



GUIDE DES Pratiques de conservation en grandes cultures

Ce feuillet est extrait du «Guide des pratiques de conservation en grandes cultures» publié par le CPVQ en mars 2000. Ce guide a été réalisé dans le but de faire connaître des méthodes de gestion des cultures et des sols contribuant à maintenir les sols en bonne condition et à limiter les impacts environnementaux, tout en assurant le développement des entreprises agricoles. Il rassemble toute l'information de pointe basée sur l'expertise développée au Québec au cours des dernières années.

Ce document de 520 pages est présenté sous la forme de 34 feuillets abondamment illustrés et répartis en 7 modules :

- Les pratiques de conservation en grandes cultures: pourquoi s'y intéresser?
- Travail du sol
- Gestion de la matière organique
- Fertilisation
- Lutte aux mauvaises herbes
- Autres pratiques de conservation
- Diagnostic et correction de problèmes de compaction et de drainage

Le «Guide des pratiques de conservation en grandes cultures» est disponible au coût de 70 \$ (taxe incluse) chez Distribution de livres Univers (publication VS 014), que vous pouvez rejoindre au (418) 831-7474 ou au 1 800 859-7474. Des frais de port et de manutention doivent être ajoutés (7 \$).



Service à la clientèle
(418) 523-5411 ou 1 888 535-2537
Télécopieur : (418) 644-5944
Courriel : client@craaq.qc.ca

Ce document vous est offert pour consultation à l'écran seulement. L'impression n'est pas permise. Le CRAAQ détient tous les droits des documents publiés par le CPVQ. Toute reproduction, sous quelque forme que ce soit, est interdite sans l'autorisation écrite du CRAAQ.

Problèmes de compaction

Module 7 - Diagnostic et correction
de problèmes de compaction et de drainage
FEUILLET 7-A

Qu'est-ce que la compaction ?	2
Qu'est-ce qui influence la compaction ?	2
Quelles conditions de sol sont les plus propices à la compaction ?	3
Qu'entend-on par compaction en profondeur ?	4
Comment prévenir la compaction ?	5
Éviter de circuler sur les sols humides ou de les travailler	5
Diminuer la pression exercée au sol par la machinerie agricole	6
Réduire le nombre de passages	6
Avoir recours à la circulation contrôlée	6
Minimiser le travail du sol	7
Intégrer des cultures améliorantes dans la rotation	8
Maintenir un bon taux de matière organique	8
Comment diagnostiquer la compaction ?	9
Observations et vérifications préliminaires	9
Comment vérifier s'il y a vraiment de la compaction ?	9
Peut-on remédier aux effets négatifs de la compaction du sol ?	11
Compaction de surface	11
Compaction en profondeur	11
La technique du sous-solage	12
Quels sont les objectifs du sous-solage ?	12
Une solution temporaire ou définitive ?	12
Une solution qui comporte certains risques	12
Les équipements utilisés pour le sous-solage	13
Les décompacteurs lourds	13
Les décompacteurs légers	13
Composantes et caractéristiques des sous-soleuses	14
Effet sur le sol	16
Recommandations sur la technique d'exécution	17
Quand doit-on effectuer les travaux de sous-solage ?	17
Comment procéder ?	17
Puissance - rendement - coût des travaux	19
Pour en savoir plus	19



Qu'est-ce que la compaction?

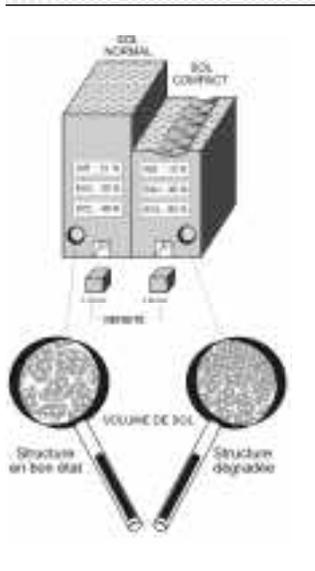


Figure 1
Comparaison d'un volume de sol normal et d'un volume de sol compacté

MAPAQ

La compaction est le réarrangement des particules du sol sous l'effet d'une **pression externe**. Se traduisant par l'augmentation de la **densité**, elle est généralement accompagnée d'une diminution de la **macroporosité** et de la **conductivité hydraulique** (Tabi *et al.*, 1990). En d'autres mots, il y a compaction lorsque l'air est chassé d'un volume donné de sol sous l'effet de la pression exercée par le poids de la machinerie ou, encore, par le travail du sol en condition humide (figure 1).

La compaction entraîne :

- une dégradation de la structure du sol ;
- un accroissement de la résistance au travail du sol (besoin en énergie accru) ;
- une diminution de la porosité drainable, c'est-à-dire celle qui permet la percolation de l'eau et assure l'aération du sol ;
- une pénétration plus difficile des racines.

La compaction ne se limite pas à la couche de travail du sol, mais excède souvent celle-ci (figure 2). Le tassement du sol peut survenir naturellement ou peut être provoqué par l'action des humains, surtout par des activités agricoles. De manière naturelle, le sol se consolide sous son propre poids ; pour la plupart des sols, il n'est donc pas surprenant de constater une augmentation de la densité du sol avec la profondeur.

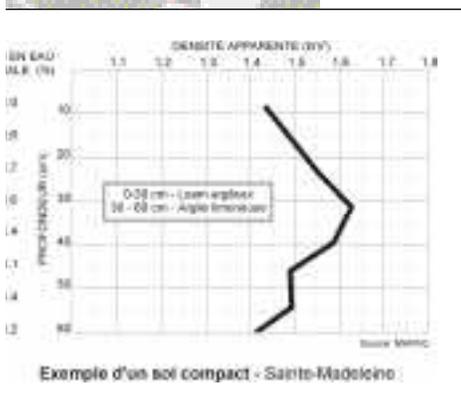
Qu'est-ce qui influence la compaction ?

Les principaux paramètres pouvant influencer le degré de compaction sont :

- la charge totale par essieu ;
- le nombre de pneus porteurs ;
- les caractéristiques des pneus (diamètre, pression de gonflage, surface de contact, type de carcasse) ;
- la pression de contact au sol de la machinerie ;
- l'humidité relative du sol ;
- le degré de structuration du sol (texture et structure) ;
- le nombre de passages de la machinerie.

De manière générale, **la compaction par la machinerie agricole se produit au moment où la charge appliquée au sol excède la capacité portante de ce dernier**. C'est alors que les paramètres ci-dessus sont déterminants, car ils influencent soit la répartition de la charge ou la capacité portante du sol.

La compaction peut aussi résulter du passage dans le sol des outils de travail du sol (socs de charrue, socs de sous-soleuse, disques de pulvérisateur, etc.). Il y a en effet compression et frottement du sol par l'outil ce qui, principalement en condition de sol humide, peut provoquer une dégradation de la structure d'une mince couche de sol en contact avec l'outil (phénomène de lissage).



Exemple d'un sol compacté - Sainte-Madeleine

Figure 2

MAPAQ

Quelles conditions de sol sont les plus propices à la compaction ?

Généralement, la sensibilité du sol à la compaction est amplifiée par :

- **une teneur en humidité du sol élevée lors du passage de la machinerie ;**
- **un faible taux de matière organique.**

En favorisant la formation d'agrégats stables et un meilleur drainage, la matière organique a pour effet de réduire la sensibilité du sol à la compaction. Les interventions culturales favorisant le maintien ou l'augmentation du taux de matière organique doivent donc être encouragées pour minimiser la compaction⁽¹⁾.

Tous les sols sont susceptibles à la compaction lorsqu'ils sont humides. La teneur en eau pour laquelle la compaction est maximale varie d'un sol à un autre selon sa texture, sa structure et son taux de matière organique. Le tableau 1 montre quelques résultats de tests effectués en laboratoire.

Tableau 1. VALEURS TYPQUES DE LA TENEUR EN EAU PONDÉRALE POUR UNE COMPACTION MAXIMALE SELON LA TEXTURE DU SOL (ESSAI PROCTOR)

Texture du sol	Teneur en eau pondérale pour une compaction maximale (%)*
Sable	15,3% ⁽¹⁾
Sable loameux	20,0% ⁽²⁾
Loam sableux	22,0% ⁽³⁾
Argile	31,5% ⁽⁴⁾

* Teneur en eau pondérale = rapport de la masse de l'eau sur la masse du sol sec.

1. Raghavan *et al.*, 1976
2. Raghavan *et al.*, 1977
3. Chassé *et al.*, 1975
4. Raghavan et McKyes, 1983

Pour aider le producteur à évaluer l'humidité du sol, une charte d'interprétation par le toucher de l'humidité du sol selon diverses textures est présentée au tableau 2.

1. Le [module 3](#) traite des façons d'améliorer la teneur en matière organique du sol.



Tableau 2. CHARTE D'INTERPRÉTATION DE L'HUMIDITÉ DU SOL ET ÉVALUATION DU RISQUE DE COMPACTION

% de la capacité au champ	Texture du sol			
	Sable	Sable loameux & loam sableux	Loam	Loam argileux & argile
Point de flétrissement	Grains individuels secs filent entre les doigts.	Grains secs filent entre les doigts.	Sec, poudreux, des petites croûtes se brisent pour former un matériel poudreux.	Dur, apparence de terre cuite et craquelée.
Moins de 50 % de la capacité au champ	Apparaît sec, ne forme pas une boule lorsque pressé dans la main.		Quelque peu granulaire, forme une boule lorsque pressé dans la main.	Un peu malléable, forme une boule lorsque pressé dans la main.
50-75 % de la capacité au champ	Apparaît sec, ne forme pas une boule lorsque pressé dans la main.	Forme une boule lorsque pressé dans la main, mais qui s'effrite par la suite.	Une fois pressé, devient légèrement plastique, glisse un peu sous la pression des doigts, forme une boule.	Forme une boule ou un rouleau entre les doigts.
De 75 % à la capacité au champ	Particules de sol adhérent entre elles, peuvent former des boules instables lorsque pressées.	Forme une boule qui se brise très facilement, ne glisse pas entre les doigts.	Forme une boule très malléable, glisse facilement entre les doigts.	Forme facilement un rouleau entre les doigts, doux et glissant au toucher.
Capacité au champ ⁽¹⁾	Lorsque pressé, aucune eau libre n'apparaît sur le sol, mais les empreintes humides d'une boule pressée dans la main apparaissent sur cette dernière.			

Adapté de The National Engineering Handbook, Soil Conservation Service, United States Department of Agriculture, section 15, chapitre 1.

- Risque élevé de compaction
- Risque modéré de compaction⁽²⁾
- Risque faible de compaction

1. À 100% de capacité au champ, le risque de compaction est moindre qu'à 75%, mais la circulation est à proscrire à cause du manque de traction et des dommages causés à la surface.
2. Il est recommandé d'avoir recours aux moyens qui permettent de réduire les risques de compaction (pneus larges, roues jumelées, etc.). Il existe cependant un certain risque de lissage par les équipements de travail du sol.

La **capacité au champ** correspond à la quantité d'eau qui reste dans le sol une fois que l'eau d'un sol saturé (par une forte pluie) se soit ressuyée pendant environ deux ou trois jours.

Qu'entend-on par compaction en profondeur ?

La compaction en profondeur se définit comme le tassement du sol situé sous la couche de labour. Elle se produit principalement sous l'effet :

- de charges excessives combinées à de faibles surfaces de contact (ex. : pneus étroits) ;
- du passage des roues du tracteur dans la fond du sillon de labour ;
- des outils utilisés pour le travail primaire du sol comme la charrue (lissage).

Certains types d'équipement, comme les épandeurs à lisier et les moissonneuses-batteuses, sont susceptibles de causer de la compaction en profondeur, surtout s'ils ne sont pas munis de systèmes porteurs permettant de réduire la pression au sol (ex.: pneus à grande surface de contact, essieux multiples, chenilles, etc.).

Le **labour** conventionnel effectué avec une charrue à versoirs peut être une source de compaction du sol en profondeur. Cette compaction s'observe principalement sous la forme d'une couche dense (semelle de labour) située dans les premiers centimètres sous la zone de travail du sol. Elle résulte du passage des roues du tracteur dans le sillon ouvert au moment du labour et du lissage créé par l'action du soc de la charrue.

Comment prévenir la compaction ?

Les mesures⁽²⁾ pour éviter ou réduire la compaction consistent principalement à :

- **éviter de circuler sur les sols humides ou de les travailler ;**
- **diminuer la pression exercée au sol par la machinerie agricole ;**
- **réduire le nombre de passages ;**
- **avoir recours à la circulation contrôlée ;**
- **minimiser le travail du sol ;**
- **intégrer des cultures améliorantes dans la rotation ;**
- **maintenir un bon taux de matière organique.**

Éviter de circuler sur les sols humides ou de les travailler

La teneur en humidité du sol est le principal facteur déterminant sa sensibilité à la compaction. Avant de travailler le sol ou même d'y circuler, il est donc important d'en vérifier la teneur en humidité. Pour cela, on creuse le sol à l'aide d'une pelle et on prend une poignée de sol à environ 20 cm (8 po) de profondeur.

En se référant à la charte d'interprétation de l'humidité du sol (tableau 2), on manipule le sol et on en observe l'effet. Si ce dernier se situe dans la zone rouge du tableau, il faut éviter de circuler et d'effectuer des opérations culturales.

Si l'opération culturale nécessite l'utilisation d'un équipement particulièrement lourd (par exemple, une moissonneuse-batteuse ou un épandeur à lisier), il vaut mieux faire la vérification jusqu'à 30 cm (12 po).

La correction des problèmes de drainage doit être une priorité lorsque l'on veut prévenir les problèmes de compaction (voir [feuillet 7-B](#)).

Effectuez les opérations culturales dans les champs les plus secs en premier. Cela donnera le temps aux autres champs de se ressuyer.

2. Adapté de « Management strategies to minimize and reduce soil compaction », File G896, Soil Resource Management , E-1, Compaction, electronic version (<http://www.ianr.unl.edu/pubs/soil/g896.htm>), NebGuide, 1997.





Figure 3
Épandeur
à lisier à essieux
multiples

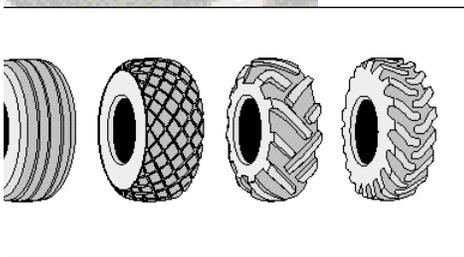
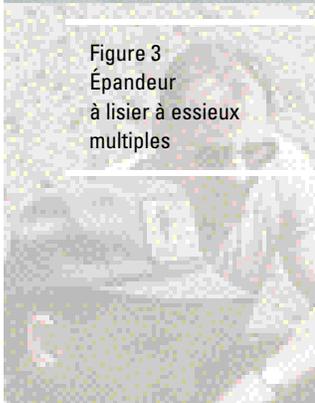
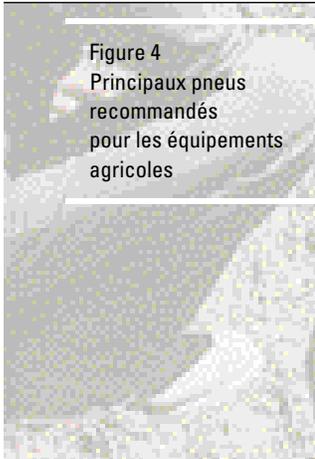


Figure 4
Principaux pneus
recommandés
pour les équipements
agricoles



Une bonne pratique consiste à garder les wagons à grains en bout de champ ou sur des voies d'accès permanentes sans avoir recours à la circulation contrôlée.

Diminuer la pression exercée au sol par la machinerie agricole

Les moyens permettant de réduire la pression au sol sont :

- de diminuer la charge par essieu (viser une charge inférieure à 7 tonnes par essieu) ;
- d'utiliser des machines moins lourdes et/ou des essieux multiples (figure 3) ;
- de ne pas remplir complètement les équipements tels que citernes à lisier, camions de chaux, wagons à grains, etc. ;
- d'augmenter la surface de contact en utilisant des pneus plus larges et de plus grand diamètre, des roues jumelées ou des chenillards (figure 4) ;
- d'opter pour des pneus à carcasse radiale (leur surface de contact est entre 15 et 20% plus grande que celle des pneus à carcasse en biais).

À noter que plus le sol est en bon état (bonne structure), moins grande est la force de traction nécessaire pour accomplir le travail du sol, d'où la possibilité d'utiliser des tracteurs moins puissants et moins lourds.

Pour moins de compaction, choisir les bons pneus...

Pour minimiser la compaction, l'utilisation de pneus souples, à basse pression (103 KPa ou 15 psi) et avec une grande surface de contact est recommandée. La souplesse de la carcasse d'un pneu utilisé sur les équipements agricoles est très variable, allant de pneus à carcasse radiale et à carcasse en biais, plus rigides, jusqu'aux pneus d'avion usagés ayant une carcasse très rigide. Dans le cas de pneus d'avion, leur utilisation est déconseillée compte tenu de leur faible pouvoir de déformation.

La majorité des fabricants fournissent, avec l'indication de la rigidité de la carcasse du pneu (plis ou étoiles), une plage de pression de gonflage minimale. Il est très important de s'assurer que la pression de gonflage respecte ces indications.

Réduire le nombre de passages

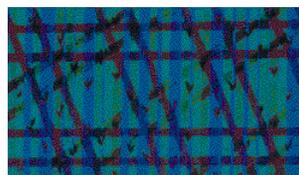
Les pratiques culturales qui permettent de minimiser le nombre de passages, comme le semis direct et la culture sur billons, contribuent à diminuer les risques de compaction. Une autre façon de réduire le nombre de passages est de combiner plusieurs opérations en un seul passage (par exemple, semer, fertiliser et pulvériser des herbicides au cours du même passage).

Avoir recours à la circulation contrôlée

Pratiquer la circulation contrôlée signifie que les opérations culturales sont exécutées en restreignant la circulation dans un nombre limité de voies de circulation. Autrement dit, il y a répétition des passages au même endroit plutôt qu'une répartition sur une plus grande surface (voir figure 5). **La circulation contrôlée permet donc de diminuer la superficie compactée par le premier passage.** Rappelons que le premier passage cause plus de compaction que les passages subséquents dans la même voie. Le semis direct et particulièrement la culture sur billons se prêtent bien à la circulation contrôlée.

Illustration des passages effectués pour:

- En vert: le semis et le sarclage
- En rose: l'application des herbicides
- En mauve: le travail du sol
- En jaune: la récolte
- En bleu: la fertilisation
- En orange: le transport de la récolte



- En vert: Illustration des passages effectués pour le semis, la fertilisation et l'application des herbicides et le travail du sol.
- En jaune: Illustration des passages de la moissonneuse-batteuse.

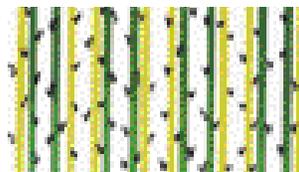


Figure 5
Passages effectués pour les opérations agricoles:
- circulation au hasard (en haut)
- circulation contrôlée (au bas)⁽³⁾

Pour diminuer la pression cumulative...

La compaction des sols agricoles est un phénomène cumulatif dans le temps. On estime que dans un champ en grande culture, plus de 90 % de la surface du champ est parcourue au moins une fois par de la machinerie au cours des opérations de travail du sol, préparation du lit de semence, pulvérisations de pesticides, épandages des engrais et opérations de récolte.

Si aucune mesure corrective n'est prise, la sévérité de la compaction, surtout celle sous la couche de labour, s'aggrave d'année en année. Le gel et le dégel, ainsi que les travaux du sol, aident à corriger la compaction dans une certaine mesure, mais ces effets sont limités principalement à la couche superficielle du sol. Un sol compact peut prendre jusqu'à 5 années (parfois plus) pour retrouver les conditions d'un sol non tassé.

Minimiser le travail du sol

Le travail du sol peut contribuer à la détérioration de sa structure par l'action mécanique des outils (lissage, pulvérisation des agrégats) de même que par la dilution de la matière organique. Un sol dont la structure est détériorée est plus sensible au tassement. De plus, dans le cas du labour, il y a un risque de créer une semelle de labour.

Plusieurs études ont démontré l'effet bénéfique sur la structure du sol du semis direct et de la culture sur billons. Ces techniques de semis ont aussi pour avantage de nécessiter moins de passages de la machinerie aux périodes où le sol est le plus humide, c'est-à-dire à l'automne et au printemps, et de ne pas engendrer de semelles de labour. Le **module 2** présente les principaux types de travail du sol.

L'utilisation du **chisel**, du **pulvérisateur à disques lourd** (ex. : *offset*) ou de la **charrue déportée** permet de travailler le sol tout en maintenant les roues du tracteur à la surface, ce qui réduit les risques de créer une semelle de labour.

3. Adapté de « Management strategies to minimize and reduce soil compaction », File G896, Soil Resource Management, E-1, Compaction, electronic version.



Intégrer des cultures améliorantes dans la rotation

Les champs dont la rotation comportent une culture **de luzerne, de trèfle ou de graminées** sont généralement moins compactés que ceux qui n'ont pas ce type de rotation. Les principales raisons sont que :

- il n'y a habituellement pas de travail du sol pendant quelques années à la suite du semis ;
- les récoltes se font généralement dans des conditions adéquates d'humidité du sol ;
- le développement en profondeur des racines de la luzerne et du trèfle et leur forme pivotante contribuent à accroître la porosité du sol en plus d'assécher le sol et ainsi favoriser sa fissuration.

Maintenir un bon taux de matière organique

Le maintien d'un taux approprié de matière organique dans le **sol favorise une bonne structure et son ajout contribue à diminuer la densité apparente**.

Les principaux moyens de favoriser un bon taux de matière organique sont⁽⁴⁾ :

- l'apport de fumier ou autres amendements organiques ;
- l'intégration à la rotation des cultures produisant des quantités importantes de résidus ;
- de laisser la paille des céréales au champ ;
- de labourer moins profondément ;
- le recours au travail réduit, à la culture sur billons ou au semis direct.

4. Le [module 3](#) traite en détail de la gestion de la matière organique.

Comment diagnostiquer la compaction ?

Observations et vérifications préliminaires

Les observations et vérifications suivantes peuvent permettre de détecter la présence de compaction :

- la présence d'ornières créées par le passage de la machinerie ;
- la persistance de flaques d'eau après une pluie ou à la fonte de la neige au printemps, associée à une baisse de la perméabilité ;
- les symptômes chez les cultures: croissance lente ou retardée, maturation inégale, diminution de rendement, jaunissement par anoxie (manque d'oxygène), etc. ;
- la faible décomposition des résidus de culture dans la couche arable ;
- le confinement du système racinaire à la couche labourée ;
- la difficulté de pénétration des équipements de travail du sol ;
- une augmentation de la puissance nécessaire à la barre de tire pour le travail du sol.

Il est habituellement plus difficile de reconnaître les signes de compaction en profondeur que ceux associés à la compaction de surface (création d'ornières par exemple).

Attention !

Certains des symptômes ci-dessus peuvent être associés à d'autres phénomènes comme la présence d'une très faible dépression sur une grande superficie résultant d'un nivellement inadéquat du terrain (voir [feuillet 7-B](#)). Il faut donc s'assurer de bien diagnostiquer le problème. **Le recours à un spécialiste est recommandé.**

Comment vérifier s'il y a vraiment de la compaction ?

Il n'existe pas de mesure directe de la compaction. **Toute mesure physique devra se référer à un sol non compacté**, ce sont plutôt les différences entre celui-ci et l'état compacté qui serviront de mesure de l'envergure du problème. Comme un état non compacté standardisé n'existe pas non plus, l'évaluation d'un problème de compaction au champ n'est pas chose simple. Les principales approches pour évaluer la compaction sont de :

- procéder à des mesures de densité apparente du sol ;
- vérifier la résistance à la pénétration du sol ;
- faire des observations sur le profil du sol.

Le tableau 3 présente brièvement quelques-unes des méthodes permettant d'évaluer la compaction.



Figure 6
Sonde

Donald Lemelin, MAPAQ



Tableau 3. MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA COMPACTION

Paramètres évalués	Méthode	Description
1) Méthodes quantitatives		
Densité apparente	Méthode du cylindre	Consiste à enfoncer dans le sol un cylindre métallique de volume donné et à déterminer la masse de sol sec dans le cylindre. L'enfoncement d'une série de cylindres dans le sol à différentes profondeurs est nécessaire pour dresser un profil de densité. Pour être représentatif, il est nécessaire d'avoir plusieurs points de mesure. Cette méthode se prête mal à un échantillonnage intensif. Il faut creuser des trous assez importants pour prélever des cylindres en profondeur, et ce travail requiert beaucoup de temps et d'énergie (méthode non applicable aux sols caillouteux).
Densité apparente	Méthode du carottage	L'équipement requis est simple, et la majorité des laboratoires d'analyse des sols le possède. Pour évaluer adéquatement le niveau de compaction d'un sol, il est nécessaire de prendre de nombreux points de mesure aussi bien horizontalement que verticalement. Les échantillons, dont on connaît le volume, sont séchés et pesés. Tout comme la méthode par cylindre, la méthode du carottage se prête mal à un échantillonnage intensif, en raison du nombre de sites et du temps exigés.
Densité apparente	Méthode indirecte par atténuation de rayons gamma	Élimine en grande partie les désavantages de la méthode du carottage. Le travail requis au champ est relativement simple et rapide. Les mesures peuvent être prises à répétition sans déranger la surface du champ. Cependant, selon le type d'appareil, le coût en immobilisation peut varier de 8 000 \$ à 15 000 \$ et certaines sondes ne peuvent mesurer la densité qu'à une profondeur maximale de 30 cm (12 po), soit dans la couche de labour.
Résistance mécanique	Pénétromètre (figure 7)	Le pénétromètre détermine la résistance à l'enfoncement d'une tige dans le sol. Permet de dresser un profil et de déceler la présence d'un horizon plus dense. Le pénétromètre est composé d'une tige métallique (généralement en acier inoxydable), à tête conique, munie d'un manomètre (jauge à pression). Une force est nécessaire pour enfoncer la tige lentement et à vitesse constante dans le sol jusqu'à une profondeur de 60 cm (24 po). Les valeurs indiquées sur le manomètre augmentent avec la densité du sol. Ce type d'appareil donne des résultats relatifs qui doivent être calibrés à partir de mesures de croissance des plantes. Une comparaison entre les endroits sondés avec des emplacements non compacts, par exemple le long d'une clôture ou dans une zone non affectée par le passage des machines, donne une indication de la densité du sol. La valeur obtenue par le pénétromètre dépend fortement de la teneur en eau du sol au moment de la mesure, de la densité du sol ainsi que du type de sol. Par exemple, un loam et un loam sableux pourraient donner la même valeur de résistance au pénétromètre et présenter des densités fort différentes. D'où l'importance de bien interpréter les données de pénétrométrie.
2) Méthodes qualitatives		
Résistance mécanique	Sonde (figure 6)	Méthode de repérage des couches compactes peu coûteuse. Consiste à enfoncer lentement et à vitesse constante dans le sol une simple tige en acier inoxydable (avec manche en T), avec une pointe conique à son extrémité jusqu'à une profondeur d'environ 60 cm (24 po). En raison de l'absence d'un manomètre pour indiquer des lectures de pression, cette technique exige du «doigté» et une attention particulière à l'enfoncement de la sonde pour déceler une zone compacte.
Densité du sol et systèmes radiculaires	Observations sur le profil ⁽¹⁾ (figure 8)	Consiste à creuser une fosse dans le sol, à réaliser un profil cultural sur au moins 60 cm (24 po) et à enfoncer la pointe d'un petit couteau à différentes profondeurs le long de la paroi. La lame doit être enfoncée avec un angle d'environ 30° par rapport à la verticale. La couche dense est détectée selon le niveau de difficulté à insérer la pointe du couteau dans le sol et à dégager des agrégats. De plus, il est important de procéder à un examen minutieux du système racinaire des plantes cultivées. En sol compact, les racines sont déformées ou restreintes et concentrées près de la surface du sol. Enfin, s'il y a présence de teintes plus bleutées, cela peut être un signe d'anoxie résultant de la compaction.

1. Pour davantage d'information sur l'observation de profils de sol, consultez le [feuillet 7-B](#).

Vous utilisez un pénétrömètre ou une sonde ?

Il faut valider vos observations en comparant les résultats à ceux d'un secteur du champ non affligé des mêmes symptômes ou près d'une clôture ou dans une zone non affectée par le passage de la machinerie agricole, tout en s'assurant du même taux d'humidité du sol aux différents endroits. En présence d'un sol sec, l'enfoncement peut cependant être difficile même s'il n'y a pas de compaction.



Figure 7
Pénétrömètre

Donald Lemelin, MAPAQ

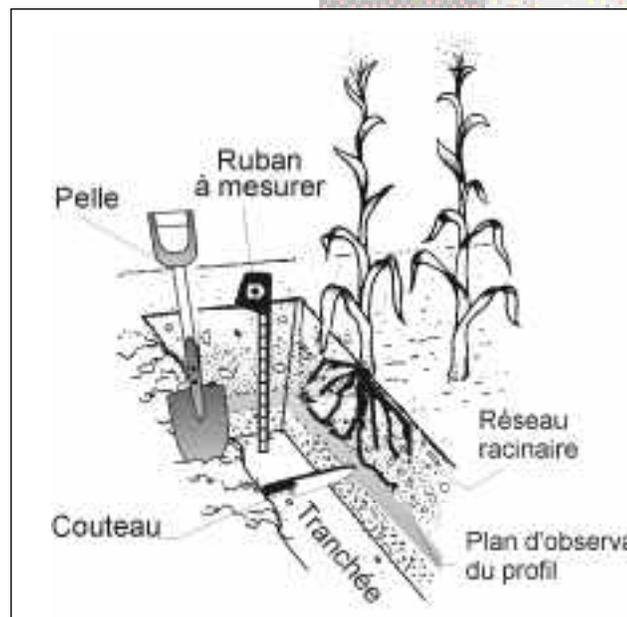


Peut-on remédier aux effets négatifs de la compaction du sol?

Compaction de surface

Un horizon de sol compacté situé dans les premiers 20 cm (8 po) de la **surface est habituellement facile à briser par un travail primaire exécuté à l'aide, notamment, d'un chisel ou d'une charrue à versoirs**. De plus, le cycle du gel et du dégel du sol contribue efficacement à la destruction d'un tel horizon.

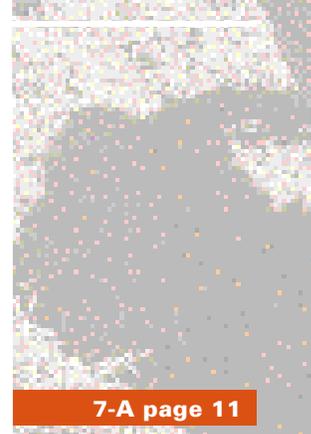
Bien que la compaction dans la couche de surface soit habituellement temporaire, elle peut quand même affecter négativement les cultures jusqu'à ce que le sol soit de nouveau travaillé ou que l'effet du gel-dégel se soit fait sentir. Consultez le [module 2](#) pour plus d'information sur les outils de travail du sol.



Compaction en profondeur

Les impacts de la compaction en profondeur peuvent, dans certains cas et avec le temps, s'atténuer sans que l'homme n'intervienne, principalement grâce à l'effet du gel et du dégel (quoique l'effet soit généralement moindre que celui produit sur la couche de surface). Toutefois, pour remédier **rapidement** aux effets de ce problème, le producteur agricole peut envisager le recours à la **technique du sous-solage**. Il faut cependant bien évaluer la situation afin que l'opération ne se solde pas par une dépense inutile (voir encadré).

Figure 8
Outils pour la réalisation d'un profil cultural



Avant d'intervenir : se questionner

Questions à se poser avant de procéder à des travaux de sous-solage.

- Y a-t-il des signes de compaction dans mon champ (réduction de rendement, mauvais drainage, etc.) ?
- S'agit-il réellement de compaction ? (appliquer la méthode de diagnostic)
- La couche compactée se situe-t-elle près de la surface ou sous la zone de travail du sol ?
- Quelle est l'importance du problème en terme de superficie : sur une partie de mon champ ou la totalité ?
- Ces dernières années, quelles ont été mes pratiques et façons culturales (monoculture, rotation, conditions du sol lors des travaux, etc.) ?
- Celles-ci peuvent-elles être modifiées pour réduire la compaction ?
- Le sous-solage est-il la seule solution à envisager ?
- Si oui, comment et quel en est le coût ?
- L'intervention sera-t-elle rentable ?

La technique du sous-solage

Quels sont les objectifs du sous-solage ?

L'objectif premier du sous-solage est de briser les horizons denses situés en profondeur et d'ainsi faciliter l'aération du sol, la décomposition des débris végétaux, la pénétration des racines (croissance des plantes) et l'infiltration de l'eau.

Une solution temporaire ou définitive ?

Le sous-solage peut être une solution temporaire ou définitive pour remédier au problème de compaction des sols en profondeur. **Cependant, si les pratiques et façons culturales ne sont pas modifiées à la suite des travaux, la probabilité que les mêmes problèmes réapparaissent est élevée.** Il est donc essentiel d'identifier la cause de la compaction pour ne pas recréer le problème.

Une solution qui comporte certains risques

Le sous-solage peut être un échec par manque de connaissances sur les propriétés des sols (propriétés physiques des horizons concernés) et causer plus de problèmes qu'il n'en résout (remontée de roches à la surface, lissage du sol au niveau du soc de la sous-soleuse, etc.) en plus d'engendrer des dépenses inutiles.

Avant de décider de procéder au sous-solage, il importe de faire l'étude du profil de sol (type de sol, consistance, profondeur affectée et autres renseignements utiles) afin de s'assurer de sa nécessité. **Un diagnostic posé par un spécialiste en sol pourra déterminer la pertinence d'effectuer de tels travaux.**

Les équipements utilisés pour le sous-solage

Il y a deux principaux types d'équipement qui peuvent être utilisés pour le sous-solage: les décompacteurs lourds et les décompacteurs légers.

Les décompacteurs lourds

Les décompacteurs lourds (figure 9) sont les instruments les plus utilisés pour le décompactage mécanique du sol. Leur profondeur d'opération est supérieure à 40 cm (16 po), et certains peuvent même atteindre 80 cm (32 po) (voir encadré). Ils peuvent être de type porté ou traîné. Ils sont plus robustes que les décompacteurs légers.

Il faut éviter de pénétrer trop profondément afin de réduire les risques de lissage, car le sol, en profondeur, est plus humide. Il est généralement recommandé de ne pas dépasser environ 10 cm (4 po) sous la zone de sol à décompacter.

Les décompacteurs légers

Les décompacteurs légers ont une profondeur de travail inférieure à 40 cm (16 po). Leur utilisation vise donc à fracturer une **zone dense située à proximité de la surface du sol**. Il existe quelques variantes de décompacteurs légers. Souvent, il s'agit d'un équipement de travail primaire de type chisel ou pulvérisateur à disques lourds auquel sont combinées des dents permettant de décompacter un peu plus profondément que la couche de sol travaillée.

Décompacteur lourd standard

MAPAQ



Figure 9
Décompacteur lourd à bâti droit muni d'une roue de contrôle et de disques ouvreur

MAPAQ

Figure 10
Sous-soleuse
et composantes

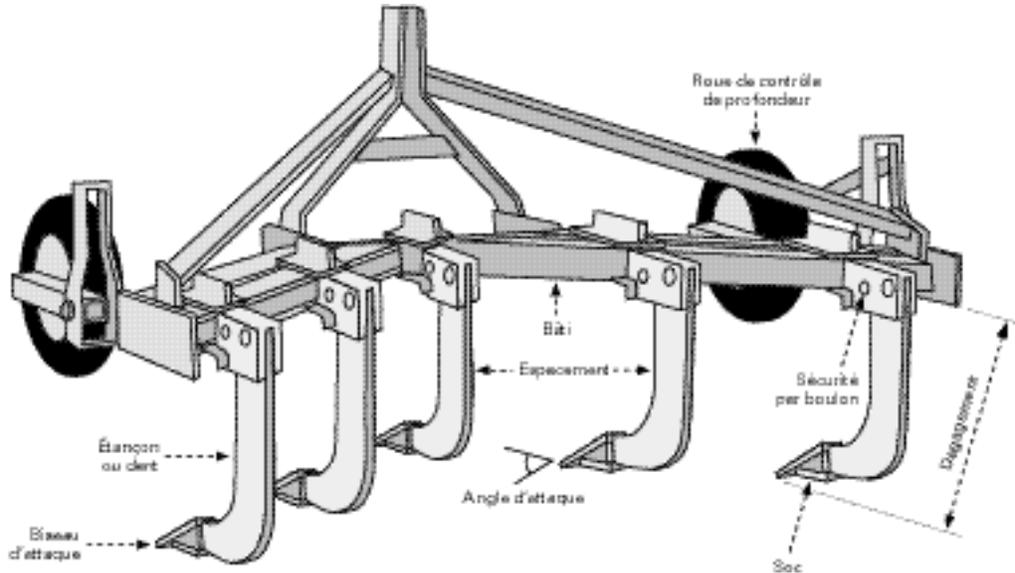
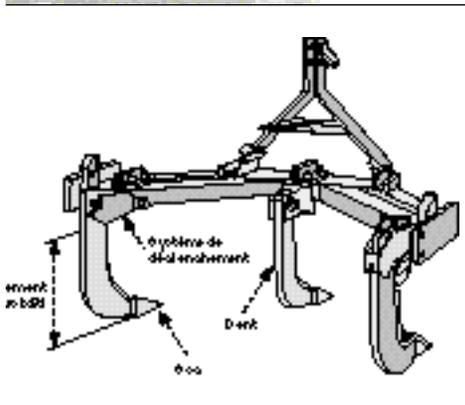


Figure 11
Sous-soleuse
à bâti en V

Adaptée de Barthelemy *et al.*,
1987



Les composantes de base des décompacteurs (ou sous-soleuses) sont le bâti, les étançons (1 à 12), les socs et le mécanisme de sécurité. Certains comportent aussi des disques ouvreurs. Enfin, pour un travail précis, la profondeur de travail doit pouvoir être contrôlée.

Le bâti

Au Québec, on rencontre deux principaux types de bâti : le bâti en V et le bâti droit (figures 11 et 12).

Bâti en V

Le bâti en V est composé de 2 poutres disposées en V qui supportent les dents (figure 11). Grâce à cette disposition en V, les dents attaquent progressivement le sol, **ce qui contribue à réduire le besoin en force de traction**. De plus, la première dent, située près du tracteur, assure un meilleur transfert de charge sur les roues du tracteur (meilleure traction).

Bâti droit

Les dents du modèle à bâti droit sont disposées sur la même rangée. Elles attaquent donc le sol de front, ce qui a pour conséquence de nécessiter, pour un même nombre de dents, une **force de traction supérieure à celle requise pour le modèle à bâti en V** (figure 12).

Les étançons

Les étançons sont fixés au bâti et se terminent par un soc. Les principaux types d'éтанçon sont les étançons droits, les étançons obliques vers l'avant et les étançons incurvés (figure 13). Le tableau 4 décrit les principaux types d'éтанçon.

Quelle est la différence entre un étançon et une dent ?

- L'éтанçon est la pièce reliée au bâti et auquel est fixé le soc.
- L'éтанçon et le soc constituent la dent.

Figure 12
Sous-soleuse
à bâti droit

Adaptée de Barthelemy *et al.*,
1987

Pour protéger l'éтанçon contre l'usure, il est recommandé de lui fixer une plaque fabriquée d'un matériau résistant. Il est à noter que l'éтанçon central du modèle de bâti en V est le plus sollicité et s'use plus rapidement.

Tableau 4. PRINCIPAUX TYPES D'ÉTANÇONS

Type d'étauçon	Particularités	Effort de traction requis
Étauçon droit	<ul style="list-style-type: none"> • presque vertical; • remonte peu de terre du sous-sol dans la couche arable et bouleverse peu la surface du sol. 	Élevé
Étauçon oblique vers l'avant	<ul style="list-style-type: none"> • se situe entre le modèle droit et le modèle incurvé ; • plus il est incliné vers l'avant, plus son effet de soulèvement sur le sol est grand et plus la remontée de mottes en surface est importante, surtout quand le sol est à une consistance dure. 	Modéré
Étauçon incurvé ou parabolique	<ul style="list-style-type: none"> • la remontée de terre du sous-sol vers la couche arable est importante comparativement à ce qu'on observe avec un étauçon droit ; • possibilité de remontées de pierres en surface dans un sol rocailleux ; • un angle d'attaque prononcé et incliné vers l'avant offre une meilleure pénétration. 	Modéré

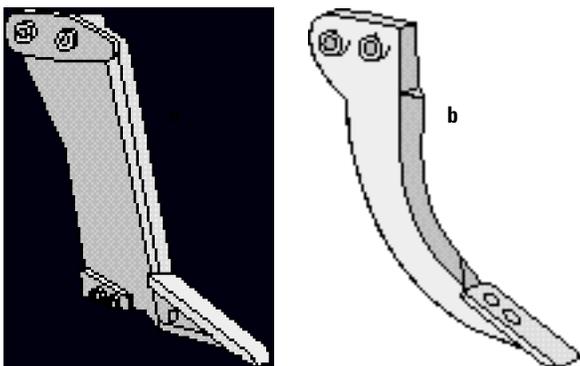


Figure 13
Modèles d'étauçon :
a étauçon droit
b étauçon incurvé

Adaptée de Barthelemy *et al.*, 1987

Les socs

Le soc est la pièce qui recouvre la pointe de l'étauçon et le prolonge. C'est lui qui donne l'angle d'attaque de la dent. Sa forme a une influence sur la profondeur et la largeur de travail. Ainsi, dans le cas d'un soc droit, plus il est long, plus il favorise, pour un même angle, la pénétration de la dent dans le sol et plus il permet de travailler le sol en profondeur (figure 14a). Par ailleurs, la présence d'ailettes, fixées parallèlement à la surface du soc ou à angle par rapport à l'horizontale (en forme de toit), augmente la largeur de travail et le volume de sol éclaté (figure 14b).

Les ailettes ont cependant pour effet d'augmenter l'effort de traction, de 10 à 30%, pour le même nombre de dents. Par contre, l'augmentation du volume de sol déplacé permet de réduire le nombre de dents pour obtenir les mêmes résultats. La largeur totale du soc à ailettes se situe entre 10 et 20 cm (4 et 8 po). Ce type de soc convient mieux aux sols peu cohésifs comme les sables.

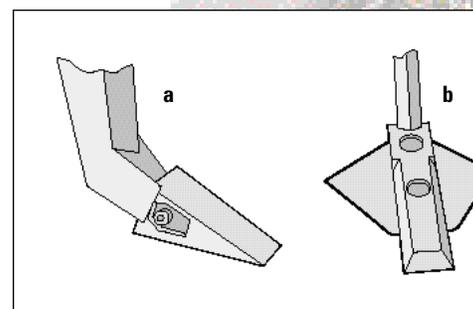


Figure 14
Soc de sous-soleuse :
a droit
b à ailettes



Le mécanisme de sécurité

Un mécanisme de sécurité doit être présent pour prévenir les dommages causés à la sous-soleuse ou au tracteur lorsque la dent rencontre un obstacle. Il est indispensable en sol rocailleux. Le mécanisme peut être un ressort, un système hydraulique ou un simple boulon de cisaillement (figure 10). Le choix du mécanisme est fonction de la densité et de la taille des obstacles susceptibles d'être rencontrés.

Les disques ouvreurs

Certains modèles de sous-soleuse sont munis de disques ouvreurs à l'avant de la dent. Ils réduisent l'effort de traction et coupent les débris végétaux réduisant ainsi les risques de bourrage. Par contre, ils limitent la profondeur de travail en réduisant le dégagement utile sous le bâti.

Le contrôle de la profondeur de travail

La profondeur de travail est contrôlée par le système de relevage hydraulique du tracteur ou à l'aide de roues de contrôle de profondeur.

Lors du sous-solage, la vérification de la profondeur peut être faite en insérant une tige dans le sillon laissé par le passage de la dent. De plus, le maintien de la profondeur visée peut être facilité en plaçant des points de repère sur la sous-soleuse ou sur les bras de relevage hydraulique.

Dégagement sous le bâti

Le dégagement utile sous le bâti est l'espace compris entre le sol et la partie inférieure des pièces de fixation des étauçons sous le bâti (figure 10). En mode de travail, il est recommandé de conserver un dégagement minimal de 20 à 30 cm (8 à 12 po) entre le sol et le bâti pour tenir compte du foisonnement du sol et des risques de bourrage causés par la présence de débris végétaux ou de mottes de sol.

Effet sur le sol

En **sol trop humide**, la dent trace un sillon étroit dans le sol. L'effet est comparable à celui créé par le passage d'un couteau dans du beurre mou.

En **condition de sol sec**, le passage de la dent de la sous-soleuse crée une zone perturbée de forme triangulaire (en forme de V) dont la pointe se situe en profondeur. Le plus grand volume de sol remanié se situe près de la surface. Lorsque le sol est sec, des fissures devraient se produire à plusieurs endroits, dont certaines dans la couche de sol compactée.

Plus le sol est humide, moins le V est évasé (angle de fendillement plus faible). De plus, le risque de lissage s'accroît avec le taux d'humidité.

Le sous-solage crée un mouvement de sol vers le haut qui provoque un **foisonnement** (sol soulevé à la surface). L'importance du foisonnement varie, entre autres, avec :

- la texture du sol ;
- sa structure ;
- son humidité ;
- le type d'étauçon (voir tableau 4).

Recommandations sur la technique d'exécution

L'exécution des travaux de sous-solage doit tenir compte des recommandations suivantes.

Quand doit-on effectuer les travaux de sous-solage ?

Ces travaux doivent être effectués **lorsque le sol est le plus sec possible à la suite de la récolte d'une culture hâtive ou sur une prairie devant être labourée**. Une bonne période est souvent la fin de l'été ou le début de l'automne. **Ne jamais effectuer le sous-solage au printemps ou tard à l'automne** (il y a cependant une exception pour certains sables dont le sous-solage est parfois possible à l'automne).

Comment procéder ?

Profondeur et vitesse

Pour être efficace, les dents de la sous-soleuse doivent passer à **environ 10 cm sous la zone de sol à décompacter (4 po)**. Celle-ci doit donc être identifiée et localisée avant de débiter les travaux. La vitesse recommandée est généralement de l'ordre de **5 à 6 km / h (3 à 4 mi / h)**. À une vitesse inférieure, l'effet recherché d'éclatement risque de ne pas être atteint.

Écartement des dents

Pour obtenir l'effet recherché d'éclatement du sol, il est important de pouvoir varier l'écartement entre les dents. Dans la plupart des cas, **un écartement égal à 1,5 à 2 fois la profondeur de travail** convient. À titre indicatif, le tableau 5 donne un aperçu des écartements pour diverses profondeurs. Ces données peuvent servir pour ajuster l'espacement entre les dents, mais l'effet sur le sol doit être vérifié, et des modifications peuvent être nécessaires.

Tableau 5. ÉCARTEMENT APPROXIMATIF DES DENTS EN FONCTION DE LA PROFONDEUR DE TRAVAIL*

Profondeur de sous-solage en cm (po)	40 (16)	50 (20)	60 (24)
Écartement des dents en cm (po)**	60-80 (24-31)	75-100 (30-39)	90-120 (35-47)

* Angle de fendillement recherché : de 45° à 50° par rapport à la verticale.

** L'écartement peut être plus grand si les socs sont munis d'ailettes.

Orientation des passages

Il est recommandé que les passages de sous-soleuse soient **perpendiculaires à la pente générale du terrain**. Cependant, afin de faciliter les opérations dans les champs étroits, on peut opter pour travailler **diagonalement** à la pente. Dans un champ muni d'un réseau de drainage souterrain, les passages perpendiculaires ou obliques par rapport à celui-ci favoriseront l'écoulement de l'eau vers les drains. En l'absence de drainage souterrain, il faut viser à exécuter le sous-solage le plus perpendiculairement possible à la pente afin de réduire les risques d'écoulement préférentiel vers le bas des pentes par les sillons faits par la sous-soleuse.

Attention de ne pas endommager :

- les conduites de drains ;
- le talus des fossés ;
- les bandes riveraines.



Vérification de l'effet sur le sol

Afin de déterminer si le travail est adéquat, il faut, à la suite d'un essai sur quelques mètres, faire des observations sur :

- le foisonnement obtenu (plus le foisonnement est important, plus le volume de sol perturbé est important) ;
- le profil du sol, afin de vérifier :
 - la profondeur de travail par rapport à la couche compactée ;
 - l'angle de fendillement.

Pour examiner le profil, il faut creuser une fosse. Ensuite, on évalue la zone de sol perturbé à l'aide de la pointe d'un couteau.

Il faut viser à ce que le sol perturbé par le passage de chaque dent forme un « V » dont chaque côté forme un angle d'environ 45° à 50° par rapport à la verticale. Un angle moindre peut signifier que le sol est trop humide. De préférence, chaque « V » doit se croiser près de la surface du sol.

À la suite de ces observations, il peut être nécessaire de modifier :

- la profondeur de travail (une profondeur de 10 cm (4 po) sous la couche à décompacter est recommandée) ;
- l'écartement des dents ;
- la vitesse d'avancement (une augmentation de vitesse peut contribuer à accroître l'éclatement du sol) ;
- le type de socs (des socs avec ailettes permettent d'élargir la bande travaillée).

Cette étape permet aussi d'évaluer si les conditions d'humidité du sol sont adéquates pour le sous-solage et, par conséquent, si la poursuite des travaux est souhaitable.

À retenir

Pour obtenir un travail efficace lors de l'opération de sous-solage, les conditions du sol, plus particulièrement son humidité, sont le facteur le plus important à considérer. Certains sols offrent des conditions propices aux déformations plastiques ; certaines argiles auront même tendance à se liquéfier sous l'action de la sous-soleuse.

L'opération de sous-solage ne doit pas être effectuée **en conditions automnales tardives et printanières hâtives. Elle doit plutôt se dérouler en conditions plus sèches à la suite de la récolte d'une culture hâtive ou sur une prairie devant être labourée.**

On doit également **respecter la profondeur maximale d'opération (10 cm ou 4 po sous la couche compactée)**. Au-delà de cette profondeur, la méthode peut nécessiter un effort de traction excessif et empirer la compaction.

De préférence, le sous-solage devrait constituer la dernière opération de l'année dans un champ donné, car les sillons accroissent les risques d'enlèvement surtout tard à l'automne.

Le recours aux services d'un spécialiste en sol est recommandé avant d'entreprendre des travaux de sous-solage.

Puissance - rendement - coût des travaux

La puissance de l'unité motrice, le rendement et le coût des travaux sont fonction, entre autres, de la profondeur de travail, du type de sol et de son taux d'humidité.

La **force de tirage requise par dent**, à 40 cm (16 po) de profondeur, est de l'ordre de 23 à 34 KW (30 à 45 CV à la barre de tire) alors que la **vitesse recommandée** pour l'exécution des travaux est généralement de 5 à 6 km/h (3,8 mi/h). Pour une vitesse de cet ordre et dans le cas d'un écartement de 76 cm (30 po) entre les dents, la superficie travaillée serait d'environ 0,38 à 0,5 ha/heure par dent (1 à 1,5 ha/heure pour une sous-soleuse à 3 dents et 1,9 à 2,5 ha pour une à 5 dents).

Le **coût** d'achat d'une sous-soleuse varie selon les modèles et les composantes. Ainsi, en 1999, le coût d'achat d'un décompacteur lourd était de l'ordre de 3 500 \$ à 4 500 \$ pour une version à 3 dents, alors que celui d'une version à 7 dents pouvait varier de 8 000 \$ à 15 000 \$ selon qu'il s'agisse d'un modèle de base ou d'un modèle plus robuste et plus équipé (avec système de déclenchement à ressort, coutres devant les dents, etc). Les décompacteurs légers ont une gamme variée de prix, car ils sont habituellement combinés à un équipement de travail du sol.

En 1999, le coût à forfait de travaux de sous-solage se situait aux environs de 40 \$ à 50 \$ par hectare. Ce montant varie selon l'état du terrain (degré de compaction, présence de débris dans le sol, etc.), les régions et la disponibilité des équipements et des entrepreneurs.

Pour en savoir plus

- ▶ **AGRICULTURE CANADA et MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION DE L'ONTARIO.** 1993. Les pratiques de gestion optimales - Grandes cultures. 133 p.
- ▶ **BARTHELEMY, P., D. BOISGONTHIER et P. LAJOUX.** 1987. Choisir les outils de travail du sol. Institut technique des céréales et fourrages. France.
- ▶ **CEMAGREF.** 1993. Les matériels de travail du sol, semis et plantation. Collection FORMAGRI vol. 3, 1^{re} édition ISBN 2-85362-348-3 (CEMAGREF). 385 p.
- ▶ **CHASSÉ, M., G.S.V., RAGHAVAN, F. MÉRINEAU et E. MCKYES,** 1975. Compaction of orchard soils in Southern Quebec. CSAE. Paper No. 75-316.
- ▶ **CNEEMA, BI n° 270,** juillet 1980. Notes de voyage de E. Dalleine du CNEEMA. France.
- ▶ **CNEEMA, BI n° 275,** décembre 1980. Notes de voyage de E. Dalleine du CNEEMA. France.
- ▶ **COMITÉ DE RÉFÉRENCES ÉCONOMIQUES EN AGRICULTURE DU QUÉBEC,** 1987. Machinerie, force requise, vitesse de travail et efficacité. Agdex 740.

RÉDACTION

Yvon Brochu, ingénieur, Direction de l'environnement et du développement durable, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec
Daniel Massicotte, agronome, ENVIROSOL, Drummondville

COLLABORATION

Pierre Chouinard, agronome, M. Sc., ENVIROSOL, Drummondville
Yves Bédard, ingénieur, M. Sc., Département de gestion agricole, Cégep de Lévis-Lauzon, Lévis
Guy Beaugard, agronome, Direction régionale Centre-du-Québec, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Nicolet
Jacques Gallichand, chercheur, Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Pavillon Paul-Comtois, Québec
Guy Mehuys, agronome, Ph. D., Département des sciences des ressources naturelles, Campus Macdonald - Université McGill, Sainte-Anne-de-Bellevue
Jean Bourque, T.P., Coopérative fédérée de Québec, Trois-Rivières

RÉVISION

Denis Angers, chercheur scientifique, Centre de recherche sur les sols et les grandes cultures, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sainte-Foy
Richard Beaulieu, agronome, M. Sc., ministère de l'Environnement du Québec, Québec
André Brunelle, agronome, Direction régionale Centre-du-Québec, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Nicolet
Éric Dehandschutter, Fédération des producteurs de cultures commerciales du Québec, Saint-Césaire
Georges Lamarre, ingénieur, agronome, Bureau des renseignements agricoles, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Sainte-Martine
Richard Laroche, ingénieur, Direction de l'environnement et du développement durable, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec
Odette Ménard, ingénieure, agronome, Direction régionale Montérégie-Est, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Saint-Hyacinthe
Victor Savoie, ingénieur, agronome, Bureau des renseignements agricoles, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Nicolet

GESTION DE PROJET MAPAQ

Bruno Gosselin, agronome,
Direction régionale de Québec,
ministère de l'Agriculture, des
Pêcheries et de l'Alimentation
du Québec, Québec

Mario Lapointe, agronome,
Direction de l'environnement et
du développement durable,
ministère de l'Agriculture, des
Pêcheries et de l'Alimentation
du Québec, Québec

ÉDITION

Aude Tousignant, ingénieure
forestière, Sillery

SECRÉTAIRE À L'ÉDITION

Jocelyne Drolet, Conseil
des productions végétales
du Québec inc., Québec

GESTION DU**MATÉRIEL VISUEL**

Chantal Turbis, agronome,
Conseil des productions
végétales du Québec inc.,
Québec

MONTAGE

Marc Brazeau, infographiste
Compélec

COORDINATION DU PROJET

Jacynthe Lareau, agronome,
M. Sc., Conseil des productions
végétales du Québec inc.,
Québec

© CPVQ, 2000

- ▶ **CONSEIL DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC inc.** 1982. Sols. Les façons culturales. Commission des sols. Section physique des sols. Agdex 517.
- ▶ **CONSEIL DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC inc.** 1995. Sols, diagnostic de la dégradation des propriétés physiques des sols. Bulletin technique 21. Agdex 500.
- ▶ **DENIS, J.** Juillet 1998. Grandes cultures: la sous-soleuse, seulement si le sous-sol est malade. Supplément de la Terre de chez nous, vol. 8, n° 3.
- ▶ **FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION.** 1986. 13^e Colloque de génie rural. La compaction du sol: problème, correction et prévention. 219 p.
- ▶ **LAFLAMME, G.** 1989. Conservation des sols et de l'eau. Institut de technologie agroalimentaire de La Pocatière. MAPAQ et MEC. Cours par correspondance.
- ▶ **MERCIER, F., et S. TESSIER.** 1993. Développement de pneus porteurs en agriculture, Groupe de recherche en environnement agro-alimentaire (GREA), Université Laval. 29 p.
- ▶ **MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DES PÊCHERIES ET DE L'ALIMENTATION DU QUÉBEC.** 1988. Vivez bien avec la terre. ISBN 2-550-18559-5.
- ▶ **RAGHAVAN, G.S.V., et E. MCKYES.** 1983. «Physical and hydraulic characteristics in compacted clay soils». J. Terramechanics 19 (4): 235-242.
- ▶ **RAGHAVAN, G.S.V., E. MCKYES et M. CHASSÉ.** 1977. «Effect of wheel slip on soil compaction». J. Agric. Engng Res. 22: 79-83.
- ▶ **RAGHAVAN, G.S.V., E. MCKYES, M. CHASSÉ et F. MÉRINEAU.** 1976. «Development of compaction patterns due to machinery operation in an orchard soil». Can. J. Plant Sci. 56: 505-509.
- ▶ **RIVEST, R., et L. GUERTIN.** 1987. Aménagement et travail du sol. Institut de technologie agro-alimentaire de Saint-Hyacinthe. Manuel de cours. 265 p.
- ▶ **TABI, M., L. TARDIF, D. CARRIER, G. LAFLAMME et M. ROMPRÉ.** 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement agroalimentaire. Rapport synthèse. 71 p.
- ▶ **TESSIER, S.** 1994. Gestion des sols. Section 4. Éléments du plan de conservation des sol - Module 9 - Travail du sol. Département de génie rural, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval. 171 p.