactage, Orniérage, Performance, Évaluation, Alberta.

Auteur

Allan Bradley
anciennement de FERIC,
Division de l'Ouest

Introduction

Depuis le début de ses opérations forestières dans le nord-est de l'Alberta, Alberta-Pacific Forest Industries Inc. a connu des succès variés dans l'accès à ses blocs de coupe hors de la période de gel. La pluie, la rareté du gravier et les sols à texture fine sensibles à l'humidité contribuent à réduire la capacité de circulation et à augmenter l'entretien des routes. Alberta-Pacific a demandé à l'Institut canadien de recherches en génie forestier (FERIC) d'examiner la construction de ses routes d'accès temporaires utilisées en été (celles destinées à être remises en production forestière dans les deux ans) et de suggérer des moyens d'en diminuer les coûts d'entretien et d'en améliorer l'accès (c.à.d. de réduire le besoin d'assistance aux camions et de maintenir les vitesses de transport). De plus, l'examen devait prendre en

compte les rendements attribuables à l'usage de systèmes de gonflage central des pneus (CTI).

FERIC a commencé son étude par une revue et un sommaire de la documentation traitant de l'effet de pressions variables des pneus sur le design et les dommages de la route (Bradley, 1997). Au cours de l'été 1998, FERIC et Alberta-Pacific construisirent deux groupes de trois variations du design habituel à « Fossé-V » utilisé par la compagnie pour ses routes d'accès temporaires, et les laissèrent à vieillir (c.-à-d. à se densifier) pendant un an avant de les utiliser pour l'essai. Les camions grumiers d'Alberta-Pacific équipés de CTI circulèrent sur le premier groupe de sections d'essai en utilisant des pressions de pneu normales pour voie publique, et sur le second groupe des pressions de pneu optimisées. Le présent rap-

port documente les résultats de cet essai terrain.

Une première phase de l'évaluation des routes d'accès a été effectuée par FERIC et Alberta-Pacific en 1998. Cette phase consistait à évaluer dix sections d'essai d'une route d'accès temporaire construite en juillet 1998 et utilisée non vieillie, en septembre 1998. Quatre de ces sections d'essai ont été construites à l'aide d'un compacteur afin d'évaluer la rentabilité du compactage de surface sur la performance de la route. Sur la moitié de ces sections d'essai, les camions circulaient avec des pressions normales de gonflage des pneus et sur l'autre moitié avec des pressions optimisées. Les résultats de cette première phase sur une route nouvellement construite ont été publiés en 2001 dans un document connexe au présent rapport (Bradley, 2001). De plus, un rapport sommaire fournira aux praticiens un guide et des stratégies pour mettre en application les résultats des deux rapports.

Objectifs

L'objectif premier de cette étude était d'évaluer le design et la technique de construction de routes d'accès temporaires; cet examen comprenait les tâches suivantes :

- Quantifier le coût de construction et d'entretien pour chaque design de route.
- Déterminer l'efficacité du vieillissement pour améliorer les caractéristiques de la route et comparer aux méthodes de l'étude précédente qui portait sur une route nouvellement construite.
- Quantifier l'influence d'une optimisation de la pression des pneus sur la performance de la route.
- Suggérer des perfectionnements aux designs de routes d'accès.

- Valider l'utilisation d'un modèle d'orniérage du USDA Forest Service dans des applications en foresterie canadienne, en comparant ses prévisions de profondeur d'orniérage avec celles observées durant l'essai.

Méthodes d'étude

Construction des routes

Trois variations du design standard des routes d'accès temporaires d'Alberta-Pacific ont été évaluées dans cet essai : Fossé-V (cas de référence), Surélévation de 0,5 m, et Surélévation sur enracinement. En septembre 1998, six sections d'essai ont été construites l'une à la suite de l'autre pour former une route d'essai de 1000 m de longueur, rejoignant aux deux extrémités la route forestière d'accès 79-04 (figure 1). La route d'essai présentait des conditions uniformes d'alignement, de type de sol, de drainage, de climat et de volume de circulation. Chacun des trois designs était reproduit deux fois, une première série devant être soumise à la circulation de camions équipés de pneus à pressions normales pour voie publique, et l'autre utilisée par des camions sur pneus à pressions optimisées par le CTI en fonction des conditions de charge et de route. FERIC a observé la construction de la route d'essai et évalué le coût de construction de chaque design. Les sections de route complétées ont fait l'objet de relevés pour en déterminer la géométrie transversale et le profil de surface avant l'essai; la route a ensuite été fermée et laissée à « vieillir » durant l'hiver.

Le vieillissement est un terme utilisé pour décrire le processus de densification de la surface de la route et le renforcement qui se produit naturellement avec le temps sur des routes de terre sans circulation. Ce processus

Institut canadien de recherches en génie forestier (FERIC)

Division de l'Est et Siège social
580 boul. St-Jean
Pointe-Claire, QC, H9R 3J9

☎ (514) 694-1140
☎ (514) 694-4351
✉ admin@mtl.feric.ca

Division de l'Ouest
2601 East Mall
Vancouver, BC, V6T 1Z4

☎ (604) 228-1555
☎ (604) 228-0999
✉ admin@vcr.feric.ca

Mise en Garde

Avantage est publié iniquement à titre d'information pour les membres et les partenaires de FERIC. Il ne doit pas être interprété comme une approbation par FERIC d'un produit ou d'un service à l'exclusion d'autres qui peuvent être adéquats.

This publication is also available in English.



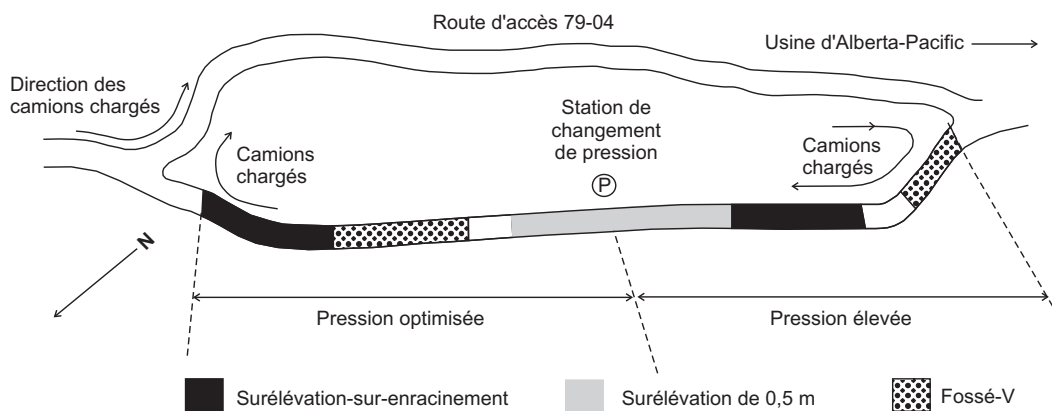


Figure 1. Vue en plan de la route vieillie, montrant les sections d'essai.

commence avec la perturbation et le réarrangement des sols à l'intérieur du profil de la route, par l'équipement de construction routière. Les sols en surface sont ensuite soumis aux effets du séchage et des agents atmosphériques. Les sols des couches supérieures sont desséchés par l'évaporation de surface et le drainage du profil de la route dans les fossés. L'oxydation de surface joue un rôle significatif dans la formation d'une croûte en créant des oxydes et des hydroxydes de fer qui agissent comme agents de cimentation. Enfin, le passage des précipitations à travers la couche supérieure de la route peut lessiver le carbonate du premier mètre de matériaux et ainsi réduire la quantité de particules fines (silt) près de la surface (Quigley, 1978). Ces forces assèchent, consolident et cimentent les particules en une croûte dense, résistante et rigide. Les augmentations de résistance sont très perceptibles dans les sols d'argile parce que le processus de vieillissement réoriente (agglomère) les particules d'argile et favorise une liaison physiochimique. Le vieillissement peut s'étendre sur une longue période (des années dans le cas de sols d'argile) et se trouve temporairement inversé par l'eau (gonflement) et le soulèvement dû au gel.

Coûts de construction routière

Aux fins de comparaison, le coût de base pour la construction de chaque section d'essai a été estimé en faisant la somme des coûts (durée de l'activité x taux demandé) pour toutes les pièces d'équipement de construction utilisées. Ce coût exclut les grands déblais

et remblais, les temps morts opérationnels, le transport des équipements, les affiches et les ponceaux. Ces estimations ne comprennent pas non plus les coûts encourus lors du processus de pré-construction, tel que la planification, les approbations et le tracé. Une comparaison relative entre les designs de route a été faite sur la base du *coût total* – c.à.d. le coût de construction de base estimé pour la section, auquel s'ajoute le coût du nivelage durant l'essai. À partir de cette analyse, des révisions spécifiques à la région ainsi qu'à l'utilisation ont été suggérées concernant le processus courant de design de routes utilisé par Alberta-Pacific.

Propriétés du sol

FERIC a mesuré la résistance du sol, la densité et la teneur en humidité durant et après le processus de construction. Des mesures de la résistance de la couche de forme ont été recueillies à l'aide d'un pénétromètre à cône dynamique (DCP) et un taux moyen de pénétration a été déterminé pour la profondeur de 20 à 60 cm. Des profils de densité de surface et des teneurs en humidité ont été recueillis, les mesures étant prises le long de la ligne centrale et dans les deux traces de roues pour quantifier les conditions au moment de la construction, après vieillissement et après neuf mois de circulation suivant la construction. Cependant, des temps morts opérationnels ont prolongé de 3 mois l'intervalle prévu de sorte que les densités sèches après vieillissement ont été estimées par extrapolation linéaire depuis 9 jusqu'à 12 mois. Cette extrapolation a

amélioré l'estimation des augmentations de la densité sèche due au vieillissement et à la circulation. Des échantillons de sol ont été recueillis et analysés pour identifier le type de sol et en quantifier les propriétés de base, c.-à-d. les limites Atterberg (limite de liquidité et indice de plasticité) et la granulométrie.

Essai de circulation

La route d'essai était disposée parallèlement près de la route forestière d'accès 79-04 de façon que la circulation puisse être dirigée sur l'une ou l'autre route (figure 1). Les camions chargés suivaient un trajet circulaire, entrant sur la route d'essai à partir du sud pour éviter de commencer sur une pente ascendante à la station de changement de pression. Les chercheurs de FERIC inspectaient chaque camion chargé avant qu'il ne circule sur les sections d'essai pour s'assurer que les pressions des pneus étaient réglées correctement. Les réglages optimisés de pression étaient basés sur des recommandations de la Tire and Rim Association (1999) (annexe I).

Quand les camions chargés entraient sur la route d'essai, les pressions des pneus étaient réglées aux pressions normales (élevées). Après avoir passé sur le premier groupe de trois sections d'essai, les camions s'arrêtaient à un point de contrôle où leurs pneus étaient dégonflés à des niveaux optimisés de pression avant de circuler sur les trois sections suivantes.

FERIC observait la circulation sur la route d'essai seulement durant des opérations de camionnage de jour. Quand les chercheurs n'étaient pas sur place ou étaient occupés à prendre des mesures sur la route, la circulation était détournée de la route d'essai. Afin d'évaluer les designs d'essai dans des conditions représentatives de la circulation, les camions grumiers chargés et à vide étaient dirigés sur la route d'essai; les camions non chargés contournaient cette route quand des camions chargés s'y trouvaient déjà. On avait prévu le passage d'approximativement 250 charges – suffisamment pour donner une in-

dication claire de la performance du design. Cependant, à cause des conditions climatiques qui se détérioraient, l'essai a dû être arrêté prématurément après 134 charges (5 320 t de charge utile).

Des données sur la répartition du poids à l'essieu ont été obtenues avec l'assistance du personnel d'Alberta-Pacific affecté aux balances. Les poids à l'essieu de chaque camion ont ensuite été convertis en charges équivalentes par essieu simple (unités ESAL)¹ en utilisant un facteur d'équivalence développé par le US Army Corps of Engineers (Barber et al., 1978) (annexe I).

Pour Alberta-Pacific, l'entretien de la route par nivelage est normalement basé sur les pires sections (c.-à-d. les sections à ornières profondes qui ralentissent la circulation ou nécessitent une assistance aux camions). De même, quand une portion importante d'une des sections d'essai développait des ornières ayant en moyenne 15 cm de profondeur (la profondeur prédéterminée dans cet essai pour déclencher le nivelage), la route d'essai était fermée à la circulation pendant que cette section était nivelée. Des mesures de la profondeur des ornières étaient prises dans les deux traces de roues de chaque section d'essai à intervalles réguliers de circulation, ainsi qu'avant et après le nivelage.

Des données de conditions climatiques pour la période d'essai étaient reçues des stations d'observation les plus proches, et exprimées en termes de précipitation et d'indice de risque d'incendie (FWI).²

¹ L'ESAL (Equivalent Single Axle Load) est un concept développé par des ingénieurs en conception de routes, dans le but de quantifier le potentiel de dommages à la route pour un véhicule de n'importe quel type et de n'importe quelles dimensions, en termes d'une unité standard – l'ESAL. L'utilisation de cette unité permet le design de routes pour tout type de véhicule ou combinaison de circulation. Elle permet également de prévoir l'influence, sur la durée de la route, de changements de certains paramètres de circulation tels que le volume, la charge à l'essieu ou la pression des pneus.

² L'indice FWI donne une bonne indication des conditions de sécheresse et est calculé à partir d'une variété d'indices de conditions climatiques comprenant la précipitation, la température, la vitesse du vent et l'humidité relative pour la journée, ainsi que du FWI de la journée précédente.

Modélisation de la profondeur des ornières

Pour estimer l'influence d'une réduction du nombre d'unités ESAL d'un camion sur les dommages produits, le USDA Forest Service a développé le modèle d'orniérage Surface Thickness Program (STP) (Whitcomb et al., 1990), un modèle empirique qui a été validé lors d'essais terrain subséquents (Truebe et Evans, 1994). Les données relatives à la pression des pneus, aux charges à l'essieu, au nombre de passages et à la résistance de la route ont servi d'entrées au modèle STP pour chemins de terre afin de comparer les profondeurs d'ornière prévues avec celles observées dans les sections d'essai. La résistance de la route a été déterminée à partir de mesures au pénétromètre prises avant l'essai, converties en indices portants californiens (CBR) à l'aide d'une formule empirique développée par les chercheurs du USDA Forest Service (Truebe et Evans, 1994).³

Après validation au moyen des données de la route d'essai, des prévisions d'orniérage à long terme ont été faites pour une route à Fossé-V. Ces prévisions ont été utilisées comme données d'entrée pour analyser la possibilité d'améliorer l'efficacité du camionnage en augmentant la charge utile.

Résultats et discussion

Designs des routes et coûts de construction

Des échantillons de sol prélevés au hasard le long de la route d'essai contenaient principalement des sables silteux (c.-à-d. classés comme sables silteux très fins, sables, ou sables silteux et graviers ayant peu de plasticité) (annexe II). Les sables silteux se drainent raisonnablement bien et développent une bonne résistance à la compression; d'après l'AASHTO (1990), ils sont considérés

passablement stables quand ils sont utilisés dans les talus de route. Comme revêtement de route cependant, ces sols forment facilement des ornières à cause de leur manque de cohésion et parce que les matériaux sont alors physiquement moins confinés que dans un talus. Les côtes dans cette région contiennent normalement des couches sèches de sable et d'argile. En pratiquant des coupes pour réduire la pente, les constructeurs de routes ont parfois accès à ces matériaux et utilisent le sable comme matériau de talus dans les dépressions humides et l'argile pour recouvrir la surface de la route.⁴

La figure 2 montre une section d'essai à Fossé-V normale, telle que construite, le modèle de route d'accès le plus courant d'Alberta-Pacific. Ce type de route est réalisé par un boueur et n'est habituellement pas compacté. Le coût moyen de construction des deux sections d'essai Fossé-V était de 166 \$/100 m, à l'exclusion de tous les déblais et remblais d'importance, du transport des équipements, du drainage transversal et des affiches (tableau 1). Ce résultat est approximativement de 57 % plus élevé que le coût de 106 \$/100 m rapporté pour la section d'essai Fossé-V de la route non vieillie, avec le même type d'équipements. Cette différence provient du temps supplémentaire requis pour enlever ou incorporer les cailloux et les grosses roches trouvés dans les sections de route vieilles.

³ $CBR = 320 / (DCP)^{0,943}$ où DCP est le taux de pénétration du cône en mm/coup. Comme il est évident par leur relation inverse, des taux plus faibles de pénétration du cône correspondent à des sols plus résistants et à des valeurs CBR plus élevées. Cette conversion diffère de celle utilisée dans l'analyse pour les routes nouvellement construites et a été adoptée afin de correspondre plus étroitement aux valeurs CBR utilisées pour générer les coefficients du modèle STP.

⁴ Emery Gorman, Green Country Resource Managers, communication personnelle, juillet 1998.

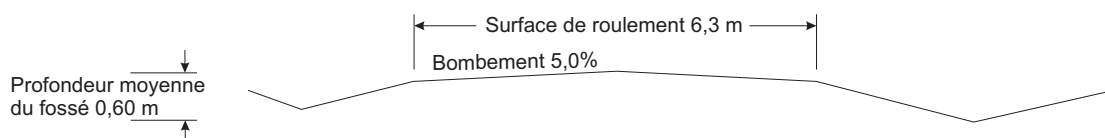


Figure 2. Profil transversal type d'une route à Fossé-V, telle que construite.

Tableau 1. Coût de construction des sections d'essai

	Équipement de construction utilisé ^a			Coût total de construction (\$)	Longueur construite (km)	Coût total de construction (\$/100 m)	Coût moyen de construction (\$/100 m)
	D7H	E	G				
Fossé-V (HP) ^b	X		X	207	0,146	142	166
Fossé-V (OP) ^b	X		X	296	0,157	189	
Surélévation (HP)	X	X	X	481	0,138	349	349
Surélévation (OP)	X	X	X	481	0,138	349	
Surélévation-sur-enracinement (HP)	X	X	X	600	0,160	375	394
Surélévation-sur-enracinement (OP)	X	X	X	708	0,172	412	

^a D7H = boteur Caterpillar D7H; E = excavatrice Hitachi EX270LC; G = niveleuse Caterpillar 14G.

^b HP = pressions de pneu normales (élevées); OP = pressions de pneu optimisées (réduites).

Le design Surélévation de 0,5 m (figure 3) serait couramment utilisé dans des dépressions et autres zones mouilleuses où la chaussée doit être élevée au-dessus de la nappe phréatique.⁵ En général, les sections de route surélevées ne sont pas non plus compactées. Le coût moyen de construction des deux sections Surélévation était de 349 \$/100 m. Ce résultat concorde étroitement avec le coût de 373 \$/100 m pour la construction des sections surélevées de la route non vieillie. Les sections Surélévation avaient des surfaces de roulement de 5 m de largeur seulement, à cause de la difficulté à excaver suffisamment de remblai depuis les fossés tout en respectant les contraintes de largeur pour l'emprise.

Le design Surélévation-sur-enracinement est utilisé avec succès en Ontario dans des

situations où les sols des couches de forme sont très mouilleux, ou absents (c.-à-d. que l'enracinement repose sur la roche-mère) (figure 4). Les racines servent de renforcement et favorisent le drainage des matériaux surélevés. Lors de la construction de routes de ce genre, les souches devraient être coupées aussi basses que possible, puisque des souches hautes requièrent plus de matériaux de surélévation pour les couvrir et peuvent ressortir à travers la surface de roulement au fur et à mesure de la circulation. La hauteur

⁵ D'après l'expérience d'Alberta-Pacific avec les sols locaux, un relèvement de 0,5 m est adéquat pour assurer le drainage. Cependant, cette surélévation doit atteindre 1 m dans une partie de la zone soumise à son Forest Management Agreement, où les sols sont principalement constitués d'argile.

Figure 3. Profil transversal type d'une route à Surélévation, telle que construite.

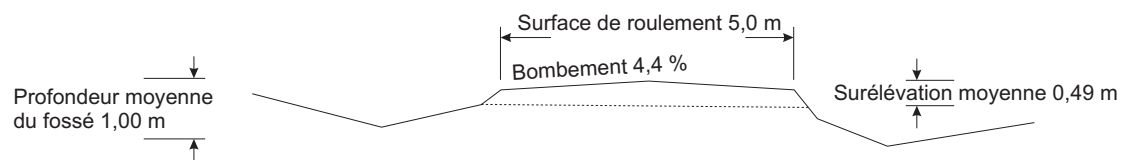
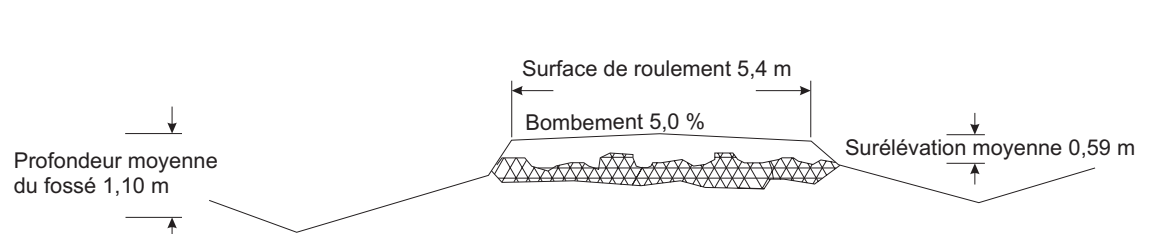


Figure 4. Profil transversal type d'une route à Surélévation-sur-enracinement, telle que construite.



moyenne de surélévation pour ces deux sections était de 0,59 m – environ 100 cm de plus que pour les sections surélevées sans enracinement.

À un coût de construction moyen de 394 \$/100 m, ces deux sections ont été les plus coûteuses à construire, mais moins que les sections équivalentes de la route non vieillie (419 \$/100 m). Cette réduction de coût peut refléter des efficacités développées par l'opérateur de l'excavatrice sur les sections non vieilles et utilisées sur ces sections. Malgré leur coût plus élevé, les sections surélevées sur enracinement pourraient être économiques comparativement à la technique d'Alberta-Pacific qui consiste à solidifier les zones mouilleuses problématiques au moyen d'une couche de rondins contigus, recouverts de remblai.

Le tableau 1 présente un sommaire du coût de construction des sections d'essai; on trouvera dans Bradley (2001) un compte rendu détaillé du procédé de construction routière d'Alberta-Pacific.

Optimisation de la construction des routes

Pour obtenir une productivité optimale des équipements, les dimensions, la masse et la puissance de ceux-ci devraient être bien adaptées aux exigences de la tâche. Dans le cas de la route d'essai vieillie, le bouteur Caterpillar D7H n'avait pas la puissance et la grosseur nécessaires pour dégager facilement certaines des grosses roches de la route. Cependant, cette même machine dépassait, semble-t-il, la puissance et la grosseur requises pour travailler les matériaux à texture fine de la route non vieillie. Ceci indique que cette grosseur de bouteur conviendrait bien pour construire des routes dans le terrain varié d'Alberta-Pacific.

Les techniques de construction peuvent contribuer au vieillissement en réduisant le décompactage qui résulte du soulèvement par le gel. Par exemple, la niveleuse laissait la route d'essai avec un bombement arrondi au lieu de lui donner sa forme finale avant le vieillissement. Ceci favorisait le vieillissement

de deux manières : la forme bombée, sans ornières, laissait écouler l'eau plus vite (développant ainsi moins de cristaux de glace durant l'hiver et séchant plus rapidement au printemps); et les matériaux les plus détachés de la surface par le gel étaient enlevés durant le formage final avant la mise en service.

Selon les professeurs en génie civil Krebs et Walker du Transportation Research Board (1979), le compactage de sols cohérents, près de leur teneur optimale en humidité, réduit à la fois la perte de résistance et l'augmentation de volume qui se produisent quand ces sols deviennent saturés par la pluie, l'action capillaire, ou l'action du gel. On peut donc présumer que le compactage de surface réduirait également le décompactage résultant du soulèvement par le gel, et ainsi contribuerait à l'efficacité du vieillissement.

Des précautions doivent être prises pour assurer un bon drainage des routes laissées à vieillir durant l'hiver, particulièrement si ces routes sont construites avec des sols très érodables. La planification du drainage devrait tenir compte de la possibilité d'accumulation des matériaux d'érosion dans les fossés et les ponceaux de drainage.⁶ Des mesures telles que la construction des fossés à une pente minimum de 0,5 % (pour prévenir l'envasement) et maximum de 3-5 % (pour limiter la canalisation), de même que l'usage fréquent de déflecteurs et de fossés de dérivation pour diriger le drainage dans la forêt à proximité, devraient être envisagées. Lors d'une inspection de la route non vieillie un an après sa construction, on a constaté beaucoup moins d'érosion des talus dans les fossés créés par une excavatrice avec une lame de formage que dans les fossés en V créés par un bouteur. Les problèmes d'érosion sur des routes laissées à vieillir sont aggravés par le manque de sur-

⁶ Alberta-Pacific a fait un essai avec une équipe d'entretien utilisant une pompe de chantier pour drainer, au besoin, l'eau des fossés emprisonnée par des accumulations de sédiments, plutôt que de creuser pour restaurer le drainage. Ceci peut être faisable et économique pour le transport à court terme dans des régions où les sols sont hautement érodables et les aires d'accumulation d'eau peu fréquentes. David Lloyd, Alberta-Pacific, communication personnelle, juin 1999.

veillance de la part du personnel de la compagnie. Il est habituellement recommandable d'empêcher le public d'utiliser les routes en vieillissement parce que les véhicules de passagers peuvent laisser des ornières dans la surface meuble et ainsi accélérer l'érosion. Des véhicules à faible pression au sol (p. ex. camionnettes équipées de chenilles au lieu de roues) peuvent accéder aux structures de drainage sur des routes en vieillissement fermées, sans causer d'orniérage excessif.

Propriétés du sol

Le fait de laisser vieillir la route d'essai avant de permettre la circulation a augmenté les densités du sol de façon significative. L'augmentation moyenne de densité sèche était de 5, 9 et 10 % respectivement, à des profondeurs de 10, 15 et 20 cm (tableau 2). L'augmentation de densité à la profondeur de 10 cm était comparable à celle de 3-5 % réalisée par le compactage sur la route non vieillie. Par contre, alors que le gain en densité

dû au vieillissement augmentait avec la profondeur, le compactage du terrain était très efficace près de la surface et avait peu d'effet à une profondeur de 20 cm sur la route non vieillie. L'augmentation plus faible observée près de la surface de la route vieillie est attribuée à l'ameublissement du sol causé par le soulèvement dû au gel. Peu de variation a été mesurée en densité sèche entre les différentes sections d'essai – toutes paraissaient avoir subi un vieillissement comparable.

Pour la section de route vieillie, les résistances des couches de forme mesurées avant la circulation étaient très constantes, avec un CBR moyen de 20 (variation 18-20). Ce n'était que légèrement inférieur au CBR⁷ moyen de 22 et de 24 pour les couches de forme des sections non vieillies, non compactées et compactées respectivement. En général, les valeurs CBR augmentent avec le

⁷ Lorsqu'estimé en utilisant le même taux de conversion DCP/CBR que dans l'analyse pour la route vieillie.

Tableau 2. Densité sèche de la route d'essai après la construction et après un an de vieillissement

	À la construction : densité sèche moyenne (g/cc)	Après vieillissement : densité sèche moyenne (g/cc)	Augmentation (%)	Augmentation moyenne (%)
Profondeur de 10 cm				5
Fossé-V	1,55	1,63	5	
Surélévation	1,57	1,64	4	
Surélévation-sur- enracinement	1,57	1,67	6	
Profondeur de 15 cm				9
Fossé-V	1,55	1,69	9	
Surélévation	1,56	1,68	8	
Surélévation-sur- enracinement	1,57	1,71	9	
Profondeur de 20 cm				10
Fossé-V	1,54	1,71	11	
Surélévation	1,56	1,70	9	
Surélévation-sur- enracinement	1,58	1,73	9	

temps à mesure que la route se densifie; cependant, le CBR des couches de forme diminuera dans des conditions humides ou mouilleuses (Truebe et Evans, 1994). Comme les deux routes d'essai sont demeurées relativement sèches durant les périodes de circulation, les résistances du sol devraient rester comparables, permettant des comparaisons utiles de l'orniérage.

Essai de circulation

Les conditions climatiques se sont détériorées pendant la période d'essai, débutant par des conditions d'automne modérées et finissant avec de faibles rafales de neige. La route d'essai, cependant, est demeurée relativement sèche tout au long de la période de circulation. L'indice FWI reflétait le refroidissement observé dans les conditions climatiques durant l'essai. Commenant environ à 15, le FWI local a chuté à 10 avec une pluie de 3 mm, et à 5 vers la fin de l'essai avec un refroidissement continu de température.

La masse totale en charge (MTC) des camions grumiers durant l'essai était en moyenne de 59,4 tonnes (bien en dessous du poids maximal permis de 62,5 t), et la charge utile moyenne était de 39,7 t (annexe I). Les pressions de pneu normales pour voie publique (HP) et les pressions optimisées (OP) utilisées par les camions chargés durant l'essai sont également présentées à l'annexe I. Seulement 11 % des camions avaient des systèmes CTI pouvant réduire la pression des pneus des roues directrices; le différentiel de pression entre les camions capables de régler la pression des pneus des roues directrices et ceux qui ne l'étaient pas était normalement inférieur à 69 kPa (10 psi).

Malheureusement, la route d'essai entière a été nivelée par erreur après 97 trajets aller-retour,

avant qu'aucune des sections n'ait dépassé la limite de profondeur d'ornièrerie fixée pour l'essai. Même si les sections Fossé-V et Surélévation-sur-enracinement (OP) n'auraient pas eu besoin de nivelage durant la période initiale de 250 passages, ce nivelage accidentel a eu pour effet d'augmenter de 8,33 \$/100 m les coûts de toutes les sections d'essai.

Efficacité du vieillissement et du gonflement des pneus sur le coût d'entretien de la route

La figure 5 compare le rapport coût/efficacité du vieillissement versus du compactage pour les sections d'essai Surélévation, en combinant les données de coût pour la route vieillie dans le présent essai avec les données de coût pour la route non vieillie dans l'étude précédente sur les routes d'accès nouvellement construites (Bradley, 2001). De même, la figure 6 montre le rap-

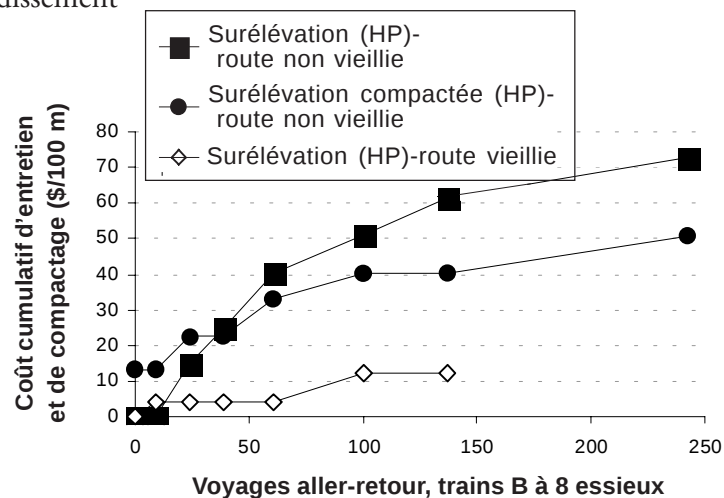


Figure 5. Influence de la technique de construction sur le coût d'entretien de la route – sections d'essai Surélévation (HP).

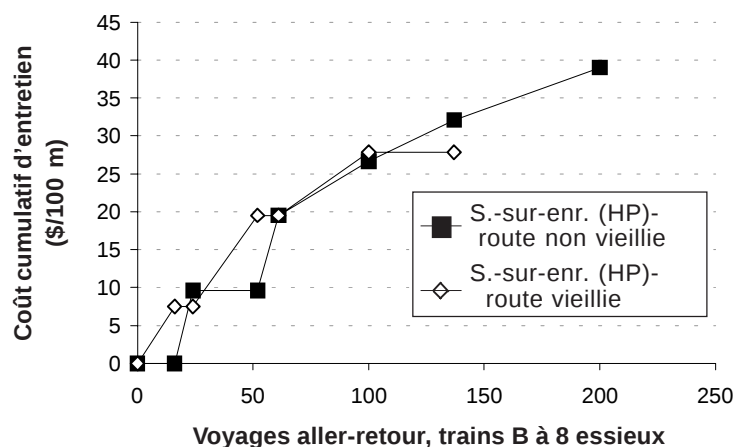


Figure 6. Influence du vieillissement sur le coût d'entretien de la route – sections d'essai Surélévation-sur-enracinement (HP).

port coût/efficacité du vieillissement des sections d'essai Surélévation-sur-enracinement, où aucun compactage n'a été effectué par une machine. Les figures 5 et 6 présentent des données provenant des sections d'essai où ont circulé des camions employant des pressions de pneu normales pour voie publique. Les figures 7 et 8 répètent ces mêmes comparaisons pour les sections d'essai où les camions avaient des pressions de pneu optimisées.

Les coûts cumulatifs des routes dans ces figures comprennent à la fois le coût du nivelage d'entretien et, le cas échéant, le coût du compactage, mais pas les autres coûts de construction (qui ont été supposés équivalents pour toutes les sections surélevées et par conséquent n'ont pas été inclus dans cette comparaison). Le coût de compactage des sections d'essai était approximativement de 130 \$/km.⁸ Il a été présumé que la construction de routes à l'avance pour les laisser vieillir ne coûtait pas plus cher que celle de

route utilisées immédiatement après leur construction.

La section Surélévation non vieillie, utilisée avec pression de pneu élevée, affichait le coût cumulatif d'entretien et de compactage le plus haut. Le vieillissement, plus encore que le compactage, a produit des économies d'entretien pour les sections surélevées, comparativement aux sections surélevées (HP) non vieillies et non compactées. Des tendances similaires ont été observées pour les sections surélevées vieillies où circulaient des camions avec pressions de pneu optimisées, par rapport à celles où les camions avaient des pressions normales pour voie publique; cependant, l'amélioration relative due au vieillissement par rapport au compactage était moindre.

Le vieillissement et le compactage de surface étaient tous deux économiques (c.-à-d. moins coûteux que l'utilisation d'une route nouvellement construite) après 40 à 60 voyages aller-retour. Comme les deux essais ont

été réalisés dans des conditions similaires mais non identiques (les charges des camions, les pressions de pneus et l'indice FWI différaient tous légèrement), nous faisons état de comparaisons relatives plutôt qu'absolues. Les résultats indiquent que les routes soumises à la circulation de pneus à pression optimisée atteindront des économies d'entretien similaires, qu'elles soient vieillies ou compactées en surface. La technique à utiliser dépend largement des machines et du temps de construction disponibles. Des économies additionnelles se produiront vraisemblablement si les routes surélevées destinées à vieillir sont d'abord

Figure 7. Influence de la technique de construction sur le coût d'entretien de la route – sections d'essai Surélévation (OP).

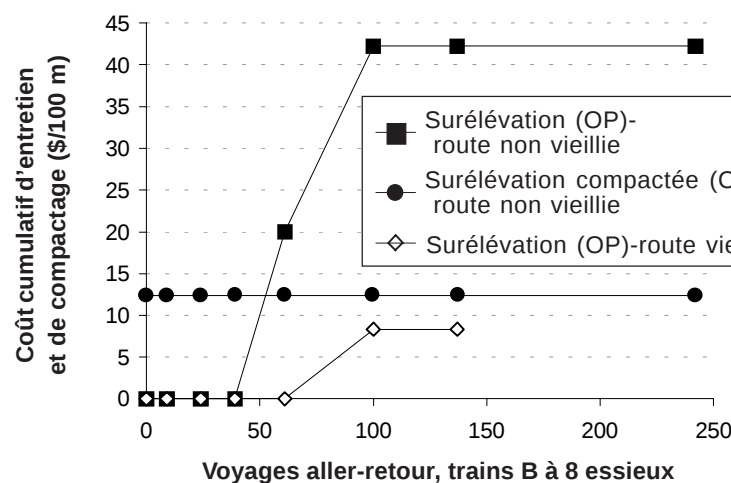
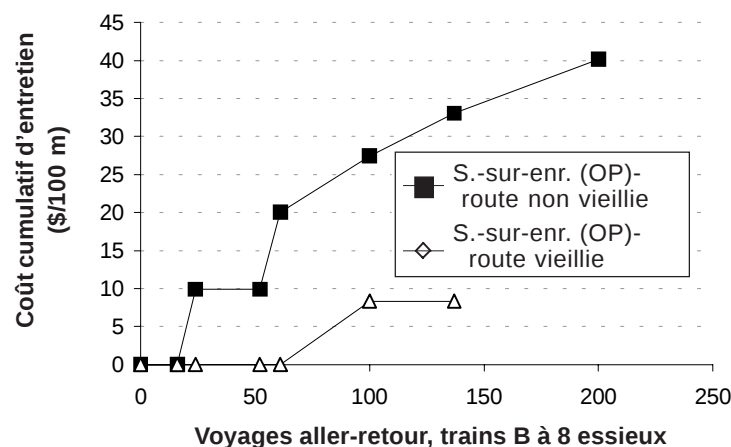


Figure 8. Influence du vieillissement sur le coût d'entretien de la route – sections d'essai Surélévation-sur-enracinement (OP).



⁸ Basé sur le temps réel de compactage seulement.

compactées (c.-à-d. construites en couches surélevées de 15 cm d'épaisseur compactées près de la teneur optimale en humidité) mais cette technique n'a pas été évaluée durant l'essai. Les résultats indiquent également que les routes surélevées soumises à des pressions de pneu élevées peuvent encourir des coûts beaucoup plus bas quand elles sont vieillies que quand elles sont compactées en surface; cependant, d'autres essais sur le terrain sont nécessaires pour quantifier la différence.

Les résultats présentés à la figure 6 indiquent que le vieillissement a semblé générer peu d'avantage pour la section soumise à une circulation avec pression de pneu élevée. Cependant, le vieillissement de la section Surélévation-sur-enracinement (OP) a produit quelques économies d'entretien (figure 8). Les coûts d'entretien pour la période initiale de la route⁹ auraient vraisemblablement été moindres si le nivelage prématuré n'avait pas eu lieu. D'autres essais terrain pourraient permettre d'identifier des économies plus importantes.

Les mêmes principes s'appliquent à la circulation sur des routes forestières où les charges de surface élevées provenant des camions grumiers causent une densification pendant toute la période initiale; cependant, dans des conditions de routes meubles, elles peuvent aussi produire de longues ornières profondes. Un précompactage par vieillissement (ou à l'aide d'un compacteur) peut renforcer la surface de la route suffisamment pour prévenir un enfoncement, un orniérage et un déplacement de sol excessifs. Conduire sur les bordures surélevées des ornières avec des camions

grumiers non chargés en utilisant des pressions de pneu optimisées offre un autre moyen de précompacter la surface de la route pour la circulation de camions chargés.¹⁰

L'amélioration résultant de l'utilisation de pressions de pneu optimisées variait considérablement selon le design de la route (tableau 3). Le coût d'entretien de base, pour la section à Fossé-V (HP), était de 8,33 \$/100 m (et 0,00157 \$/t de charge utile). La comparaison des coûts d'entretien encourus durant l'essai indique qu'on a dépensé 4,06 \$/100 m de moins pour le nivelage de la section surélevée (OP) que pour celui de la section surélevée (HP). Ces économies de 33 % étaient attribuables à l'utilisation de pressions de pneu optimisées. Et on a dépensé 19,53 \$/100 m de moins pour le nivelage de la section Surélévation-sur-enracinement (OP) que pour la même section (HP) – une économie de 70 %. Les sections à Fossé-V n'ont montré aucune différence dans le coût du nivelage d'entretien et peu de différence dans le taux d'orniérage. L'ordre de grandeur relatif de ces résultats est conforme aux résultats obtenus pour l'essai sur une route nouvellement construite. Dans les deux essais, l'optimisation

Note :

Compactage à la machine de sols cohérents à texture fine : L'intensité de la pression exercée par les charges en surface diminue rapidement avec la profondeur, particulièrement dans des sols cohérents, à texture fine. Lors du compactage de ces sols, c'est l'usage d'un compacteur aussi lourd que possible qui est le plus efficace et effectif; cependant, les compacteurs lourds peuvent causer un enfoncement et un orniérage excessifs et repousser le sol devant les roues. Par conséquent, le compacteur consomme plus d'énergie lors des premiers passages; autrement, il peut être nécessaire de procéder à un compactage préalable à l'aide d'une machine plus légère (Transportation Research Board, 1979).

⁹ D'après l'opinion de plusieurs entrepreneurs en construction de routes d'Alberta-Pacific, une route d'accès temporaire d'Alberta-Pacific requiert le passage d'approximativement 250 camions chargés pour atteindre un état dense et stable.

¹⁰ Une opération forestière près de Grande Prairie densifie ses routes forestières en circulant d'abord avec des camions chargés équipés de CTI, suivis plus tard par des camions chargés utilisant des pressions de pneus normales pour voie publique (Dennis Young, Weyerhaeuser Company Limited, communication personnelle, novembre 2001).

Tableau 3. Effet de l'optimisation de la pression des pneus sur les coûts d'entretien par nivelage durant l'essai

Design de route	Coût d'entretien de la section (HP) (\$/100 m)	Coût d'entretien de la section (OP) (\$/100 m)	Économies dues à l'utilisation de pressions de pneu optimisées	
			(\$/100 m)	(%)
Fossé-V	8,33	8,33	0,00	0
Surélévation	12,39	8,33	4,06	33
Surélévation-sur-enracinement	27,86	8,33	19,53	70

des pressions de pneu a entraîné les plus grandes économies sur les sections Surélévation-sur-enracinement, et les plus faibles sur les sections à Fossé-V.

Le nivelage accidentel a inutilement ameubli la surface de la route d'essai, accélérant ainsi la formation subséquente d'ornières. Le même phénomène apparaît clairement dans un essai du USDA Forest Service (Truebe et Evans, 1994) où un nivelage léger fréquent des sections d'essai a accéléré la formation d'ornières (et la fréquence de nivelage) bien au-delà de ce que le STP avait prévu si la surface de la route avait été laissée non perturbée pour se densifier avec la circulation. Il ne faut pas permettre le développement d'un orniérage excessif puisqu'il peut ralentir et/ou mettre en danger les véhicules et diriger l'humidité vers les couches inférieures de la route; cependant, la possibilité d'économiser sur le nivelage existe réellement. Un orniérage peu profond peut souvent être corrigé uniquement en variant les traces de roues des véhicules (Keller, 1993; Bradley, 1996) et, au besoin, par l'utilisation judicieuse du nivelage.¹¹

Modélisation de la profondeur des ornières

L'annexe 1 quantifie le changement théorique dans les dommages à la route d'accès quand un train double de type B à huit essieux, portant la charge moyenne de

l'essai, circule avec des pressions de pneu optimisées. Cette analyse montre que l'optimisation des pressions cause une réduction de 4,63 unités ESAL par voyage aller-retour. Ceci correspond à un orniérage 55 % plus lent si le groupe entier de camions optimise les pressions de pneus. Cela signifie aussi que la fréquence de nivelage sera réduite de 55 %, en supposant que le nivelage débute uniquement quand la profondeur moyenne des ornières atteint une profondeur de déclenchement prédéterminée.

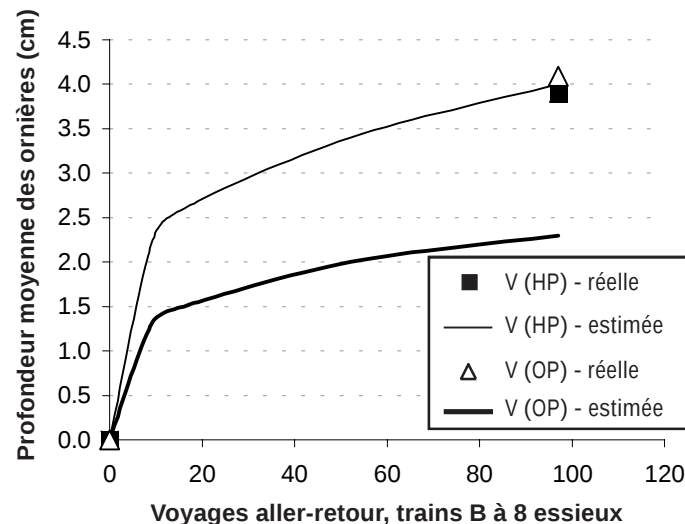
FERIC a utilisé le modèle d'orniérage STP pour prévoir le développement des ornières dans les sections d'essai, préalablement au nivelage durant l'étude. Les prévisions ont été représentées sur graphique et comparées aux mesures moyennes d'orniérage observées (figures 9 et 10). On n'a pas tenté de faire des prévisions pour les sections Surélévation-sur-enracinement, parce que la couche de racines confère aux matériaux sus-jacents une résistance non connue.

Le modèle STP a prévu avec une fiabilité raisonnable la profondeur moyenne des ornières dans les sections Fossé-V. Ces prévisions étaient à moins de 1 mm de la moyenne pour la section à Fossé-V (HP) et à moins de 18 mm pour la section (OP) après 97 voyages aller-retour. On n'a pas tenté de prévoir la profondeur des ornières après le nivelage parce que la résistance de la route aurait changé par rapport aux conditions de la route telle que construite, et qu'aucune

mesure au DCP n'a été prise pour quantifier ce changement.

La profondeur moyenne des ornières pour la section Surélévation (OP) était sur-

Figure 9.
Profondeurs
réelles et prévues
des ornières pour
les sections
d'essai vieilles à
Fossé-V.



¹¹ Le nivelage localisé est un procédé selon lequel les sections susceptibles de nivelage sont formellement identifiées d'après certaines mesures de performance (p. ex. rugosité de la route, vitesses de déplacement), et programmées pour entretien selon les priorités définies par l'utilisateur. FERIC a récemment lancé le programme informatique « Opti-Grade » pour faciliter le procédé de nivelage localisé (Brown et Provencher, 2001).

estimée de 63 mm après 97 voyages aller-retour. Après 9 voyages aller-retour, de profondes ornières localisées (ayant en moyenne 48 mm) se sont développées dans la section Surélévation (HP) et un nivelage est devenu nécessaire. Le STP a sous-estimé de 24 mm le développement de ces ornières, et le nivelage a rendu non valide toute estimation à plus long terme pour cette section.

Ces résultats s'accordent avec les conclusions pour la route nouvellement construite où les estimations pour les sections à Fossé-V étaient fiables mais les estimations pour les sections Surélévation ne l'étaient pas. Comme pour la route non vieillie, la raison de l'imprécision dans les estimations pour la section Surélévation pourrait être la difficulté éprouvée par les conducteurs à varier leurs traces de roues pour abaisser les bordures soulevées des ornières, à cause de la largeur réduite de la surface de roulement (seulement 5 m) et de la profondeur des fossés sur ces sections. Bien qu'il soit possible de réduire les coûts de construction en permettant des surfaces de roulement plus étroites, cette pra-

tique peut être non économique si elle augmente les coûts d'entretien. De plus, Larcombe (1999) estime que le fait de rétrécir de 6 m à 5 m les routes forestières à deux voies réduira les vitesses moyennes de déplacement (d'approximativement 3 km/h dans les conditions de la Nouvelle-Zélande).

Étant donné que le STP a prévu raisonnablement le développement des ornières sur les routes à Fossé-V, la figure 11 présente un exemple d'analyse montrant comment le STP peut être employé dans une opération forestière pour aider à évaluer les moyens d'améliorer l'efficacité du

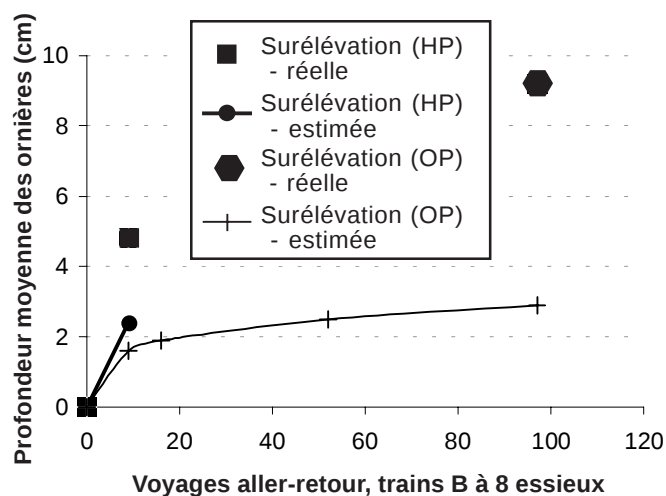


Figure 10. Profondeurs réelles et prévues des ornières pour les sections d'essai Surélévation vieilles

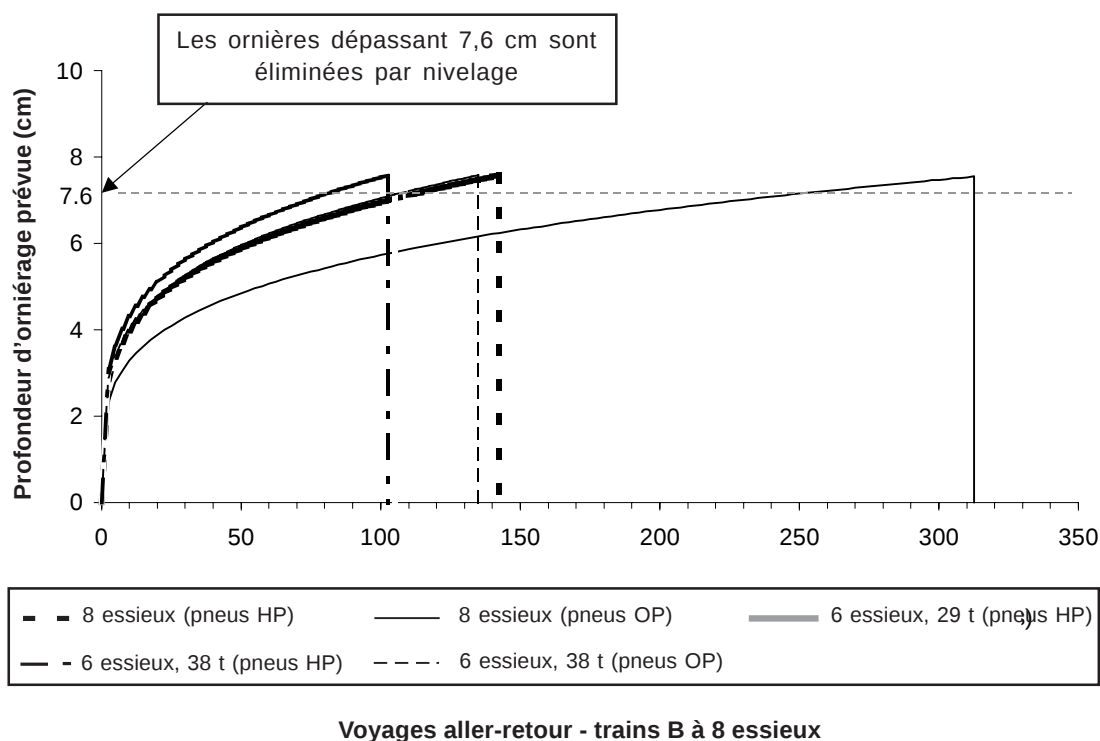


Figure 11. Influence de la configuration des camions grumiers et de la pression de gonflement sur l'orniérage estimé par le modèle STP.

camionnage. Supposons qu'une compagnie forestière envisage d'augmenter de 29 à 38 t la charge utile de ses camions grumiers à 6 essieux (c.-à-d. tracteur tandem/remorque tridem), ou de remplacer le groupe de camions par des trains doubles de type B à haute capacité, capables de transporter une charge utile de 42,8 t. Afin de contrebalancer certains des dommages additionnels à la route (ornières) qui peuvent en résulter, la compagnie envisage également d'optimiser la pression des pneus sur les camions par l'installation de systèmes CTI. Le passage de charges plus lourdes peut nécessiter une amélioration des ponts, mais ceci n'a pas été considéré dans l'analyse.

Dans l'exemple, il a été présumé que les pressions des pneus étaient de 655 kPa (95 psi) pour tous les modes de gonflage à pression élevée, et les pressions optimisées conformes aux recommandations de la Tire & Rim Association pour des vitesses de déplacement allant jusqu'à 50 km/h.

Avec une charge utile de 29 t, l'équivalence ESAL pour le voyage aller-retour d'un camion à 6 essieux est estimée à 7,7 et 3,9 unités ESAL, pour des modes de gonflement des pneus à pression élevée et optimisée, respectivement. Avec une charge utile plus lourde de 38 t, l'équivalence ESAL pour le voyage aller-retour d'un camion à 6 essieux augmente à 10,4 et 7,9 unités ESAL pour les pressions élevée et optimisée. Comme pour la majorité des trains B d'Alberta-Pacific, les pressions de pneu des roues directrices n'ont été optimisées dans aucune des configurations. La route de l'étude était une route forestière d'accès dont la couche de forme avait un CBR de 20 (c.-à-d. équivalent à la résistance moyenne des sections d'essai à Fossé-V). Les comparaisons de l'aptitude des véhicules à préserver la route ont été basées sur la charge utile qui pouvait être transportée avant le début du nivelage à une profondeur d'ornière de 7,6 cm, étant donné que la résistance de la route demeurerait constante.

Le fait d'augmenter à 38 t la charge utile des camions à 6 essieux n'a pas entraîné davantage de dommages à la route parce que

l'augmentation des dommages par voyage est compensée par une réduction du nombre de voyages. Si ces camions à 6 essieux lourdement chargés utilisent des pressions de pneu optimisées, le bénéfice prévu est une augmentation de 32 % dans l'intervalle de nivelage. Le fait de passer à des trains B à 8 essieux réduit encore davantage le nombre de voyages pour un volume total transporté, et par conséquent augmente encore plus l'intervalle de nivelage. Parmi les bénéfices additionnels de l'utilisation des trains B, mentionnons une moins forte congestion de la circulation sur les routes, des délais d'attente moins longs, une plus grande sécurité (comparativement aux camions à 6 essieux de 38 t), et le moins grand nombre de camions et de conducteurs requis.¹² C'est l'utilisation de systèmes CTI sur les trains B, comme l'a fait Alberta-Pacific, qui offre le plus grand avantage – une augmentation de plus de 200 % dans l'intervalle de nivelage. Alors que des précipitations réduiraient la résistance de la route et les intervalles de nivelage, et concentreraient l'entretien sur les pires sections, le bénéfice relatif de l'optimisation des pressions de pneu augmente généralement sur les routes plus meubles. La réduction des dommages résultant de l'utilisation de pressions de pneu optimisées est moindre pour des routes plus résistantes ou pour des routes à très faible volume de circulation (Bradley, 1997). Préalablement à la mise en application, les compagnies forestières devraient évaluer l'aspect économique de l'utilisation de systèmes CTI; les bénéfices sont nombreux, cependant l'investissement dans cette technologie peut être assez considérable. Les coûts de possession et d'utilisation au Canada de systèmes CTI sur les camions grumiers de type trains B à 8 essieux, à l'exclusion des profits, des frais généraux et des économies d'entretien du véhicule, ont été estimés à 3,34 \$/h (Jokai et Bradley, 2000).

¹² Attirer et garder des conducteurs de camions expérimentés et compétents est une préoccupation pressante pour la plupart des opérations forestières canadiennes.

Le modèle STP semble être un outil utile pour modéliser l'effet de changements dans les variables de circulation sur le développement d'ornières dans les routes d'essai vieilles et non vieilles à Fossé-V, pour les deux types de sols considérés. D'autres essais sont recommandés pour confirmer son application pour la grande variété de types de sols et de conditions climatiques rencontrées dans les opérations canadiennes de camionnage des billes. Cependant, une fois la confiance établie dans le modèle, il pourra être utilisé dans plusieurs applications éventuelles.

Performance globale

Le tableau 4 classe la performance des sections d'essai de la route vieillie qui ont été soumises à la circulation de véhicules avec pressions de pneu optimisées (dans les conditions de transport d'Alberta-Pacific). L'évaluation de performance pour les trois designs a été basée sur une combinaison du coût de la route et des exigences imposées par les conditions climatiques et les conditions du sol durant l'essai.

Comme dans l'analyse pour la route nouvellement construite, la section Fossé-V a été classée comme le meilleur design d'après sa bonne performance et son coût combiné le plus bas. Les sections Surélévation de 0,5 m et Surélévation-sur-enracinement ont toutes deux subi des problèmes localisés d'orniérage, et leurs besoins de nivelage étaient similaires. Le coût de construction plus élevé du design Surélévation-sur-enracinement lui a valu le classement « le moins approprié ». Tel que discuté, le

vieillessement a augmenté la densité de surface de la route de 5,5 % (et de 9,8 % à une profondeur de 20 cm), et il a amélioré considérablement la performance de ces sections par rapport aux routes utilisées immédiatement après leur construction. Le compactage a augmenté la densité de surface des sections comparables de routes non vieilles à Fossé-V et à Surélévation de 3 à 5 % (pourcentage inférieur à la profondeur de 20 cm), et a eu pour résultat un orniérage plus lent et, dans le cas de la section surélevée, un entretien moins fréquent.

La performance des designs d'essai et par suite, leur classement, auraient vraisemblablement été différents dans des conditions de sol et/ou de drainage différentes. Si les sites avaient été situés dans des dépressions humides, il aurait davantage été nécessaire d'élever le niveau, et les designs Surélévation et Surélévation-sur-enracinement auraient même pu se révéler supérieurs. Étant donné que l'entretien d'une route forestière est fréquemment basé sur les sections problèmes, l'emploi de designs favorisant un meilleur drainage dans ces sections devrait réduire la fréquence des réparations correctives et les temps morts associés.

Conclusions

Les coûts de construction des trois designs de route étaient comparables à ceux rapportés pour la route d'essai nouvellement construite, la section à Fossé-V étant la moins chère et la section Surélévation-sur-enracinement la plus chère. Les coûts moyens de construction des sections Fossé-V,

Tableau 4. Classement de la performance des sections de route avec circulation sur pneus à pression optimisée

Design de route	Coût moyen de construction (\$/km)	Coût d'entretien par nivelage (\$/km)	Coût combiné de la route (\$/km)	Classement de la performance
Fossé-V	1 660	83	1 743	le meilleur
Surélévation de 0,5 m	3 490	83	3 573	non approprié
Surélévation-sur-enracinement	3 940	83	4 023	le moins approprié

Surélévation et Surélévation-sur-enracinement étaient respectivement de 166, 349 et 394 \$/100 m. Les coûts totaux de construction pour chaque design peuvent être estimés en incluant tous les coûts spécifiques au site qui sont reliés à la construction (p. ex. coûts de déblais ou de remblais majeurs de terre, transport des équipements, ponceaux de drainage et affiches, ou coûts additionnels encourus par la construction hâtive de la route pour permettre le vieillissement avant usage).

Le coût d'entretien de chaque section d'essai durant la période initiale n'a pas été déterminé parce que la route d'essai a été accidentellement nivelée et que les conditions climatiques se sont détériorées, mettant fin prématurément à l'essai. Cependant, le STP prévoit que les sections à Fossé-V n'auraient pas normalement demandé de nivelage durant cette période. Il a été observé que les ornières se formaient plus lentement dans les sections à Fossé-V que dans les deux autres sections. Comme l'entretien de routes forestières d'accès est habituellement basé sur les sections problèmes, l'emploi de designs qui se drainent bien et fournissent des routes résistantes dans les parties humides peut réduire de façon significative les coûts d'entretien ainsi que les temps d'arrêt du transport. Les sections d'essai des routes nouvelles à Fossé-V ont montré des niveaux élevés d'érosion des fossés et de sédimentation durant l'hiver. Le coût de nettoyage des fossés et des ponceaux d'Alberta-Pacific (et la réparation des aires inondées) pourrait être réduit si les parois des fossés étaient adoucies à l'aide d'une lame de formage montée sur une excavatrice dans les régions de sols à texture fine, hautement érodables.

Le vieillissement a duré approximativement un an après la période de construction et a visiblement densifié la route d'essai – la densité sèche moyenne a augmenté de 5, 9 et 10 % à des profondeurs de 10, 15 et 20 cm, respectivement. Cette densification de la route préalablement à la circulation a amélioré la performance des sections à niveau surélevé. Les sections vieilles Surélévation (OP) et Surélévation-sur-enracinement (OP)

ont eu un bien meilleur comportement que les sections comparables de l'étude sur les routes nouvellement construites. Les coûts d'entretien des sections vieilles Surélévation (OP) et Surélévation-sur-enracinement (OP) étaient inférieurs à ceux des sections comparables (OP) non vieilles, après le passage des 40 et 20 premières charges de camion, respectivement. Comme pour le compactage par les machines, cependant, le vieillissement de la section à Fossé-V (OP) n'a apporté aucune économie de nivelage par rapport à la section utilisée immédiatement après construction. En conclusion, le vieillissement et le compactage de surface ont amélioré d'un pourcentage similaire la performance des sections Surélévation et Surélévation-sur-enracinement, et les deux techniques devraient se révéler économiques pour toutes les routes sauf celles à très faible volume de circulation. Par contre, le design de route à Fossé-V utilisé par Alberta-Pacific ne semble pas bénéficier suffisamment du vieillissement ou du compactage pour en justifier le coût additionnel. Par conséquent, s'il est faisable opérationnellement, les sections de route Surélévation et Surélévation-sur-enracinement devraient être construites à l'avance dans les aires humides, en utilisant les sentiers de débardage pour le passage des machines. Les équipements forestiers devraient cependant éviter de circuler sur ces sections mouilleuses, en vieillissement, faciles à endommager. L'été suivant, les routes à Fossé-V devraient être construites sur le terrain bien drainé entre ces aires mouilleuses, et les sections de route surélevées réparées au besoin.

Les techniques de construction peuvent contribuer au vieillissement en réduisant le décompactage qui résulte du soulèvement par le gel, p. ex. en laissant les routes à vieillir durant l'hiver avec un bombement arrondi et en nivelant, lors de la mise en forme finale, les matériaux de surface détachés. Les routes vieilles devraient être construites en tenant bien compte de l'érosion et de la possibilité de perturbation du drainage par les accumulations de sédiments.

Comme dans l'analyse pour la route nouvellement construite, la section Fossé-V (OP) a été classée comme le meilleur design d'après sa bonne performance et son coût combiné le plus bas (1743 \$/km). Les sections Surélévation et Surélévation-sur-enracinement ont toutes deux connu des problèmes localisés d'orniérage, et leurs besoins de nivelage ont été similaires. Le coût combiné plus élevé de la section Surélévation-sur-enracinement lui a valu le classement « le moins approprié ». La performance des designs d'essai et par suite, leur classement, auraient vraisemblablement été différents dans des conditions de sol et/ou de drainage différentes.

Théoriquement, l'optimisation des pressions de pneu réduit de 55 % le potentiel de dommages par les camions d'essai chargés. La réduction des dommages résultant de pressions de pneu optimisées est davantage perceptible sur les sections faibles, où les ornières se forment facilement. L'utilisation de pressions de pneu optimisées a eu pour résultat une baisse de 33 % et de 70 % de l'entretien par nivelage pour les sections Surélévation et Surélévation-sur-enracinement, respectivement. Il n'y avait pas de différence dans l'entretien, et peu de différence dans le taux d'orniérage, entre les sections à Fossé-V pour circulation avec des pressions de pneu optimisées ou élevées. L'ordre de grandeur relatif de ces résultats reflète l'essai sur les routes non vieilles, dans lequel on obtenait le moins de bénéfice avec les pressions de pneu optimisées sur les sections à Fossé-V résistantes et le plus grand bénéfice sur les matériaux de remblai relativement non compactés des sections Surélévation-sur-enracinement. Ces conclusions s'accordent bien avec la théorie suggérant que les bénéfices de pressions de pneu réduites sont le plus élevés dans des conditions de route meuble, où on a le plus grand besoin de traction et de flottation.

Les entrepreneurs routiers d'Alberta-Pacifique étaient familiers avec la construction de

routes à Fossé-V et travaillaient efficacement, préparant des routes à surface de roulement ferme, de pleine largeur. Cependant, la qualité de la surface de roulement et la productivité étaient toutes deux plus faibles pour les routes à surface de roulement surélevée. C'est à cause du compactage inadéquat de la partie surélevée et de la difficulté à excaver assez de matériel des fossés pour produire un profil de route de hauteur et de largeur suffisantes (tout en respectant les contraintes de largeur pour l'emprise). Comme l'expérience locale suggère que des hauteurs surélevées de 0,5 m dans des sols silteux et de 1 m dans des sols argileux sont suffisantes pour assurer le drainage, et comme il était difficile de trouver assez de matériel pour produire les surélévations de 0,5 m des sections d'essai, il est conclu que la hauteur surélevée ne devrait pas dépasser 1 m (à l'exception des sections de remblai). Cependant, des réductions de hauteur peuvent être possibles quand on construit les surélévations avec des matériaux favorisant un meilleur drainage.

Le STP est un modèle d'orniérage empirique développé par le USDA Forest Service. Le modèle a prévu avec une précision raisonnable la formation d'ornières pour les deux sections d'essai à Fossé-V, mais l'a sous-estimée pour la section d'essai vieillie Surélévation (OP). Le nivelage requis après le passage de neuf camions seulement a empêché de faire des prévisions d'ornières à long terme pour la section vieillie Surélévation (HP). La sous-estimation de la profondeur des ornières sur la section Surélévation (OP) peut être le résultat de la faible densité du sol, et du fait que les largeurs étroites de la route concentraient les traces de roues – des conditions très différentes de celles utilisées lors du développement du modèle. Afin d'appliquer le STP aux sections de route surélevées, la qualité de la surface de route doit être maintenue et, possiblement, le facteur d'estimation de la profondeur des ornières prévue par le STP doit être augmenté dans le cas des sections surélevées.

Mise en application

Les résultats indiquent que les routes Surélévation et Surélévation-sur-enracinement soumises à la circulation avec pressions de pneu optimisées offriront des économies similaires en entretien, qu'elles soient vieilles ou compactées en surface. La technique à utiliser dépend largement des machines et du temps de construction disponibles. Les compagnies utilisant des véhicules avec pressions de pneu optimisées devraient élaborer des directives concernant l'utilisation la plus économique de ces techniques.

Des comparaisons de performance devraient être faites entre les designs Surélévation et Surélévation-sur-enracinement dans des conditions de routes mouilleuses afin d'établir où chacune s'applique le mieux. Un orniérage excessif a été observé là où la largeur de la surface de roulement avait été réduite durant la construction des sections surélevées. Une largeur minimale de 6,0 m devrait être conservée pour la surface de roulement afin d'assurer aux camions un espace adéquat pour varier leurs traces de roues et corriger les ornières existantes; ceci réduira également le risque d'accidents et maintiendra les vitesses de déplacement sur ces sections.

La productivité de construction et la qualité de la surface de roulement pour les designs surélevés peuvent être améliorées de plusieurs façons, entre autres :

- En s'assurant que les arbres sont coupés sur la pleine largeur de l'emprise.
- En plaçant les débris organiques provenant de la ligne de fossés dans l'espace entourant les arbres qui bordent l'emprise.
- En utilisant à la fois un boueur et une excavatrice pour la construction, mettant à profit le mieux possible les points forts de chacun (p. ex. en transportant et en épandant les matériaux de surélévation à l'aide du boueur tout en utilisant l'excavatrice pour creuser et trier les matériaux inacceptables et former les côtés des fossés.

En outre, plusieurs entrepreneurs routiers ont souligné l'importance d'empêcher les matériaux de surélévation d'être mouillés par la pluie durant la construction parce que l'humidité, une fois scellée dans la route, peut y demeurer et détériorer la résistance du sol pendant la durée entière de la route, qui est de deux ans. Des mesures opérationnelles en ce sens comprennent :

- L'établissement d'un système d'alerte de pluie fiable pour les opérations en forêt.
- L'utilisation de véhicules à faible pression au sol pour transporter les entrepreneurs routiers aller-retour jusqu'au site de construction. Ceci devrait leur donner davantage de temps pour sceller les matériaux de surélévation exposés, en évitant la nécessité de quitter immédiatement le site dans des camions réguliers dès que la pluie commence à rendre molle et glissante la surface des routes à texture fine.
- L'utilisation de chaux ou de chaux vive pour assécher et renforcer les sections surélevées qui ont été trempées.

Les mesures de profondeur des ornières prises dans cet essai et certains autres ont permis de constater que le nivelage peut accélérer le développement des ornières en empêchant la densification de la croûte de surface de la route. Des techniques telles que la correction des ornières par des camions non chargés équipés de CTI et un nivelage localisé judicieux aideront à prolonger les intervalles de nivelage et à tirer pleinement parti de la densification de la surface qui se produit avec le temps et la circulation. L'emploi d'accessoires de compactage remorqués qui referment et compactent les surfaces de route après le nivelage devrait être envisagé. Ces unités peuvent également offrir un moyen économique de compacter une route préalablement à son vieillissement et de réduire ainsi les pertes de densité dues au soulèvement par le gel.

Le vieillissement des routes construites de sols hautement érodables (p. ex. silts) peut occasionner des blocages des fossés et des ponceaux de drainage par les sédiments. Les

compagnies qui envisagent cette méthode devraient adopter des pratiques qui réduisent l'érosion au minimum et empêchent les sédiments d'atteindre les structures de drainage et les cours d'eau. Là où les sols sont érodables et où des sédiments excessifs sont inacceptables, une excavatrice utilisant une lame de formage devrait être utilisée pour reformer les fossés des routes de type Fossé-V. Il est recommandé de bloquer l'accès aux routes en vieillissement afin de réduire l'érosion causée par l'orniérage de surface dû au passage de véhicules publics. En circulant sur des routes meubles en vieillissement, les équipes d'entretien du drainage devraient éviter de faire des ornières, ce qui peut demander l'utilisation de véhicules à faible pression au sol. Une comparaison devrait être faite entre l'usage d'équipements mobiles de pompage pour drainer les accumulations majeures d'eau dans les fossés, et l'utilisation d'excavatrices pour continuellement rétablir le drainage sur les routes de camionnage à usage temporaire.

Le modèle d'orniérage STP semble être un outil utile pour modéliser l'effet de changements dans les variables de circulation sur le développement d'ornières dans les routes d'essai à Fossé-V. D'autres essais sont recommandés pour confirmer son application dans une plus grande variété de types de sols et de conditions climatiques, et pour prévoir la formation des ornières après le nivelage. Des essais sont également souhaitables pour confirmer et/ou ajuster le modèle en vue de son utilisation pour des sections surélevées.

Références

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 1990. Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing. 15th ed. Washington, D.C.
- Barber, V.C.; Odum, E.C.; Patrick, R.W. 1978. The deterioration and reliability of pavements. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss. Technical Report S-78-8. 155 p.
- Bradley, A. H. 1996. Trial of a central tire inflation system on thawing forest roads. FERIC, Vancouver, C.-B. Technical Report TR-116. 27 p.
- Bradley, A. H. 1997. The effect of reduced tire inflation pressures on road damage: a literature review. FERIC, Vancouver, C.-B. Special Report SR-123. 37 p.
- Bradley, A. H. 2001. Évaluation de designs de routes forestières d'accès pour utilisation par des camions grumiers équipés de CTI – Phase I : routes d'accès nouvellement construites. FERIC, Vancouver, C.-B. Rapport Avantage Vol. 2, No 53. 16 p.
- Brown M; Provencher, Y. 2001. Improving road quality with focused daily maintenance. Paper 01-0237. *Dans* Proceedings of the 80th Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington, D.C. Janvier 2001. 7 p.
- Jokai, R; Bradley, A.H. 2000. Ownership and operating cost analysis of log trucks equipped with CTI systems or TPCS. FERIC, Vancouver, C.-B. Rapport Avantage Vol. 1, No 30. 16 p.
- Keller, R. 1993. Operational testing of central tire inflation systems proves the benefits of low pressure in logging operations. Society of Automotive Engineers, Warrendale, Penn. SAE Technical paper 933056. 6 p.
- Larcombe, G. 1999. Forest roading manual. LIRO Forestry Solutions. Logging Industry Forestry Organisation Rotorua, Nouvelle-Zélande. Janvier 1999. 404 p.
- Quigley, R. 1978. Compaction-strength-stabilization properties of weathered surface clays of southwestern Ontario. Ontario Ministry of Transportation and Communications. Downsview, Ont. 36 p.
- Tire and Rim Association Inc. 1999. 1999 Year book. Copley, Ohio. 436 p.
- Transportation Research Board, Commission on Sociotechnical Systems, National Research Council, 1979. Compendium 10. Compaction of roadway soils. Washington, D.C. 249 p.
- Truebe, M.; Evans, G. 1994. Lowell surfacing thickness design test road: Final report. USDA Forest Service, Pacific Northwest Region, Portland, Ore. Report Number FHWA-FLP-94-008. 95 p.
- Whitcomb, W.G.; Yapp, M.T.; Myers, M. 1990. Aggregate surfacing design guide: Final report. ARE Inc., Engineering Consultants. Contract 53-04H1-8-6230. For the USDA Forest Service, Portland, Ore. 34 p.

Remerciements

L'auteur désire remercier l'Alberta Department of Forestry, Lands, and Wildlife pour son soutien financier au projet; il aimerait également exprimer sa reconnaissance pour leur contribution aux individus et compagnies dont les noms suivent : Richard Tourand, Al Fisher, David Lloyd et Bob Nicol, Alberta-Pacific Forest Industries Inc.; Emery Gorman, Green Country Resource Managers; Ray Vincent, Allen Burnett et Guy Lofstrand, opérateurs de machinerie de construction; Ron St. Jean, Rocklake Enterprises Ltd.; Dan Andersson (étudiant d'été), Colin Blair, Brian Bulley, Dick Webb, Rob Jokai et Eric Amlin, FERIC; Tom Moore et Gary Evans, USDA Forest Service; Dr Robert Douglas, autrefois de l'Université du Nouveau-Brunswick.

ANNEXE I

Gonflement des pneus et charges à l'essieu pour les véhicules circulant sur la route d'essai

Groupe d'essieux	Camions chargés		Camions non chargés - charge moyenne sur le groupe d'essieux (t)
	Pression moyenne de gonflement des pneus (HP/OP) (kPa) (psi)	Charge moyenne sur le groupe d'essieux (t)	
Essieu directeur (1)	655/648	95/94	5,40
Essieux moteurs(2)	648/372	94/54	16,72
Essieux avant de la remorque (3)	641/379	93/55	21,67
Essieux arrière de la remorque (2)	641/379	93/55	15,57
Total			59,36 ^a
			19,66 ^b

^a MTC.

^b Poids à vide.

Effet du gonflement des pneus et de la charge à l'essieu sur les équivalences par essieu pour les véhicules circulant sur la route d'essai

	Essieu directeur	Essieux moteurs tandem	Essieux avant triples de remorque	Essieux arrière tandem de remorque	Nombre total d'unités ESAL	Unités ESAL par aller-retour	Changement dans le nombre d'unités ESAL par aller-retour (%)
Mode 1 – pressions de pneu normales pour voie publique (HP)							
En charge							
Pression (kPa)	655	648	641	641			
Charge (t)	5,4	16,7	21,7	15,6			
Facteur d'équivalence	0,90	2,25	2,32	1,90	7,37		
Mode 2 – pressions de pneu optimisées (OP)							
En charge							
Pression (kPa)	648	372	379	379			
Charge (t)	5,4	16,7	21,7	15,6			
Facteur d'équivalence	0,88	0,62	0,68	0,56	2,74		
Modes 1 et 2 (HP et OP)							
À vide							
Pression (kPa)	648	372	379	379			
Charge (t)	5,4	6,3	8,0	0,0			
Facteur d'équivalence	0,87	0,08	0,09	0,00	1,04		
Nombre moyen d'unités ESAL par voyage aller-retour pour les véhicules à pressions de pneu élevées dans l'essai						8,41	
Nombre moyen d'unités ESAL par voyage aller-retour pour les véhicules à pressions de pneu optimisées dans l'essai						3,78	(-55)
Charge utile (t)	39,7		Poids à vide	19,7	MTC (t)	59,4	

ANNEXE II

Sommaire des propriétés du sol et classification

Échantillon	Limites d'Atterberg		Composition ^a		Système unifié de classification de sols	Classification comme matériaux de forme pour voie publique ^c
	Limite de liquidité (%)	Indice de plasticité (%)	Sable (%)	Particules fines ^b (%)		
Fossé-V (HP)	22,4	non-plastique	54	10	Sable de qualité irrégulière, non plastique (SP)	Bon (A-2-4)
Fossé-V (OP)	17,8	4,3	48	42	Sable silteux très fin, faible plasticité (ML)	Médiocre à mauvais (A-4)
Surélévation (HP)	15,3	non-plastique	83	16	Sable de qualité irrégulière, non plastique (SP)	Bon (A-2-4)
Surélévation (OP)	15,8	non-plastique	77	17 (13 % silt)	Sable de qualité irrégulière, non plastique (SP)	Bon (A-2-4)
Surélévation-sur-enracinement (HP)	15,8	2,4	50	49 (27 % silt)	Sable silteux très fin, faible plasticité (ML)	Médiocre à mauvais (A-4)
Surélévation-sur-enracinement (OP)	14,8	0,8	52	25	Sable silteux très fin, faible plasticité (ML)	Médiocre à mauvais (A2-4 ou A-3)

^a Le gravier et les cailloux constituent la balance des échantillons de sol, p. ex. l'échantillon Fossé-V (HP) contient 54 % de sable, 10 % de silt et d'argile, et 36 % de gravier et de cailloux.

^b Teneur de silt et d'argile.

^c D'après l'AASHTO (1990).

ANNEXE III

Glossaire

- Charge équivalente par essieu simple (ESAL) :** Unité standard utilisée pour décrire le potentiel de dommages à la route causés par une charge sur essieux multiples, comparativement au potentiel de dommages causés par une charge de 18 000 lb sur un essieu simple avec montage de roues jumelées. Plus le nombre total d'unités ESAL d'un véhicule est élevé, plus ce véhicule est susceptible de produire des ornières dans des routes forestières non revêtues.
- Granulométrie du sol :** Composition, en poids, des particules de diverses dimensions qui constituent le sol. Les sols identifiés comme « à texture fine » sont principalement composés de très petites particules (argile, silt et sable fin).
- Indice de risque d'incendie (FWI) :** Estimation des conditions de sécheresse de la forêt, calculée à partir de l'indice FWI de la journée précédente et d'une variété de mesures courantes des conditions climatiques, entre autres la précipitation, la vitesse du vent, la température et l'humidité relative.
- Indice portant californien (CBR) :** Descripteur largement accepté de la résistance du sol, qui peut être mesuré en laboratoire mais est fréquemment estimé à l'aide de corrélations avec des propriétés du sol plus faciles à mesurer, p. ex. les limites d'Atterberg ou les valeurs DCP. Les valeurs CBR sont exprimées en pourcentage de la force portante de la pierre concassée. Les valeurs pour des sols à texture fine, très humides, sont de l'ordre de 3 à 5 %.
- Limites d'Atterberg :** Cinq indices qui décrivent la réaction des sols au contact de l'eau. Deux des limites d'Atterberg, la limite de liquidité et l'indice de plasticité, sont couramment utilisées pour l'identification et la classification des sols.
- Pénétromètre à cône dynamique (DCP) :** Dispositif utilisé pour évaluer la résistance au cisaillement de sols à texture fine et moyenne, en quantifiant le taux de pénétration d'une tige pointue dans le sol. Les taux plus élevés de pénétration correspondent à des conditions de sol plus faibles.
- Précompactage :** Processus de compactage d'un sol faible par des charges légères jusqu'à ce qu'il soit capable de supporter des équipements de compactage plus lourds.
- Pressions de pneu normales pour voie publique :** Niveau de gonflement des pneus normalement utilisé par des camions chargés, sans CTI, fonctionnant sur routes publiques. Dans les opérations forestières canadiennes, plusieurs camions utilisent une pression de gonflement à froid d'approximativement 100 psi.
- Pressions de pneu optimisées :** Niveau de gonflement des pneus ajusté (normalement à l'aide d'un système CTI) pour correspondre au gonflement minimum recommandé par le fabricant dans des conditions spécifiques d'utilisation aux points de vue charge et vitesse.
- Profondeur de déclenchement prédéterminée :** Profondeur d'orniérage maximale acceptable prédéterminée sur un type particulier de route forestière. Le nivelage d'entretien est amorcé (déclenché) quand l'orniérage sur une section de la route dépasse cette profondeur.
- Profondeur d'une ornière :** Différence verticale entre le point le plus bas dans une trace de roues (ornière) et une ligne droite tracée perpendiculairement à la trace de roues entre les points les plus élevés des matériaux de chaque côté de l'ornière.
- Route à Fossé-V :** Route à surface de terre, à faible volume de circulation, dont les fossés ont la forme d'un V. Normalement construite à l'aide d'un buteur, cette route est constituée à partir de la couche de forme une fois que le terrain organique a été enlevé.
- Route nouvellement construite (non vieillie) :** Route destinée à être utilisée immédiatement ou peu après sa construction.
- Route à Surélévation :** Route à surface de terre, à faible volume de circulation, caractérisée par une surface de roulement surélevée. Des matériaux trouvés sur les lieux, normalement dans les fossés, sont placés sur la couche de forme décapée pour créer la surface de roulement surélevée finale.

Route à Surélévation sur enracinement : Route à surface de terre et à faible volume de circulation, caractérisée par une surface de roulement surélevée. Des matériaux trouvés sur les lieux, normalement dans les fossés, sont placés sur le tapis existant de racines et de souches basses pour créer la surface de roulement surélevée finale.

Route nouvellement construite (non vieillie) : Route destinée à être utilisée immédiatement ou peu après sa construction.

Route vieillie : Route à faible volume de circulation construite en avance de la période prévue pour son utilisation, de façon à ce qu'elle puisse se renforcer et se stabiliser par exposition aux cycles naturels d'humidité et de séchage.

Surfacing Thickness Program (STP) : Modèle empirique développé par le USDA Forest Service pour estimer l'épaisseur de la couche de roulement requise pour limiter l'orniérage à une profondeur maximale spécifiée, compte tenu des données relatives à la résistance du sol et au nombre d'unités ESAL causées par la circulation. Les analyses de FERIC utilisent ce modèle pour estimer la profondeur des ornières, compte tenu de diverses épaisseurs de la couche de roulement et résistances du sol lors de la construction, ainsi que du nombre d'unités ESAL causées par la circulation.

Vieillessement : Processus naturel de consolidation et de renforcement expérimenté par les sols de routes non pavées (particulièrement les sols à texture fine) en réponse aux changements dans le niveau de la nappe phréatique et les conditions atmosphériques.