

# COMPRENDRE ET RÉUSSIR LE SOUS-SOLAGE



Le CETAB+ est une composante du



#### Comprendre et réussir le sous-solage

2015

#### Gestion de projet et rédaction

Anne Weill, agr., Ph.D., CETAB+ (anne.weill@cetab.org)

#### Collaboration

Joshua Bougon-Ronin, stagiaire, étudiant à l'ISARA (France)

Pierre Bournival, ing., M.Sc., enseignant au Cégep régional de Lanaudière

Eve Cayer, agr.

Sam Chauvette agr., M.Sc., agent de recherche au Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ)

Aurélie Demers, technicienne au CETAB+

Jean Duval, agr. Ph.D., chargé de projet au CETAB+

Audrey Fréchette, stagiaire, étudiante au Cégep de Victoriaville

Pierre Antoine Gilbert, agr., M.Sc., enseignant au Cégep de Victoriaville

Denis La France, dta, expert en agriculture biologique au CETAB+

Audrey Ross, dta., technicienne au CETAB+

Valérie Roy-Fortin, agr., chargée de projet au CETAB+

#### Révision scientifique

Dick Godwin, DSc, FREng., professeur à l'Université Harper Adams (Angleterre)

Gordon Spoor, Ph.D. MSc, MI AgrE, professeur émérite en physique des sols appliquée, Université Cranfield (Angleterre)

#### Révision linguistique

Monic Rouleau, CETAB+

#### Illustrations

Marie Bilodeau

#### **Photos**

CETAB+ sauf si mentionné autrement

#### Réalisation

Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité (CETAB+) du Cégep de Victoriaville

#### Remerciements aux producteurs ayant participé au projet

Sébastien Angers (Ferme Rheintal)
Jean-François Arpin (Ferme l'Arche du Ruisseau)
Simon Audette (Ferme Monlou et filles)
John Bastian (Ferme Morgan)
Alain Courchesne (Ferme Alain Courchesne et Rachel Cloutier)
Jean Leclerc, dta., enseignant au Cégep de Victoriaville
RDR Grains et semences inc.

#### Remerciements aux concessionnaires de machinerie ayant participé au projet

Agritex Yamaska (John Deere)
Centre agricole Yamaska inc. (case IH)
Comptoir agricole de Sabrevois (Jo-ber)
Kverneland Canada
La Sole inc.

#### **Financement**

Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada

#### Citation suggérée

Weill, 2014. Comprendre et réussir le sous-solage. CETAB+, Victoriaville, 45 p. www.cetab.org/publications

## TABLE DES MATIÈRES

Int	rodu	ction	1
1.	Diag	gnostic préalable	1
E	But rec	herché	1
(	aracté	ristiques du champ	2
2.	Cho	ix et types de sous-soleuses	4
3.	Effe	t du sous-solage	10
A	meub	lissement du sol	10
(	Compr	ession du sol autour du soc et de la partie inférieure de la dent	.11
F	rofon	deur critique	12
(	Séomé	trie de la zone ameublie lorsque la profondeur critique n'est pas atteinte	15
١	olume'	e de sol ameubli	18
4.	Les	règles du succès	23
\	itesse'	et puissance	23
N	⁄lécani	sme de sécurité pour les dents de sous-soleuse	24
F	roblèr	nes observés lors d'une démonstration de sous-solage en sol très compact	25
5	tratég	ies de sous-solage pour obtenir un ameublissement uniforme du sous-sol	27
5	ous-so	olage sans bouleversement de la surface du sol	29
Co	nclus	ion	35
Ré	féren	ces	36
ΤA	BLE	DES ILLUSTRATIONS	
Figi	ure 1.	Direction de sous-solage transversale par rapport aux drains	4
Figi	ure 2.	Bâti en V et bâti droit de deux sous-soleuses	5
Figi	ure 3.	Étançons de différentes formes	7
Figi	ure 4.	Effet de la profondeur de travail sur les forces appliquées par la dent lorsque la partie supérieure d'une dent incurvée penche vers l'avant; (adapté de Raper, 2006 et Gill et Vanden Verg, 1966)	7
Figi	ure 5.	Socs étroit ou large (avec ailettes)	
_		Hauteur de soulèvement des ailettes	

Figure 7.	Sous-soleuse dont le soc et les ailettes (en particulier celles qui ont été rajoutées au-dessus du soc) ont un angle d'attaque trop vertical (a et b). Au lieu d'être soulevé, le sol est poussé vers l'avant et compacté (c)	10
Figure 8.	Fissuration par compression du sol exercée principalement par le soc	11
Figure 9.	Soulèvement du sol occasionnant des fissures par tension	11
Figure 10.	Passage d'une dent de sous-soleuse à une profondeur de 43 cm (17 po) dans un sol très compact et moyennement humide en profondeur	12
Figure 11.	Vues de côté et de face de l'effet du passage d'une dent à soc étroit sur le sol lorsque celle-ci est au-dessus (a) ou en dessous (b) de la profondeur critique (Godwin and Spoor (2015) d'après Godwin and Spoor (1977) et Spoor (2006))- Reproduit avec l'aimable permission des auteurs et de CABI	13
Figure 12.	Passage de deux dents de sous-soleuse à une profondeur de 43 cm (17 po) dans un sol très compact et moyennement humide en profondeur. Le sol a été fissuré entre 0 et 35 cm (14 po) et comprimé en dessous.	13
Figure 13.	Sous-soleuse avec 6 dents Michel espacées de 50 cm (20 po) travaillant à 40 cm (16 po) de profondeur en sol argileux. Le faible espacement entre les dents réduit la masse de sol à soulever pour chaque dent et par conséquent, la résistance que le sol exerce sur la dent	15
Figure 14.	Géométrie de la zone ameublie en fonction de la largeur du soc	16
Figure 15.	Sol cassé en gros blocs de 30 à 60 cm (12 à 24 po) par un passage de sous-soleuse à dents incurvées juste en dessous de la couche compacte	16
Figure 16.	Sol argileux très massif qui ne s'est pas suffisamment fracturé lors du sous-solage; seule une petite zone en forme de V a été ameublie	17
Figure 17.	Zone de sol ameubli en forme de V (pas toujours complètement symétrique). Les flèches orange indiquent le passage des dents. Dans ce cas, les V ne se croisent pas et une faible fraction du sol est ameublie.	18
Figure 18.	Influence de l'espacement entre les dents sur l'uniformité de l'ameublissement du sol : espacement trop important (haut) et optimum (bas), (Godwin and Spoor (2015) d'après Spoor et Godwin (1992)) - Reproduit avec l'aimable permission des auteurs et de CABI	19
Figure 19.	Influence de la profondeur de travail sur la proportion de sol ameubli par une dent droite sans ailette pour 3 profondeurs de travail (23, 30 et 43 cm); (données du CETAB+ – non publié)	19
Figure 20.	Sol compact fissuré par le passage d'une dent dont le soc travaille à une trop grande profondeur	20
Figure 21.	Exemple de sous-soleuse avec dents superficielles en avant des dents profondes (photo : Dick Godwin) – Attention, certains outils combinés ne sont pas adaptés au sous-solage à cause de leur trop grand nombre de dents, ce qui requiert trop de puissance	

Figure 22.	Position optimale des dents superficielles et forme de la zone ameublie (gauche).  Latéralement, les dents superficielles se situent entre les dents profondes (Godwin and Spoor (2015) d'après Spoor et Godwin (1978). Reproduit avec l'aimable permission des auteurs et de CABI	.21
Figure 23.	Géométrie de la zone ameublie avec la présence d'ailettes (haut) et présence d'ailettes et de dents superficielles en avant des dents de sous-soleuse (bas) (reproduit de Godwin and Spoor (2015) d'après Spoor et Godwin (1978)) - Reproduit avec l'aimable permission des auteurs et de CABI	.22
Figure 24.	Dents qui ne pénètrent pas suffisamment un sol sableux très compact. A titre de référence, on peut voir la dent la plus à droite qui travaille à la bonne profondeur. La deuxième dent à partir de la droite est presque complètement sortie.	.24
Figure 25.	Surface du sol après un ou deux passages de sous-soleuse	.29
Figure 26.	Zone ameublie par une dent de sous-soleuse passée à une profondeur de 42 cm (17 po) et envahie par les racines d'un engrais vert (a) et nouvelles racines nombreuses dans la galerie créée par la dent de sous-soleuse (b)	.30
Figure 27.	Disques droits tranchants qui coupent la culture en avant des dents de la sous-soleuse	.32
Figure 28.	Effet de l'utilisation de dents droites sur engrais vert de seigle d'automne semé au printemps (a) et de dents incurvées sur engrais vert de trèfle après la récolte de blé en sol argileux (b)	.32
Figure 29.	Utilisation de dents incurvées en sol sableux avec des disques en avant des dents (dans un raygrass annuel en rotation avec des pommes de terre). Attention : si le sol contient suffisamment d'argile pour faire des mottes, la culture sera abîmée	.33
Figure 30.	Bâti droit avec une seule rangée de dents espacées de 60 cm (24 po) en sol argileux: le sol se coince entre les dents et se soulève;	.33
Figure 31.	Glissement excessif des roues qui abîme la culture d'engrais vert	.34
Figure 32.	Sous-soleuse adaptée aux prairies avec rouleau-tasseur	.34

## **TABLE DES TABLEAUX**

Tableau 1. Géométrie de la zone ameublie en fonction du type de sol, du degré de compaction et de la profondeur de sous-solage	17
Tableau 2. Espacements entre dents recommandés selon la profondeur de travail (Godwin and Spoor, 2015)	
Tableau 3. Espacements entre dents recommandés selon la profondeur de travail pour une sous- soleuse standard avec soc étroit d'environ 7,5 cm (3 po)	23
Tableau 4. Puissance requise par dent en fonction de la profondeur (Spoor, 2006)	23
Tableau 5. Problèmes rencontrés lors du sous-solage d'un sol argileux très compact de 5 à 40 cm (2 à 18 po) <sup>1</sup>	26
Tableau 6. Stratégies permettant d'améliorer l'uniformité de l'ameublissement du sol	28



#### INTRODUCTION

La compaction<sup>1</sup> des sols agricoles est un problème important qui diminue, souvent de façon insidieuse, le rendement des cultures, ralentit l'égouttement des sols et augmente les risques de maladies. Dans plusieurs, cas, il est nécessaire de recourir au décompactage à l'aide de sous-soleuses afin de corriger le problème. Pour bien réussir une opération de sous-solage, il faut commencer par faire un diagnostic de la situation, afin de bien connaître les caractéristiques du champ concerné et de de déterminer le but recherché avec le sous-solage. Par la suite, une bonne compréhension des conditions de réussite reliées au sous-solage est nécessaire.

## 1. DIAGNOSTIC PRÉALABLE

Le sous-solage est une opération coûteuse qui doit être bien planifiée. Une stratégie inadéquate peut amener plus de méfaits que de bienfaits. Dans certains cas, le but recherché peut être un ameublissement complet du profil de sol alors que dans d'autres, il peut être souhaitable de faire seulement un ameublissement partiel. Il est nécessaire de connaitre les caractéristiques du champ afin de bien cibler le but du sous-solage, de décider du moment du sous-solage, de sa profondeur ainsi que de sa direction par rapport à la pente du champ ou aux drains souterrains.

#### **BUT RECHERCHÉ**

Dans de nombreux cas, un ameublissement complet de la couche compacte est souhaitable car cela permet aux racines de se développer, à l'eau de percoler en profondeur et à la structure du sol de s'améliorer.

Dans d'autres cas, il peut être désirable de faire un sous-solage qui vise seulement à accélérer l'assèchement du champ au printemps sans nécessairement ameublir l'ensemble de la couche compacte. En effet, même lorsque le sol n'est pas très compact, il y a souvent une petite semelle de labour qui ralentit la percolation de l'eau.

Finalement, lorsque la perméabilité naturelle du sol est faible sur une grande profondeur, le sous-solage doit être adapté afin de ne pas créer une couche gorgée d'eau qui risque de s'assécher très lentement au printemps (voir section suivante sur la profondeur de la compaction).

Selon Spoor *et al.* (2003), la présence d'une zone compacte comme une semelle de labour peut protéger le sous-sol de la compaction en offrant une surface ferme qui absorbe et distribue la pression causée par la machinerie. Ces chercheurs recommandent de ne pas trop ameublir la couche compacte et de chercher plutôt à la fissurer ou la casser en blocs assez gros, de façon à laisser passer l'eau et les racines tout en maintenant une certaine protection du sous-sol.

1

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Le terme correct est tassement ou compactage mais le terme compaction est fréquemment employé au Québec.



#### **C**ARACTÉRISTIQUES DU CHAMP

Afin de connaître les caractéristiques du champ, plusieurs examens de profil de sol doivent être faits, en particulier pour connaître la profondeur de la compaction (Weill, 2009; Ball, 2007). Des mesures au pénétromètre peuvent compléter ces examens afin d'évaluer la constance de la présence et de la profondeur de la zone compacte dans l'ensemble du champ; elles ne peuvent toutefois pas remplacer les examens du profil. Le plan de drainage devrait aussi être examiné ainsi que la topographie du terrain. Les caractéristiques du champ les plus importantes à considérer sont la texture, la rapidité du drainage, la profondeur de la compaction et la topographie.

#### Texture du sol et humidité

La texture du sol a une grande influence sur la vulnérabilité du sol à la compaction. De plus, l'importance du taux d'humidité sur le succès de l'opération de décompactage varie avec la texture.

#### Sols légers

Les sols légers peuvent être très massifs et compacts, en particulier lorsque le pourcentage de sable fin ou de limon est important. Les grains de sable fin ou de limon s'encastrent les uns dans les autres, ce qui réduit la porosité de façon drastique et peut complètement bloquer le passage des racines et de l'eau. Les sols légers sont très facilement compactés lorsqu'ils sont humides et, dans une moindre mesure, lorsqu'ils sont secs. À cause de leur faible taux d'argile, ils sont peu structurés et, de plus, leur structure n'est ni stable ni résistante aux forces de compression.

Pour cette raison, il est parfois préférable d'ameublir le sol avec un sous-solage juste avant le semis ou peu après. Une telle technique peut être envisagée en sols sableux uniquement, car ils sont moins à risque que les argiles d'être compactés en profondeur par les dents de sous-soleuses lorsqu'humides. Certains producteurs équipés d'un GPS s'assurent que les dents de la sous-soleuse passent exactement sur le rang à semer ou parfois juste un peu à côté. Une telle technique doit être essayée au préalable sur une petite superficie car, dans certains types de sol, elle peut affecter la régularité de la profondeur de semis et de la levée.

#### Sols lourds

Les sols lourds sont sensibles à la compaction lorsqu'humides mais très résistants à la compaction lorsque secs. De façon générale, ils résistent mieux à la compaction que les sols légers, grâce à leur structure en agrégats solides. Le sous-solage de ces sols doit toujours être fait lorsqu'ils sont secs, soit le plus souvent en été ou au début de l'automne. Le printemps n'est jamais une bonne période pour sous-soler un sol argileux au Québec puisqu'il est toujours humide en profondeur. De plus, si le sous-solage entraîne la formation de gros blocs en surface, il est important que les cycles de gel et de dégel de l'hiver puissent ameublir ces derniers afin de faciliter la préparation du lit de semence au printemps. Compte tenu de la difficulté de réussir un sous-solage en profondeur dans un sol souvent insuffisamment sec, ainsi que du coût élevé de cette opération, il faut bien évaluer la situation avant de passer à l'action. En effet, les sols lourds, même compactés, sont souvent fissurés, ce qui permet à une petite proportion de racines de descendre en



profondeur. Lorsque des fissures sont présentes dans l'ensemble du profil, il est probable que l'eau circule et que le sous-solage ne soit pas vraiment nécessaire.

#### Sols d'origine glaciaire (tills)

Au Québec, de nombreux sols sont d'origine glaciaire, aussi appelés tills. Ce sont des sols que l'on retrouve surtout dans les zones montagneuses (Appalaches, Laurentides et contreforts de ces chaînes de montagnes). Ces sols, en général loameux, sont souvent rocheux et massifs sur une grande profondeur. Comme pour les sols légers compacts, les racines et parfois l'eau peuvent être bloquées à la base de la zone de sol travaillée. Dans ces sols, un des buts importants du sous-solage est d'augmenter la profondeur d'enracinement.

#### Rapidité du drainage

Vu l'important rôle que l'humidité d'un sol joue sur sa vulnérabilité à la compaction, en particulier pour les sols lourds, il est primordial de s'assurer d'un égouttement rapide, ce qui implique de vérifier la qualité du drainage de surface et sous-terrain. Lorsque le drainage est lent, les opérations culturales sont souvent faites en conditions humides, ce qui non seulement entraîne des risques importants de compaction mais compromet le succès d'une opération de sous-solage. Lorsque le sol est mal drainé, le sous-sol reste souvent trop humide pour faire du sous-solage. Même s'il est sous-solé en bonnes conditions, il est en général compacté à nouveau dans les mois qui suivent, car les travaux de champ sont souvent faits en conditions humides. L'amélioration du drainage doit donc être faite avant tout sous-solage.

## Profondeur de la compaction

La gestion du sous-solage doit se faire en fonction de la profondeur de la couche compacte et de la profondeur possible de sous-solage.

#### Couche compacte peu profonde (base de la couche en général moins de 40 cm)

Lorsque la couche compacte est inférieure à 40 cm environ, il est possible de décompacter l'ensemble de la couche. Il est alors très important de décompacter toute l'épaisseur de cette couche imperméable sinon le problème relié à la compaction est aggravé. En effet, grâce à l'ameublissement créé par le sous-solage, l'eau entre en plus grande quantité dans le sol au lieu de ruisseler à la surface ou de s'écouler à la base du labour. Elle s'accumule dans la partie ameublie (effet « éponge »), car elle est bloquée par la base de la couche compacte non sous-solée qui est peu perméable. Le sol est alors gorgé d'eau pendant une plus longue période au printemps et après une pluie, ce qui peut retarder la rentrée au champ et asphyxier les cultures. De plus, lorsque l'eau stagne, elle augmente l'effet d'anaérobiose et empêche le sol de se restructurer.

#### Couche compacte profonde (base de la couche en général plus de 40 cm)

Dans cette situation, la profondeur de travail possible par la sous-soleuse ne permet pas de décompacter toute la zone compacte. Si le sous-sol n'est pas trop imperméable, il peut quand même être intéressant de faire un sous-solage afin d'augmenter la profondeur d'enracinement. Il faut toutefois être prudent car le sous-solage peut causer plusieurs problèmes :



- Compactage du sol en profondeur : comme le sol est souvent plus humide en profondeur, le risque de lissage et de compaction en profondeur lors du passage des dents de sous-soleuse dans le sol humide est élevé;
- Accumulation d'un volume d'eau important dans la zone sous-solée : comme dans le cas précédent, lorsque la profondeur du sous-solage est plus faible que la profondeur de la couche compacte et que le sous-sol est très peu perméable, l'ameublissement d'une couche importante de sol risque d'entraîner un effet « éponge », tel que décrit précédemment, et d'augmenter les risques de nappe perchée. En sol argileux, le drainage taupe (qui crée des canaux d'écoulement souterrain vers un fossé) peut alors être plus approprié que le sous-solage.

#### Topographie du champ

La direction du sous-solage doit être planifiée en fonction de la topographie du champ et aussi en fonction de la direction des drains souterrains lorsque ces derniers sont présents. Comme les galeries créées par le sous-solage permettent à l'eau d'y circuler, il faut choisir la direction du sous-solage afin d'évacuer l'eau. Il faut préférer un angle oblique avec la direction des drains (Figure 1). Il faut aussi éviter de diriger l'eau vers des baissières (si elles ne sont pas drainées).

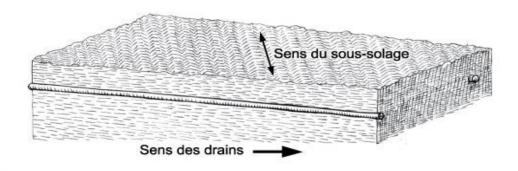


Figure 1. Direction de sous-solage transversale par rapport aux drains ©

#### 2. CHOIX ET TYPES DE SOUS-SOLEUSES

De façon générale, le choix de la sous-soleuse doit se faire selon l'objectif recherché et les caractéristiques du champ. Les critères suivants doivent être pris en compte :

- Le degré de bouleversement de la surface du sol tolérable après l'opération : dans certains cas, il peut être souhaitable de ne pas bouleverser la surface du sol (semis direct, pâturages, engrais verts ou culture implantés avant le sous-solage);



- Le degré d'ameublissement recherché dans l'ensemble du profil : selon l'objectif poursuivi, on veut soit ameublir l'ensemble du profil, soit seulement créer des passages pour l'infiltration de l'eau;
- La gravité de la compaction et la profondeur de la zone compacte.

Les trois principales composantes d'une sous-soleuse sont le bâti, les étançons et les socs. L'ensemble socétançon forme la dent (CPVQ, 2000). Certaines sous-soleuses peuvent aussi avoir des disques en avant des dents et un rouleau compacteur en arrière qui sert aussi à stabiliser la profondeur de travail. L'espacement entre les dents varie et doit être adapté aux besoins (voir section 3). Au Québec, il est souvent de 76 cm (30 po), ce qui correspond à l'espacement des grandes cultures sarclées (maïs et soya).

#### Les bâtis

Les bâtis de sous-soleuses peuvent être en V ou droits (Figure 2). La puissance requise est moindre avec un bâti en V ou un bâti droit comportant 2 rangées dont les dents sont alternées, que pour un bâti droit ayant une seule rangée de dents.





Bâti en V (Photo : D. La France)

Bâti droit avec une seule rangée de dents

Figure 2. Bâti en V et bâti droit de deux sous-soleuses

## Les étançons

Il y a trois principaux types d'étançons : droits, incurvés et paraboliques. Leur action et la puissance requise sont reliées à l'angle qu'ils font avec l'horizontale (angle d'attaque). De façon générale, plus l'étançon est large, plus il contribue localement à l'ameublissement du sol, en particulier lorsque la profondeur de travail est supérieure à la profondeur critique (voir section 3 pour l'explication de la profondeur critique).

#### Étançon droit

L'étançon droit (Figure 3a) ayant un angle d'attaque de 90° ne fait pas remonter la terre, permet de limiter le bouleversement du sol mais requiert plus de puissance que les autres types d'étançons. Toutefois, lorsqu'il



est un peu incliné (angle d'attaque inférieur à  $90^{\circ}$ ), la puissance requise diminue et est assez similaire à celle requise par les autres types d'étançons (Raper, 2005).

#### Étançon incurvé

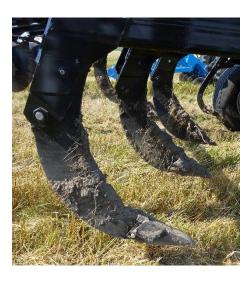
La partie inférieure de l'étançon incurvé a un angle d'attaque de moins de 90°, ce qui force la terre à remonter vers le haut et bouleverse souvent de façon importante les sols argileux. La partie supérieure de l'étançon peut être verticale ou pencher vers l'avant, créant ainsi un angle d'attaque de plus de 90° (Figure 3b et c). Tel qu'illustré à la Figure 4, lorsqu'elle penche vers l'avant et que la profondeur de travail est trop importante, la dent peut pousser le sol vers le bas et augmenter la puissance requise (Raper and Bergtold, 2006). Dans une telle situation, de bons résultats sont donc obtenus seulement pour une profondeur prédéterminée.

#### Étançon parabolique (dent Michel, Paraplow)

L'étançon parabolique est incliné latéralement, ce qui permet de ne pas remonter de terre, de ne pas bouleverser le sol et requiert un peu moins de puissance que les deux autres types (Figure 3d). La proportion de sol ameubli est aussi supérieure aux autres sous-soleuses (Raper, 2006, 2007). Ce type d'étançon est intéressant pour sous-soler en semis direct ou encore dans une prairie lorsque la surface du sol ne doit pas être bouleversée.



Étançon droit (a)



Étançon incurvé (b)



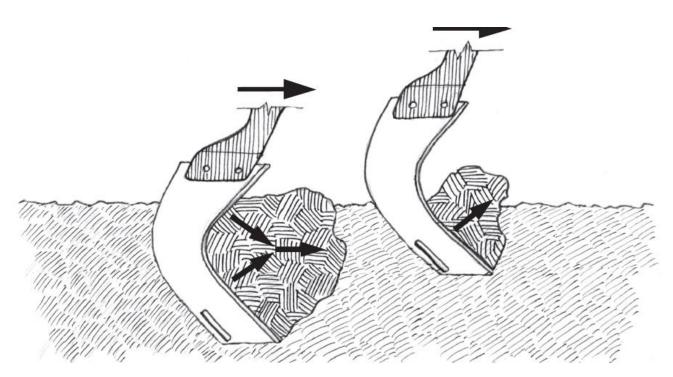




Étançon dont la partie supérieure penche vers l'avant (c)

Étançon parabolique (dent Michel), (d)

Figure 3. Étançons de différentes formes



Profondeur trop importante qui augmente la compaction et la puissance requise

Profondeur adéquate

Figure 4. Effet de la profondeur de travail sur les forces appliquées par la dent lorsque la partie supérieure d'une dent incurvée penche vers l'avant; (adapté de Raper, 2006 et Gill et Vanden Verg, 1966) ©



#### Les socs (ou pointes)

Les socs se distinguent par leur largeur, leur hauteur de soulèvement des ailettes (*wing lift height*), leur angle d'attaque et leur longueur. Le degré d'ameublissement du sol est fortement dépendant de leur géométrie.

#### Largeur des socs

Les socs sont soit étroits, soit larges grâce à la présence d'ailettes (Figure 5). La largeur d'un soc étroit peut varier de 2,5 à 12,5 cm (1 à 5 po.). En ce qui concerne les socs avec ailettes, ces dernières sont fixées directement sur le soc ou, plus rarement, sur l'étançon (Figure 5b). La largeur totale du soc avec ailette varie de 15 à 30 cm (6 à 12 po).

Lors du sous-solage, les ailettes permettent de :

- ameublir une proportion beaucoup plus importante de sol;
- diminuer la puissance requise par unité de volume ameublie;
- augmenter la profondeur critique (voir section 3 pour l'explication de la profondeur critique).

Bien qu'une dent avec ailettes augmente la puissance requise de 10 à 20 %, l'augmentation du volume de sol ameubli permet d'augmenter l'espacement entre les dents de 30 % et donc de diminuer le nombre de dents requis pour une largeur donnée d'ameublissement (Spoor and Godwin, 1978).





Soc étroit (a)

Soc avec ailettes (b)

Figure 5. Socs étroit ou large (avec ailettes)

Le degré de soulèvement du sol est influencé par la hauteur de soulèvement des ailettes (*wing lift height*), (Figure 6). Il s'agit de la distance verticale entre le bas de l'ailette (avant de l'ailette) et le haut (arrière de l'ailette). Cette distance varie de 2,5 cm à 10 cm. Plus cette mesure est importante, plus le sol est bouleversé car il est forcé de glisser et de monter par-dessus les ailettes.



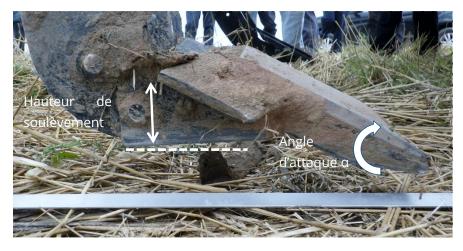


Figure 6. Hauteur de soulèvement des ailettes

#### Angle d'attaque et longueur du soc

L'angle d'attaque (Figure 6) pour une bonne pénétration du soc dans le sol et un ameublissement optimum devrait idéalement être autour de 20 à 25°. Plus il est faible par rapport à l'horizontale, plus il pénètre facilement dans le sol. Par conséquent, pour une même hauteur de soulèvement, plus le soc est long, plus il pénètre facilement dans le sol. La puissance requise augmente avec l'angle d'attaque.

Lorsque l'angle d'attaque est trop important (ce qui n'est en général pas le cas pour les sous-soleuses commercialisées), le sol est poussé en avant au lieu d'être soulevé vers l'avant et le sol est comprimé au lieu d'être décompacté (Figure 7).









(c

Figure 7. Sous-soleuse dont le soc et les ailettes (en particulier celles qui ont été rajoutées au-dessus du soc) ont un angle d'attaque trop vertical (a et b). Au lieu d'être soulevé, le sol est poussé vers l'avant et compacté (c).

#### 3. EFFET DU SOUS-SOLAGE

Selon l'état du sol (densité, humidité), les dents de sous-soleuse peuvent soit ameublir le sol soit le compacter. L'ameublissement se fait par fissuration du sol alors que la compaction se fait par compression du sol près de la dent.

#### AMEUBLISSEMENT DU SOL

L'ameublissement du sol peut être obtenu grâce à la fissuration par compression ou par tension.

Dans le premier cas, le soc exerce une force de compression sur le sol qui le force à se fracturer et se soulever (Figure 8). Les mottes qui en résultent (en sol argileux) se déplacent vers le haut et sont réarrangées les unes par rapport aux autres lorsqu'elles retombent. Le sol se dilate et s'ameublit.

Dans le deuxième cas, la fissuration se fait sans qu'il y ait de force de compression (Figure 9). Le sol est simplement soulevé, ce qui crée des fissures. Si des ailettes sont présentes, le sol se fissure lorsqu'il est forcé de passer par-dessus ces dernières. Il est fréquent de voir tout le sol se soulever entre les dents lors du sous-solage, ce qui entraîne une fissuration de l'ensemble du sol.

Pour que le sol puisse s'ameublir, il faut qu'il soit suffisamment sec pour être soulevé vers le haut par la force exercée par le soc. De façon générale, l'ameublissement par compression, qui entraîne un réarrangement des mottes les unes par rapport aux autres, est plus important que l'ameublissement par tension.



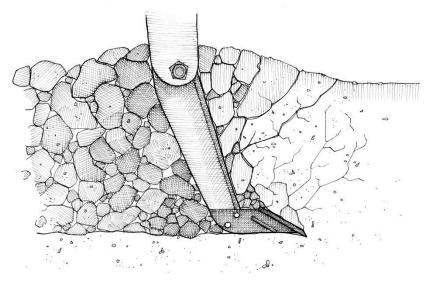
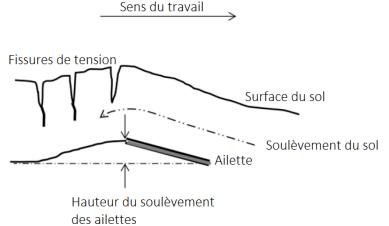


Figure 8. Fissuration par compression du sol exercée principalement par le soc ©





Formation de fissures par tension lors du sous-solage (Godwin and Spoor (2015) d'après Spoor (2006)) (a) Reproduit avec l'aimable permission des auteurs et de CABI

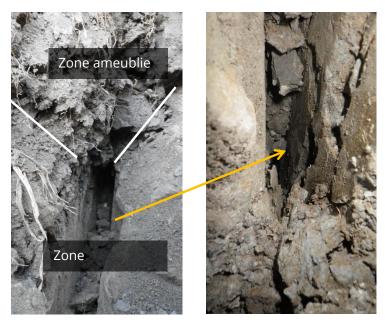
Soulèvement du sol occasionnant des fissures par tension (b)

Figure 9. Soulèvement du sol occasionnant des fissures par tension

#### COMPRESSION DU SOL AUTOUR DU SOC ET DE LA PARTIE INFÉRIEURE DE LA DENT

Lorsque la profondeur de sous-solage augmente, la résistance du sol à se soulever augmente aussi et, à une certaine profondeur (profondeur critique), il devient plus facile pour le sol de se déplacer latéralement plutôt que vers le haut. À ce moment, le sol se comprime le long du soc et de la partie inférieure de l'étançon, entraînant ainsi une compaction ou un lissage en profondeur (Figure 10). Plus la profondeur de sous-solage est importante et plus le sol est argileux, plus le risque de compression du sol près de la dent est grand.





Le sol a été fissuré entre 0 et Gros plan de la zone 35 cm (14 po) et comprimé comprimée (b) en dessous (a)

Figure 10. Passage d'une dent de sous-soleuse à une profondeur de 43 cm (17 po) dans un sol très compact et moyennement humide en profondeur.

## PROFONDEUR CRITIQUE

La compression du sol autour du soc qui se fait dans certaines situations nous amène à définir la notion de profondeur critique. Il s'agit de la profondeur de travail maximum à laquelle le sol se fissure et se soulève du soc vers le haut. En dessous de cette profondeur, il se comprime latéralement (Figure 10, Figure 11, Figure 12).



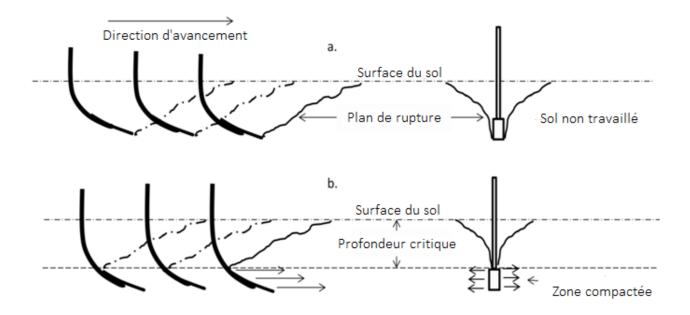


Figure 11. Vues de côté et de face de l'effet du passage d'une dent à soc étroit sur le sol lorsque celleci est au-dessus (a) ou en dessous (b) de la profondeur critique. (Godwin and Spoor (2015) d'après Godwin and Spoor (1977) et Spoor (2006))- Reproduit avec l'aimable permission des auteurs et de CABI



Figure 12. Passage de deux dents de sous-soleuse à une profondeur de 43 cm (17 po) dans un sol très compact et moyennement humide en profondeur. Le sol a été fissuré entre 0 et 35 cm (14 po) et comprimé en dessous.

Lorsque le soc de la sous-soleuse travaille à une profondeur plus grande que la profondeur critique, l'effet de fissuration est réalisé par l'étançon, à une profondeur moindre que celle du soc; une section beaucoup plus faible du profil de sol est alors fragmentée et la puissance requise du tracteur est plus importante.



La profondeur critique dépend, d'une part, du type d'outil et de la façon dont il est opéré et, d'autre part, des conditions du sol, en particulier le taux d'humidité et la densité qui influencent la résistance du sol à se soulever.

L'humidité du sol a un effet sur la profondeur critique qui semble contradictoire. Plus l'humidité du sol est élevée, plus le sol est plastique et plus il se déforme et se comprime facilement autour du soc, ce qui réduit la profondeur critique. Plus le sol est sec, plus il devient dur et plus la résistance au soulèvement est élevée. Si le sol en profondeur est aussi sec et dur, il est difficile à comprimer et aura tendance à se fracturer, ce qui contribue à augmenter la profondeur critique même si la résistance au soulèvement est importante. Par contre, si le sol est humide en profondeur (donc plus facile à comprimer) et sec au-dessus, la pointe de sous-soleuse va comprimer le sol humide et la profondeur critique est alors plus faible. Il faut donc une humidité optimale, qui est atteinte lorsque le sol est friable, ce qui n'est pas toujours facile à obtenir!

La densité du sol influence aussi sa capacité à se comprimer et par conséquent, la profondeur critique. Un sol argileux très compact, dense et dur contient en général peu d'eau et aura tendance à se fracturer plutôt qu'à se comprimer. Dans un tel cas, la profondeur critique aura tendance à être plus importante.

Lorsque la profondeur critique est moins importante que la profondeur de travail voulue, les changements suivants peuvent être réalisés afin de l'augmenter (Spoor, 2006):

- sur la sous-soleuse
  - Augmenter la largeur des pointes;
  - Ajouter des ailettes, ce qui augmente la largeur efficace de la pointe; il s'agit de la principale méthode pour augmenter la profondeur critique;
  - o Diminuer l'angle d'attaque des socs;
  - o Augmenter la hauteur de soulèvement des ailettes;
  - Ajouter des dents travaillant à plus faible profondeur en avant des dents de sous-soleuse afin de diminuer la résistance au soulèvement (voir partie 4);
- lors du sous-solage
  - Faire un premier passage de sous-soleuse (ou autre travail de sol) à plus faible profondeur afin de diminuer la résistance au soulèvement (voir partie 4);
  - Diminuer suffisamment l'espacement entre les dents afin de réduire la résistance du sol au soulèvement.





Figure 13. Sous-soleuse avec 6 dents Michel espacées de 50 cm (20 po) travaillant à 40 cm (16 po) de profondeur en sol argileux. Le faible espacement entre les dents réduit la masse de sol à soulever pour chaque dent et par conséquent, la résistance que le sol exerce sur la dent.

Bien que la profondeur critique ne puisse pas être prévue de façon précise, la « règle du pouce » suivante donne une indication : pour une dent unique qui travaille en conditions friables (ni trop sec ni trop humide), la profondeur critique est d'environ 6 fois la largeur du soc. Par conséquent, pour une largeur de soc de 7,5 cm, la profondeur critique sera de 45 cm (18 po). Il est toutefois nécessaire de faire des profils de sols lors du sous-solage pour vérifier si le travail se fait correctement et à la bonne profondeur.

Lorsqu'une sous-soleuse travaille en dessous de sa profondeur critique, les effets négatifs sont les suivants :

- la puissance requise est beaucoup plus importante que lorsqu'elle travaille au-dessus;
- le volume de sol ameubli est moindre et l'objectif d'ameublissement n'est pas atteint;
- le sol est compacté (lissé) en profondeur.

De plus, des passages répétés de sous-soleuse à une profondeur inférieure à la profondeur critique entraînent la création d'une couche compacte qui ne pourra pas être défaite mécaniquement par la suite.

## GÉOMÉTRIE DE LA ZONE AMEUBLIE LORSQUE LA PROFONDEUR CRITIQUE N'EST PAS ATTEINTE

Le sol se déforme toujours selon les plans de moindre résistance. Par conséquent, la géométrie de la zone ameublie dépend de la géométrie des plans de moindre résistance qui elle-même dépend de la texture du sol et de l'importance de la compaction.

#### Situation 1 : Sols légers ou argileux peu compacts

Dans ces sols, les plans de moindre résistance se situent entre les petites unités structurales (grains de sables, de limon ou petits agrégats). Ces dernières glissent facilement les unes par rapport aux autres et la forme de la zone ameublie est en V ou en U évasé (Figure 14).





Soc étroit : zone ameublie en forme de V (a)

Soc avec ailettes : zone ameublie en forme de U évasé (b)

(Godwin and Spoor (2015) d'après Spoor (2006) –
reproduit avec l'aimable autorisation des auteurs et de
CABI)

Figure 14. Géométrie de la zone ameublie en fonction de la largeur du soc

#### Situation 2 : Sol argileux compact avec plans de faible résistance définis

Lorsque le sol est argileux et compact, les unités structurales sont des grosses mottes très dures, souvent plus ou moins soudées les unes aux autres, ce qui peut donner l'impression d'une masse continue et uniforme lorsque le sol n'est pas travaillé. Dans ce cas, le sol se brise le long de plans de faible résistance entre les grosses mottes ou le long de fissures et la géométrie de la zone ameublie n'a pas une forme de V (

Figure 15). Le sol est alors fracturé en grosses mottes.



Figure 15. Sol cassé en gros blocs de 30 à 60 cm (12 à 24 po) par un passage de sous-soleuse à dents incurvées juste en dessous de la couche compacte.



#### Situation 3 : Sol argileux compact sans plan de moindre résistance bien défini

Lorsque le sol est tellement massif qu'il n'y a aucune fissure clairement définie, le sol est alors forcé de se briser entre les petites particules (sable, limon, agrégats) ou en grosses mottes massives et irrégulières. La géométrie de la zone ameublie peut alors être soit similaire à celle de la situation 1 (Figure 16), soit à celle de la situation 2.



Figure 16. Sol argileux très massif qui ne s'est pas suffisamment fracturé lors du sous-solage; seule une petite zone en forme de V a été ameublie

#### Observations lors des essais du CETAB+

Lors des essais de sous-soleuses du CETAB+, ces trois situations ont été observées lorsque la profondeur critique n'était pas atteinte (Tableau 1). Il a aussi été constaté que la profondeur de travail de la sous-soleuse avait parfois un effet important sur la géométrie de la zone ameublie.

Tableau 1. Géométrie de la zone ameublie en fonction du type de sol, du degré de compaction et de la profondeur de sous-solage

Type de sol	Degré de compaction	Unités structurales	Profondeur de travail de la sous-soleuse par rapport au bas de la zone compacte	Situation observée
Léger (incluant les tills)	Faible à élevé	Grains de sable ou limon ou petits agrégats	Inférieure ou supérieure	Situation 1 (V ou U évasé)
Lourd	Faible	Petits agrégats	Inférieure ou supérieure	Situation 1 (V ou U évasé)
Lourd <sup>1</sup>	Très élevé	Grosses mottes soudées ou	Légèrement supérieure	Situation 2 (Grosses mottes)



complètement massif	Situation 3 – ameublissement insuffisant en V
	étroit

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>En sol suffisamment sec avec la profondeur critique supérieure à la profondeur de travail

### VOLUME DE SOL AMEUBLI

Les principaux facteurs qui influencent le volume de sol ameubli sont l'espacement entre les dents, la largeur des socs, la profondeur de travail et la présence ou non de dents travaillant à plus faible profondeur en avant des dents de sous-soleuse.

#### Largeur des socs et espacement entre les dents

Au Québec, il est fréquent d'observer qu'une proportion de sol assez faible est ameublie par le sous-solage (Figure 17). Un tel résultat est dû à un espacement entre les dents important, souvent de 76 cm (30 po) combiné à une profondeur de travail trop faible.

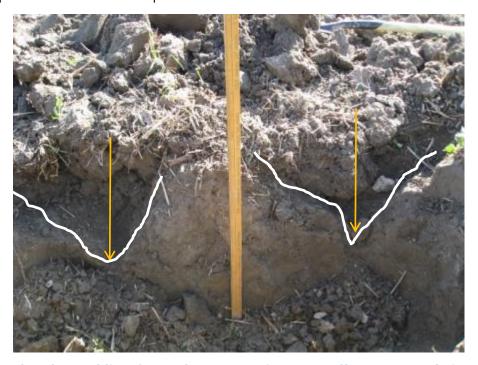


Figure 17. Zone de sol ameubli en forme de V (pas toujours complètement symétrique). Les flèches orange indiquent le passage des dents. Dans ce cas, les V ne se croisent pas et une faible fraction du sol est ameublie.

Le rapprochement des dents permet d'augmenter le volume de sol ameubli et améliore l'uniformité de l'ameublissement (Figure 18).



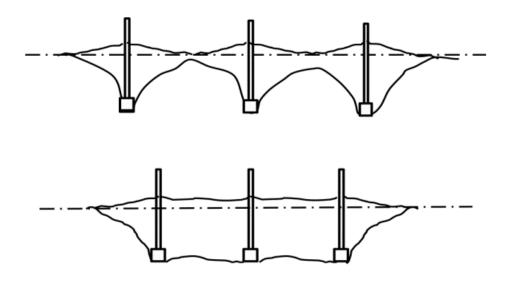


Figure 18. Influence de l'espacement entre les dents sur l'uniformité de l'ameublissement du sol : espacement trop important (haut) et optimum (bas), (Godwin and Spoor (2015) d'après Spoor et Godwin (1992)) - Reproduit avec l'aimable permission des auteurs et de CABI

L'addition d'ailettes, qui permettent d'élargir le soc, augmente aussi le volume de sol ameubli (Figure 14).

#### Profondeur de travail

Pour un espacement donné, tant que la profondeur de travail est située au-dessus de la profondeur critique, plus la profondeur augmente plus le volume de sol ameubli est important (Figure 19).

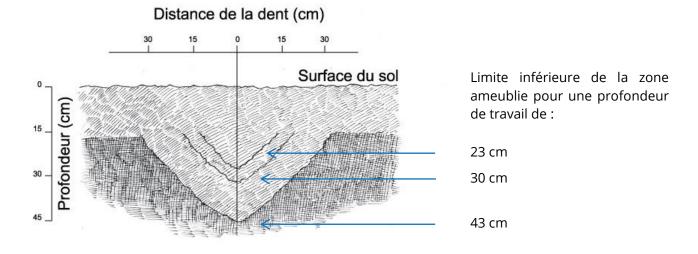


Figure 19. Influence de la profondeur de travail sur la proportion de sol ameubli par une dent droite sans ailette pour 3 profondeurs de travail (23, 30 et 43 cm); (données du CETAB+ – non publié) ©



Lorsque le sol est très argileux et très compact, la profondeur de travail doit être bien ajustée en fonction de la profondeur de la zone compacte. Si les dents de sous-soleuse passent à plus de 5 cm (2 po) sous la couche compacte, les socs risquent de comprimer le sol meuble dans lequel elles passent et l'effet d'éclatement ne se fait pas. Dans cette situation, les étançons font simplement une fente en passant dans la couche compacte (Figure 20).



Figure 20. Sol compact fissuré par le passage d'une dent dont le soc travaille à une trop grande profondeur

#### Ajout d'une rangée de dents plus petites et superficielles en avant des dents standards

Le volume de sol ameubli peut aussi être augmenté par l'ajout d'une rangée de dents travaillant à plus faible profondeur en avant des dents standards (Figure 21, Figure 22, Figure 23). Ces dents doivent travailler à 60 % de la profondeur des dents principales (Spoor and Godwin, 1978). Elles devraient être positionnées à mi-chemin entre les dents de sous-soleuse et suffisamment en avant de celles-ci. Elles ne devraient pas se situer dans la zone qui serait ameublie par les dents arrière si ces dernières travaillaient seules car elles seraient inefficaces. L'ajout de ces dents n'augmente pratiquement pas la puissance requise.





Figure 21. Exemple de sous-soleuse avec dents superficielles en avant des dents profondes (photo : Dick Godwin) – Attention, certains outils combinés ne sont pas adaptés au sous-solage à cause de leur trop grand nombre de dents, ce qui requiert trop de puissance.

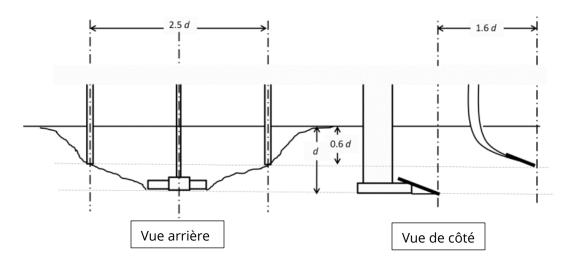


Figure 22. Position optimale des dents superficielles et forme de la zone ameublie (gauche). Latéralement, les dents superficielles se situent entre les dents profondes (Godwin and Spoor (2015) d'après Spoor et Godwin (1978)). Reproduit avec l'aimable permission des auteurs et de CABI



Figure 23. Géométrie de la zone ameublie avec la présence d'ailettes (haut) et présence d'ailettes et de dents superficielles en avant des dents de sous-soleuse (bas) (reproduit de Godwin and Spoor (2015) d'après Spoor et Godwin (1978)) - Reproduit avec l'aimable permission des auteurs et de CABI

#### Règle générale pour un ameublissement complet du profil en fonction du type de sous-soleuse

L'espacement entre dents requis pour un ameublissement complet du profil est donné dans le Tableau 2 (Godwin and Spoor, 2015). La forme de la dent n'a pas beaucoup d'importance. À titre d'exemple, les profondeurs requises pour une sous-soleuse standard avec soc étroit d'environ 7,5 cm (3 po) sont données dans le

Tableau 3.

Tableau 2. Espacements entre dents recommandés selon la profondeur de travail (Godwin and Spoor, 2015)

Configuration des dents	Espacement entre dents requis pour un ameublissement complet du profil
Soc étroit (7,5 cm, 3 po)	1,0 – 1,5 fois la profondeur de travail
Soc avec ailette (30 cm, 12 po)	1,5 – 2,0 fois la profondeur de travail
Soc avec ailette et rangée de dents superficielles en avant	2,0 – 2,5 fois la profondeur de travail



Tableau 3. Espacements entre dents recommandés selon la profondeur de travail pour une soussoleuse standard avec soc étroit d'environ 7,5 cm (3 po)

Profondeur de travail (P)	Espacement entre dents recommandé	
Profondeur de travail (P)	(1,0 à 1,5 fois la profondeur de travail)	
30 cm (12 po)	30-45 cm (12-18 po)	
40 cm (16 po)	40-60 cm (16-24 po)	
50 cm (18 po)	60-75 cm (24-30 po)	

## 4. LES RÈGLES DU SUCCÈS

Lors du sous-solage, en plus des facteurs liés à la géométrie des dents et à leur espacement, l'ameublissement du sol est aussi influencé par la vitesse d'avancement et par la capacité des dents à travailler à la bonne profondeur. Ces facteurs dépendent de la puissance du tracteur et de la force du mécanisme de sécurité pour les dents. Plusieurs stratégies peuvent être utilisées pour optimiser le sous-solage en fonction de la puissance du tracteur, de la sous-soleuse disponible et du résultat souhaité.

#### VITESSE ET PUISSANCE

En général, la vitesse d'avancement lors du sous-solage doit être de 5 à 6 km/h afin d'avoir un effet de fissuration suffisant.

La puissance requise pour travailler un sol compact avec une sous-soleuse peut être 10 fois plus grande que celle requise pour travailler le même sol non compact (Godwin and Spoor, 1977). La profondeur de travail est probablement le facteur le plus important pour la puissance requise (Tableau 4). Bien que les chiffres de ce tableau puissent varier d'un sol à l'autre, en sol compact, il est normal d'utiliser une puissance par dent d'au moins 80 hp.

Tableau 4. Puissance requise par dent en fonction de la profondeur (Spoor, 2006)

Profondeur de travail cm (po)	Puissance requise (hp/dent)
30 cm (12 po)	50
40 cm (16 po)	75
50 cm (18 po)	125



Deux facteurs, qui en apparence augmentent la puissance requise, la diminuent en fait grâce à la possibilité d'augmenter l'espacement entre les dents et par conséquent de diminuer le nombre de dents :

- Ajout d'ailettes (augmentation possible de l'espacement entre dents de 30 %);
- Ajout des dents superficielles en avant des dents de sous-soleuse profondes munies d'ailettes (augmentation possible de l'espacement entre dents de 25 % par rapport aux socs avec ailettes).

Le type d'étançon ainsi que l'angle qu'il fait avec la verticale influencent beaucoup moins la puissance requise que le type de soc (Spoor and Godwin, 1978).

#### MÉCANISME DE SÉCURITÉ POUR LES DENTS DE SOUS-SOLEUSE

Sur la plupart des sous-soleuses commerciales, un système de sécurité pour chaque dent permet d'assurer que les dents ne cassent pas lorsqu'un obstacle tel qu'une roche est rencontré. Il peut s'agir de boulons de sécurité qui cassent si la force exercée est trop élevée, de ressorts ou d'un mécanisme hydraulique. Avec les deux derniers systèmes, la dent se soulève lorsqu'elle rencontre un obstacle et redescend ensuite dans le sol. Ces systèmes permettent d'exercer une force sur la dent qui tend à la maintenir dans le sol. En sol compact, il peut être nécessaire d'avoir une pression de 1 000 kg (2 200 lbs) pour maintenir les dents dans le sol. Si la pression est insuffisante, les dents n'arrivent pas à rentrer suffisamment profondément dans le sol (Figure 24).



Figure 24. Dents qui ne pénètrent pas suffisamment un sol sableux très compact. À titre de référence, on peut voir la dent la plus à droite qui travaille à la bonne profondeur. La deuxième dent à partir de la droite est presque complètement sortie.



## PROBLÈMES OBSERVÉS LORS D'UNE DÉMONSTRATION DE SOUS-SOLAGE EN SOL TRÈS COMPACT

Des essais de différentes sous-soleuses ont été réalisés en collaboration avec différentes compagnies de machinerie lors d'une démonstration organisée par le CETAB+ sur une ferme avec un sol argileux très compact. Les problèmes rencontrés lors du sous-solage ont été nombreux et révèlent la difficulté de bien réussir un sous-solage (Tableau 5.)



Tableau 5. Problèmes rencontrés lors du sous-solage d'un sol argileux très compact de 5 à 40 cm (2 à 18 po)<sup>1</sup>

Sous-soleuse	Tracteur utilisé	Problème rencontré
Bâti en V 5 dents incurvées Largeur du soc : 30 cm (12 po)	Inter 7240 200 hp 40 hp/dent	Les dents de la sous-soleuse n'ont pas pu pénétrer le sol car les ressorts doubles, ajustés au maximum de leur pression, n'étaient pas assez forts.
Bâti droit une dent droite, une dent incurvée Largeur du soc : 15 cm (6 po)	NH 110 110 hp 55 hp/dent	Le tracteur n'était pas assez fort, ce qui a limité la vitesse. La répartition du poids sur le tracteur était inadéquate. La pelle avant a été chargée de terre pour augmenter la traction. Les dents de la sous-soleuse ont bien pénétré le sol à une profondeur de 43 cm (17 po).
Bâti en V 5 dents droites Largeur du soc : 15 cm (6 po)	New Holland T8330 - 330HP 65 hp/dent	Les dents n'ont pas pu pénétrer le sol, la pression de 730 kg (1 600 lb) sur les ressorts était très insuffisante et les dents s'inclinaient, ce qui diminuait leur capacité de pénétration. Les ailettes ont été enlevées pour faciliter la pénétration des dents mais l'absence d'ailettes a empiré la situation; sans ailettes, les dents rentraient à une profondeur de 10 cm (4 po) et avec ailettes à une profondeur de 18-20 cm (7-8 po).
Une dent droite – ancienne draineuse taupe reconvertie en sous-soleuse Largeur du soc : 15 cm (6 po)	John Deere 7340 135-150 hp/dent	Le tracteur était assez fort et bien balancé. La dent a bien pénétré dans le sol à une profondeur de 56 cm (22 po). Le lissage a été important en dessous de 38 cm (15 po) (ce qui indique que la profondeur critique était de 38 cm (15 po)). Cette sous-soleuse permettait de travailler en profondeur mais l'état du sol ne le permettait pas; il aurait fallu travailler à moins de 38 cm (15 po). De plus, des ailettes supplémentaires avaient été rajoutées au-dessus du soc (Figure 7). Elles étaient beaucoup trop verticales, ce qui a entraîné un effet de compaction directement vers l'avant plutôt que de soulever le sol.
Bâti droit 4 dents Michel tournées vers l'intérieur	New Holland T7070 200 hp 50 hp/dent	Le tracteur n'était pas assez fort, ce qui a limité la vitesse et la profondeur de travail. De plus, le tracteur était mal équilibré et le glissement était élevé. La profondeur de travail a été seulement de 36 cm (14 po).
Bâti droit 3 dents droites Largeur du soc : 3,75 cm (1,5 po)	John Deere 7340 135-150 hp 50 hp/dent	Le tracteur n'était pas assez fort, ce qui a limité la vitesse, mais était bien équilibré et le glissement était moyen. Les dents ont bien rentré dans le sol. La profondeur de travail était de 43 cm (17 po). Le lissage a été important en dessous de 38 cm (15 po) (ce qui indique que la profondeur critique était de 38 cm (15 po))

Les marques et modèles de sous-soleuses ne sont pas identifiés car les problèmes rencontrés étaient principalement dus à des problèmes d'ajustement reliés à la compaction importante de ce sol, ainsi qu'à un manque de puissance des tracteurs fournis par les compagnies et non aux sous-soleuses en tant que telles.



Le problème le plus fréquent a donc été un manque de puissance du tracteur qui limitait la vitesse d'avancement et forçait à diminuer la profondeur de travail. Lorsque la puissance était suffisante pour travailler à la bonne profondeur, la profondeur critique était rapidement atteinte à cause de la géométrie des dents (ailettes trop verticales ou dents trop étroites) et de l'humidité du sol. Dans plusieurs cas, le tracteur était mal équilibré, ce qui entraînait un glissement excessif des roues (voir Lamarre, 2012 et Garon, 2014 pour ajuster l'équilibre du tracteur).

De telles difficultés ont aussi été rencontrées lors de différents essais réalisés par le CETAB+ sur les fermes. La profondeur de travail a souvent été limitée à 35 cm (14 po). Dans certaines situations, un double passage a permis de régler le problème (voir section suivante). Il ressort de ces essais que la puissance requise pour travailler en sol compact est souvent sous-estimée.

#### STRATÉGIES DE SOUS-SOLAGE POUR OBTENIR UN AMEUBLISSEMENT UNIFORME DU SOUS-SOL

Différentes stratégies peuvent être adaptées en fonction du type de sol et de l'équipement disponible afin d'obtenir un ameublissement uniforme (Tableau 6). Trois situations doivent être distinguées :

- situation 1 : la profondeur requise peut être atteinte en un passage car la profondeur critique n'est pas atteinte et la puissance du tracteur est suffisante; de plus, la sous-soleuse peut être ajustée ou modifiée;
- situation 2 : comme précédemment mais la sous-soleuse ne peut pas être ajustée ou modifiée;
- situation 3: la profondeur requise ne peut pas être atteinte en un passage car la profondeur critique est trop faible ou le tracteur n'est pas assez puissant.



Tableau 6. Stratégies permettant d'améliorer l'uniformité de l'ameublissement du sol

Stratégies	Conditions requises	
<b>Situation 1</b> . Il est possible de travailler à la profondeur requise (profondeur critique pas atteinte et puissance de racteur suffisante). La sous-soleuse peut être ajustée.		
1a. Diminuer l'espacement entre les	Se référer au Tableau 2;	
dents	Si les dents sont montées sur une seule rangée, le sol risque de bloquer entre les dents; le sol en arrière des roues doit être ameubli, le nombre de dents doit donc être suffisant et il doit y avoir une dent en arrière de chaque roue.	
1b. Ajouter des ailettes	Se référer au Tableau 2;	
	La largeur des ailettes devrait être assez importante pour faire une différence (dans les essais faits en Angleterre, une largeur totale de la dent de 30 cm (12 po) est utilisée)	
1c. Utiliser une sous-soleuse munie d'une rangée de dents moins profondes en avant	Se référer à la section 3.	
<b>Situation 2.</b> Il est possible de travailler tracteur suffisante). La sous-soleuse ne pe	à la profondeur requise (profondeur critique pas atteinte et puissance de eut pas être ajustée.	
2a. Faire deux passages consécutifs avec un angle entre les deux passages	Possible uniquement sur sol argileux sec sinon il y a risque de recompaction de la zone ameublie; Le sol risque d'être très irrégulier lors du 2 <sup>ième</sup> passage.	
2b. Faire deux passages parallèles décalés	L'espacement entre les dents devrait être le double de l'espacement désiré. De plus, il faut s'assurer que deux des dents passent directement en arrière des roues de tracteur. L'espacement entre les dents doit permettre aux roues de tracteur de passer sur du sol non travaillé lors du 2 <sup>ième</sup> passage. Au Québec, l'espacement entre les dents est généralement de 76 cm (30 po). Si la sous-soleuse ne peut pas être ajustée, un double passage résulterait en un ameublissement aux 37 cm (15 po), ce qui est très faible. Faire le 2ième passage 3 cm plus profond pour stabiliser la sous-soleuse.	
2c. Planifier l'ameublissement du sol sur une plus longue période : faire plus d'un passage sur une période de plusieurs années	Une telle stratégie permet de limiter le risque d'avoir un sol trop meuble au printemps ainsi qu'un effet « éponge ».	
<b>Situation 3.</b> La profondeur requise ne peut pas être atteinte en un passage : la profondeur critique est trop faible ou le tracteur n'est pas assez puissant.		
3a. Faire 2 passages comme dans 2a ou 2b avec le premier passage à une profondeur plus faible que la profondeur désirée	La profondeur du premier passage est ajustée en fonction de la profondeur critique ou de la puissance du tracteur. Le 2 <sup>ième</sup> passage est fait à la profondeur désirée. Le sol risque d'être très irrégulier lors du 2 <sup>ième</sup> passage.	
3b. Utiliser une sous-soleuse munie d'une rangée de dents moins profondes en avant	Se référer à la section 3.	



Avec certaines sous-soleuses, la décompaction en profondeur des argiles peut entraîner la formation de gros blocs qui laissent le sol très inégal. Pour éviter ce problème, il est possible de décompacter progressivement en commençant par faire un premier passage qui vise à décompacter le sol sur une profondeur plus faible. Un autre moyen d'éviter de faire des gros blocs est de travailler avec une rangée de dents plus petites en avant des dents profondes de sous-soleuse, tel qu'expliqué dans la section 3.



Surface du sol après un seul passage à 33 cm (13 po)



Surface du sol du même champ après un passage à 33 cm (13 po) et un à 42 cm (17 po) (b). Toute la couche compacte a été fracturée

Figure 25. Surface du sol après un ou deux passages de sous-soleuse

#### Sous-solage sans bouleversement de la surface du sol

Il est intéressant de sous-soler dans un engrais vert déjà établi ou encore dans une prairie ou un pâturage afin de favoriser l'envahissement du sol ameubli par les racines (Figure 26). Il peut être aussi nécessaire de sous-soler dans une culture récemment établie ou dans un système de semis direct. Dans certains cas, comme par exemple pour les engrais verts, un léger bouleversement de la surface du sol est possible alors que dans d'autres cas, comme pour les prairies et pâturages, la surface du sol doit rester en bon état.



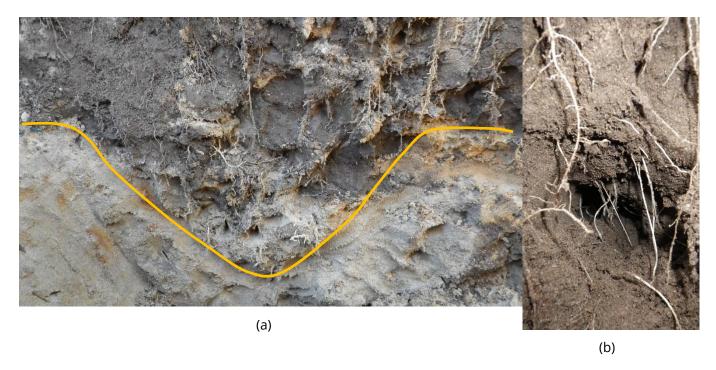


Figure 26. Zone ameublie par une dent de sous-soleuse passée à une profondeur de 42 cm (17 po) et envahie par les racines d'un engrais vert (a) et nouvelles racines nombreuses dans la galerie créée par la dent de sous-soleuse (b)

Afin de minimiser le bouleversement en surface, il est indiqué de :

installer des disques droits tranchants qui coupent la culture en avant des dents de la sous-soleuse (Figure 27). Ces disques sont indispensables si la culture en place ne doit pas du tout être abîmée. Il faut s'assurer que les disques travaillent à une profondeur suffisante, particulièrement en présence de chiendent. En effet, si les rhizomes de ce dernier ne sont pas bien coupés par les disques, ils s'accumulent sur les dents et contribuent à abîmer la culture (Figure 27);

utiliser des dents droites ou des dents Michel en sol argileux (Figure 28); en sol sableux, les dents incurvées peuvent aussi convenir (

#### Figure 29);

- utiliser des pointes à faible hauteur de soulèvement;
- éviter un bâti droit en sol argileux combiné avec des dents rapprochées car le sol peut coincer entre les dents et se soulever (Figure 30);
- s'assurer d'avoir une puissance adéquate, un tracteur suffisamment pesant ainsi qu'un bon balancement du poids car un glissement excessif des roues abîme la culture et la régularité de la surface du sol (Figure 31);
- utiliser un rouleau tasseur qui permet d'écraser les mottes qui ressortent lors du sous-solage de pâturage ou de prairie (Figure 32);



- planifier de travailler lorsque le sol de surface est suffisamment sec.et de préférence avant une pluie.

Disque posé en avant de la dent de sous-soleuse et qui permet de ne pas détruire le foin lors du passage



Disques qui travaillent à une profondeur suffisante



Disques qui travaillent à une profondeur insuffisante





Figure 27. Disques droits tranchants qui coupent la culture en avant des dents de la sous-soleuse



Dents droites (a)



Dents incurvées (b)





Figure 28. Effet de l'utilisation de dents droites sur engrais vert de seigle d'automne semé au printemps (a) et de dents incurvées sur engrais vert de trèfle après la récolte de blé en sol argileux (b)



Figure 29. Utilisation de dents incurvées en sol sableux avec des disques en avant des dents (dans un raygrass annuel en rotation avec des pommes de terre). Attention : si le sol contient suffisamment d'argile pour faire des mottes, la culture sera abîmée.





Figure 30. Bâti droit avec une seule rangée de dents espacées de 60 cm (24 po) en sol argileux: le sol se coince entre les dents et se soulève;





Figure 31. Glissement excessif des roues qui abîme la culture d'engrais vert. Il est important d'ajuster le poids du tracteur ainsi que son balancement. Le sol doit être suffisamment sec.

Sous-soleuse pour prairie avec disques et rouleau-tasseur permettant d'écraser les mottes

Rouleau-tasseur qui a permis d'aplatir le sol qui avait été soulevé par le glissement excessif des roues.





Figure 32. Sous-soleuse adaptée aux prairies avec rouleau-tasseur



#### CONCLUSION

Le sous-solage peut aider à corriger un problème de compaction mais il peut aussi être inutile et même nuisible si cette opération n'est pas bien planifiée ou si elle est réalisée dans de mauvaises conditions. Même lorsque réalisée en bonnes conditions, le volume de sol ameubli par le sous-solage peut être insuffisant et, dans certains cas, le sol peut être compacté ou lissé en profondeur au lieu d'être ameubli.

La réussite du sous-solage ne dépend pas seulement des conditions du sol. Plusieurs autres facteurs tels que la puissance du tracteur et la répartition du poids, la force du mécanisme de sécurité de la sous-soleuse et l'ajustement de la sous-soleuse jouent un rôle majeur pour la réussite de l'opération. La profondeur de travail, l'espacement entre les dents et la géométrie des socs sont à considérer pour réussir un ameublissement adéquat du sol. Lorsqu'il est difficile de travailler à une profondeur suffisante ou que la sous-soleuse ne peut pas être ajustée, certaines stratégies peuvent être utilisées afin de compenser ces problèmes.

Certaines sous-soleuses peuvent aussi être ajustées afin de travailler dans une culture établie, ce qui permet aux racines de rapidement coloniser les zones ameublies.

La compréhension de tous les facteurs impliqués dans l'opération de sous-solage devrait permettre aux 'agriculteurs québécois de procéder avec succès au décompactage de leurs sols.

Le sous-solage ne demeure toutefois qu'un palliatif au problème de compaction. Il faut continuer à travailler au développement de systèmes permettant de limiter la compaction.



## **RÉFÉRENCES**

- Ball, B.C., Batey, T. et L.J. Munkholm. 2007. Field assessment of soil structural quality a development of the Peerlkamp test. Soil Use and Management. 23: 329-337.
- Ball, B.C. et Munkholm, L. R. (eds). 2015. Visual Soil Evaluation: Realising Potential Crop Production with Minimum Environmental Impact. CABI, Wallingford, UK (in preparation)
- Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ). 2000. Guide de pratique de conservation en grandes cultures. Problèmes de compaction Module 7 -Diagnostique et correction de problèmes de compaction et de drainage. Feuillet 7A. <a href="http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Probl%C3%A8mes%20de%20compaction.pdf">http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Probl%C3%A8mes%20de%20compaction.pdf</a>
- Garon B. 2014. Attention à la pression au champ, comment réduire la compaction.

  <a href="http://www.agrireseau.qc.ca/legumeschamp/documents/Compaction\_et\_%20balancement\_du\_tracteur.pdf">http://www.agrireseau.qc.ca/legumeschamp/documents/Compaction\_et\_%20balancement\_du\_tracteur.pdf</a>
- Gill, W.R. et G.E. Vanden Berg. 1966. Design of tillage tools. In: W.R. Gill and G.E. Vanden Berg (ed.) *Soil Dynamics in Tillage and Traction*, Auburn, Alabama/USDA. pp. 211-217.
- Godwin, R.J. et G. Spoor. 1977. Soil failure with narrow tines. Journal of Agricultural Engineering Research. 22:213-228.
- Godwin, R.J. et G. Spoor. 2015. Choosing and evaluating soil improvements by subsoiling and compaction control. In: B.C. Ball, et L.R. Munkholm (ed.). 2015. *Visual Soil Evaluation: Realising Potential Crop Production with Minimum Environmental Impact*. CABI, Wallingford, UK (in preparation).
- Lamarre, V. 2012. Réduire la compaction, Réglage des pneus et équilibrage du tracteur. ITA Campus de La Pocatière.

  <a href="http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/Monteregie-Ouest/Journee grandes cultures 2012/Grandes cultures Salle Chevaliers de Colomb/10h50 Reduire la compaction des sols %28V Lamarre%29.pdf</a>
- Raper, R.L et J.S. Bergtold. 2006. Using in-row subsoiling and cover crops to increase use of conservation agriculture in the southern US. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Paper 061039. 2006 ASABE Annual International Meeting. Portland/USA.
- Raper, R.L et J.S. Bergtold. 2006. In-row subsoiling: a review and suggestion for reducing cost of this conservation tillage operation. Applied Engineering Agriculture. 23: 463-471.
- Raper, R.L. 2005. Subsoiler shape for site-specific tillage. 2005. Applied Engineering in Agriculture. 21:25-30.
- Raper, R.L. 2007. In-Row subsoiler that reduce soil compaction and residue disturbance. Applied Engineering in Agriculture. 23:253-258.
- Raghavan, G.S.V, P. Alvo et E. McKyes. 1990. Soil Compaction in Agriculture: A View Towards Managing the Problem. In: Lal R. and B.A. Stewart (ed.) *Soil Degradation, Advances in Soil Science* vol. 11, Springer, pp 1-36.
- Spoor, G., F.G.J. Tijink et P. Weisskopf. 2003. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. Soil and tillage research. 73:175-182.



Spoor, G. et R.J., Godwin. 1978. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tine. Journal of Agricultural Engineering Research. 23::243-258.

Spoor, G. 2006. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. Soil Use and Management. 22:113-122

Weill A. 2009. Les profils de sol agronomiques. Un outil de diagnostic sur l'état des sols. CRAAQ. 132 p.