



Préparation du terrain pour la régénération de la couverture forestière sur des sites pétroliers et gaziers





Préparation du terrain pour la régénération de la couverture forestière sur des sites pétroliers et gaziers

Remerciements

Nous désirons souligner le soutien de l'Alliance canadienne pour l'innovation dans les sables bitumineux (COSIA), qui a rendu ce projet possible. Nous tenons également à remercier Matthew Pyper et Sonya Odsen (Fuse Consulting), Michael Cody (Cenovus Energy), Dani Degenhardt (InnoTech Alberta), Janet Mitchell et Virginia Hudson (FPInnovations), Jeannine Goehing et Amanda Schoonmaker (Institut de recherche boréale du NAIT), et Chris Powter (Enviro Q&A Services) pour leur contribution à ce guide.

Pour obtenir des renseignements sur les droits de reproduction, veuillez communiquer avec Ressources naturelles Canada à rncan.copyrightdroitdauteur.rncan@canada.ca.

Cat. No. Fo4-131/2018F-PDF
ISSN 978-0-660-27614-4

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2019



Papier recyclé

Table des matières



Avant-propos	2	Figures	
1. Introduction	4	Figure 1. Sous-soleuse à ailerons	8
2. Options de traitement	6	Figure 2. Passages superposés avec une paire de sous-soleuses à ailerons (a) premier passage (b) deuxième passage de chevauchement.....	9
2.1 Décompactage	7	Figure 3. Dents de défonceuse fixées aux extrémités de la basse multifonctions	10
2.1.1 Technique de la sous-soleuse à ailerons	8	Figure 4. Buttes standards	10
2.1.2 Technique de la défonceuse à dent droite	9	Figure 5. Technique de buttage grossier et lâche	11
2.1.3 Technique de buttage standard	10	Figure 6. Technique appropriée d'enlèvement de la couche arable.....	13
2.1.4 Technique de buttage grossier et lâche.....	11	Figure 7. Profondeur de récupération appropriée	13
2.2 Enlèvement de la couche arable du sol (récupération du sol)	12	Figure 8. Plantation profonde sur des buttes de sol minéral.....	15
2.3 Buttage.....	14	Figure 9. Butte d'humus inversé	16
2.4 Scalpage	18	Figure 10. Butte de sol minéral	17
2.5 Scarifiage	20	Figure 11. Butte mixte d'humus et de sol minéral.....	17
2.6 Malaxage	21	Figure 12. Butte de tourbe	17
2.6.1 Malaxage fin.....	22	Figure 13. Zone scalpée	18
2.6.2 Malaxage sélectif	22	Figure 14. Débusqueuse avec râteau.....	20
2.6.3 Malaxage grossier	22	Figure 15. Malaxeur de sol	22
2.7 Utilisation d'une trancheuse à disques.....	23	Figure 16. Microsites de plantation créés par le creusement de tranchées.....	23
2.8 Labourage.....	25	Figure 17. Amendements pour des résultats précis.....	27
2.9 Amendements organiques.....	26		
2.10 Fertilisation.....	31		
3. Références	33	Tableaux	
		Tableau 1. Options de décompactage du sol	11
		Tableau 2. Conditions climatiques appropriées pour la formation de buttes.....	16
		Tableau 3. Propriétés de certains amendements.....	29
		Tableau 4. Engrais conventionnels et engrais à efficacité améliorée	31

Avant-propos



La sylviculture est une pratique qui consiste à contrôler l'établissement, la croissance, la composition, la santé et la qualité des forêts à l'échelle du peuplement afin de répondre à divers besoins et diverses valeurs. Les pratiques sylvicoles peuvent avoir une incidence forte et bénéfique sur la remise en état des zones associées à l'extraction *in situ* des ressources pétrolières et gazières.

La préparation du terrain, la régénération forestière et la gestion de la végétation sont des aspects importants de la sylviculture et de la remise en état. De multiples pratiques et techniques peuvent optimiser le succès de la remise en état, qui dépend de nombreux facteurs, y compris les propriétés physiques, chimiques et biologiques du site.

Une partie de la grande richesse des connaissances sylvicoles traditionnellement utilisées par l'industrie forestière sera expliquée dans une série de guides, de fiches d'information et de vidéos.

Le présent guide explique les techniques de préparation du site. Le Service canadien des forêts (SCF) de Ressources naturelles Canada (RNCan) a préparé ce guide pour favoriser la restauration sur place des sites perturbés.

Avis de non-responsabilité : Ce guide ne donne que des conseils sur les meilleures pratiques. Nous recommandons vivement au lecteur de s'assurer de la conformité réglementaire avant de choisir la meilleure technique ou le meilleur outil.

De multiples pratiques et techniques peuvent optimiser le succès de la remise en état, qui dépend de nombreux facteurs . . .

1. Introduction



En quoi consiste la préparation du terrain et à quoi sert-elle?

La préparation du terrain – également appelée préparation du sol de surface – vise à créer des conditions de croissance appropriées sur les sites perturbés afin de favoriser l'établissement et la croissance de la végétation forestière. La plupart des sites qui ont connu des perturbations industrielles nécessitent une préparation pour le rétablissement réussi de la végétation forestière.

Les conditions qui entravent la survie et la croissance de la végétation, que ce soit par manque ou par excès d'un élément ou d'un facteur, sont appelées facteurs limitant la croissance. Toutes les plantes ont besoin de lumière, d'air, d'eau et d'éléments nutritifs pour croître et survivre. Cependant, les plantes pousseront mieux dans des conditions qui répondent à leurs besoins de croissance, lesquelles peuvent varier selon les espèces. Le manque ou l'excès de l'une ou l'autre des conditions de croissance requises peut réduire considérablement la croissance de la végétation ciblée et peut mener à l'échec de l'établissement.

La préparation du terrain sert à surmonter les facteurs limitants en améliorant la température du sol, la disponibilité des éléments nutritifs, le drainage et l'aération du sol et en réduisant la compétition. Cela permet d'améliorer la survie et la croissance des espèces cibles. Selon le site et les objectifs de traitement, la préparation du terrain sert à :

- **créer des microsites appropriés pour la plantation ou la croissance** (p. ex. en exposant le sol minéral);
- **améliorer les propriétés physiques du sol de surface** (p. ex. en réduisant le compactage et en améliorant la porosité du sol).

La préparation du terrain nécessite en général la manipulation de l'un des éléments suivants : sol de surface, matériaux ligneux (p. ex. débris ligneux grossiers), matières organiques ou éléments nutritifs. Cela consiste à utiliser une variété de méthodes et d'équipements avant la revégétalisation. Les techniques utilisées varieront d'un site à l'autre selon les objectifs de remise en état du sol (p. ex. plantation, ensemencement ou régénération naturelle), les espèces cibles et les objectifs de croissance.

La préparation du terrain est couramment utilisée pour créer des microsites adaptés à la plantation ou à la croissance des plantes, réduire le compactage du sol, diminuer le ruissellement et l'érosion, et réduire la compétition végétale des espèces indésirables. La préparation du sol n'est pas nécessairement requise

pour tous les sites et peut ne pas être bénéfique sur les sites peu perturbés, car ils ont souvent une couche arable en place avec des banques de semences intactes et les propagules végétatives nécessaires à la revégétalisation. De manière générale, les objectifs de traitement pour les sites nordiques ciblent des techniques qui améliorent le drainage et augmentent la température du sol, comme la création de buttes. Pour les sites secs, en revanche, des techniques d'amélioration de l'accès à l'eau sont déployées, comme la création de dépressions.

La préparation du terrain sert à surmonter les facteurs limitants en améliorant la température du sol, la disponibilité des éléments nutritifs, le drainage et l'aération du sol et en réduisant la compétition.

Les techniques de préparation du site suivantes sont décrites en détail dans le présent guide :

- décompactage
- dénudation du sol
- buttage
- scalpage
- scarifiage
- malaxage
- utilisation d'une trancheuse à disque
- labourage

2. Options de traitement



La préparation du terrain modifie le site pour surmonter les facteurs limitants et créer des conditions favorables pour les semis et des zones de germination appropriées pour les semences.

Les plantes ont besoin de suffisamment (mais sans excès) d'humidité et d'oxygène dans la zone d'enracinement, d'une lumière suffisante pour leur physiologie et d'éléments nutritifs pour une croissance optimale. Ces facteurs peuvent être modifiés par des traitements sur le site.

La préparation du terrain consiste à modifier physiquement les rémanents, l'humus et les couches de sol par des méthodes telles que le scalpage, le creusement de tranchées, le labourage, le malaxage et le buttage. Ces termes sont expliqués ci-dessous. Les sols peuvent également être modifiés par l'ajout de matières organiques et d'éléments nutritifs.

Les conditions du sol peuvent souvent varier sur une petite zone géographique (même à l'intérieur d'un site perturbé comme un site d'exploration des sables bitumineux). Pour obtenir les meilleurs résultats, la méthode de préparation du terrain doit être adaptée à ces conditions variables (voir *Évaluation du terrain pour la régénération de la couverture forestière sur des sites pétroliers et gaziers* [à paraître prochainement]).

Avant de choisir le traitement ou l'équipement le plus approprié, il est important d'évaluer les principales caractéristiques de l'endroit, y compris le régime hydrique, la texture du sol, la pente, l'état des rémanents et les espèces concurrentes potentielles. Il est important de tenir compte de ces caractéristiques ainsi que des conditions désirées après le traitement ainsi que des microsites au moment de choisir le traitement. Dans de nombreux cas, il est possible de prédire les facteurs limitants à l'aide des classifications d'écosites.

Il est important de tenir compte de la période de l'année lors de la planification de la préparation mécanique du terrain. Cela est particulièrement important dans le cas des climats nordiques, où le sol est gelé pendant la majeure partie de l'année. Certaines machineries agricoles peuvent fonctionner dans des sols gelés et non gelés, d'autres pas.

Quel que soit le moment de la préparation mécanique du sol, il est important que la plus grande partie de la plantation se fasse après le traitement afin de réduire les effets de la compétition végétale.

L'épinette noire est parfois plantée en hiver, mais seulement dans des circonstances particulières

(par exemple, directement après que le sol a été traité et avant qu'il ne gèle à nouveau). Le taux de réussite et de survie des plantations hivernales est légèrement inférieur à celui des plantations régulières du printemps ou de l'été. Pour plus d'informations sur la plantation, voir *Techniques de régénération de la couverture forestière sur des sites pétroliers et gaziers*.

Immédiatement après les traitements de préparation du terrain, une évaluation doit être effectuée pour déterminer si les objectifs du traitement ont été atteints. Les objectifs varieront en fonction des conditions du site et du type de traitement. Il est important d'effectuer ces évaluations pour s'assurer que suffisamment de microsites de plantation adéquats ont été créés et qu'ils sont dans un état approprié pour la régénération réussie des assemblages de plantes désirés.

2.1 Décompactage

Le décompactage est une étape importante au cours de laquelle les sols compactés sont fracturés et ameublissent pour améliorer leurs propriétés physiques. Ce processus augmente la porosité et l'aération du sol, de sorte que les systèmes racinaires des plantes peuvent s'étendre et se développer. L'équipement tel que les dents de défonceuse, les sous-soleuses à ailerons et les excavatrices peuvent être utilisées pour décompacter le sol.

Le compactage créé par le développement industriel ou par une mauvaise synchronisation des travaux de remise en état ou de préparation du terrain réduit la porosité du sol et modifie la structure du sol. Ces changements réduisent les fonctions hydrologiques du sol.

La couche de sol compacté qui se situe entre 10 et 20 centimètres (cm) sous la surface ne se rétablit pas naturellement et nécessite donc un traitement. Même un léger trafic de machineries peut entraver les fonctions hydrologiques du sol, lesquelles sont peu susceptibles

d'être restaurées par des processus naturels (comme le cycle de gel-dégel), surtout dans un laps de temps relativement court.

Les sols minéraux riches en limon et en argile sont sujets au compactage du sol, tout comme les sols humides. Les sols organiques et les sols qui ont des textures plus grossières (pourcentage élevé de sable) sont moins touchés. Le type d'équipement utilisé, le moment et la fréquence de leur utilisation ont également des effets importants sur le compactage du sol. L'équipement lourd est plus susceptible de causer des dommages que l'équipement léger et, en général, l'équipement à roues peut causer une plus grande pression au sol que les machines à chenilles. La circulation des machines sur un sol gelé a moins d'impact sur le compactage du sol.

Le décompactage vise à restaurer la productivité des sols dégradés et est effectué soit dans le cadre d'opérations de terrain en cours, soit pour le traitement de sites hautement prioritaires qui ont été dégradés dans le passé. L'ameublissement du sol restaure les macropores dans les sols et réduit la résistance du sol. Une profondeur de travail du sol appropriée est semblable à la profondeur

d'enracinement des arbres qui poussent sur des sites non perturbés à proximité.

Les anciennes routes extrêmement compactées peuvent nécessiter un décompactage plus profond que les zones moins compactées. Une végétation compétitive non indigène colonisera souvent facilement les sols récemment traités. Par conséquent, un plan de gestion de la végétation est un aspect nécessaire pour toutes les activités de préparation de site.

2.1.1 Technique de la sous-soleuse à ailerons

Comment ça fonctionne

La sous-soleuse à ailerons représente une catégorie d'outils de travail du sol spécialement conçus pour labourer en profondeur les sols compactés sans retourner la couche arable. Ces outils sont efficaces pour un large éventail de régimes d'humidité du sol et de teneur en argile. Ce traitement crée de grands vides qui permettent au cycle de gel-dégel de pénétrer profondément dans le profil du sol et d'améliorer la fonction hydrologique du sol. Avec le temps, le gel et le dégel ameublissent le sol à des profondeurs considérables à mesure que l'eau du sol passe de l'état solide à l'état liquide et vice versa.

Figure 1. Sous-soleuse à ailerons



Figure 2. Passages superposés avec une paire de sous-soleuses à ailerons : (a) premier passage (b) deuxième passage de chevauchement



(a)



(b)

Principales considérations

Le labourage à des profondeurs supérieures à 60 cm fournit la meilleure amélioration de la fonction hydrologique du sol et la plus grande diminution de la densité apparente du sol. Des labourages moins profonds (moins de 60 cm) créent des sillons moins idéaux composés d'un mélange de sous-sol et de couche arable (le cas échéant), ce qui peut aussi accélérer la fermeture des sillons adjacents.

Il est recommandé de se déplacer en lignes droites parallèles avec une sous-soleuse à ailerons, avec des passages qui se chevauchent entre les sillons pour maximiser la surface de travail du sol par site (Figure 2). La vitesse de labourage ne doit pas dépasser 3 kilomètres à l'heure (km/h).

Dans la mesure du possible, évitez de traiter les sols à forte teneur en humidité, car cela formera des tunnels sous la surface et ne causera que peu ou pas de fracturation des mottes de terre.

Les sols de surface qui sont extrêmement secs et compactés (p. ex. les vieilles routes) peuvent nécessiter d'abaisser le corps de la charrue sous la surface du sol. Cette méthode évite d'endommager l'équipement et permet à la sous-soleuse à ailerons d'accéder à des couches plus profondes. Sinon, un premier traitement à l'aide d'une défonceuse à dents (décrit ci-dessous) peut être nécessaire pour permettre à la sous-soleuse à ailerons d'accéder aux couches plus profondes du sol qui sont plus faciles à fracturer. Les sols extrêmement compactés peuvent nécessiter des tracteurs à chenilles plus gros et plus puissants (p. ex. plus gros qu'un D7).

2.1.2 Technique de la défonceuse à dent droite

Comment ça fonctionne

La technique de la défonceuse à dent droite est souvent utilisée durant la remise en état des sites et se fait à l'aide d'un outil facilement disponible qui peut s'attacher à une large gamme de tracteurs à chenilles (Figure 3). Le défouage s'effectue généralement avec une ou deux dents montées verticalement.

Figure 3. Dents de défonceuse fixées aux extrémités de la barre multifonctions



Principales considérations

Cette technique est plus efficace lorsque le sol est sec et que la teneur en argile est faible.

Lorsque les sols sont fortement compactés, il est recommandé de procéder à un défonçage croisé avec la technique de la défonceuse à dent droite pour fracturer davantage les mottes de sol durcies.

2.1.3 Technique de buttage standard

Comment ça fonctionne

Le décompactage peut également être accompli avec une technique de buttage standard dans laquelle le sol est creusé et placé à côté du trou formé. Cette opération est faite avec une excavatrice munie d'un godet de creusage ou d'un râteau à buttage.

Figure 4. Buttes standards



Principales considérations

Il est recommandé de laisser les buttes se tasser pendant l'hiver pour réduire le nombre de poches d'air dans le sol.

Les buttes devraient être plantées au cours de la saison de croissance suivante.

La technique de buttage standard peut être utilisée dans des conditions où le sol est gelé ou non. Il est recommandé de briser le sol prélevé pour accélérer l'ameublissement (Figure 4).

2.1.4 Technique de buttage grossier et lâche

Comment ça fonctionne

La formation de buttes meubles et non consolidées est une variante de la technique de buttage standard et utilise le même équipement. La principale distinction est la façon dont le sol pelleté est manipulé. Le sol retiré est placé partiellement dans le trou excavé et partiellement sur la surface du sol adjacente. Cette approche a pour effet un sol très hétérogène qui est visuellement plus semblable à celui produit par les sous-soleuses à ailerons que les buttes standards.

Principales considérations

La technique de buttage grossier et lâche peut être utilisée dans des conditions où le sol est gelé ou non (Tableau 1).

Elle est comparativement plus lente que d'autres techniques qui utilisent des dents et des bulldozers. Cependant, la disponibilité de l'équipement ou l'accessibilité du site peuvent en faire une bonne option.

Tableau 1. Options de décompactage du sol

Outils et techniques	Conditions du sol		Type d'opération
	Gelé	Non gelé	
	Sous-soleuse à ailerons	✗ ¹	
Défonceuse à dent droite	✓ ²	✓	Passages de chevauchement ou défonçage croisé
Buttage standard	✓ ³	✓	Le sol retiré est placé à côté du trou
Technique de buttage grossier et lâche	✓ ³	✓	Le sol est placé partiellement dans le trou

Remarques :

¹ Les sous-soleuses à ailerons sont efficaces dans des sols partiellement gelés (moins de 15 cm de profondeur de la surface gelée).

² Cet outil est plus efficace lorsque le sol est sec et que la teneur en argile est faible.

³ Le fonctionnement de l'équipement devient difficile dans un sol boueux.

Figure 5. Technique de buttage grossier et lâche



2.2 Enlèvement de la couche arable du sol (récupération du sol)

L'enlèvement de la couche arable du sol, également connu sous le nom de récupération du sol, est effectué pour conserver la couche arable (et dans certains cas, le sous-sol) pour les activités de remise en état futures des terres dont on prévoit la perturbation.

Avant que le sol ne soit perturbé, il est important de déterminer le type, l'étendue, la profondeur, l'emplacement et la qualité des sols dans la région (voir *Évaluation des sites pétroliers et gaziers pour le retour à la couverture forestière*).

Cette information aide à déterminer si le sol est approprié pour la récupération et quelle quantité devrait être, ou pourrait être, récupérée efficacement. Si la récupération du sol est appropriée pour un site, le sol est enlevé et stocké pour une utilisation ultérieure. Si différents types de sols sont récupérés, ils sont entreposés séparément. Une fois les activités industrielles terminées, la surface du site est nivelée selon les contours d'origine. La couche arable est placée sur la surface nivelée (ou le sous-sol remplacé, le cas échéant) pour fournir un milieu de croissance approprié.

Le type de sol de surface doit être pris en compte lors de la détermination de la profondeur de récupération, du moment et de l'équipement. Les sols de surface peuvent être divisés en trois catégories : les sols de surface des hautes terres, les sols organiques peu profonds et les sols organiques profonds.

Le sol de surface des hautes terres comprend les horizons organiques L, F et H et le minéral A sous-jacent, également appelé mélange minéral LFH. Le sol de surface des hautes terres est le matériau de récupération le plus précieux disponible pour une utilisation comme sol de couverture. Il fournit une source importante et unique de matière organique, d'éléments nutritifs pour les végétaux, de débris ligneux, de microbes et de bactéries pour le sol. Il est essentiel au maintien des cycles des éléments nutritifs et au maintien de forêts saines et productives.

Si le sol de surface des hautes terres est enlevé et stocké avec soin et retourné sur le site en temps opportun, il peut également fournir des semences, des propagules de plantes et du biote du sol au site.

Il y a beaucoup moins de sol de surface que de mélanges de tourbe et de minéraux dans de nombreuses régions de la forêt boréale. Par conséquent, les efforts de récupération des sols de surface devraient être maximisés dans les zones riches en sols de surface afin de s'assurer que le volume de sol disponible est suffisant. Si les matériaux retirés peuvent être entreposés à proximité d'une zone perturbée, il n'est plus nécessaire de perturber complètement le site pendant la remise en état finale.

Principales considérations

Malgré son utilisation répandue, l'enlèvement de la couche arable du sol peut avoir des conséquences négatives sur le potentiel de régénération d'un site. L'enlèvement de la couche arable perturbe les systèmes racinaires et limite le potentiel de reproduction végétative, comme le drageonnement du tremble. Le délai entre la perturbation et la remise en état est également un facteur important : plus un site est perturbé, plus les chances de reproduction végétative sont réduites.

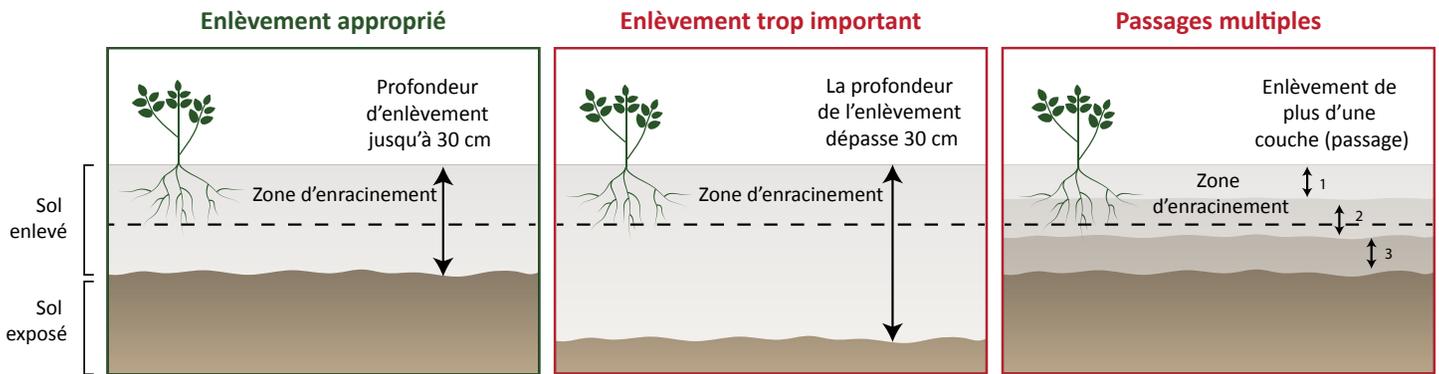
L'enlèvement de la couche arable du sol peut également ralentir les processus naturels de revégétalisation de certaines espèces et augmenter le risque de dégradation du sol, alors que les traitements qui n'enlèvent pas le sol ne causent pas ces problèmes.

Il faut éviter de mélanger le sol de surface des hautes terres avec d'autres matériaux de remise en état pendant la récupération afin de s'assurer que des matériaux séparés sont disponibles pour des occasions de mise en place directe. La façon la plus efficace de prévenir le mélange des matériaux de remise en état pendant la récupération est de séparer les différents matériaux récupérés. Les sols de surface avec une banque de semences abondantes d'espèces concurrentes peuvent avoir une incidence négative sur les progrès de la remise en état et augmenter les coûts d'exploitation.

Le fait de stocker la couche arable en gros tas pendant plus de huit mois peut réduire la viabilité des semences et des racines et affecter négativement les propriétés chimiques, biologiques et physiques du sol.

En général, lorsque la remise en état aura lieu peu de temps après la perturbation, le plan opérationnel devrait être d'éviter d'enlever la couche arable du sol autant que possible. Toutefois, si l'enlèvement de la couche arable est nécessaire, les exploitants devraient décider de l'approche appropriée ou optimale.

Figure 6. Technique appropriée d'enlèvement de la couche arable



Dans la plupart des cas, un seul passage, plus important, est la meilleure façon d'assurer une meilleure conservation des propagules. Cependant, dans certains cas, il est approprié de faire plusieurs passages d'enlèvement peu profond de la couche arable (Figure 6).

L'enlèvement d'une couche trop importante de sol est un risque courant et devrait être évité. L'évaluation du site avant qu'il ne soit perturbé permettra de prendre des décisions éclairées en matière d'enlèvement de la couche arable du sol. La quantité de sol recueillie avec la zone racinaire devrait être suffisante pour enfouir la plupart des racines dans la pile de déblais et réduire l'exposition des racines aux éléments.

Les couches superficielles, y compris les débris ligneux, la zone racinaire et les sous-sols supérieurs devraient être stockés dans des tas séparés afin d'éviter le mélange de ces couches. Un mélange excessif des couches superficielles peut influencer l'aptitude des sols à soutenir la croissance des semis. Le remplacement des couches de surface à partir d'une seule pile de sol mélangé entraîne une plus grande quantité de débris ligneux mélangés à la couche de sol minéral. Cette combinaison

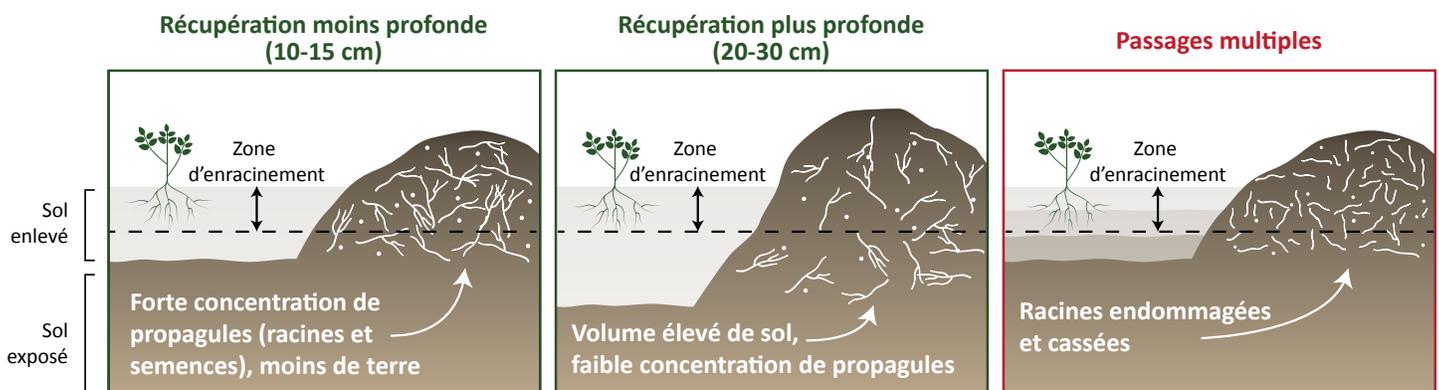
tend à former un mélange indésirable dans lequel les semis naturels d'arbres seraient exposés à des risques accrus de sécheresse et de délogement du sol.

Bien que la pratique consistant à placer les couches retirées dans une seule pile puisse être attrayante pour son utilisation efficace de l'espace, elle n'est pas recommandée en raison des effets négatifs sur les arbres naturels et les arbres plantés.

La profondeur de récupération est importante, car elle affecte les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol de surface (Figure 7). L'utilisation d'une seule profondeur de récupération prescrite pour tous les types de sols n'optimise pas toujours le potentiel du sol de surface récupéré.

Par exemple, la récupération du sol de surface à de plus grandes profondeurs (de 20 à 30 cm) augmente le volume de matériaux disponibles pour la remise en état. Malheureusement, l'augmentation de la profondeur limite l'aptitude du sol en tant que source de propagules pour la revégétalisation et peut réduire sa teneur en matière organique.

Figure 7. Profondeur de récupération appropriée



La récupération de sols de surface peu profonds (de 10 à 15 cm) augmente généralement la proportion de propagules viables dans ces matériaux, mais réduit le volume récupéré pour la remise en état.

Ces exemples illustrent différentes approches de gestion et d'utilisation des sols de surface récupérés. Dans le cas des sols de surface des hautes terres, les opérateurs récupèrent en général la totalité de l'horizon LFH et de l'horizon minéral A. Cependant, la profondeur optimale de récupération nuit à la qualité du sol et à la façon dont les différents types de sols et d'écosites ont un impact sur l'établissement des végétaux.

Considérations relatives à l'équipement

Les sols de surface sont généralement récupérés à l'aide d'excavatrices et de tracteurs à chenilles. Les excavatrices décapent le sol de surface en utilisant un godet pour soulever le sol et le placer en andain ou en tas. Les grattoirs sont utilisés sur des sites plus grands. Les tracteurs à chenilles enlèvent le sol avec une lame en un ou plusieurs passages et poussent le sol dans un tas ou un andain.

L'équipement de récupération doit être choisi avec soin pour permettre un décapage précis des couches du sol tout en s'ajustant aux changements de la profondeur du sol de surface.

L'utilisation d'une excavatrice plutôt que d'un tracteur à chenilles pour récupérer le sol en surface minimise la destruction des racines trouvées dans l'interface sol-sous-sol. Ces racines sont souvent détruites par la lame de l'équipement pendant la récupération et lorsqu'elles sont exposées au gel et à la dessiccation.

La récupération du sol de surface à l'aide d'un grattoir entraîne souvent un enlèvement et un mélange irrégulier, en particulier sur les sites accidentés. Il est difficile d'ajuster la position de l'équipement et la profondeur de coupe pour tenir compte des variations de la profondeur de récupération sur place.

La récupération de composés organiques profonds ne se produit que pendant les mois d'hiver en raison de problèmes de traficabilité. Les excavatrices récupèrent les sols organiques profonds et les mélanges minéraux de tourbe. Les pailleuses, les motoculteurs et les rotoculteurs en combinaison avec des tracteurs à chenilles, les véhicules Bobcats et les excavatrices récupèrent les 10 à 30 cm supérieurs de sols organiques pour les utiliser comme source de propagules.

Pour les projets de plus grande envergure, les pailleuses sont plus efficaces pour récupérer le matériel donneur.

Considérations relatives au calendrier de récupération

Le meilleur moment pour récupérer le sol de surface est lorsque les propagules sont en dormance pour réduire leur perte de viabilité. (Par exemple, sur les sites d'exploration, ne pas enlever le sol trop longtemps avant le forage).

La récupération du sol de surface lorsque le sol est gelé améliore la traficabilité et réduit le potentiel de compactage. La récupération pendant l'hiver augmente le risque de mélange s'il y a du gel profond, puisque le sol sort en mottes qui contiennent du sol et du sous-sol.

La période de l'année où les activités de récupération ont lieu influence la quantité de dommages causés aux propagules végétatives. Les plantes qui se reproduisent de façon asexuée sont les moins susceptibles d'être endommagées pendant les opérations d'automne et d'hiver, parce qu'elles sont dormantes et que les réserves d'hydrates de carbone dans leur système racinaire sont les plus élevées. La plupart des plantes boréales ont des graines qui mûrissent à la fin de l'été ou au début de l'automne. La récupération du sol de surface après la maturation des graines augmente le nombre de graines viables.

La récupération devrait être restreinte ou suspendue dans des conditions de sol défavorables, ou lorsque les conditions météorologiques dominantes créent un risque accru de perte, de mélange ou de dégradation du sol.

Par exemple, la récupération des sols de surface sur de grands sites dans des conditions venteuses expose le sol à l'érosion éolienne. La récupération en conditions humides augmente les risques de compactage, de mélange, d'érosion hydrique et de dégradation de la structure du sol. Le fait de placer des sols de surface humides en tas dégrade encore davantage la viabilité des propagules et la qualité du sol de surface.

2.3 Buttage

Le buttage est la création mécanique d'un emplacement de plantation ou d'un microsite discret, surélevé, semblable à ce qui existe naturellement (microtopographie à fosses et à buttes) dans les sites forestiers naturels.

Lorsqu'elles sont faites adéquatement, les buttes créent des zones de plantation qui favorisent l'établissement des semis. La technique des buttes est souvent appliquée dans les forêts boréales et subboréales du Canada, parce qu'elle convient particulièrement bien aux zones humides et froides qui caractérisent souvent les sites d'exploitation des sables bitumineux.

Les traitements par buttes perturbent en général environ de 10 % à 30 % de la surface du sol. Par conséquent, ils peuvent constituer un bon compromis entre une perturbation minimale et des traitements à forte perturbation.

Des zones de plantation surélevées sont généralement de bons sites de croissance pour les semis, surtout dans les climats froids et humides. Les buttes aident à augmenter la température du sol et de l'air, créent un sol minéral lâche et riche en oxygène et augmentent le drainage, ce qui favorise une croissance précoce des racines et l'établissement de semis.

Les buttes peuvent également aider à contrôler la végétation concurrente, à retenir les éléments nutritifs dans les couches organiques de surface, à accroître la disponibilité de la lumière pour les semis et à réduire le risque de dommages causés par le gel et le poids de la neige. Bien que tous les types de zones de plantation surélevées améliorent la température et l'aération du sol, leur efficacité à fournir l'eau, les éléments nutritifs, le contrôle de la végétation et la lumière de façon adéquate varie selon le site.

Principales considérations

La taille, la forme et la composition idéales des buttes varient en fonction du site et des conditions du sol ainsi

que de la machinerie et des techniques utilisées pour les créer. Deux des caractéristiques les plus importantes sont la quantité et la distribution de la matière organique dans la butte et la profondeur du recouvrement du sol minéral.

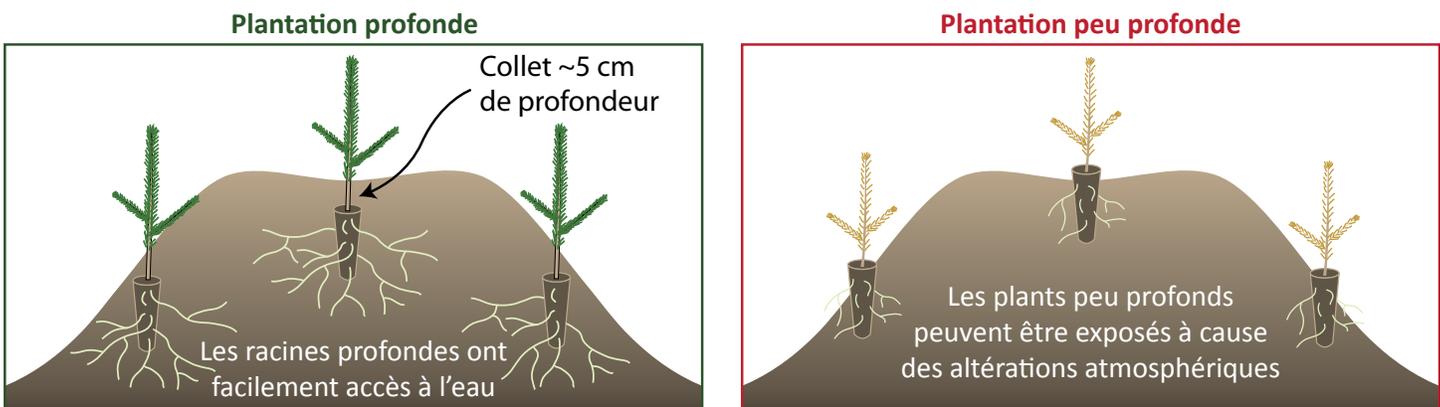
Sur les sols lourds et argileux, les buttes ne nécessitent que de 10 à 15 cm de couverture de sol minéral. Cependant, sur les sols humides avec un sol forestier épais (LFH), les buttes peuvent être aussi hautes que nécessaire pour élever le système racinaire des semis au-dessus des nappes phréatiques élevées. Dans la plupart des cas, les buttes ne devraient pas dépasser de 20 à 30 cm de hauteur une fois tassées.

Les buttes minérales ne doivent pas dépasser 40 cm ni être plus hautes que de 20 à 30 cm une fois tassées. Les buttes organiques peuvent avoir de 1 à 1,5 mètre de hauteur lorsqu'elles sont créées, car elles auront environ 40 cm de hauteur une fois tassées.

Des buttes plus grosses sont en cours d'expérimentation dans certaines applications de restauration, et les résultats indiquent que de grandes buttes peuvent entraîner de très bons résultats.

Les buttes doivent être assez larges pour contrôler la végétation concurrente. Dans tous les cas, les buttes devraient être formées avec des sommets plats à concaves et des côtés légèrement inclinés et doivent avoir un bon contact avec l'humus ou les couches de sol en dessous. Les sommets concaves sont particulièrement importants sur les sites soumis à une sécheresse saisonnière, car ils aident à recueillir l'eau de pluie et à empêcher le dessèchement de la butte.

Figure 8. Plantation profonde sur des buttes de sol minéral



Remarque : L'emplacement de plantation (haut ou côté des buttes) dépend du site.

Il est important de comprendre les conditions climatiques du site perturbé à traiter, car certains climats sont plus propices à la formation de buttes que d'autres.

La plantation en profondeur s'applique presque toujours lors de la plantation sur des buttes. Pour la plantation en profondeur, le semis est planté avec le collet racinaire (c.-à-d. le sommet du bouchon) enfoui à environ 5 cm dans le sol minéral ou l'humus. La plantation en profondeur protège également les racines contre l'exposition en raison de l'altération de la surface de la butte après la plantation (Figure 8).

Les buttes ne sont pas recommandées dans les endroits exposés à la sécheresse, parce que les semis peuvent éprouver un stress hydrique lorsque des points de plantation élevés se dessèchent pendant les périodes sèches. Si la butte est utilisée dans des endroits sujets à la sécheresse, envisagez la sélection d'un endroit qui vous assure que les buttes sont établies dans des zones où l'humidité est plus abondante.

Les semis doivent être plantés assez profondément pour que les racines aient accès à un apport continu d'humidité du sol à la base du point de plantation surélevé.

Des buttes inappropriées ou des plantations inadéquates (peu profondes) peuvent rendre les semis vulnérables à la sécheresse et peuvent également augmenter le risque de soulèvement dû au gel dans les sols à texture plus fine (pourcentage élevé d'argile et de limon). Par exemple, les buttes meubles peuvent être pleines de poches d'air, et les buttes en forme de cône peuvent être sujettes à un drainage rapide : les deux sont défavorables à l'établissement de semis.

L'érosion, l'exposition, la restriction et la déformation des racines sont également des préoccupations en ce qui concerne les buttes.

Lors de la formation de buttes, évitez de recouvrir les résidus ou d'autres débris, ce qui gênerait l'évacuation des racines de la butte et augmenterait le risque de

dessèchement de la butte. Évitez également de créer des buttes à parois abruptes (pentes supérieures à 20 %).

Dans les régions où les chutes de neige sont faibles, une isolation moindre et une fonte des neiges plus précoce autour des buttes peuvent causer des dommages hivernaux aux semis nouvellement plantés qui ne sont pas acclimatés au site.

Il est important de comprendre les conditions climatiques du site perturbé à traiter, car certains climats sont plus propices à la formation de buttes que d'autres (Tableau 2).

Tableau 2. Conditions climatiques appropriées pour la formation de buttes

Conditions climatiques	Convient pour les buttes
Courte saison de croissance et températures fraîches	✓
Saisons de croissance chaudes et sèches avec un risque important de sécheresse estivale	✗
Pentes fraîches, ombragées et orientées vers le nord, surtout en altitude	✓
Pentes et crêtes ensoleillées et exposées plein sud	✗
Poches de gel et zones de drainage d'air froid	✓

Sélection du bon type de butte

Le choix d'un type de butte approprié dépend des caractéristiques du site et des objectifs du traitement de préparation du site.

Buttes d'humus inversées

Ces types de buttes sont créées en plaçant une pelletée de couche arable et le sol minéral sous-jacent à l'envers (Figure 9). C'est la méthode la plus courante et la plus facile à utiliser. Elle convient aux sols à texture fine, mais elle n'est pas recommandée pour les sites sujets à la sécheresse.

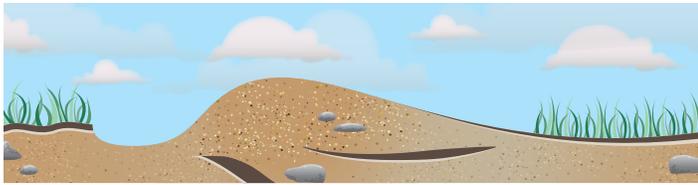
Figure 9. Butte d'humus inversée



Butte de sol minéral

Les buttes de sol minéral sont créées en plaçant le sol minéral dans une aire de plantation surélevée. Cette méthode convient bien aux sites exposés au froid et à la sécheresse où les éléments nutritifs sont abondants dans le sous-sol (Figure 10).

Figure 10. Butte de sol minéral



Buttes mixtes d'humus et de sol minéral

Ces buttes sont composées de matière organique de surface mixte (aussi appelée humus) et de sol minéral. Ce type de butte est bien adaptée aux sites relativement secs et ayant peu d'éléments nutritifs. Cette méthode n'est pas recommandée pour les sites où la végétation concurrente est abondante (Figure 11).

Figure 11. Butte mixte d'humus et de sol minéral



Butte de tourbe

Les buttes de tourbe sont couramment utilisées dans les sols qui sont souvent gorgés d'eau pendant toute la saison de croissance. La plantation dans ce scénario permet à un semis de développer ses racines dans un microsite beaucoup plus sec et plus chaud que les conditions environnantes. Cette méthode convient bien aux sols tourbeux profonds (Figure 12).

Figure 12. Butte de tourbe



Considérations relatives à l'équipement

Les accessoires de terrassement pour excavatrices sont les types de matériel de terrassement les plus polyvalents, mais les plus coûteux. Ils peuvent créer n'importe quel type et taille de butte, même sur des sites qui ont une épaisse couche d'humus et d'abondants débris ligneux.

Les accessoires de terrassement, comme un râteau ou une cuillère, fonctionnent bien sur les sites humides, parce que les excavatrices ont tendance à avoir une faible pression sur le sol. De plus, les accessoires peuvent pousser les débris ligneux sur le côté avec les dents au dos du râteau.

Sur les sites extrêmement humides, les buttes peuvent être combinées avec des fossés, une technique qui permet à l'eau de s'écouler d'une butte. Toutefois, le creusement de fossés doit être abordé avec prudence et planifié avec soin pour éviter l'érosion minérale du sol et la sédimentation possible des cours d'eau. Il s'agit du traitement le plus efficace et le plus rentable, en particulier sur les petits sites isolés (p. ex. les sites sur place).

Dans les sols tourbeux profonds (organiques), une excavatrice avec un godet peut être préférable.

En plus des accessoires pour excavatrices, une gamme d'outils à monticules tractés est disponible pour les tracteurs à chenilles. Les tracteurs à chenilles sont cependant limités à des pentes de moins de 30 %, alors que les excavatrices peuvent travailler sur des terrains plus escarpés.

La puissance supplémentaire d'un accessoire à monticules tracté par un véhicule à chenilles (p. ex. Bracke), combiné à un accessoire permettant de déplacer les rémanents comme une lame en V ou un râteau, peut traiter des sites où la quantité de rémanents est de modérée à élevée.

Une débusqueuse ou un accessoire à monticules tracté sont plus adaptés aux pentes douces (moins de 20 %) qui sont facilement accessibles. Cependant, ils ne sont pas recommandés sur les sites extrêmement humides ou sur les sites qui ont une épaisse couche d'humus ou d'abondants débris ligneux. En effet, l'équipement ne peut pas créer des microsites assez hauts qui se trouvent suffisamment éloignés de la nappe phréatique.

Un buttoir monté sur une débusqueuse est la façon la plus efficace et rentable de traiter des grandes surfaces (p. ex. de grandes éclaiciés ou de longues zones linéaires).

La fabrication de buttes à l'aide d'une excavatrice coûte plus cher qu'avec un buttoir tiré par une débusqueuse ou un tracteur à chenilles. Cependant, ces derniers sont compétitifs en termes de coûts sur les sites qui ont les conditions suivantes :

- petits sites isolés;
- grande quantité de rémanents;
- souches élevées et nombreux obstacles;
- couche d'humus épaisse;
- pente supérieure à 25 %;
- broussailles abondantes;
- terrain humide;
- besoin d'une variété de tailles et de types de buttes.

Modèle

Le modèle utilisé pour les buttes dépend de la couverture requise pour le site. Cette couverture est basée sur les objectifs du site.

Il n'y a pas de modèle établi pour les buttes – les opérateurs travaillent généralement sur le site au besoin. Une exception évidente est la formation de buttes sur des éléments linéaires. Ici, un motif semblable à celui d'une carte à jouer de cinq carreaux est requis sur toute la largeur de l'élément pour s'assurer que des chenaux d'écoulement ne sont pas créés.

Avant la plantation, il est recommandé de laisser les buttes se tasser pendant l'hiver pour réduire le nombre de poches d'air dans le sol. Cependant, si on attend trop longtemps, les buttes pourraient être occupées par de la végétation non désirée. Le meilleur moment pour planter est donc tôt au printemps ou en été après le buttage.

2.4 Scalpage

Pendant le scalpage, les couches organiques superficielles sont enlevées en plaques ou en bandes continues pour exposer le sol minéral sous-jacent. Ce traitement crée un emplacement de plantation plat ou en dépression avec un sol minéral exposé. Il est généralement utilisé en

combinaison avec les buttes sur les terrains accidentés où les conditions d'humidité changent rapidement de très humide à très sec (p. ex. le long des lignes sismiques).

Le scalpage est plus efficace sur les sites secs bien drainés avec des sols à texture moyenne. Dans ces sites, de tels traitements peuvent être assez profonds pour aider à contrôler la végétation concurrente, sans toutefois entraîner d'autres problèmes comme l'engorgement (formation de flaques) ou l'inhibition de la croissance des racines des semis. Les scalps ne devraient être assez profonds que pour éliminer les couches de litière et d'humus défavorables et pour exposer des horizons de sols organiques ou minéraux favorables bien décomposés (Figure 13).

Le sol minéral exposé par le scalpage se réchauffe plus rapidement que le sol non perturbé sous les couches organiques isolantes. L'augmentation de la température du sol est généralement bénéfique, parce que les racines poussent plus vite dans les sols plus chauds que dans les sols plus froids. De plus, le sol minéral exposé fournit un microsite pour la germination et l'établissement des semences.

Des scalps larges et continus permettent une plus grande augmentation de la température et de l'humidité du sol que ceux petits ou étroits. Cependant, ils déplacent plus d'éléments nutritifs du sol du microsite. L'augmentation de la température du sol améliore généralement la croissance des semis, peut faciliter l'absorption d'eau et peut réduire les dommages causés par le gel aux semis.

Selon l'équipement utilisé, le scalpage peut produire une gamme d'aires de plantation. Souvent, il se forme une petite butte d'humus ou d'herbe inversée avec un peu de sol minéral.

Sur les sites humides, les semis doivent être plantés sur l'épaulement du sol minéral exposé, adjacent à l'humus inversé.

Sur les sites secs, les semis peuvent être plantés au fond du scalp.

Sur les sites sujets au soulèvement par le gel, les semis doivent être plantés dans l'humus inversé avec un recouvrement suffisant de la butte. La plantation près du bord du scalp peut optimiser les avantages du réchauffement, ce qui augmente l'accès aux éléments nutritifs provenant de la matière organique.

Figure 13. Zone scalpée



Principales considérations

Il est essentiel de faire correspondre la profondeur du scalpage au site. Il faut prendre soin d'éviter de scalper trop profondément ou trop large — surtout sur les sites pauvres en éléments nutritifs qui ont une mince couche d'humus.

La taille de l'aire créée par le scalpage est également importante. Enlever les éléments nutritifs au-delà des racines des semis ou en exposer des substrats de sol défavorables peut entraîner un mauvais rendement des semis. Les semis dans le sol scalpé n'ont pas initialement accès aux éléments nutritifs dans les couches de surface relativement fertiles éliminées par le scalpage. La surface scalpée doit être assez petite pour que les racines des semis plantés au milieu puissent atteindre les éléments nutritifs dans le sol entourant le sol scalpé pendant la première saison de croissance.

La taille optimale de la surface scalpée varie selon le site. De grandes surfaces sont nécessaires lorsque la végétation environnante ombrage excessivement les semis ou lorsque la végétation concurrente est pressée par la neige sur le semis (pression de la neige). Il est recommandé de ne pas scalper le sol dans les zones sujettes aux glissements de terrain ou à l'érosion.

La texture du sol est également un facteur important qui influence le rendement des semis plantés dans un sol scalpé. Les sols à texture moyenne et modérément grossière n'inhibent généralement pas la croissance des racines. Cependant, un sol de sous-surface compacté et

à texture fine, exposé dans des parcelles scalpées, peut limiter la croissance des racines des semis. Dans cette situation, les semis deviennent chlorotiques (c.-à-d. qu'ils montrent des signes de stress), parce que les racines prennent des années pour accéder à l'azote dans les couches organiques superficielles adjacentes.

Le soulèvement par le gel peut aussi être un problème pour les semis plantés dans un sol minéral exposé à texture fine.

Le scalpage n'est pas recommandé sur les sites humides, car les racines des semis peuvent devenir saturées. Le scalpage profond dans les sols à texture fine peut également entraîner des flaques d'eau et une extension radiculaire restreinte. Les systèmes radiculaires des semis peuvent être si peu profonds dans un sol scalpé à texture fine que les jeunes arbres sont instables. Le soulèvement par le gel peut aussi être un problème pour les semis plantés dans un sol minéral exposé à texture fine.

Considérations relatives à l'équipement

Des godets, des fourches, des râtaux et des accessoires motorisés montés sur la flèche d'une excavatrice peuvent être utilisés pour le scalpage. Les outils tractés ou montés sur une débusqueuse sont recommandés sur la plupart des sites où la traficabilité est bonne, les pentes sont douces et l'épaisseur du sol forestier est modérée. Les outils montés sur une débusqueuse (p. ex. le scarificateur Bracke) ont une productivité élevée et de faibles coûts de traitement.

Les godets standards qui ont des dents ou des râtaux sont tout ce qui est nécessaire pour le scalpage. Les excavatrices ont généralement une productivité plus faible et des coûts de traitement plus élevés que les outils tirés par une débusqueuse. Les excavatrices sont utilisées pour le scalpage uniquement sur les sites présentant des pentes abruptes, des rémanents abondants ou des souches élevées ou qui nécessitent une variété de traitements de préparation de site (p. ex. lors d'une restauration linéaire).

Modèles

Au cours du scalpage, les plaques de sol minéral sont exposées en rangées continues ou selon un motif de parcelles systématique.

En rangées continues, les surfaces scalpées doivent être espacées uniformément le long du contour du site. L'intervalle des rangées dépend du nombre d'emplacements de plantation requis pour le site.

En motif de parcelles systématique, la terre végétale est enlevée en petites parcelles pour exposer le sol minéral, ce qui crée un endroit idéal pour planter des semis.

Le scalpage devrait généralement être assez profond pour n'enlever que la couche LFH. Les microsites scalpés devraient être plantés dans la saison suivant les traitements pour assurer le succès des semis dans les zones où la végétation est en compétition.

2.5 Scarifiage

Le scarifiage du sol consiste à enlever les couches organiques de surface (humus, herbe et/ou végétation) pour exposer et ameublir le sol minéral. La surface du sol est éraflée avec l'équipement directement ou par des outils traînés derrière. Ce traitement crée un microsite plat ou en dépression avec un sol minéral exposé.

Le scarifiage est plus souvent utilisé sur de grandes zones contiguës au lieu du scalpage. Il convient aux endroits où la compétition végétative est faible, où il y a une source de graines provenant de forêts adjacentes et où des cônes sont présents sur le sol ou dans les débris d'exploitation forestière.

Le scarifiage sert à :

- créer des lits de semis appropriés;
- distribuer les cônes ou les semences en mélangeant ou en scalpant partiellement le sol forestier;
- favoriser le développement rapide du système racinaire d'un semis planté;
- favoriser la libération possible de graines de cônes sérotineux lorsque les températures sont suffisamment élevées.

Le scarifiage se traduit par :

- des températures du sol minéral plus élevées;
- moins de risque de gel;
- plus de lumière arrivant jusqu'au semis;
- un apport plus équilibré d'oxygène et d'eau dans le sol.

Ce traitement convient aux endroits où une préparation légère du site est requise, comme sur des sites d'humus secs ou minces.

Principales considérations

Le scarifiage par plaques crée des emplacements scalpés, affaissés et préparés, un épaulement plat et une butte surélevée et lâche. L'enlèvement des couches organiques crée un microsite qui favorise la survie et la croissance des semis sur les terrains mésiques qui ont des sols limoneux non compactés. Sur les sites plus secs, l'emplacement préféré de plantation peut se situer dans la dépression, tandis que sur les sites plus humides, le point de plantation préféré peut se situer sur l'épaulement.

En général, ce traitement n'assure pas un contrôle adéquat de la végétation là où la concurrence est agressive, et il n'est pas non plus efficace sur les sites humides ou très secs où les tranchées ou talus et les buttes sont

plus appropriés. Le scarifiage par plaques perturbe généralement environ de 10 à 30 % de la surface du sol et retient plus d'éléments nutritifs du sol à proximité du semis que le scarifiage par bandes.

Pendant le scarifiage, éviter d'enlever beaucoup de matière organique, en particulier sur les sols stériles à texture grossière avec une couche organique épaisse et sur les sols argileux ou limoneux sujets au soulèvement par le gel. Un scarifiage inadéquat peut entraîner l'érosion et le compactage du sol, l'endommagement des arbres restants, le déracinement ou l'endommagement des semis, l'expansion indésirable des mauvaises herbes ou des plantes envahissantes, la réduction de l'approvisionnement en éléments nutritifs du sol et un risque accru de soulèvement dû au gel.

Considérations relatives à l'équipement

Les types les plus communs de scarificateurs sont tirés derrière une débusqueuse ou un tracteur à chenilles. Ils roulent sur des roues qui, en plus de supporter le cadre, freinent les roues de défonçage. Les unités qui fonctionnent sur roues peuvent être couplées à l'aide d'un treuil et être sorties ou tirées au besoin.

Les bras de la roue de défonçage sont toujours pivotants pour permettre un mouvement vertical, et un mouvement latéral est parfois aussi possible. Dans ce dernier cas, on dit que les bras sont inclinés. Les unités inclinées fonctionnent plus facilement et sont plus à même de suivre les contours du sol. Les bras de la roue de défonçage sont soulevés pendant le transport (Figure 14).

Les chaînes à débroussailler sont de grandes chaînes d'acier spécialement construites et traînées derrière une machine motrice. La configuration de l'unité de scarifiage varie considérablement en fonction des conditions du site et des objectifs du scarifiage.

Une série de chaînes d'ancres de grands navires de liaison sont attachées parallèlement les unes aux autres à une barre d'attelage droite ou en forme de V (barres en V) ou à une nacelle à débusquer triangulaire. De grosses pointes sont soudées en spirale au milieu des maillons de la chaîne. Des manilles ou des chapes retiennent le tout ensemble.

Les chaînes sont fréquemment utilisées en combinaison avec d'autres dispositifs de scarifiage par traînée tels que les patins de tracteur et les barils « ailerons de requin ». Les ailerons de requin sont construits comme des

Figure 14. Débusqueuse avec râteau



unités étanches à l'eau avec quatre rangées en spirale de lames ou d'ailettes soudées à la surface du tambour. Ils nécessitent un pivot à l'avant et à l'arrière pour leur permettre de tourner librement. Les ailerons de requin sont utilisés pour orienter les rémanents et exposer le sol minéral dans des conditions de sols forestiers plus épais.

Le scarificateur à deux rangs Bracke produit un scarifiage intermittent avec un minimum de perturbation du sol et des microsites surélevés et aérés. La roue piocheuse tourne à environ la moitié de la vitesse du pneu, ce qui fait que les dents creusent, scalpent et inversent le sol minéral exposé. Quand la pioche heurte un obstacle inamovible, le pneu glisse pour absorber la charge de choc avant que le scarifiage ne reprenne.

Modèles

Les modèles concentriques sont recommandés pour le scarifiage par traînée parce qu'ils peuvent aider à minimiser le temps passé à tourner puisqu'il est difficile de tourner avec cette méthode de traitement. L'opérateur commence le long du bord extérieur du site perturbé et continue à faire le tour jusqu'à ce que toute la zone soit traitée.

N'effectuez cette opération que dans l'année qui suit la récolte, car une utilisation ultérieure pourrait déraciner et tuer les germinations établies. Une évaluation préalable au traitement déterminera le nombre et la répartition des germinations ou des semis.

2.6 Malaxage

Les traitements par malaxage incorporent des couches organiques de surface avec le sol minéral sous-jacent, laissant les éléments nutritifs des couches organiques immédiatement disponibles aux végétaux en germination ou aux semis plantés dans des sites autrement pauvres. Le mélange expose en général le sol minéral, ce qui augmente la température du sol. Il améliore également la capacité des matériaux de surface à retenir l'humidité, améliorant ainsi le lit de semence.

Figure 15. Malaxeur de sol



Lorsqu'il est fait de manière appropriée, le malaxage du sol peut :

- contrôler la végétation concurrente;
- augmenter la température du sol et l'aération;
- diminuer la densité apparente du sol;
- améliorer la relation sol-eau;
- retenir les éléments nutritifs stockés dans les couches organiques de surface.

Pour les sols à texture fine, le malaxage peut être un traitement plus efficace que le scalpage. L'incorporation de matière organique dans le sol minéral produit des emplacements de plantation moins compactés que ceux qui se trouvent dans les sols souterrains exposés et à texture fine.

Le mélange évite également les problèmes de croissance racinaire restreinte et d'engorgement hydrique, qui sont généralement associés au scalpage. Le malaxage fin, le malaxage sélectif et le malaxage grossier sont trois types courants de malaxage.

2.6.1 Malaxage fin

Le malaxage fin du sol est utilisé sur les sites qui présentent un fort potentiel de végétation concurrente. Dans ce scénario, une vitesse de rotation élevée est nécessaire pour couper les parties de plantes se propageant en morceaux assez petits pour empêcher la repousse.

Le malaxage fin exige que l'équipement se déplace lentement afin de laisser suffisamment de temps pour hacher le sol et la végétation. Il convient aux sols à texture fine qui ont peu de galets ou de blocs.

Ce traitement entraînera le remplacement des complexes de végétation arbustive, comme le saule ou le tremble, par de la végétation herbacée et de l'herbe. Ce changement dans le complexe végétal peut ne pas être souhaitable sur certains écosites. Les traitements de malaxage fin perturbent en général jusqu'à 100 % de la surface du sol.

2.6.2 Malaxage sélectif

Le malaxage sélectif est recommandé pour les sites où il est biologiquement approprié, mais où les débris, les souches ou d'autres obstacles empêchent l'utilisation d'outils de malaxage en bande. Le malaxage sélectif est également utilisé sur les sites où une perturbation minimale du sol est requise. Les outils de malaxage sélectif sont généralement montés sur des excavatrices, puisque ces dernières peuvent travailler sur une grande variété de sites.

2.6.3 Malaxage grossier

Le malaxage grossier est réalisé à l'aide de gros outils qui amoncellent des mottes de couches de sol organique et minéral en surface dans un lit. Le malaxage grossier fournit peu de contrôle de la végétation concurrente, mais il est bénéfique lorsque les basses températures du sol et/ou la nappe phréatique haute empêchent la croissance des semis. Sur les sites à fort potentiel de végétation concurrente, le malaxage grossier doit être suivi de traitements de brossage planifiés. Les traitements de malaxage grossier perturbent en général jusqu'à 100 % de la surface du sol.

Principales considérations

Un malaxage inadéquat peut stimuler la végétation concurrente. L'efficacité des traitements de malaxage pour contrôler la végétation concurrente dépend de l'intensité du malaxage et de l'agressivité de la végétation concurrente.

Le malaxage fin ne convient pas aux sols pierreux, à texture grossière et humide avec une mince couche d'humus. Les techniques de malaxage sélectif et de malaxage grossier peuvent être efficaces pour favoriser la croissance des semis que si la végétation concurrente n'est pas agressive. Sinon, le malaxage sélectif et le malaxage grossier peuvent accroître la concurrence des plantes indésirables, parce qu'ils améliorent la fertilité du sol sans réduire suffisamment le potentiel de repousse.

Le malaxage peut entraîner un appauvrissement à long terme des éléments nutritifs en les rendant disponibles de façon excessive au cours des premières années suivant le traitement. Les éléments nutritifs non absorbés par les plantes peuvent être perdus dans l'écosystème par lessivage. Le fait de ne malaxer que les emplacements de plantation plutôt que l'ensemble du site semble éviter ce problème.

L'équipement de malaxage incorpore la matière organique de surface dans le sol minéral afin d'améliorer l'état des éléments nutritifs, d'augmenter la température du sol et d'améliorer les propriétés physiques du sol. Les emplacements préparés peuvent être surélevés ou plats. Les emplacements surélevés peuvent être créés par un accessoire de labour.

La plupart des sols bénéficieraient de ce traitement, mais les contraintes opérationnelles limitent son applicabilité.

2.7 Utilisation d'une trancheuse à disques

Le creusement de tranchées crée des sillons ou des tranchées continus ou intermittents. Au cours de ce traitement, la couche organique et une partie de la matière minérale sous-jacente sont enlevées et déposées sur des talus à côté de la tranchée résultante, offrant ainsi une variété de positions de plantation.

Les couches sont à peu près mélangées sur le sol forestier non perturbé à côté de la tranchée. Les trancheuses à disques utilisent des disques rotatifs avec une pression

vers le bas pour produire deux tranchées parallèles qui créent une couche minérale et organique mélangée sur le sol forestier non perturbé. Les traitements par creusement de tranchées perturbent généralement environ de 25 à 50 % de la surface du sol.

La trancheuse à disques mélange le sol et l'humus d'une manière qui favorise la croissance tout en fournissant le microrelief nécessaire à l'établissement réussi des semis. Le creusement de tranchées est plus approprié pour des conditions humides (non mouillées) ou lorsque des zones froides et humides sont intercalées avec des zones de meilleur drainage.

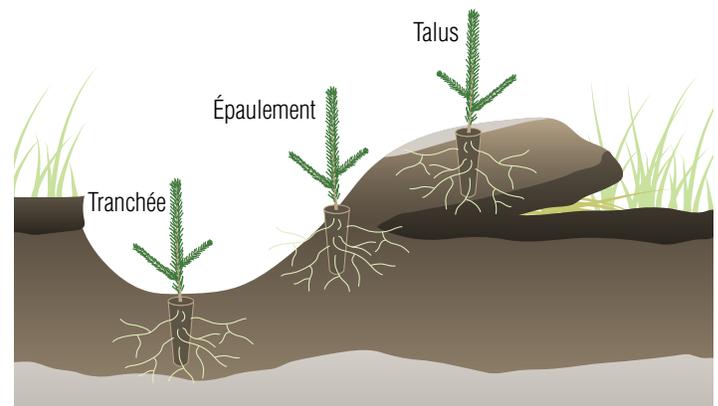
Après le creusage de tranchées, plusieurs positions de plantation (microsites) sont disponibles pour le planteur (Figure 16). Ces positions comprennent la tranchée, l'épaulement et le talus.

La position de la tranchée peut être utilisée lorsque la conservation de l'humidité est requise sur des sites secs.

La position de l'épaulement à la jonction de la tranchée et du talus est favorable sur les sites à régime d'humidité intermédiaire (mésique).

La position du talus de terre minérale/matière organique de surface fournit un point surélevé qui peut être partiellement mélangé ou généralement inversé avec un recouvrement de sol minéral. Ce microsite surélevé convient aux sites humides.

Figure 16. Microsites de plantation créés par le creusement de tranchées



Principales considérations

Les résultats du creusement de tranchées varient selon les caractéristiques du site, le type de trancheuse et les réglages de la machine utilisés. Le profil de la tranchée peut être ajusté en modifiant l'angle du disque, la pression verticale et la vitesse de déplacement.

Lorsque le disque est à un angle presque perpendiculaire à la direction de déplacement, il produit une tranchée plus large et plus plate. Lorsque l'angle est plus proche de la parallèle à la direction de déplacement, il produit une tranchée plus profonde et plus étroite.

En augmentant la pression verticale et en diminuant la vitesse de déplacement, on obtient une tranchée plus profonde et un talus bien formé.

Des tranchées larges et continues permettent une plus grande augmentation de la température et de l'humidité du sol que celles petites ou étroites. Cependant, elles déplacent plus d'éléments nutritifs du sol. Les petites tranchées retiennent les éléments nutritifs du sol près des semis, mais elles n'entraîneront pas une augmentation aussi importante de la température du sol.

Le creusement de tranchées n'est pas recommandé pour les sites froids et humides ou abrupts. Sur les grands pâturages libres (domestiques ou fauniques) ou sur les sites en pente où l'érosion par canalisation de l'eau est préoccupante, le creusement de tranchées ne devrait être effectué que de façon intermittente. Les talus latéraux surélevés peuvent également être sujets à la dessiccation dans les endroits plus secs. Ce traitement ne convient pas non plus aux petits sites de moins de 5 hectares (ha), parce que le tracteur a besoin d'espace pour ses manœuvres et pour suivre le modèle le plus efficient.

Les trancheuses à disques peuvent être regroupées en trois catégories distinctes : les trancheuses passives, les trancheuses qui ont une pression hydraulique vers le bas, mais des disques passifs, et les trancheuses qui ont une pression hydraulique vers le bas et des disques motorisés.

Les trancheuses les plus couramment utilisées dans l'Ouest du Canada sont équipées d'un système hydraulique à pression vers le bas et de disques motorisés. Elles sont recommandées pour les sites avec des rémanents lourds sur une couche d'humus relativement profonde ou toute autre application nécessitant une bonne

pénétration du disque ou la formation de talus. Pour un bon fonctionnement, les trancheuses à disques doivent être utilisées à des vitesses de déplacement inférieures à 5 km/h. Sur les sites où les rémanents sont abondants, un râteau en V peut être utilisé pour aligner les rémanents immédiatement avant le creusement de tranchées. Certaines trancheuses à disques motorisées peuvent creuser des tranchées de façon intermittente. Ces trancheuses sont recommandées pour les pentes de tranchées trop raides pour être traitées par contournage.

Il peut arriver que des flaques d'eau s'accumulent dans les tranchées profilées, bien que les tranchées aient généralement suffisamment d'interruptions pour que le drainage ne soit pas affecté. Le potentiel d'érosion est plus élevé si des passages perpendiculaires sont utilisés sur des pentes abruptes. Les passages perpendiculaires devraient être limités aux sols à texture grossière et combinés à des tranchées intermittentes pour réduire la dégradation potentielle du site comme l'érosion ou l'affaissement.

Considérations relatives à l'équipement

Les trancheuses à disques peuvent être montées sur une grande variété de véhicules. Lors du choix de l'appareil moteur, les considérations suivantes sont importantes :

- l'adaptation de la machine motrice aux conditions du site (pentes, chargement des rémanents, traficabilité);
- répondre aux exigences hydrauliques de la trancheuse à disque;
- l'adaptation de la transmission aux exigences de traction élevée de la barre d'attelage à des vitesses de translation lentes (en particulier si un dispositif pour aligner les rémanents doit également être utilisé).

Modèles

Le modèle de traitement pour la machine motrice est limité par le terrain. Sur un terrain accidenté, les blocs doivent être traités en sous-unités. Sur les pentes, jusqu'à 30 %, les tranchées peuvent être contournées avec la pente. En cas de contournage sur des pentes plus raides, il est difficile de maintenir un espacement uniforme entre les passages, car la tendance est que la machine glisse vers le bas en évitant les obstacles.

Pour satisfaire aux objectifs de préparation du terrain et fournir des emplacements de plantation appropriés, l'opérateur de la machine peut modifier l'angle du disque,

la pression vers le bas, l'espacement des disques, la vitesse de la machine et l'espacement entre les passages. Comme le soleil se trouve principalement dans la moitié sud du ciel pendant la majeure partie de la journée, la direction dans laquelle les tranchées sont orientées peut avoir un effet sur les conditions du microsite. Les tranchées nord-sud créent des conditions de lumière constantes. Dans les tranchées est-ouest, l'épaulement orienté sud-est la position la plus chaude, tandis que les tranchées ombragées par un talus au sud ont tendance à être plus fraîches.

Sur les sites froids où l'on souhaite un réchauffement du sol, les tranchées devraient être orientées nord-sud. Lorsque des tranchées est-ouest sont inévitables, les planteurs devraient choisir, si possible, des microsites orientés sud ou sud-ouest.

Sur les sites plus chauds et plus secs, où le manque d'humidité du sol et les températures élevées peuvent nuire aux semis, les tranchées est-ouest sont préférables, et les planteurs devraient choisir des emplacements de microsite frais dans la mesure du possible.

Le creusement à disque est plus efficace de mai à octobre sur les sols non gelés qui n'ont pas de couverture neigeuse. Cependant, les sols gelés à une profondeur de 5 cm ou qui ont de la neige jusqu'à 15 cm peuvent être traités efficacement.

2.8 Labourage

Le labourage crée des talus de plantation surélevés et continus, ce qui permet d'ameublir le sol à long terme. Une grande surface de terrain uniforme et relativement libre d'obstructions (roches, rémanents, souches, etc.) est nécessaire pour ce traitement. Les traitements par labourage perturbent en général environ de 30 % à 65 % de la surface du sol.

Le labourage peut créer des microsites surélevés acceptables pour la plantation. Il ameublir le sol et assure un bon drainage, ce qui fournit suffisamment d'oxygène au sol pour les semis et augmente la température du sol. Le labourage est recommandé pour les sites humides qui ont des couches d'humus épaisses et pour les zones qui ont des couches d'humus épaisses, mais inactives, avec des cycles des éléments nutritifs plus lents. Les semis doivent être plantés sur le microsite surélevé créé par le labourage.

Principales considérations

Sur les sites secs, de plus petites dessoucheuses à griffe à deux rangs peuvent être efficaces. Les semis plantés au fond du sillon peuvent bénéficier d'un certain degré de protection contre le gel causé par le rayonnement de la chaleur du sol la nuit et d'une plus grande disponibilité de l'humidité.

Le labourage doit être planifié de façon à ce que le sol traité sera humide lorsqu'il gèlera.

Le labourage peut gravement affecter le régime nutritif et l'équilibre hydrique du sol. Par conséquent, il est considéré comme inapproprié pour les sites pauvres en éléments nutritifs ou les sites secs. Le labourage ne peut pas contrôler la végétation concurrente comme l'herbe. Le sillon profond associé à ce traitement peut causer des systèmes racinaires asymétriques, parce que les racines ne traverseront pas les sols denses, souvent humides, à texture fine au fond du sillon. Il n'est pas recommandé pour les terrains irréguliers ou accidentés, les pentes de moins de 25 % ou les sites secs avec des couches minces d'humus. Un labourage trop profond dans des substrats défavorables (p. ex. couches compactées (horizon durci) ou sols minéraux pauvres en éléments nutritifs) peut également entraîner un mauvais rendement des semis.

Considérations relatives à l'équipement

Les dessoucheuses à griffes sont des dents de défonceuse standard modifiées montées à l'arrière d'un tracteur à chenilles. Elles ont été conçues spécialement pour traiter les sols humides lorsqu'ils sont gelés. La conception la plus commune est une charrue type à double versoir symétrique avec des lames racleuses remplaçables, qui s'attachent à la tige de la défonceuse du tracteur à chenilles. La dent de la défonceuse creuse dans le sol, tandis que les lames racleuses de la charrue déplacent le sol de chaque côté. Les petites dessoucheuses à griffes à deux rangs ont été conçues pour créer des sillons de plantation sur des sites secs.

Ces effets bénéfiques contribuent à améliorer les conditions de sol indésirables . . .

Une charrue de coupe traverse le sol et dirige le matériau vers les côtés. On obtient un sillon d'une profondeur de 20 à 60 cm et d'une largeur maximale de 80 cm. De chaque côté du sillon, le sol minéral est exposé sur les épaulements. L'épaulement peut avoir jusqu'à 60 cm de largeur.

Les charrues en V sont des tracteurs à chenilles qui ont de grandes lames en forme de V montées sur le châssis en C. La forme de la lame lui permet de dégager un chemin devant la machine motrice sans avoir à reculer et à empiler continuellement le sol.

Les charrues montées à l'arrière servent à enlever la végétation et les couches organiques lorsqu'une perturbation profonde ou importante est nécessaire. Habituellement, ces outils créent un talus et une tranchée renversés, mais le profil de traitement dépend de chaque accessoire.

Les objectifs varient en fonction de l'outil et du site. Les emplacements de plantation peuvent être préparés au sommet du matériau renversé, sur la partie scalpée et nivelée ou dans la tranchée scalpée et abaissée, selon les besoins du site et de l'espèce.

Modèle

Le labourage doit se faire en lignes droites et parallèles, avec des passages qui se chevauchent entre les talus, ce qui permet à la charrue de capter les sols non labourés. Le premier passage d'une paire de charrues couvrira de 30 à 35 % de la surface. La superposition du premier passage créera des sillons d'un mètre de largeur et couvrira au moins 65 % de la superficie. Le deuxième passage fracture généralement tout le sol entre les sillons du premier passage. L'efficacité du deuxième passage de labourage

est améliorée si les sillons sont droits et uniformément espacés. À la fin du sillon, il est conseillé de minimiser le labourage peu profond en soulevant la charrue hors du sol.

Lors du labourage de pentes douces, il est recommandé de faire le premier passage vers le bas de la pente. Le premier passage exige toujours le plus de puissance, le labourage sera plus profond et plus efficace si le premier passage est vers le bas de la pente. Le deuxième passage sera plus facile en amont après la première passe. De petites variations cycliques de la profondeur de labourage (de 3 à 5 cm) peuvent réduire la puissance nécessaire au labourage et augmenter la vitesse. Les tracteurs à chenilles devraient sortir les outils de labourage du sol avant de se retourner.

Sauf pour les courtes distances, retourner le tracteur à chenilles permet généralement un meilleur contrôle que de reculer entre les sillons du premier passage pour faire le deuxième passage. Pour passer d'un sillon à l'autre, le tracteur à chenilles doit rester sur le sol entre les sillons, sans quoi il dérivera dans le sillon existant et réduira les avantages du premier passage.

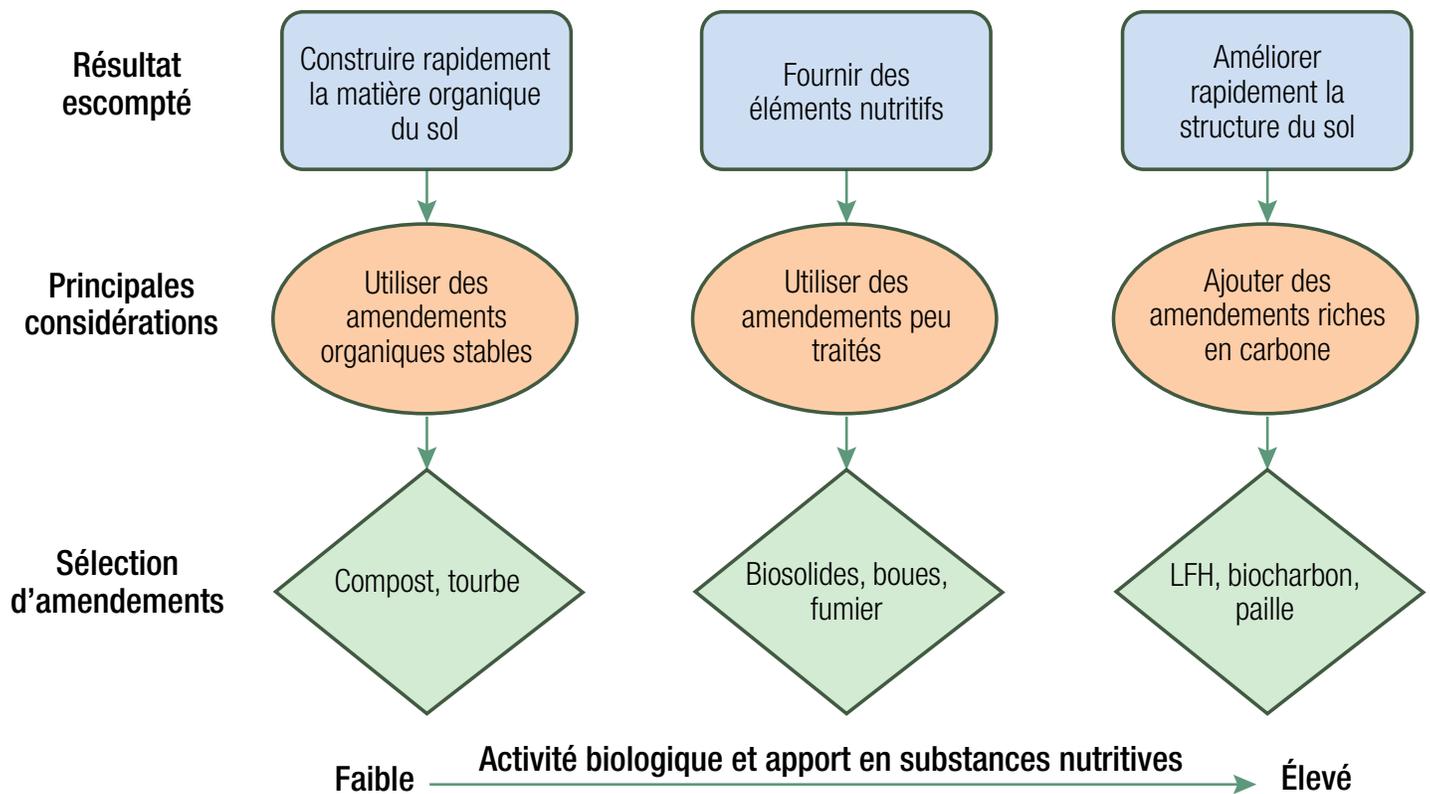
Les charrues de labourage doivent être utilisées à des profondeurs supérieures à 60 cm, car un labourage moins profond augmente le mélange des couches de sol. Par conséquent, une plus grande quantité de sous-sol remonte à la surface et est mélangée à la couche arable, ce qui réduit les avantages du travail du sol forestier.

Le labourage doit être planifié de façon à ce que le sol traité sera humide lorsqu'il gèlera.

2.9 Amendements organiques

En plus de modifier physiquement les rémanents, l'humus et les couches de sol par diverses méthodes mécaniques, l'application d'amendements du sol peuvent être mises en œuvre au cours de l'étape de préparation du terrain. L'application d'amendements a pour but d'améliorer les conditions physiques, biologiques et chimiques du sol (y compris la texture, la densité apparente, l'humidité et les éléments nutritifs) afin de favoriser la croissance et le développement des arbres.

Figure 17. Amendements pour des résultats précis



Source : Voir le chapitre Références, adapté de Cooperband, 2002.

L'ajout d'amendements organiques comme le compost, les boues de pâte mécanique et le biocharbon présente de nombreux avantages, dont les suivants :

- augmentation de la quantité de matière organique du sol (MOS) dans le sol, ce qui améliore sa capacité à retenir l'humidité et en améliore l'aération;
- diminution de la densité apparente;
- augmentation du pouvoir tampon du pH;
- augmentation de la capacité d'échange cationique;
- augmentation des macronutriments dans le sol;
- augmentation des micronutriments dans le sol.

Ces effets bénéfiques contribuent à améliorer les conditions de sol indésirables auxquelles sont confrontés de nombreux sites après leur perturbation et à accélérer davantage la croissance des arbres et d'autres espèces souhaitables.

Principales considérations

L'ajout d'un amendement doit être approuvé dans le plan de conservation, de remise en état et de fermeture de chaque site. Il est important de noter que la certification des sites qui ont reçu des amendements est souvent retardée pour s'assurer que le site est autosuffisant. Comparativement aux engrais conventionnels, la plupart des amendements organiques peuvent fournir des concentrations stables d'éléments nutritifs aux plantes sur une plus longue période de temps, avec l'avantage supplémentaire d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol réhabilité.

Plusieurs types d'amendements organiques sont disponibles pour la remise en état. Certains amendements ont plus de carbone et d'éléments nutritifs labiles que d'autres; par conséquent, la sélection des amendements devrait être basée sur le résultat souhaité de la remise en état (Figure 17).

Pour les amendements ayant un faible rapport carbone-azote (comme le fumier animal), la biodégradation libère de l'azote (sous forme de NH_4^+ et de NO_3^-) dans le sol. Il s'agit d'un processus important dans la forêt boréale du nord, où la disponibilité accrue de formes inorganiques d'azote est directement liée à une plus grande biomasse aérienne et souterraine dans les peuplements matures de conifères.

Dans l'ensemble, la documentation suggère une forte relation entre la quantité de matière organique dans le sol (en pourcentage du poids sec) et la hauteur des arbres. Cela est dû à l'amélioration de la capacité de rétention de l'eau et des éléments nutritifs disponibles. Le carbone organique contenu dans les amendements sera décomposé par les micro-organismes et la végétation résidente en composés organiques plus petits et plus facilement disponibles.

Un autre facteur à prendre en considération lors du choix des amendements et de la dose d'application appropriée est le type d'espèces plantées dans chaque scénario. La durée d'efficacité d'un amendement biologique est incertaine, surtout lorsque les doses d'application sont faibles. Inversement, l'ajout de matière organique du sol peut modifier le fonctionnement des sols par rapport aux systèmes naturels; les trajectoires de croissance peuvent être différentes du système naturel.

Une couche organique riche ne produit pas de conditions de croissance idéales pour toutes les espèces d'arbres. La libération d'éléments nutritifs labiles peut stimuler la croissance de graminées et de mauvaises herbes agronomiques qui surpasseraient les espèces d'arbres, et certaines espèces ligneuses peuvent être entravées par trop d'amendements organiques.

Par exemple, la croissance du tremble est entravée par une épaisse couche organique du sol (plus de 25 cm à l'échelle du paysage) et, après un feu, une couche organique du sol de plus de 2 à 10 cm peut empêcher le tremble de s'enraciner.

Un autre facteur à prendre en considération lors du choix des amendements et de la dose d'application appropriée est le type d'espèces plantées dans chaque scénario.

D'autres effets secondaires d'une couche organique épaisse au sol (dont une baisse de la température du sol) sont des taux d'assimilation plus faibles, une biomasse aérienne réduite (en termes de croissance des feuilles et des pousses) et un arrêt de la croissance et de la reproduction des racines.

De plus, des facteurs clés comme la quantité et le taux de litière et de débris ligneux qui s'accumulent naturellement au fil du temps avec la revégétalisation doivent être pris en compte lors du choix de l'amendement approprié à utiliser dans la remise en état.

Les arbres à feuilles caduques (comme le tremble) produisent plus de litière que les conifères. En outre, la litière de la plupart des conifères se décompose lentement, mais cette litière épaissit lentement la couche organique du sol. Si la reconstruction de la matière organique du sol dans le sol est le résultat souhaité, il est important de choisir un amendement qui soutiendra le développement de l'arbre et l'accumulation de litière en fonction du type d'arbres plantés dans ces scénarios de remise en état.

Tableau 3. Propriétés de certains amendements

Amendements	Propriétés générales	Directives d'emploi	Précautions d'emploi
Compost	<ul style="list-style-type: none"> • PH ~ 5,5-8,0 • Teneur en humidité ~ 35-55 % • Sel soluble < 1,25 décisiemens/mètre • Teneur élevée en matière organique • Source d'éléments nutritifs • Améliore la structure du sol • Augmente la capacité de rétention d'eau • Fournit des microbes bénéfiques pour le sol • Sans pathogène • Sans graine de plantes indésirables 	<ul style="list-style-type: none"> • Appliquer au moins un mois avant la plantation pour augmenter la stabilité • Dose d'application : 10-40 tonnes/ha (t/ha) incorporé à 15 cm 	<ul style="list-style-type: none"> • Des dommages dus au sel peuvent se produire dans les sols grossiers avec une faible teneur en matière organique et une faible capacité d'échange de cations • Peut contenir de l'ammonium, des sels et d'autres éléments phytotoxiques • Son application doit être évaluée au cas par cas, parce que les directives pour l'application du compost dans les forêts ne sont pas disponibles
Tourbe commerciale	<ul style="list-style-type: none"> • La tourbe mésique est plus efficace que la tourbe fibrique • Haute capacité de rétention d'eau • Ajouter au sol aussi souvent que nécessaire • Des taux élevés sont requis 	<ul style="list-style-type: none"> • Étendre les matériaux fraîchement excavés dans les 20 premiers centimètres de sol minéral ou dans 25 centimètres de sable de résidus • La chaux peut être nécessaire pour corriger l'acidification de la tourbe • L'engrais peut être nécessaire pour atteindre un rapport carbone-azote souhaitable • Éviter la stratification pour éviter les effets négatifs sur le mouvement vertical de l'humidité 	<ul style="list-style-type: none"> • Un pH bas (3,7-4,5) peut acidifier le sol • Peut contenir des graines de mauvaises herbes ou des graines non indigènes • Ressource non renouvelable • Rapport carbone-azote élevé, mauvaise source d'éléments nutritifs pour les végétaux • Peut libérer des gaz à effet de serre après l'application en raison de la décomposition
Biosolides (Classes A et B)	<ul style="list-style-type: none"> • Teneur élevée en matière organique • Améliore la structure du sol • Augmente la capacité de rétention de l'eau • Source d'éléments nutritifs • Faible coût • Réduit la mise en décharge 	<ul style="list-style-type: none"> • Caractériser le matériau cible avant l'application • Dose d'application : 25-85 t/ha incorporé à 15 cm • Envisager d'ajouter des bandes tampons pour protéger les ressources en eau locales et les utilisations des terres avoisinantes • Peuvent être réappliqués après 3 ans si les conditions sont respectées • Peuvent être appliqués uniquement sur des pentes jusqu'à 9 % • Seulement recommandés pour les sols avec un pH > 6,5 	<ul style="list-style-type: none"> • Contiennent des organismes pathogènes • Peuvent contenir des métaux lourds ou des toxines organiques • Les biosolides traités à la chaux peuvent causer des sols à pH alcalin • Des charges excessives d'éléments nutritifs ou des déséquilibres nutritifs peuvent survenir si les biosolides sont mal appliqués • Peuvent générer des odeurs et attirer la faune • Coûteux à déplacer sur de longues distances

Tableau 3. Propriétés de certains amendements (suite)

Amendements	Propriétés générales	Directives d'emploi	Précautions d'emploi
Boues de pâtes et papiers	<ul style="list-style-type: none"> Teneur élevée en matière organique Appliquer sur des sols minéraux, pas sur des sols organiques Améliorent la structure du sol Augmentation de la porosité, de l'aération, du drainage et de la profondeur d'enracinement des sols à texture fine Augmentent la capacité de rétention de l'eau Libération lente de l'azote Augmentent la capacité de rétention des éléments nutritifs Réduisent la quantité de déchets incinérés ou enfouis dans les usines de pâtes et papiers Faible coût 	<ul style="list-style-type: none"> Ne pas appliquer sur des sols avec un pH < 6,0 Dose d'application : 60-185 t/ha de boue sèche Peuvent être appliquées sur des pentes jusqu'à 15 % Peuvent être réappliquées après 2-4 ans si les conditions sont respectées 	<ul style="list-style-type: none"> Les résidus de chaux peuvent augmenter le pH du sol Peuvent avoir un rapport carbone-azote élevé, ce qui réduit la disponibilité de l'azote pour les plantes Coûteux à déplacer sur de longues distances
Fumier	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la croissance et de la productivité des plantes Source d'éléments nutritifs Fournit de l'azote tout au long de la saison Augmente l'activité microbienne. Teneur élevée en matière organique Améliore la structure du sol Augmentation de la capacité de filtration de l'eau et de rétention de l'eau Augmentation de la capacité d'échange cationique Réduction de l'érosion éolienne et hydrique 	<ul style="list-style-type: none"> Utiliser du fumier composté (contient un pourcentage plus élevé d'éléments nutritifs pour les végétaux sous une forme facilement disponible) Ne pas appliquer sur la neige, sur un sol gelé ou dans des zones sujettes aux inondations Injecter dans le sol pour éviter les odeurs et les problèmes d'insectes Dose d'application : 10-20 t/ha pour le fumier de volaille; 80-150 t/ha pour le fumier laitier Appliquer des formes brutes ou compostées Laisser la pluie lessiver les sels avant la plantation 	<ul style="list-style-type: none"> Teneur élevée en sel (Na⁺) Du potassium peut s'accumuler à la surface du sol Peut contenir des graines de mauvaises herbes et des pathogènes L'humidité et la teneur en éléments nutritifs sont très variables Les éléments nutritifs présents dans le fumier sont difficiles à équilibrer, ce qui entraîne une charge excessive en éléments nutritifs ou des déséquilibres Problèmes d'odeurs Coûteux à déplacer sur de longues distances Disponibilité limitée dans la région des sables bitumineux
Résidus de récolte (foin, paille, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> Utiliser comme paillis pour les arbres et les arbustes. Rapport carbone-azote élevé 	<ul style="list-style-type: none"> Appliquer de la paille à l'automne pour immobiliser l'azote et prévenir les pertes au printemps Utiliser de la paille de disque léger pour l'ancrer Plusieurs applications plus légères sont les plus efficaces Dose d'application : 1,5-7,5 cm à la surface du sol, incorporé à 15 cm 	<ul style="list-style-type: none"> Difficiles à étendre Coûteux à déplacer sur de longues distances Un engrais azoté peut être nécessaire pour réduire les rapports carbone-azote élevés Disponibilité limitée dans la région des sables bitumineux Il peut être difficile d'acquérir de la paille sans mauvaises herbes
Biocharbon	<ul style="list-style-type: none"> Améliore la productivité des cultures Réduit la densité apparente et augmente la porosité Réduit le lessivage des éléments nutritifs Réduit l'acidité du sol Améliore l'efficacité des engrais Réduit l'érosion du sol Fournit un micro-environnement pour la croissance des microbes du sol 	<ul style="list-style-type: none"> Dose d'application : 15-40 t/ha (selon le type de sol) Souvent appliqué avec une autre source d'éléments nutritifs (p. ex. compost ou engrais) 	<ul style="list-style-type: none"> Coûteux à fabriquer et à expédier Fabrication énergivore Grands volumes nécessaires en raison de la faible densité apparente Perte causée par le vent Peut contenir des hydrocarbures aromatiques polycycliques ou des métaux lourds

Sources : Voir le chapitre Références, adapté de Bates et Lafleur, 1999; Bekele et coll., 2013; Cooperband, 2002; Hoffman et coll., 1993; Land Resources Network Ltd, 1993.

2.10 Fertilisation

Comme pour l'ajout d'amendements, l'utilisation d'engrais est une technique qui peut être mise en œuvre à l'étape de la préparation du terrain afin d'améliorer le développement de la croissance des arbres sur les sites pauvres en éléments nutritifs. L'utilisation d'engrais doit être approuvée dans le plan de conservation, de remise en état et de fermeture de chaque site. De plus, il y a souvent un délai dans la certification du site après la fertilisation pour s'assurer que les effets de l'engrais se sont dissipés. L'azote et le phosphore ont été signalés comme étant les plus pertinents pour la croissance des arbres dans les écosystèmes réhabilités.

Principales considérations

Pour réduire les coûts économiques et environnementaux de l'épandage d'engrais, il est fortement conseillé de synchroniser l'approvisionnement en éléments nutritifs

avec les taux de croissance des semis d'arbres. Les taux de distribution devraient augmenter avec les taux de croissance exponentielle des semis.

La gestion des éléments nutritifs dans les écosystèmes réhabilités devrait suivre les principes directeurs de l'intendance des éléments nutritifs des 4 B : bonne source, bon taux, bon moment, bon endroit.

En plus des engrais conventionnels qui fournissent des éléments nutritifs facilement disponibles, il existe des engrais plus efficaces qui sont commercialisés pour maximiser la croissance des plantes tout en réduisant le coût de gestion des engrais. Deux types de produits fertilisants à efficacité accrue sont disponibles sur le marché en Alberta : les engrais à libération contrôlée et les stabilisateurs d'engrais. Leur mode d'action ainsi que leurs avantages et leurs limites sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Engrais conventionnels et engrais à efficacité améliorée

Types d'engrais	Mode d'action	Avantages	Contraintes
Engrais conventionnels	<ul style="list-style-type: none"> La plupart des engrais sont sous une forme qui est facilement disponible pour les plantes ou sous une forme qui est rapidement hydrolysée par les enzymes du sol en ammoniac, puis transformée en une forme disponible pour les plantes 	<ul style="list-style-type: none"> Les éléments nutritifs sont disponibles immédiatement pour les plantes 	<ul style="list-style-type: none"> Faible taux de récupération des engrais Contamination environnementale potentielle par lessivage Risque de dommages aux racines si appliqué directement sur la zone racinaire des semis Possibilité d'augmenter considérablement la concurrence de la végétation environnante
Engrais à libération contrôlée	<ul style="list-style-type: none"> Engrais granulaires revêtus qui limitent physiquement la libération des éléments nutritifs à une vitesse contrôlée en permettant une décomposition lente du revêtement ou à travers un revêtement semi-perméable 	<ul style="list-style-type: none"> L'azote est libéré pendant des semaines ou des mois et peut durer jusqu'à deux ans. Planter des semis d'arbres et fertiliser peuvent se produire simultanément Risque limité de dommages aux semis et d'émergence retardée lorsqu'il est appliqué à des concentrations élevées Peut être appliqué directement sur la zone racinaire des semis pour les arbres et les arbustes d'intérêt Réduction des pertes par lessivage et volatilisation Concurrence réduite des graminées annuelles et des mauvaises herbes 	<ul style="list-style-type: none"> La majorité des éléments nutritifs ne sont pas immédiatement disponibles pour les plantes

Tableau 4. Engrais conventionnels et engrais à efficacité améliorée (suite)

Types d'engrais	Mode d'action	Avantages	Contraintes
Stabilisateurs d'engrais	<ul style="list-style-type: none"> L'inhibiteur d'uréase est appliqué conjointement avec de l'urée, un mélange d'urée et de nitrate d'ammonium liquide ou du fumier. Il inhibe l'hydrolyse de l'azote uréique en azote ammoniacal, alors que l'inhibiteur d'azote inhibe l'oxydation biologique de l'azote ammoniacal en azote nitreux L'inhibiteur de nitrification est utilisé avec de l'ammoniac anhydre, mélangé avec des engrais liquides et du fumier liquide, etc. ou imprégné sur des mélanges d'urée ou d'engrais secs. Il retarde sélectivement la conversion microbienne de l'ammonium en nitrates en interférant avec le métabolisme des bactéries nitrifiantes, réduisant ainsi les pertes d'azote par lessivage 	<ul style="list-style-type: none"> Réduction des pertes d'azote par lessivage et volatilisation Réduction des effets néfastes de l'excès d'azote sur les semis Peut augmenter la croissance par rapport à l'application en surface conventionnelle d'engrais à base d'urée Couverture plus élevée par tonne de produit comparativement à l'application conventionnelle d'urée Permet l'application de l'engrais à l'automne. Peut diminuer la nitrification potentielle, contribuant à la production de gaz à effet de serre et à la perte d'azote 	<ul style="list-style-type: none"> Certains de ces produits sont chers, et leurs avantages pour les semis d'arbres sont encore à l'étude Les des stabilisants sont avantages UNIQUEMENT applicables lorsqu'ils sont utilisés avec des engrais liquides ou du fumier liquide, et ceux-ci ne sont généralement pas utilisés dans la remise en état Certains produits stabilisants ne sont pas compatibles avec l'application d'engrais au printemps

Bien que la fertilisation puisse favoriser la croissance des semis, elle peut aussi augmenter la croissance des mauvaises herbes indésirables ou nuisibles. Un nombre croissant d'entreprises choisissent d'utiliser des engrais améliorés (en particulier des engrais à libération contrôlée) au lieu des engrais classiques disponibles immédiatement.

Le plus grand avantage de l'utilisation de produits fertilisants à libération contrôlée est celui de la logistique : la plantation de semis d'arbres et la fertilisation peuvent se produire simultanément. Les engrais préemballés à libération contrôlée peuvent être placés près du semis sans endommager les racines, permettant ainsi une distribution plus rentable des éléments nutritifs au fil du temps. Cela réduira également la compétition végétative par des espèces indésirables.

L'application d'engrais à libération contrôlée à l'automne peut procurer un avantage économique indirect en permettant plus de souplesse sur le moment où des activités de remise en état peuvent avoir lieu. En outre, les éléments nutritifs sont libérés lentement pendant deux ans, ce qui coïncide avec la période de croissance des racines. Cela garantit que les semis reçoivent une quantité suffisante d'éléments nutritifs pendant qu'ils s'établissent, sans que le personnel doive effectuer d'autres visites sur le terrain pour réappliquer les engrais.

Les engrais préemballés à libération contrôlée peuvent être placés près du semis sans endommager les racines . . .

Une solution de rechange à l'épandage d'engrais sur le site est de charger les semis en éléments nutritifs avant la plantation. La croissance accrue devrait permettre une plus grande utilisation des ressources en surface (lumière, etc.) pour accroître la photosynthèse et l'établissement précoce. Le meilleur taux de charge en azote pour favoriser la croissance des tiges et des racines lorsque les semis sont transplantés dans des conditions de plein champ varie selon l'espèce d'arbre. Une discussion avec les fournisseurs de pépinières et de semis est nécessaire pour déterminer si la charge en éléments nutritifs des semis s'applique au type d'espèce, à l'âge et à la taille des semis nécessaires à la revégétalisation, et si elle est rentable pour le nombre de semis requis.

3. Références



2010 Reclamation Criteria for Wellsites and Associated Facilities for Forested Lands (Updated July 2013).

Environment and Sustainable Resource Development, 2013, Government of Alberta

Alberta Energy Regulator (2013). [Integrated Standards and Guidelines – Enhanced Approval Process \(EAP\)](#). Gouvernement de l'Alberta, Edmonton, Alberta.

Anderson, M.-L. (1996). « Tech Update: Site Prep-Equipment », Logging and Sawmilling Journal.

Bancroft, B. (1995?). Fundamentals of Natural Lodgepole Pine Regeneration and Drag Scarification. B.C. Ministry of Forests, Silviculture Practices Branch, Colombie-Britannique. www.for.gov.bc.ca/hfp/publications/00096/NatPlregen.pdf

Bates, T.E. (1999). Guidelines for the utilization of pulp and paper mill biosolids in silviculture and land reclamation. Préparé par Lafleur De La Capitale Inc. pour l'Ontario Forest Industries Association, Toronto, Ontario, 39 pages.

B.C. Ministry of Forests (2002). Forest Soil Conservation and Rehabilitation in British Columbia – Opportunities, Challenges, and Techniques. Forest Science Program. www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/bro/bro70.pdf.

B.C. Ministry of Forests (1994). Site Preparation: Microsite Selection and Planting Stock Performance. Regeneration Note 5. www.for.gov.bc.ca/hfp/publications/00106/SN05.pdf.

B.C. Ministry of Forests (1990). Operational Forester – Mechanical Site Preparation for Cold Site Management. Mémo FRDA 160.

B.C. Ministry of Forests (1990). Operational Forester – Mounding for Site Preparation. Mémo FRDA 100.

B.C. Ministry of Forests (1989). Mounding for Site Preparation. Mémo FRDA 100. www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/Frm/frm100.pdf.

Bekele, A., J.L. Roy et M.A. Young (2013). « Use of biochar and oxidized lignite for reconstructing a functioning topsoil: Plant growth response and soil nutrient concentrations », Soil Science, 178 : 344-358.

Best Management Practices for Conservation of Reclamation Materials in the Mineable Oil Sands Region of Alberta. Cumulative Environmental Management Association. Fort McMurray, Alberta. MacKenzie, 2011

Burton, G. D. (1992). Alternatives to Prescribed Burning. B.C. Ministry of Forests, Colombie-Britannique.

Cooperband, L. (2002). Building soil organic matter with organic amendments. University of Wisconsin-Madison, College of Agricultural and Life Sciences, Center for Integrated Agricultural Systems, Madison, WI. 13 pages.

Cortini, F. (2015). Connaissances en sylviculture pour la remise en état de terrains perturbés par des activités pétrolières et gazières – Formation de monticules. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre canadien sur la fibre de bois, Ottawa. 20 pages.

Environment and Sustainable Resource Development (2013). [2010 Reclamation Criteria for Wellsites and Associated Facilities for Forested Lands \(Updated July 2013\)](#). Gouvernement de l'Alberta, Edmonton, Alberta.

Farnden, C., R.J. Vassov, M. Yarmuch et B.C. Larson (2013). « Soil reclamation amendments affect long term growth of jack pine following oil sands mining », New Forests, 44 : 799-810.

Gallandt, E.R., M. Liebman et D.R. Huggins (1999). « Improving soil quality », Journal of Crop Production, 2 : 95-121.

Hangs, R.D., J.D. Knight et K.C.J. Van Rees (2003). « Nitrogen accumulation by conifer seedlings and competitor species from 15 nitrogen-labeled controlled-release fertilizers », Soil Science Society of America Journal, 67 : 300-308.

Hoffman, G.L., D.J. Nikols, S. Stuhec et R.A. Wilson (1993). Evaluation of Leonardite (Humalite) Resources of Alberta. Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, Edmonton, Alberta, 48 pages.

Hu, Y. (2012). « Nutrient loading of aspen, jack pine and white spruce seedlings for potential out-planting in oil sands reclamation ». Mémoire de maîtrise. Université de l'Alberta, Department of Renewable Resources, Edmonton, Alberta, 143 pages.

[Integrated Standards and Guidelines – Enhanced Approval Process \(EAP\)](#), Alberta Energy Regulator, 2013

Jacobs, D.F., K.F. Salifu et J.R. Seifert (2005). « Growth and nutritional response of hardwood seedlings to controlled-release fertilization at outplanting », *Forest Ecology and Management*; 214 : 28-39.

Lafleur, B., A. Cazal, A. Leduc et Y. Bergeron (2015). « Soil organic layer thickness influences the establishment and growth of trembling aspen (*Populus tremuloides*) in boreal forests », *Forest Ecology and Management*, 347 : 209-216.

Land Resources Network Ltd. (LRK) (1993). *Organic Materials as Soil Amendments in Reclamation: A Review of the Literature*. Reclamation Research Technical Advisory Committee, Alberta Conservation and Reclamation Council. Edmonton, Alberta, 247 pages.

Lavender, P., R. Parish, C.M. Johnson, G. Montgomery, A. Vyse, R.A. Willis et D. Winston (dir.) (1990). *Regenerating British Columbia's Forests*. University of British Columbia Press. www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/mr/mr063.pdf.

Lieffers, V.J., R.T. Caners et G. Hangei (2017). « Re-establishment of hummock topography promotes tree regeneration on highly disturbed moderate-rich fens », *Journal of Environmental Management*, 197 (2017) : 258-264.

Lupi, C., H. Morin, A. Deslauriers, S. Rossi et D. Houle (2013). « Role of soil nitrogen for the conifers of the boreal forest: A critical review », *International Journal of Plant and Soil Science*, 1 : 155-189.

MacAfee, K., et F. Cortini (2016). *Décompactage des sols : Connaissances en sylviculture pour la réhabilitation de terrains perturbés par des activités pétrolières et gazières*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Ottawa, 10 pages.

MacKenzie, D. 2006. *Assisted Natural Recovery using a Forest Soil Propagule Bank*. M.Sc Thesis. Department of Renewable Resources, University of Alberta. Edmonton, Alberta.

MacKenzie, D. and Naeth, M.A. 2007. *Assisted Natural Recovery Using a Forest Soil Propagule Bank in the Athabasca Oil Sands*. Pages 374 -382. In: *Seeds Biology, Development and Ecology*. Cromwell Press, Townbridge, United Kingdom.

MacKenzie, D.D., and Naeth, M.A. 2010. *The role of the forest soil propagule bank in assisted natural recovery after oil sands mining*. *Restoration Ecology*; 18: 418-427.

MacKenzie, K. (2011). [Best Management Practices for Conservation of Reclamation Materials in the Mineable Oil Sands Region of Alberta](#). Cumulative Environmental Management Association, Fort McMurray, Alberta.

MacKenzie, K., et J.M. Renkema (2013). [In-situ oil sands extraction reclamation and restoration practices and opportunities compilation](#). Canada's Oil Sands Innovation Association.

MacKenzie, D.D. 2013. *Oil sands mine reclamation using boreal forest surface soil (LFH) in northern Alberta*. Ph.D Thesis. Department of Renewable Resources. University of Alberta. Edmonton, Alberta.

Maurice, M. (2011). *Reclamation and Restoration Plan Development*. NAIT-Boreal Reclamation Program. Note technique 11. www.nait.ca/docs/Reclamation_Plan_Development_TN.pdf.

NAIT Boreal Research Institute (2010). *Progressive Reclamation*. NAIT Boreal Research Institute, Boreal Reclamation Program. Note technique 19.

Oliet, J.A., J. Puertolas, R. Planelles et D.F. Jacobs (2013). « Nutrient loading of forest tree seedlings to promote stress resistance and field performance: A Mediterranean perspective », *New Forests*, 44 : 649-669.

Orlander, G., P. Gemmel et J. Hunt (1990). *Site Preparation: A Swedish Overview*. Forêts Canada et B.C. Ministry of Forests.

Osko, T., et M. Glasgow (2010). [Removing the Wellsite Footprint: Recommended Practices for Construction and Reclamation of Wellsites on Upland Forests in Boreal Alberta](#). Department of Biological Sciences, University of Alberta, Edmonton, Alberta.

Pinno, B.D., S.M. Landhausser, M.D. MacKenzie, S.A. Quideau et P.S. Chow (2012). « Trembling aspen seedling establishment, growth and response to fertilization on contrasting soils used in oil sands reclamation », Canadian Journal of Soil Science, 92 : 143-151.

Ramsey, C.L., S. Jose, B.J. Brecke et S. Merritt (2003). « Growth response of longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) seedlings to fertilization and herbaceous weed control in an old field in southern USA », Forest Ecology and Management, 172 : 281.

[Removing the Wellsite Footprint: Recommended Practices for Construction and Reclamation of Wellsites on Upland Forests in Boreal Alberta](#), Osko & Glasgow, 2010

Schott, K.M., A.E.K. Snively, S.M. Landhausser et B.D. Pinno (2016). « Nutrient loaded seedlings reduce the need for field fertilization and vegetation management on boreal forest reclamation sites », New Forests, 47 : 393-410.

Skogsarbeten Logging Research Foundation (1978). Scarification. Suède.

Sloan, J.L., et D.F. Jacobs (2013). « Fertilization at planting influences seedling growth and vegetative competition on a post-mining boreal reclamation site », New Forests, 44 : 687-701.

Sutherland, B.J., et F.F. Foreman (1995). Guide to the Use of Mechanical Site Preparation Equipment in Northwestern Ontario. Ministère des Ressources naturelles, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie, et Ontario Ministry of Natural Resources, Toronto, Ontario.

Von der Gonna, M. A. (1992). Fundamentals of Mechanical Site Preparation. B.C. Ministry of Forest et Forêts Canada, Victoria. B.C. FRDA Report 178. www.for.gov.bc.ca/hfp/publications/00084/FRDA178.pdf.

