

Contenu

Introduction	1
Principes et avantages du compactage	2
Résultats	3
Discussion	4
Mise en application	5
Remerciements ..	6
Références	6

Avantages du compactage des sols cohérents pour les routes forestières

Résumé

Le compactage de sols cohérents pour des routes forestières est relativement peu coûteux (500 à 1000 \$/km) et se révèle rentable, mais il n'est pas très répandu dans l'industrie forestière. La densité accrue du sol réduit le tassement, augmente la résistance, améliore la capacité portante, limite les changements volumétriques et peut diminuer les coûts de construction et d'entretien. Ces économies couvrent souvent le coût du compactage. FERIC a étudié l'impact du compactage dans des opérations utilisant la méthode à fossé en V où la résistance à la pénétration a triplé et la méthode à surélévation sur tapis linceux où la résistance à la pénétration a doublé.

Mots clés :

Compactage des sols, Construction routière, Méthode à fossé en V, Méthode à surélévation, Rouleau compacteur à pieds de mouton, Sols cohérents.

Auteur

Glen Légère
Division de l'Est

Introduction

La stabilité et la performance des sols peuvent souvent être améliorées par le compactage. Bien que ce procédé ait des avantages aux plans économique et technique, peu d'entreprises forestières l'utilisent sur leurs routes. On croit généralement que les camions de gravier appliquent suffisamment de pression au sol pour un compactage adéquat, mais ils n'exercent que 620 kPa (90 psi) de pression, contre jusqu'à 3500 kPa pour un rouleau à pieds de mouton. De plus, les camions font un compactage irrégulier dont la plus grande partie se produit sous les roues, ce qui amène la formation d'ornières; le résultat se compare donc difficilement au travail effectué par un rouleau compacteur. En outre, sur les sols à texture grossière, le compactage requiert une vibration (ce que les camions ne peuvent fournir) pour être efficace.

À seulement 500 à 1000 \$/km, le compactage est peu coûteux comparativement au coût total d'une route (<3 % du coût total de 30 000 \$/km). Son coût est souvent récupéré rapidement :

- Les rouleaux compacteurs remplacent les équipements sur chenilles (p. ex. boteurs et excavatrices) fréquemment utilisés pour cette tâche. Ces derniers sont moins efficaces car ils exercent une pression au sol normalement inférieure à 100 kPa.
- Bradley (2001, 2002) a démontré que des routes nouvellement construites sur des sols à texture fine (« cohérents ») tels que silts et argiles, compactées durant la construction, ont une meilleure performance que les routes non compactées et sont moins affectées par l'orniérage.
- Le compactage peut réduire l'épaisseur de gravier requise.
- Le compactage des routes permet des économies subséquentes sur les coûts d'entretien.

Le présent rapport résume les principes du compactage, son applicabilité en foresterie, ses avantages en matière de performance et l'utilisation appropriée des compacteurs. FERIC a récemment recueilli des données (classification, densité du sol, teneur en eau et résistance à la pénétration) sur les rouleaux à pieds de mouton chez Tembec – Spruce Falls (Kapusking, Ont.). Le rapport porte sur des sols cohérents, mais la théorie s'applique aussi en grande partie aux sols granulaires.

Principes et avantages du compactage

Le compactage est la densification des sols par application d'énergie mécanique. La diminution des espaces d'air (Craig, 1992; Selig, 1982) réduit le risque de tassement, augmente la résistance du sol et améliore la capacité portante de la route. Il limite également les changements volumétriques indésirables causés par l'infiltration d'eau, le gel, le dégel et d'autres facteurs (Holtz et Kovacs, 1991).

Dans les sols cohérents, le rapprochement des particules par le compactage augmente leur cohésion. Pour ces sols, les rouleaux à pieds de mouton donnent le meilleur compactage; ils pétrissent le sol et fournissent la pression requise pour augmenter la densité (MTO, 1979). Le compactage commence sous les pieds du rouleau (jusqu'à une profondeur de 150 à 200 mm). La profondeur de pénétration diminue lors des passages subséquents. On peut utiliser des rouleaux vibrants à tambour lisse ou à grillage pour les sols granulaires (concassé, gravier, graviers sableux et

sable), qui exigent une vibration pour un compactage optimal (MTO, 1979).

Cinq critères sont essentiels pour obtenir un compactage efficace :

- Le sol doit présenter une granulométrie appropriée (déterminée lors d'une analyse par tamisage).
- Il doit y avoir une base sous-jacente ferme, contre laquelle la couche suivante peut être compactée.
- L'équipement de compactage doit exercer une pression de contact élevée.
- Le bon équipement de compactage doit être sélectionné selon le type de sol.
- La teneur en eau du sol doit se situer près de l'optimum pour le compactage.

La compacité peut être mesurée sur le terrain avec une jauge nucléaire de densité-teneur en eau. Celle-ci fournit des lectures de densité qui peuvent être comparées aux résultats de laboratoire définissant la courbe Proctor normalisée pour le sol (voir figure 3). Cette courbe montre que la compacité (exprimée comme le poids spécifique, en kN/m^3 , ou la densité sèche, en kg/m^3) varie à mesure que change la teneur en eau pendant le compactage, pour un niveau standard d'énergie de compactage. Elle indique donc l'aptitude du sol au compactage. La teneur en eau pendant le compactage qui produirait la densité sèche maximale se trouve au sommet de la courbe Proctor, là où le compactage est le plus efficace. Pour un sol plus sec, le compactage serait inefficace et coûteux, la demande d'énergie étant plus forte pour obtenir le même effet. Le compactage d'un sol plus humide sera aussi moins efficace; l'eau dans les espaces vides ne peut être comprimée, et le sol se déplace au lieu de se densifier.

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

Ce rapport est publié uniquement à titre d'information à l'intention des membres de FERIC. Il ne doit pas être considéré comme une approbation par FERIC d'un produit ou d'un service à l'exclusion d'autres qui pourraient être adéquats.

This publication is also available in English.

© Copyright FERIC 2002. Imprimé au Canada sur du papier recyclé fabriqué par une compagnie membre de FERIC.

Poste-Publications #40008395 ISSN 1493-3713



Comme chaque sol a une courbe Proctor différente, un essai en laboratoire pour déterminer cette courbe devrait être réalisé avant le compactage. La courbe Proctor et les lectures de teneur en eau prises durant le compactage indiquent si le sol est à une teneur en eau appropriée pour un compactage efficace. Sinon, on peut procéder à un arrosage si le sol est trop sec ou le laisser sécher s'il est trop humide.

La densité maximale obtenue dépend de l'énergie appliquée durant le compactage. Comme cette énergie varie selon la méthode employée (qui diffère de celle utilisée dans l'essai en laboratoire), la compacité réalisée peut souvent dépasser la densité maximale estimée au laboratoire. Craig (1992) ainsi que Holtz et Kovacs (1991) fournissent plus de détails sur la théorie du compactage et les essais Proctor. Nous vous invitons à consulter ces documents sur la mécanique des sols pour plus de renseignements sur le compactage.

Résultats

À l'été 2001, FERIC a étudié deux opérations de compactage de sols cohérents sur des routes en construction. L'une d'elles, construite en janvier 2000, suivait la méthode standard de construction de Tembec (fossé en V), où la route est remblayée à une

hauteur approximative de 1 m avec des matériaux en place (argile de plasticité élevée). Cette route s'était consolidée pendant plus d'un an avant le compactage. La seconde route a été construite au cours de l'été 2001 selon la technique surélévation sur tapis ligneux, où les souches, les branches et la matière organique disponibles sur le site forment la première couche de remblai. Une mince couche (150 à 200 mm) du sol en place (argile silteuse de faible plasticité) a été utilisée comme base. Selon le Système unifié de classification de sols (Hamilton, 2000), les sols entraient dans les classes CH et CL-ML, respectivement. Une mince surface de roulement en gravier (6 m de largeur, 150 à 200 mm d'épaisseur) a été ajoutée aux deux routes. Normalement, ce type de route est utilisé pendant 2 à 3 ans durant les périodes sèches de l'été.

Le compactage a été fait à l'aide d'un rouleau à pieds de mouton de 10 t (figure 1) sur la route à fossé en V (550 m) et d'un rouleau à pieds de mouton de 6 t (figure 2) tiré par un boteur Caterpillar D8R sur la route à surélévation (500 m). Le rouleau tracté avait des pieds plus petits que le rouleau automoteur et produisait donc une énergie de compactage comparable. FERIC a observé sur chaque côté des routes et à intervalles de 50 m la densité, la teneur en eau et la résistance à la pénétration des sols.



Figure 1. Compacteur de 10 t à pieds de mouton utilisé sur la route à fossé en V.



Figure 2. Compacteur tracté de 6 t à pieds de mouton utilisé sur la route à surélévation.

La figure 3 montre la courbe Proctor normalisée en laboratoire ainsi que les lectures de teneur en eau et de densité prises sur le terrain pour les routes. Le poids spécifique à sec avant compactage sur la route à fossé en V se situait au-dessus de la courbe de densité Proctor, probablement à cause de la consolidation de la route pendant 1,5 an avant le compactage. Comme la zone effectivement compactée par le rouleau se trouve sous ses pieds, le traitement de la surface entière de la route (une « couverture ») nécessitait environ 10 passages pour une largeur de 6,5 m. La plus forte augmentation de densité (6 %) a été observée après deux couvertures. Aucun changement n'a été noté après quatre couvertures et seulement une légère augmentation (2 %) après six couvertures.

Sur la route à surélévation, la teneur en eau était inférieure au niveau optimal pour le compactage; un camion-citerne a donc ajouté de l'eau avant l'opération. La densité sur cette route n'a augmenté que de 3 % après deux couvertures; aucune augmentation significative n'a été notée après quatre et six couvertures. Il est possible que la mince couche d'argile silteuse sur un tapis de broussailles souple et élastique n'ait permis qu'un léger compactage avant que le sol ne soit repoussé dans ce tapis fibreux. Une fois le sol mélangé à ces matériaux, la densité moyenne diminue malgré les passages répétés du compacteur. Tel que déjà

mentionné, un compactage réussi requiert une base solide contre laquelle la couche suivante est compactée. Cette base a été inadéquate dans la méthode à surélévation.

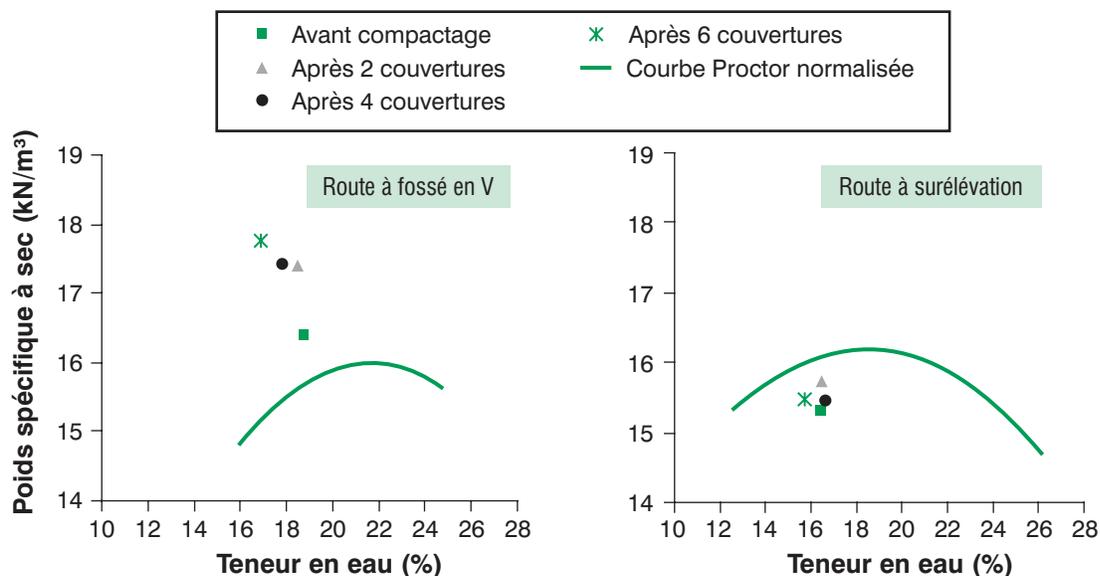
Nous avons mesuré les changements dans la résistance du sol au cisaillement en utilisant un pénétromètre à cône dynamique. Les résultats ont été convertis en indices portants californiens (CBR) au moyen d'une formule de conversion (MDOT, 1993). Les valeurs CBR peuvent être estimées rapidement sur le terrain; le doigt pénètre facilement dans un sol ayant un CBR de 2, alors qu'avec un CBR supérieur à 16 le sol serait difficile à rayer avec l'ongle du pouce (Koerner, 1997).

La figure 4 présente les valeurs CBR estimées à diverses profondeurs dans la route. Pour la route à fossé en V, relativement peu de compactage se produisait au-dessous de 150 mm (profondeur maximale recommandée). Cependant, la résistance à la pénétration triplait dans les 100 premiers mm. Pour la route à surélévation, la résistance à la pénétration était plus faible, mais elle faisait encore plus que doubler jusqu'à une profondeur de 200 mm.

Discussion

La route à fossé en V coûtait approximativement 38 000 \$/km, incluant le gravier, versus 32 000 \$/km pour la route à suréléva-

Figure 3. Mesures de teneur en eau-densité sur le terrain et courbes Proctor normalisées pour les routes à fossé en V et à surélévation.



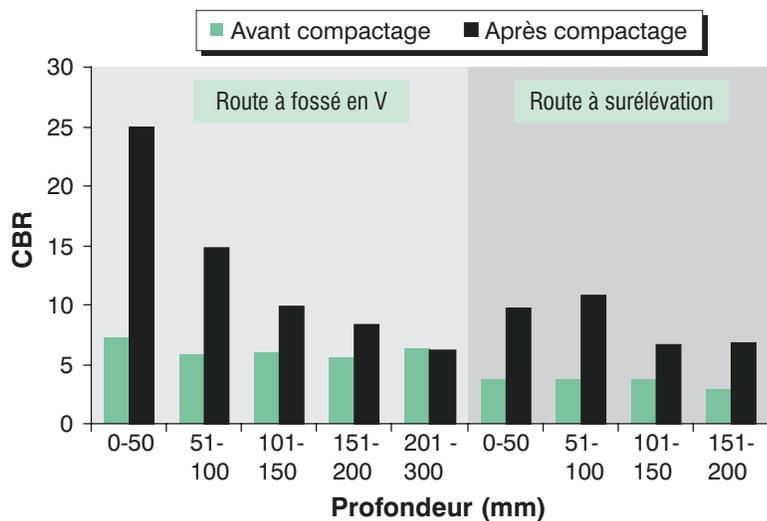


Figure 4. Valeurs CBR en fonction de la profondeur pour les routes à fossé en V et à surélévation après six couvertures.

tion. Dans la méthode à fossé en V, les densités de sol étaient déjà relativement élevées après 1,5 an de consolidation et le compactage augmentait encore la densité et la résistance du sol; à la longue, le résultat prévu sera sans doute une route de qualité supérieure. Avec la technique à surélévation, la surface de la route séchait plus vite parce que la mince couche d'argile silteuse reposait sur un tapis de broussailles qui séchait et se drainait rapidement; de plus, cette argile retient moins d'eau que les argiles de plasticité élevée. Cette technique permet ainsi l'utilisation en été tôt après la construction, à un coût inférieur à celui des routes à fossé en V. Par contre, elle n'assure pas une base uniforme pouvant supporter une route à surface plane puisque le tapis ligneux suit la topographie naturelle du terrain.

Tembec fixe la vitesse d'utilisation de ses routes *secondaires* à 60 km/h, mais la méthode à surélévation ne permet pas toujours ces vitesses. Cependant, sur des routes *tertiaires* utilisées pendant quelques années seulement, des vitesses élevées ne sont pas un critère de conception essentiel. On peut donc comparer la réduction des coûts de construction en regard de celle des coûts de camionnage. Même si la technique à fossé en V était plus coûteuse dans notre étude, les valeurs CBR après compactage étaient significativement plus élevées que dans la

méthode à surélévation. Si l'épaisseur de la couche de matériaux granulaires en surface peut être réduite à cause de cette résistance accrue, les coûts réduits du gravier pourraient au moins compenser pour les coûts de compactage, particulièrement là où le gravier provient de sources éloignées. Les rouleaux tractés coûtent moins cher que les rouleaux automoteurs, mais ils peuvent être plus chers d'utilisation

puisque'il faut une seconde machine pour les tirer. De plus, il est difficile de travailler en marche arrière, ce qui réduit leur productivité. Les rouleaux automoteurs sont disponibles à un coût de 50 à 80 \$/HMP, alors qu'il est difficile de louer des rouleaux tractés dans l'est du Canada. Avec une bonne planification, l'emploi de rouleaux motorisés peut être rentable.

Mise en application

L'étude a démontré qu'un compactage approprié augmente la résistance des sols utilisés pour la construction d'une route, ce qui peut en améliorer la performance générale. Le compactage est relativement peu coûteux (<3 % du coût total de construction dans cette étude) et peut représenter un investissement économique. Bradley (2001, 2002) a démontré que le compactage est rentable sur des sols cohérents; l'orniérage a diminué suffisamment pour que la baisse dans les coûts d'entretien compense pour le coût du compactage. Ses résultats indiquent également que le compactage de routes nouvellement construites augmente la densité et la résistance du sol au moins autant que dans une route consolidée pendant plus d'un an. Les économies et la flexibilité opérationnelle dues à la possibilité d'accéder plus rapidement à un site doivent aussi être considérées.

Pour un compactage efficace sur des sols cohérents, FERIC recommande :

- De classer le sol avant le compactage et d'établir des courbes Proctor pour les sols du site de construction. Hamilton (2000) constitue un bon document de référence pour classer les sols sur le terrain.
- D'observer et de contrôler la teneur en eau pendant le compactage afin d'obtenir les meilleurs résultats. Si le sol est beaucoup plus humide que la valeur optimale basée sur la courbe Proctor, laissez-le sécher; s'il est beaucoup plus sec, arrosez-le.
- De sélectionner un type approprié de rouleau. Pour les sols cohérents, utilisez des rouleaux à pieds de mouton. Un compacteur vibrant, inefficace avec des sols cohérents, est essentiel pour des matériaux granulaires.
- D'utiliser des compacteurs automoteurs. Ils coûteront peut-être moins cher et seront plus productifs que les unités tractées, le coût total de ces dernières étant augmenté par l'emploi d'une machine additionnelle pour les tirer.
- De compacter tout matériau de remblai en couches dont l'épaisseur ne dépasse pas la profondeur de compactage efficace du rouleau. L'épaisseur des matériaux influence directement l'efficacité du compactage. L'emploi de rouleaux à pieds de mouton sur des sols cohérents est généralement très efficace jusqu'à une profondeur de 100 à 150 mm. Cependant, la profondeur sera influencée par le nombre de passages, la vitesse du rouleau et l'énergie de compactage.
- D'évaluer avec soin la nature du support sous la couche qui est compactée. La qualité du support influence énormément le potentiel de compactage; plus le support est ferme, plus la densité finale sera élevée. Pour la *construction à surélévation*, le compactage risque d'être inefficace à moins que la couche compactée n'ait une épaisseur >200 mm. Cette épaisseur peut aussi varier dépendant de la hauteur des souches.
- De contrôler les vitesses de déplacement. Bien que les rouleaux non vibrants soient moins affectés par la vitesse de déplacement que les modèles vibrants, cette vitesse devrait toujours se situer entre 5 et 13 km/h (MTO, 1979).
- Dans cette étude, la plus forte augmentation de densité est survenue après deux couvertures, mais les passages additionnels ont donné des augmentations modérées. Le nombre optimum de passages dépend du type de sol, de la teneur en eau, de l'énergie de compactage et de la vitesse de déplacement.

Remerciements

L'auteur remercie Mark Stanley (Tembec – Spruce Falls), Robert A. Douglas, Ph.D. (Université de Canterbury, Nouvelle-Zélande) et Allan Bradley (Ministère des Routes et du Transport, Saskatchewan) pour leur assistance.

Références

- Bradley, A. 2001. Évaluation de designs de routes forestières d'accès pour utilisation par des camions grumiers équipés de CTI – I : routes d'accès nouvellement construites. Inst. can. rech. en génie for. (FERIC), Vancouver, C.-B. *Avantage* 2(53). 16 p.
- Bradley, A. 2002. Evaluation of forest access road designs for use with CTI-equipped log haul trucks phase II: Seasoned access roads. Inst. can. rech. en génie for. (FERIC), Vancouver, C.-B. *Advantage Report* (en préparation).
- Craig, R.F. 1992. *Soil mechanics*, 5th edition. Chapman & Halls, New York, N.Y. 427 p.
- Hamilton, P. 2000. Identification des sols à utiliser pour la construction de routes : conseils pratiques. Inst. can. rech. en génie for. (FERIC), Pointe-Claire, Qué. *Avantage* 1(11). 8 p.
- Holtz, R.D.; Kovacs, W.D. 1991. *Introduction à la géotechnique*. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, Montréal, Qué. 808 p.
- Koerner, R.M. 1997. *Designing with geosynthetics*. 4th Ed. Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, N.J. 761 p.
- MDOT. 1993. *Users guide for the dynamic cone penetrometer*. Minn. Dep. Transportation, Office of Materials Research and Engineering, Physical Research Section, St. Paul, Minn. 20 p.
- MTO. 1979. *Soils manual*. Ministry of Transportation of Ontario, Engineering Materials Office, Downsview, Ont. 184 p.
- Selig, E.T. 1982. *Compaction procedures, specifications, and control considerations*. Transportation Research Board, Washington, D.C. *Transportation Res. Record* 897. 8 p.