Semis direct des plantes fourragères au Québec: une revue

G. PARENT[1], S. TESSIER[2], G. ALLARD[1] et D.A. ANGERS[3]

[1]Département de phytologie, Université Laval, Ste-Foy, QC, Canada G1K 7P4;[2]Département de génie rural, Université Laval, Ste-Foy, QC, Canada G1K 7P4; et [3]Station de recherche Agriculture Canada, 2560, Hochelaga, Ste-Foy, QC, Canada, G1V 2J3.
Reçue le 9 août 1993; acceptée le 30 août 1994.

Parent, G., Tessier, S., Allard, G. et Angers, D.A. 1995. **Semis direct des plantes fourragères au Québec: une revue**. Can. Agric. Eng. 37:029-039. Malgré des avantages économiques évidents, le semis direct ne semble pas toujours entraîner un établissement convenable des plantes fourragères. Cette revue vise à connaître différents facteurs qui influencent l'établissement des plantes fourragères suite à un semis direct ainsi que les adaptations nécessaires à la conception de différents instruments de semis. En raison d'une accumulation de résidus de culture en surface du sol, le semis direct peut causer de l'ombrage, réduire l'évaporation de l'eau et ralentir le réchauffement du sol au printemps. L'ombrage au sol n'affecte cependant pas la germination des graminées et légumineuses fourragères. En outre, la plus grande quantité d'eau dans le sol favorise un bon établissement des cultures. Une température du sol plus basse en semis direct n'a qu'une faible influence sur l'établissement des cultures fourragères. Pour le semis direct de plantes fourragères, il faut semer à une profondeur plus faible et plus uniforme qu'en semis conventionnel puisque les semences comportent peu de réserves. Le sillon formé par l'instrument de semis doit être fermé sans tassement excessif au moyen d'une roue plombeuse. Idéalement, la localisation de ce raffermissement devrait se situer au niveau de la semence tout en laissant le sol meuble au-dessus de la semence. Les engrais minéraux doivent, lors d'une fertilisation d'établissement, être préférablement localisés dans le sol selon la morphologie des racines de la culture afin d'assurer leur disponibilité à la plante. La localisation des engrais sous les résidus de culture et sous la semence comportent plusieurs avantages pour le semis direct des plantes fourragères. En bref, un semoir pour le semis direct devrait effectuer un semis superficiel, fermer le sillon, tasser le sol au niveau de la semence et placer les fertilisants sous la semence pour maximiser l'établissement des plantes fourragères.

No-tillage seeding of forage crops has drawn considerable interest over the last few years, principally because of the obvious savings associated with the reduced energy and labor requirements for soil preparation and rock picking on many typical dairy or beef cattle farms. However, this technique is yet seen to often result in less than satisfactory stand establishment of forage crops. A review of the current information on the changes in soil edaphic factors brought about by no-tillage seeding was deemed necessary to guide no-tillage seeder design or modifications to better meet the soil-seed environment needs of these generally very small seeded crops. Increased shading and decreased soil evaporation and heating are likely consequences of the sometimes important residue mass retained at the surface with no-tillage. However, neither grass nor legume forage species are greatly affected by incoming light. While increased soil water availability near the soil surface may contribute to better emergence, establishment of these plant species should not be significantly slowed by the range of reported temperature differences between no-tillage and conventional seeding. Because of the low seed energy reserves of many forage species, it is imperative that no-tillage seeding be as shallow (few millimetres) and as uniform as possible. Seed row firming is recommended to both close the furrow and increase soil-seed contact, but should be fairly light. Ideally, the press wheel should compact the soil around the seed and leave loose soil above it. Starter fertilisers should be placed differently according to the primary root development patterns of the forage species, to insure fast availability to these relatively slow growing plants. Fertiliser placement under the residue mass as well as under the seed seems most advantageous for no-tillage seeding. Finally, a no-tillage seeder should be able to place seed very near the surface, compact soil around the seed, and close the furrow without applying excessive pressure at the surface of the furrow, and place starter fertilisers under the seed to maximize forage crops emergence.

INTRODUCTION

Les pratiques conventionnelles d'établissement des végétaux consistent habituellement en un labour automnal accompagné au printemps d'une séquence d'opérations secondaires visant à former un lit de semence adéquat. Au cours des dernières années, la popularité du travail conventionnel du sol en Amérique du nord a diminuée au profit de pratiques visant une meilleure conservation des sols et des ressources naturelles (USDA 1989). Les pratiques de travail minimum du sol consistent généralement en un remaniement superficiel et peu intensif, voir même en l'absence de travail, auquel s'ajoute l'utilisation d'herbicides pour le contrôle de la végétation présente non désirée. Ce sont habituellement les producteurs de céréales et de maïs en régie intensive qui utilisent les techniques de travail minimum du sol. Depuis quelques années, un engouement pour le semis direct des plantes fourragères étend l'application de ces techniques de conservation au-delà de la production des céréales et du maïs.

Différentes raisons peuvent inciter les producteurs à adopter des pratiques de conservation des sols. La réduction de l'érosion des sols (Moldenhauer et al. 1971; Wischmeier et Smith 1978; Carter et Kunelius 1986) ainsi que la conservation de la qualité des sols (Angers et al. 1993) sont des avantages liés au travail réduit du sol. Cependant, ce sont des incitations économiques et législatives qui justifieront finalement l'utilisation de pratiques de conservation des sols. Le semis direct entraîne une réduction du temps et de l'énergie requis pour effectuer le semis et restreint le nombre d'instruments aratoires utilisés pour réaliser les opérations préparatoires au semis. À titre d'exemple, le semis direct requiert de 16 à 37 litres de carburant de moins par hectare que le semis conventionnel (ASAE 1992). Le semis direct permet également une économie des frais variables de 14 à

24 $/ha par rapport au travail conventionnel du sol, lorsqu'un traitement herbicide semblable est utilisé pour les deux modes de semis (CREAQ 1992). Enfin, le sol n'étant pas retourné par le labour, moins de pierres sont exposées à la surface diminuant ainsi les frais d'épierrage qui varient entre 17 et 91 $/ha (CREAQ 1992).

Le semis direct des plantes fourragères ne semble pas toujours donner un établissement convenable. Des retards dans l'émergence, entraînant parfois des diminutions de rendements, sont souvent observés l'année du semis (Mueller-Warrant et Koch 1980). L'utilisation des semoirs pour le semis direct des céréales présentement disponibles suivent difficilement les rugosités et dépressions du sol. Ces semoirs, plutôt rigides pour le semis direct des plantes fourragères, rendent extrêmement difficile le contrôle de la profondeur d'ensemencement, principalement dans des sols accidentés (Gill 1992). Ces outils, conçus dans des régions plus sèches que celles du Québec, sont mieux adaptés pour un semis à des profondeurs importantes et sur les surfaces nivelées retrouvées dans les régions semi-arides. De plus, l'absence d'information pertinente sur la régie d'ensemencement des plantes fourragères en semis direct nous oblige à appliquer les recommandations établies pour le semis conventionnel qui sont plus ou moins adaptées au semis direct.

Une revue des travaux antérieurs concernant l'établissement des cultures s'impose afin de faire le point sur les différents facteurs édaphiques et physiologiques pertinents pour l'établissement des plantes fourragères en semis direct en climat humide. Cette revue permettra également d'évaluer les conséquences des besoins des plantes au niveau du lit de semence sur la conception de semoirs pour le semis direct des plantes fourragères, entre autre. Cette revue servira à vérifier l'adéquation entre les différentes recommandations pour le semis conventionnel et celles pour le semis direct sans travail du sol. Les besoins des plantes à l'étude et les effets des méthodes de gestion du lit de semence et du sillon seront considérés. Ces recommandations, confirmées ou révisées, permettront d'apprécier l'importance de la précision du contrôle de la profondeur de semis, de la conception d'ouvre-sillons, de l'utilisation de roues plombeuses et des choix de placement des fertilisants minéraux dans le sol.

DÉFINITION DES SYSTÈMES DE SEMIS

Il existe principalement deux types de mode de semis des végétaux cultivés soient le semis conventionnel et le semis direct. Premièrement, le semis conventionnel consiste à semer dans un sol dont la surface a été complètement retournée par le labour. Des travaux secondaires de préparation du lit de semence précèdent le semis pour bien niveler, émietter et débarrasser la surface du sol des débris végétaux (Mannering et al. 1987). Le semis est généralement réalisé au moyen de semoirs peu élaborés, conçus pour travailler dans des conditions de lit de semence meuble. Le semis direct consiste pour sa part, au semis en absence de travail du sol. Par conséquent, le couvert de résidus de culture est très abondant et peut atteindre facilement de 60 à 80% de la surface du sol. Le semis s'effectue avec un semoir adapté à ces conditions de semis qui s'avère plus résistant et plus lourd que celui destiné au semis conventionnel.

CONDITIONS ÉDAPHIQUES ESSENTIELLES POUR LA GERMINATION ET L'ÉMERGENCE

Lumière

La lumière est un facteur primordial pour le règne végétal. Aussitôt que les besoins en lumière d'une culture sont comblés, l'humidité du sol devient le facteur principal limitant l'établissement des plantes fourragères (Gist et Mott 1957; Groya et Sheaffer 1981). Certaines semences photosensibles exigent de la lumière pour déclencher leur germination. Une saine gestion des résidus de culture est donc préférable pour le semis direct de semences photosensibles afin de limiter l'ombrage en surface du sol. Dans le cas des espèces de graminées et de légumineuses fourragères utilisées en agriculture, la lumière n'est pas directement nécessaire pour amorcer la germination (Heller et al. 1989). Les résidus en surface auront alors peu d'effet sur la germination de ces espèces mais pourront néanmoins limiter la quantité de lumière qui atteindra le feuillage après l'émergence (Wilkins et al. 1988).

Température du sol

La température du sol influence le déclenchement et la vitesse des réponses biologiques des végétaux. Les végétaux cultivés comportent des besoins thermiques différents. Ces besoins thermiques sont souvent exprimés en terme de températures cardinales c'est-à-dire, températures minimale, optimale et maximale nécessaires pour amorcer un phénomène biologique donné. Par exemple, les températures cardinales pour respectivement débuter, optimiser et supprimer la germination de la luzerne(*Medicago sativa* L.) sont de 1, 25, et 35°C et de 4, 18-22, et 30°C pour la fléole des prés (*Phleum Pratense* L.) (Treidl 1978). Ces deux espèces sont donc bien adaptées au climat frais. L'émergence de la luzerne est bien entendu plus lente à de basses températures du sol (Townsend et McGinnies 1972). La température cardinale optimale peut cependant mal représenter les besoins thermiques réels des différentes espèces végétales (Wilson et al. 1974). Finalement, l'exposition à de basses températures ou à des températures fluctuantes peut parfois favoriser un plus haut taux de germination (Naylor et Abdalla 1982; Young et al. 1980).

Eau du sol

L'eau du sol est un autre facteur essentiel pour la germination des semences. En effet, la luzerne ne peut germer et émerger lorsque le potentiel hydrique du sol est inférieur à -1,1 MPa dans des loams sableux et argileux (Tripplet et Tesar 1960). Considérant l'importance de l'eau pour le semis, deux facteurs du sol pouvant influencer sa disponibilité seront étudiés.

Eau vs agrégation du sol Un contact relativement intime entre les particules de sol et les semences est primordial en sol sec. L'intensité du contact sol-semence contrôle l'importance du transport capillaire de l'eau vers la semence nécessaire à l'initiation de la germination des semences. Dans le but d'optimiser ce contact sol-semence, le diamètre moyen des agrégats du lit de semence devrait se situer entre 1/5 et 1/10 du diamètre de la semence (Hadas et Russo 1974). Ceci peut représenter un diamètre moyen des agrégats variant entre 0,2 et 0,4 mm pour la luzerne. En production de plantes fourragères, Russell (1973) propose un diamètre des agrégats du sol variant entre 0,5 et 1,0 mm. Une agrégation

fine du sol semble favoriser le développement initial des cultures (Gill 1992) principalement lors d'un déficit hydrique (Braunack et Dexter 1988). Toutefois, les agrégats plus fins deviennent facilement érodables par le vent et l'eau. De plus, les agrégats de petite taille favorisent la formation d'une croûte à la surface du sol qui peut empêcher l'émergence de plusieurs cultures (Shiel et al. 1987).

Eau vs impédance mécanique du sol L'impédance mécanique du sol peut également réduire le potentiel d'établissement des plantes cultivées. La densité apparente élevée de certains loams sableux fins non-travaillés (Carter 1987; Carter et Kunelius 1989) peut avoir un effet négatif sur la disponibilité de l'eau pour la semence en semis direct. L'imbibition des semences par l'eau est moins rapide en sol compact, bien que cet effet n'influence pas toujours la rapidité de la germination (Collis-George et Yoganathan 1985). Les semences soumises à une impédance mécanique plus élevée peuvent par compte germer à des niveaux critiques d'humidité du sol inférieurs (Collis-George et Melville 1978). On constate donc que l'impédance du sol et la densité apparente variable des différents types de sol influencent l'émergence des semis (Wanjura et Buxton 1972).

Interaction température-eau du sol

L'augmentation de la température de l'eau entraîne habituellement une diminution de sa viscosité. Ceci pourrait en améliorer la disponibilité pour les végétaux. Cependant, la température du sol n'a que peu d'effet sur le processus d'imbibition de l'eau par la semence puisque les faibles variations de températures couramment observées n'influencent que très peu la viscosité et l'attraction des molécules d'eau entre elles (Mayer et Poljackoff-Mayber 1982). En revanche, d'autres études portant sur les interactions entre la température et l'eau du sol démontrent un effet prononcé du potentiel hydrique du sol sur la germination des graminées lorsque la température du sol s'éloigne des valeurs optimales (McGinnies 1960). Chez le blé par exemple, le potentiel hydrique critique du sol pour l'émergence augmente en fonction de la température, diminuant ainsi les besoins en eau à faibles températures du sol (Lindstrom et al. 1976).

PROPRIÉTÉS DU SOL PROPRES AU SEMIS DIRECT

Lumière au sol

L'utilisation du semis direct entraîne une accumulation de résidus de culture à la surface du sol. La présence de ces résidus a pour effet de réduire la quantité de lumière qui atteint les semences ou les plantules venant d'émerger (Wilkins et al. 1988). Ces débris peuvent d'une part, bloquer les longueurs d'onde de la lumière (rouge) nécessaires pour lever la dormance des semences photosensibles et d'autre part, entraîner une limitation du potentiel photosynthétique.

Teneur en eau du lit de semence

Les résidus de culture peuvent également influencer la teneur en eau du sol. La présence de résidus à la surface du sol favorise une meilleure conservation de l'eau dans le sol en limitant son évaporation (Moody et al. 1963; Al-Darby et al. 1989).

L'absence de travail du sol minimise les modifications au niveau de ses pores et de son régime hydrique. Ainsi, Francis et al. (1985) suggèrent qu'en semis direct, une plus grande teneur en eau dans les premiers cinq centimètres de sol est reliée à un taux inférieur d'évaporation résultant d'une plus grande proportion de micropores dans un sol non travaillé. En outre, la continuité des pores du sol, habituellement brisée lors du travail conventionnel, favorise en semis direct une meilleure conductivité hydraulique saturée et une meilleure infiltration de l'eau dans le sol (Ehlers 1975; Barnes et Ellis 1979). Le maintien de la microporosité du sol résulte en de meilleures conditions de drainage de l'eau gravitationnelle par les pores du sol, et en des teneurs en eau disponible potentiellement plus élevées. L'augmentation de la matière organique du sol en semis direct (Blevins et al. 1977) peut aussi contribuer à la rétention de l'eau du sol.

Température du sol

La présence de résidus de culture en surface du sol peut ralentir son réchauffement en réfléchissant une bonne partie de l'énergie solaire incidente ainsi qu'en isolant le sol (Van Wijk et al. 1959; Van Doren et Allmaras 1978). Pour ces mêmes raisons, les résidus ont un effet modérateur sur les amplitudes de température journalières (Gill 1992). La teneur en eau du sol peut également exercer une influence sur le régime thermique du sol. En effet, une teneur en eau du sol élevée cause généralement une plus grande inertie thermale du sol, ce qui contribue à ralentir son réchauffement (Thibaudeau 1990).

La température du sol en semis direct au printemps n'est généralement plus faible que de quelques degrés comparativement à la température d'un sol nu. Ainsi, Gill (1992) a noté au Québec une température moyenne du sol inférieure de seulement 1,4 °C pour une quantité de paille d'orge de 670 kg/ha (représentant une couverture de résidus de 30%) comparativement à une quantité de paille de 4050 kg/ha. De légers retards dans la vitesse d'émergence sont survenus lorsque de fortes quantités de paille recouvraient le sol mais aucune différence au niveau des populations finales n'a été observée. Ceci démontre le peu d'influence qu'ont de faibles variations de température sur une espèce adaptée à un climat frais, plus particulièrement lorsqu'il s'agit de quantités normales de résidus de culture sur le sol.

Agrégation du sol

La pratique du semis direct peut entraîner des variations du diamètre des agrégats comparativement à un mode de gestion conventionnel du lit de semence. En effet, les essais de Gill (1992) au Lac Saint-Jean (Québec) ainsi que les travaux de Angers et al. (1993) à La Pocatière (Québec) rapportent que le semis direct produit habituellement des agrégats plus grossiers que le travail conventionnel du sol. Cependant, d'autres chercheurs ont obtenu, dans des conditions de sol plus sèches, une agrégation plus fine en semis direct qu'en travail conventionnel du sol (Lindwall et Erbach 1983; Unger 1984). Les résultats de Tessier et al. (1991a) laissent prévoir une ségrégation des agrégats dans un lit de semence suite à un semis direct, avec les agrégats les plus fins situées près de la surface du sol et les agrégats plus grossiers à une certaine profondeur sous la surface.

GESTION DES PROPRIÉTÉS DU LIT DE SEMENCE

Le succès de l'établissement des cultures dépend des nombreux facteurs édaphiques énumérés ci-dessus. Des paramètres de gestion tels la profondeur de semis, le raffermissement du lit de

semence et le placement des fertilisants à proximité de la semence sont probablement les seuls qui peuvent être contrôlés lors de l'opération du semis. La plupart de ces facteurs édaphiques sont influencés par ces trois paramètres de gestion du lit de semence et sont donc potentiellement contrôlables. La section suivante vise à explorer l'impact de chacun de ces paramètres de gestion du lit de semence sur la germination et l'émergence des plantes fourragères en semis direct.

Profondeur de semis

L'importance de la profondeur de semis dépend principalement de la quantité de réserves des semences (qui dépend de la grosseur des semences), de la teneur en eau du sol et du type de sol. La profondeur de semis influence la demande énergétique nécessaire pour que les organes photosynthétiques d'une plantule traversent le sol et atteignent la surface (Bewley et Black 1982). Pour les plantes fourragères, on conseille d'utiliser une faible profondeur de semis principalement en raison des réserves limitées de la semence de ce type de plante.

Le poids par 1000 grains est généralement un bon indicateur de la facilité d'une plante pour émerger du sol (King et Bladen 1992). Notons par exemple que la luzerne et la fléole des prés présentent respectivement des poids par 1000 grains de 2,0 et 0,5 g comparativement à 45 g pour l'orge. Murphy et Arny (1939) ont noté une meilleure émergence de différentes plantes fourragères semées en profondeur (50 à 75 mm) lorsque les semences présentent un poids par 1000 grains important. Au sein d'une même espèce, il existe une relation entre le diamètre de la semence et la facilité de l'établissement (King et Bladen 1992); les semences les plus grosses ont plus de facilité à émerger. Ainsi, il est préférable d'avoir des semences de taille importante pour les semis plus profonds (30 mm) ou bien lorsqu'une croûte de battance se forme à la surface du sol. Tout excès de recouvrement de la semence par du sol peut réduire l'émergence du semis (Gul et Allan 1976; Sepaskhah et Raessi Ardekani 1978) notamment lorsque la profondeur de semis dépasse la longueur maximale que peut atteindre le coléoptile chez les graminées, ou l'hypocotyle chez les légumineuses (Feather et al. 1968). La profondeur de semis ne devrait idéalement pas dépasser 25 mm pour le semis de petites semences de légumineuses fourragères (Murphy et Arny 1939).

Les recommandations de profondeurs de semis dépendent aussi de la texture et de la teneur en eau du sol. La profondeur optimale de semis des plantes fourragères en pratique conventionnelle varie, selon Sund et al. (1966), entre 6 et 13 mm en sols argileux et entre 13 et 25 mm en sols sableux. La profondeur de semis de la luzerne devrait généralement varier entre 5 et 20 mm dans les sols de texture fine (Smith 1981). Cependant, en sols plus grossiers sujets à l'assèchement, une profondeur de semis plus importante devrait être considérée pour déposer la semence dans des conditions d'humidité plus convenables (Smith 1981; Tripplet et Tesar 1960). Un semis à une profondeur variant entre 12 et 40 mm est alors recommandé. De même, lorsque la teneur en eau près de la surface du lit de semence est faible, l'augmentation de la profondeur de semis semble appropriée pour déposer la semence dans des conditions d'humidité plus favorables (Gul et Allan 1976). Cette stratégie n'est toutefois valable que lorsque la teneur en eau du sol augmente avec la profondeur du semis; un semis plus profond peut s'avérer avantageux dans ces circonstances au détriment d'une diminution du taux et de la vitesse d'émergence (Murphy et Arny 1939; McGinnies 1973).

Raffermissement du lit de semence

L'importance et les effets bénéfiques du recouvrement de la semence et du raffermissement ou tassement du lit de semence sont connus depuis longtemps. Copeman et Roberts (1960) notent que les moutons peuvent, par leur piétinement, enfoncer les semences dans le sol en marchant dans un champ préalablement semé à la volée. Le raffermissement du lit de semence vise entre autres à accroître le contact sol-semence pour ainsi favoriser l'entrée et l'absorption de l'eau par la semence. Ce tassement du lit de semence affecte directement le transport et la disponibilité de l'eau à la semence et modifie les propriétés physiques du sol (densité apparente, résistance à l'enfoncement, diamètre des agrégats) et les échanges gazeux dans le sol (Tessier et al. 1988).

L'utilisation de roues plombeuses sur un semoir, en plus de raffermir le lit de semence, peut permettre l'accroissement du pourcentage des agrégats fins (12,7 mm) et diminuer le diamètre moyen pondéral des agrégats (Lindwall et Erbach 1983). En sol sec, ceci revêt un avantage particulier en améliorant la disponibilité de l'eau (Hadas et Russo 1974). Le raffermissement ralentit également l'évaporation de l'eau du sol autour de la semence (Choudhary et Baker 1980). Le raffermissement au-dessus de la semence peut créer une barrière limitant l'évaporation de l'eau du sillon en réduisant la porosité du sol au niveau de la semence, ce qui permet d'obtenir de meilleures conditions pour l'émergence des cultures (Penman 1940; Johnson et Henry 1964). Finalement, le raffermissement du lit de semence permet de hâter l'émergence et d'accroître le taux de germination (Ward et Shaykewich 1972; Sepaskhah et Raessi Ardekani 1978; Foster 1991).

Par opposition à ses effets bénéfiques, le raffermissement du lit de semence peut aussi affecter négativement l'émergence et le développement initial des cultures. En effet, le tassement peut réduire la disponibilité de l'oxygène à la semence (Hanks et Thorp 1956). Selon Kolp et al. (1967), un compactage excessif peut réduire et même supprimer l'émergence des végétaux cultivés. Les roues plombeuses ou de raffermissement ont souvent un effet plus marqué en surface du sol qu'en profondeur (Tessier et al. 1991b). Ainsi, l'utilisation de roues plombeuses peut rendre les sols faiblement structurés et présentant une agrégation trop fine à la surface du sol, sensibles à la formation d'une croûte de battance suite à une pluie (Schneider et Gupta 1985; Tessier et al. 1990). Également, le tassement d'un sol humide ou encore un excès de raffermissement peut occasionner la formation de croûtes denses. Le sol soumis à une régie de culture sans travail du sol et recouvert de résidus de culture est cependant plus stable et plus résistant à la battance que le sol travaillé de façon conventionnelle (Douglas et al. 1986; Angers et al. 1993). Toutefois, toute impédance mécanique notable entre la semence et la surface du sol retardera ou diminuera l'émergence des cultures (Bilbro et Wanjura 1982).

D'autre part, le tassement du sol qui diminue le diamètre moyen des agrégats sans augmenter de façon excessive l'im-

pédance du sol au-dessus de la semence lors ou après le semis, n'a pas la même influence sur un sol humide et un sol sec. Selon une étude conduite au Minnesota, un léger tassement du lit de semence au moyen d'un rouleau bosselé en pré-semis a permis d'améliorer l'établissement de la luzerne de 48 à 66% pendant les deux années suivant le semis comparativement à un semis conventionnel sans traitement de tassement du lit de semence (Schmid et Rud 1952). La nécessité d'un raffermissement du lit de semence est plus critique à la fin de l'été et lors d'un semis superficiel sur les sols à texture sableuse et lors d'un semis en conditions sèches (Schmid et Rud 1952; Tripplet et Tesar 1960). Cette technique est donc recommandée pour les sols secs (Smith 1981) mais semble également applicable dans certaines conditions d'humidité. Tripplet et Tesar (1960) ont d'ailleurs recommandé en climat tempéré et humide, un semis de la luzerne à une profondeur de 13 mm avec un tassement de seulement 0,3 kPa situé au-dessus des semences dans des loams sableux et limoneux. L'établissement était amélioré de 25% lors d'un semis de printemps et de 50% lors d'un semis de fin d'été. Le contact sol-semence est donc plus ou moins primordial selon la quantité d'eau disponible pour la semence (Hillel 1972; Choudhary et Baker 1980) et n'est pas nécessaire en sol fin (Schmid et Rud 1952).

Différentes localisations du tassement peuvent être envisagées lors du semis au moyen de diverses combinaisons de roues plombeuses. Le raffermissement du sol autour de la semence peut favoriser l'émergence au point de permettre une diminution des doses de semis des plantes fourragères nécessaires pour un établissement satisfaisant (Hoveland et al. 1987). Idéalement, il faudrait presser la semence dans le sillon pour faciliter le transport de l'eau à la semence et la recouvrir avec du sol meuble afin d'éviter la formation d'une couche de sol compacte que la plantule ne pourrait traverser (Stout et al. 1961). On note chez le blé une amélioration de l'émergence lorsque la pression est appliquée directement sur la semence avant un recouvrement subséquent par du sol non raffermi (Choudhary et Baker 1980). Cependant, Tripplet et Tesar (1960) recommandent de tasser un semis de luzerne directement au-dessus des semences pour en maximiser l'émergence. Clement (1967) a pour sa part démontré que tasser le sol au-dessus d'une semence de blé, tel que le font la plupart des semoirs actuellement disponibles, peut tout simplement inhiber l'émergence, principalement en sol argileux ou humide. Bilbro et Wanjura (1982) ont même constaté que la présence d'une couche compacte de sol au-dessus de la semence a le même effet qu'un semis trop profond. Morisson (1989) préconise pour sa part l'utilisation de roues plombeuses doubles, inclinées et disposées de chaque côté du sillon qui laissent le sol meuble au-dessus des petites semences comportant peu de réserves.

Placement des fertilisants minéraux

La progression des racines dans un sol plutôt ferme, parfois associé au semis direct (Carter 1987), combinée à une mauvaise nutrition des plantes croissant dans ces sols, exigent un meilleur positionnement des fertilisants (Murphy 1983). En effet, la plantule a besoin de plus d'énergie pour émerger d'un sol ferme ce qui cause une réduction dans la disponibilité des éléments nutritifs intrinsèques à la semence tôt après la germination. Il faut donc suppléer par une application de fertilisants lors du semis. Deux méthodes d'application de fertilisants minéraux sont couramment employées pour une fertilisation d'établissement: l'application à la volée suivie ou non d'une incorporation et l'application en bandes dans le sol.

L'application à la volée des fertilisants granulaires en surface du sol n'est pas recommandée pour le semis direct (Murphy 1983). La couche de résidus de culture sur le sol crée une barrière physique limitant le mouvement des fertilisants de la surface du sol jusqu'à la zone des racines (McCalla et Russel 1943). Ainsi, les résidus limitent le mouvement du fertilisant vers le sol et entraînent des pertes par immobilisation et même par volatilisation dans le cas de l'azote (Mengel et al. 1982). Des précipitations importantes sont alors essentielles pour transporter les nutriments solubles vers la zone des racines. Lors d'années très pluvieuses, la différence entre le placement d'un fertilisant granulaire en surface ou dans le sol est faible (McConnell et al. 1986). Les éléments peu solubles restent néanmoins en surface et peu disponibles aux plantes (Klepper et al. 1983).

Tant pour les pratiques culturales réduites que pour le semis direct, le placement de l'azote dans un sol humide ou sous la couche de résidus de culture à la surface du sol améliore l'efficacité et diminue les pertes par volatilisation (Kitur et al. 1984; Rice et Smith 1984, Mengel et al. 1982). L'avantage d'une application en bande de l'engrais dans le sol peut être attribué à une concentration accrue du fertilisant dans un volume de sol réduit ce qui en limite l'immobilisation, à une diminution du taux de dénitrification et au placement sous la zone d'activité biologique intense de la couche de résidus (Tomar et Soper 1981; Carter et Rennie 1984; Monreal et al. 1986).

L'application de phosphore dans le sol assure de façon générale une plus grande disponibilité de cet élément à la plante comparativement à une simple application en surface (Hipp 1970; Prummel 1956). Cette disponibilité du phosphore placé en bande dans le sol provient de sa plus grande accessibilité aux racines malgré sa faible mobilité et d'une minéralisation réduite du fertilisant attribuable à une réduction du contact sol-fertilisant (Follett et al. 1981). Pour sa part, le superphosphate appliqué en bande dans le sol est deux à trois fois plus disponible à la culture qu'une application laissée en surface du sol (Rudd et Barrows, 1973; Peterson et al. 1981). Les deux techniques, à la volée et en bande, semblent toutefois aussi efficaces l'une que l'autre dans les sols présentant des teneurs moyennes ou élevées en phosphore (Peterson et al. 1981).

Les études sur le placement du potassium dans le sol sont beaucoup moins nombreuses. Le potassium étant surtout nécessaire pour la reconstitution des réserves de la plante avant la période hivernale (CPVQ 1989) on comprend le peu d'intérêt à faire de la recherche sur la fertilisation potassique à l'établissement. Globalement, la mobilité dans le sol de cet élément est moins contraignante que celle du phosphore (Randall et Hoeft 1988).

Pour assurer une bonne fertilisation, les fertilisants doivent donc préférablement être localisés dans le sol à quelques centimètres de la semence pour faciliter rapidement leur accès aux racines (Niping et Edwards 1986). L'application en bande des fertilisants minéraux potassiques nécessite

25% moins de fertilisants, économie substantielle par rapport à une application à la volée suivie d'une incorporation dans le sol (CPVQ 1989). La plupart des observations citées plus haut concernant la localisation idéale des fertilisants dans le sol ont toutefois été réalisées en conditions de semis conventionnel.

Différentes localisations des fertilisants dans le sol par rapport à la position de la semence peuvent être considérées. Une option simple est le placement du fertilisant directement avec la semence lors du semis. Cette approche n'est pas sans effet secondaire; selon la dose, le développement des plantules peut être retardé ou tout simplement arrêté (Olson et al. 1956; Lawton et Davis 1960; Allison et Klein 1962; Babowicz et al. 1985). Par exemple, une fertilisation de seulement 22 kg/ha d'azote en contact direct avec la semence peut retarder et diminuer l'émergence de la culture (Rasmussen et al. 1980; Noori-Fard et Bolton 1981). Le problème résulte d'une diminution du potentiel hydrique par les sels constituant les fertilisants minéraux, principalement les fertilisants azotés et potassiques, ainsi que la formation d'ammoniaque ou de nitrite toxiques aux jeunes plantules (Toews et Soper 1978, Randall et Hoeft 1988). Habituellement, les cellules des racines ont un potentiel hydrique de - 1 MPa comparativement à - 1,5 à - 2 MPa pour les pousses (Pearson et Kirkham 1980). Lorsque la solution du sol atteint un potentiel osmotique plus faible que celui de la plante, les racines se dessèchent et la plantule flétrit. Par compte, ces sels peuvent être dilués dans les sols humides ce qui occasionne une réduction du stress osmotique (Carter 1969). Dans le cas de l'urée qui a un équivalent salin relativement faible, un excès d'ammoniaque, dérivé de l'urée, peut être toxique pour les nouvelles plantules (Curtis 1949; Court et al. 1964). Les recommandations d'application de fertilisants pour l'établissement des plantes fourragères dépassent déjà la norme de 22 kg/ha; le CPVQ (1989) recommande d'ailleurs de ne pas appliquer plus de 30 kg/ha d'azote au semis. Il semble donc risqué de déposer la totalité des fertilisants au semis à même le sillon et directement avec la semence.

Le placement des fertilisants doit également être adapté à la morphologie des racines des plantules, principalement pour les éléments peu solubles puisque l'interception par les racines des éléments fertilisants peu mobiles influencera leur disponibilité (Lawton et Vomocil 1954). L'importance du contact racine-fertilisant est d'ailleurs l'un des facteurs majeurs contrôlant l'efficacité de l'absorption du phosphore (Barber 1974). La distance entre le fertilisant et la semence agit également sur le temps de réponse de la plante et influence la probabilité que la racine entre en contact avec le fertilisant (Russell et Ellis 1968). Par exemple, une luzerne semée à 38 mm au-dessus et 25 mm sur le côté d'une bande d'engrais phosphatés peut absorber, après 8 semaines de croissance, 60% du phosphore appliqué comparativement à seulement 3% pour une distance de 76 mm (Tesar et al. 1954). Aussi, le semis de plantules directement au-dessus d'une bande de phosphore permet d'observer une croissance végétative plus élevée de 52 et 66% respectivement d'un semis à 25 et 50 mm sur le côté de la bande de fertilisants.

Date de semis

Un autre paramètre sur lequel nous pouvons avoir un contrôle et qui n'implique pas les divers équipements de semis, est la date de semis. Deux périodes de semis des plantes fourragères sont possibles au Québec soient au printemps ou en fin d'été. Pour un établissement au printemps, un semis hatif permet d'observer des rendements plus importants qu'un semis plus tardif (Taylor et al. 1969; Belzile et Rioux 1984). Le semis hatif de la luzerne s'avère particulièrement avantageux compte tenu que sa germination débute à des températures relativement basses ce qui permet de compétitionner plus efficacement la végétation non désirée (Smith 1981). Une diminution du couvert végétal est habituellement observée avec le report de la date de semis au printemps (Langille et Warren 1964).

L'établissement des plantes fourragères est étalement possible en fin d'été. Cette date de semis est particulièrement avantageuse puisque la compétition à cette période avec la végétation existante est moins importante qu'au printemps (Wolf et Edmisten 1989). Il faut toutefois que le semis soit réalisé assez tôt pour que la plante puisse s'établir et avoir le temps de se préparer à la venue de l'hiver (Fribourg et Strand 1973). Une diminution du pourcentage de couverture de la luzerne est observée au Québec lorsque le semis conventionnel est réalisé plus tardivement que la mi-août (Belzile 1984). Toutefois, le semis de fin d'été de luzerne peut être effectué trois semaines plus tard en utilisant la technique du semis direct (Wolf et Edmisten 1989).

Dose de semis

Selon le CPVQ (1989), la dose de semis de la luzerne est de 600 graines/m^2 et de 2500 graines/m^2 pour la fléole des prés en semis pur. Toute dose de semis supérieure à ces recommandations ne permettra de voir un effet qu'à la première coupe l'année de l'établissement pour un semis de printemps et la première coupe de l'année suivant pour un ensemencement en août (Belzile et Rioux 1984). Pour la luzerne, il faut également viser à obtenir un nombre de plantule variant entre 120 et 150 plants/m^2 l'année du semis pour maximiser le rendement. Pour les années suivantes, une population d'environ 60 plants/m^2 assure une densité de peuplement convenable pour maximiser la productivité de la luzernière (Gervais 1978).

DISCUSSION

Comparativement au semis conventionnel, le semis direct se caractérise par une accumulation de résidus de culture à la surface. Les résidus de culture peuvent affecter la germination des espèces photosensibles et influencer le processus subséquent de croissance suite à l'émergence, tout en limitant le réchauffement du sol. Cependant, la germination des principales espèces fourragères cultivées au Québec n'est pas affectée par la lumière. Les résidus qui réduisent l'évaporation, combinés à l'absence de bris des pores du sol permettant une bonne remontée capillaire de l'eau, favorisent des teneurs en eau plus élevées du lit de semence qu'en pratique conventionnelle. Par compte, ceci peut contribuer à ralentir le réchauffement du sol.

Un problème en semis direct qui découle de la présence de résidus de culture en surface, est la présence d'un sol potentiellement plus froid et non remanié. En se rappelant les besoins thermiques des plantes fourragères (exprimés en termes de températures cardinales), un sol froid contribue à ralentir le processus d'établissement des plantes fourragères. Malgré la capacité de germination de plusieurs espèces à de

basses températures, les semences nécessitent suffisamment de chaleur pour atteindre une rapidité d'établissement satisfaisante. L'accroissement de la profondeur de semis aura également pour conséquence de déposer la semence dans un sol potentiellement plus froid, par rapport à la surface ou tout au moins dans les premiers centimètres de la couche arable (Al-Darby et al. 1989). Cependant, compte tenu des quantités de résidus habituellement retrouvées particulièrement en présence de pailles de céréales en surface, le sol n'est souvent plus froid que de quelques degrés seulement (Gill 1992) et les plantes utilisées, adaptées à des climats frais, peuvent malgré tout bien émerger du sol dans ces conditions.

Puisque le sol est un peu plus compact et non remanié en semis direct, il faudrait envisager un placement de la semence dans le sol à une profondeur inférieure au travail conventionnel du sol (généralement 25 mm). La conservation de l'eau notamment par l'effet des résidus de culture en surface augmenterait les chances de succès d'un semis aussi superficiel. En revanche, un semis si près de la surface requiert un contrôle plus précis de la profondeur de semis que celui normalement obtenu avec les semoirs pour le semis direct des céréales. La technique de semis à la volée à la surface du sol est dans ces circonstances à rejeter puisque la présence importante de résidus de culture limiterait le contact sol-semence et pourrait même empêcher les semences d'atteindre la surface du sol.

La teneur en eau du sol étant habituellement favorable au niveau de la semence en semis direct, la pertinence du raffermissement du lit de semence sous les conditions climatiques qui prévalent au Québec est remise en question. Ce tassement, qui a pour conséquence d'accroître la conductivité hydrique non-saturée du sol dans l'environnement immédiat de la semence, peut dans des circonstances particulières d'humidité des sols à texture fine provoquer la formation d'une masse compacte de sol retardant ou tout simplement empêchant l'émergence des plantules. Compte tenu qu'un sol sec ne peut être compacté à la même densité qu'un sol humide pour une pression donnée (Angers 1990), le risque de causer un compactage excessif d'un lit de semence humide est relativement important. Ce phénomène sera encore plus néfaste lors de l'établissement de plantes fourragères, compte tenu des faibles réserves des semences. Il semble dans ces circonstances plus approprié de tout simplement refermer sans tasser excessivement la fente laissée par l'ouvre sillon uniquement pour éviter l'évaporation de l'eau immédiatement au pourtour de la semence (School of Agriculture-Aberdeen 1980). Toutefois, un léger tassement contrôlé du lit de semence, même en sol humide, localisé au niveau de la semence ne serait pas nuisible à l'établissement des végétaux.

Cependant, dans un sol sec ou lors d'un semis de fin d'été, un certain raffermissement du lit de semence pourrait s'avérer nécessaire. Le tassement devrait être stratifié, c'est-à-dire localisé principalement au niveau de la semence et non directement au-dessus. Le sol devrait être, du moins au-dessus de la semence, meuble et ne pas imposer de contraintes mécaniques au développement du coléoptile ou de l'hypocotyle de la plantule. Un tassement au-dessus de la semence pourrait, dans les sols peu structurés, entraîner la formation d'une croûte de battance en surface, contraignant la plantule à contourner cet obstacle. À ce jour, aucune étude ne nous renseigne sur l'intensité de raffermissement nécessaire au niveau de la semence pour le semis des plantes fourragères en condition de semis direct sous un climat tempéré.

Le placement des fertilisants granulaires lors d'une fertilisation d'établissement en semis direct devrait préférablement être effectué en bande dans le sol afin de minimiser les pertes d'éléments fertilisants et accroître l'efficacité de la fertilisation. Le placement de la dose complète de fertilisant directement avec la semence est cependant à rejeter en considérant les risques relativement élevés d'inhibition de la germination et de diminution du potentiel osmotique du sol découlant des doses recommandées d'engrais qui sont relativement élevées. Il serait possible de déposer une certaine quantité de fertilisants avec la semence et de localiser le reste sous la semence ou encore entre les rangs, selon la culture. En tenant compte de la morphologie des racines des plantes fourragères (Figs. 1 et 2), le placement des fertilisants minéraux, surtout les éléments peu mobiles dans le sol, devrait idéalement être effectué directement sous la semence, particulièrement pour la production de luzerne (Fig. 3).

Les considérations précédentes ont un impact déterminant sur les spécifications d'un semoir pour le semis direct des plantes fourragères. Les semoirs devront pouvoir placer les semences à une profondeur se situant entre 5 et 15 mm dans le sol selon la disponibilité de l'eau du sol et sous le couvert de résidus de culture. Compte tenu de la faible profondeur de semis considérée, le contrôle de la profondeur devra être beaucoup plus rigoureux qu'avec la plupart des semoirs à céréales existants qui sont utilisés pour le semis direct des plantes fourragères (PAMI 1987). Le système de tassement des sillons devra pouvoir être ajusté tantôt pour refermer seulement le sillon, tantôt pour le refermer et le tasser au niveau de la semence. Finalement, il apparaît que, même en conditions humides, une partie importante des fertilisants granulaires devrait être placée ailleurs qu'avec la semence et préférablement à quelques centimètres sous celle-ci.

Plusieurs questions restent encore sans réponse. La profondeur exacte de semis, compte tenu des propriétés particulières du sol en semis direct, reste encore à déterminer

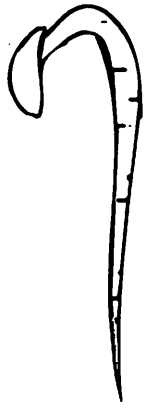

Fig. 1. Représentation de la morphologie des racines d'une légumineuse fourragère.

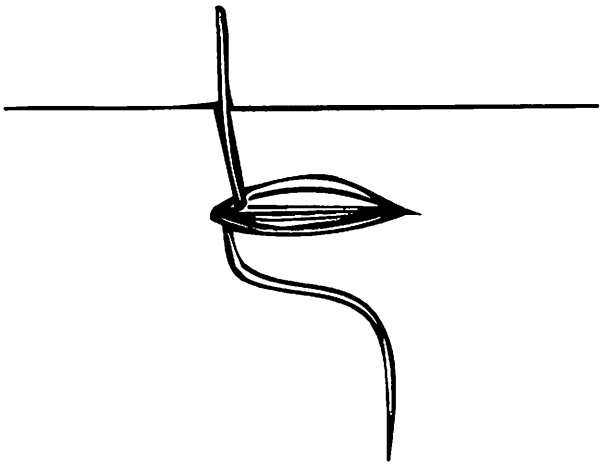

Fig. 2. Représentation de la morphologie des racines d'une graminée fourragère.

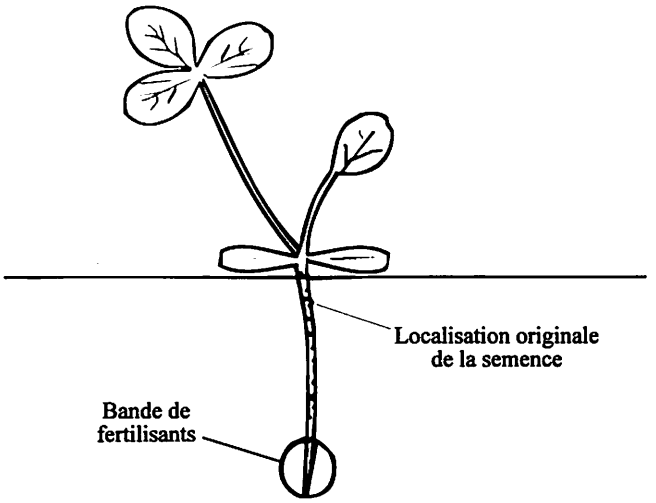

Fig. 3. Localisation suggérée des fertilisants lors du semis d'une légumineuse fourragère.

pour les plantes fourragères. Également, les études reliant l'émergence des plantes fourragères et le raffermissement du lit de semence à des localisations diverses dans le sillon sont quasi inexistantes, sans compter le manque d'information au niveau de la pression nécessaire sur le sol pour assurer une bonne conductivité de l'eau vers la semence. Des études au niveau de la régie d'établissement des plantes fourragères en semis direct sont nécessaires pour permettre un établissement des plantes fourragères en semis direct aussi efficace que celui obtenu avec le semis conventionnel. Les avantages agronomiques, économiques et environnementaux de cette technique d'établissement en région tempérée devraient être reconsidérées.

RÉFÉRENCES

Al-Darby, A.M., M.A. Mustafa, A.M. Al-Omran et M.O. Mahjoub. 1989. Effect of wheat residue and evaporative demand on intermittent evaporation. *Soil and Tillage Research* 15:105-116.

Allison, F.E. et C.J. Klein. 1962. Rates of immobilization and release of nitrogen following additions of carbonaceous materials and nitrogen to soils. *Soil Science* 93:383-386.

Angers, D.A. 1990. Compression of agricultural soils from Quebec. *Soil and Tillage Research* 18:357-365.

Angers, D.A., N. Samson et A. Légère. 1993. Early changes in water-stable aggregation induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Canadian Journal of Soil Science* 73:51-59.

ASAE. 1992. ASAE D497 - Agricultural machinery management data. In *ASAE Standards 1992*, 39th ed., 293-299. St-Joseph, MI:ASAE.

Babowicz, R.J., G.M. Hyde et J.B. Simpson. 1985. Fertilizer effects under simulated no-tillage conditions. *Transactions of the ASAE* 28:1003-1006.

Barber, S.A. 1974. A program for increasing the efficiency of fertilizers. *Fertilizer Solutions* 18:24-25.

Barnes, B.T. et F.B. Ellis. 1979. Effects of different methods of cultivation, and direct drilling and disposal of straw residues, on population of earthworms. *Journal of Soil Science* 30:669-679.

Belzile, L. 1984. Influence des cultivars, des dates de semis et des doses de semis sur le rendement et la qualité de la luzerne semée en fin d'été. *Canadian Journal of Plant Science* 64:667-675.

Belzile, L. et R. Rioux. 1984. Influence des cultivars, des dates et doses de semis sur le rendement et la qualité de la luzerne l'année du semis. *Canadian Journal of Plant Science* 64:309-317.

Bewley, A. et M. Black. 1982. *Physiology and Biochemistry of Seeds in Relation to Germination*, vol. 2. New York, NY: Springer-Verlag.

Bilbro, J.D. et D.F. Wanjura. 1982. Soil crusts and cotton emergence relationships. *Transactions of the ASAE* 26:1484-1487, 1494.

Blevins, R.L., G.W. Thomas et P.L. Cornelius. 1977. Influence of no-tillage and nitrogen fertilization on certain soil properties after 5 years of continuous corn. *Agronomy Journal* 69:383-386.

Braunack, M.V. et A.R. Dexter. 1988. The effect of aggregate size in the seedbed on surface crusting and growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L., cv Halberd) under dryland conditions. *Soil and Tillage Research* 11:133-145.

Carter, M.R. 1987. Physical properties of some Prince Edward Island soils in relation to their tillage requirement and suitability for direct drilling. *Canadian Journal of Soil Science* 67:473-487.

Carter, M.R. et H.T. Kunelius. 1986. Comparison of tillage and direct drilling for Italian ryegrass on the properties of a fine sandy loam soil. *Canadian Journal of Soil Science* 66:197-207.

Carter, M.R. et H.T. Kunelius. 1989. Effet du semis direct de cultures fourragères sur la compaction de loams sableux fins. Canadex 517.120. Agriculture Canada, Direction générale des communications, Ottawa, ON.

Carter, M.R. et D.A. Rennie. 1984. Crop utilization of placed and broadcast 15N-urea fertilizer under zero and conventional tillage. *Canadian Journal of Soil Science* 64:563-570.

Carter, O. 1969. The effects of fertilizers on germination and establishment of pasture and fodder crops. *Journal of Wool Technology and Sheep Breeding*, July: 69-75.

Choudhary, M.A. et C.J. Baker. 1980. Physical effects of drilling equipment on undisturbed soils. I. Wheat seedling emergence under controlled climates. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 23:489-496.

Clement, C.R. 1967. The growth of cereals under soil conditions characteristic of an unstable tilth. *Plant and Soil* 20:265-270.

Collis-George, N. et M.D. Melville. 1978. Water absorption by swelling seeds. II. Surface condensation boundary condition. *Australian Journal of Soil Research* 16:291-310.

Collis-George, N. et P. Yoganathan. 1985. The effect of soil strength on germination of emergence of wheat (*Triticum aestivum* L.). 1. Low shear strength conditions. *Australian Journal of Soil Research* 23:577-587.

Copeman, G.J.F. et H.W. Roberts. 1960. The development of surface seeding. *Journal of the British Grassland Society* 15:163-168.

Court, M.N., R.C. Stephen et J.S. Waid. 1964. Toxicity as a cause of the inefficiency of urea as a fertilizer. I. Review. *Journal of Soil Science* 15:42-48.

CPVQ. 1989. *Plantes Fourragères: Culture*, 2e éd., 80-82. Conseil des productions végétales du Québec, Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec, C.P. 1693, Québec, QC.

CREAQ. 1992. Agdex 740/825. Comité des références économiques en agriculture du Québec, Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec, C.P. 1693, Québec, QC.

Curtis, D.S. 1949. Nitrite injury on avocado and citrus seedling in nutrient solutions. *Soil Science* 68:441-450.

Douglas, J.L., M.G. Jarvis, K.R. Howse et M.J. Goss. 1986. Structure of a silty soil in relation to management. *Journal of Soil Science* 37:137-151.

Ehlers, W. 1975. Observation on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soils. *Soil Science* 119:242-249.

Feather, J.T., C.O. Qualset et H.E. Vogt. 1968. Planting depth for short-saturated wheat varieties. *California Agriculture* 22(9):12-14.

Follett, R.H., L.S. Murphy et R.L. Donahue. 1981. Applying fertilizers and soil amendments. Dans *Fertilizers and Soil Amendments*, 302-392. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.

Foster, R.K. 1991. Preseeding tillage and postseeding packing effects on spring wheat growth in a semiarid environment. *Canadian Journal of Plant Science* 71:1155-1159.

Francis, G.S., K.C. Cameron et R.S. Swift. 1985. Soil physics conditions after six years of direct drilling or conventional cultivation on a silt loam soil in New Zealand. *Australian Journal of Soil Research* 25:517-529.

Fribourg, H.A. et R.H. Strand. 1973. Influence of seeding date and methods on establishment of small-seeded legumes. *Agronomy Journal* 65:804-807.

Gervais, P. 1978. Les doses de semis de la luzerne. Dans *Compte rendu du colloque Luzerne*, 25-29. Québec, QC, 14 et 15 février.

Gill, J. 1992. Travail du sol en céréales continues. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec, QC.

Gist, R. et G.O. Mott. 1957. Some effects of light intensity, temperature, and soil moisture on the growth of alfalfa, red clover and birdsfoot trefoil seedlings. *Agronomy Journal* 49: 33-36.

Groya, F.L. et C.C. Sheaffer. 1981. Establishment of sod-seeded alfalfa at various levels of soil moisture and grass competition. Agronomy Journal 73:560-565.

Gul, A. et R.E. Allan. 1976. Stand establishment of wheat lines under different levels of water potential. *Crop Science* 16:611-615.

Hadas, A. et D. Russo. 1974. Water uptake by seeds as affected by water stress, capillary conductivity, and seed-soil water contact. II, Analysis of experimental data. *Agronomy Journal* 66:647-652.

Hanks, R.J. et F.C. Thorp. 1956. Seedling emergence of wheat as related to soil moisture content, bulk density, oxygen diffusion and crust strength. *Soil Science Society of America Journal* 20:307-310.

Heller, R., R. Esnault et C. Lance. 1989. *Physiologie végétale. 2. Développement*, 4e éd. Paris, France: Masson.

Hillel, D. 1972. Soil moisture and seed germination. Dans *Water Deficits and Plant Growth*, ed. T.T. Kozlowski, Vol. III:65-89. New York, NY: Academic Press.

Hipp, B.W. 1970. Phosphorus requirements for tomatoes as influenced by placement. *Agronomy Journal* 62:203-206.

Hoveland, C.S., J.H. Bouton, J.F. Newton et G.V. Calvert. 1987. Alfalfa establishment as affected by land preparation and seeding rate. Research Report No 519. University of Georgia Agricultural Experiment Station, Athens, GA.

Johnson, W.H. et J.E. Henry. 1964. Influence of simulated row compaction on seedling emergence and soil drying rates. *Transactions of the ASAE* 7:252-255.

King, J.R. et C. Bladen. 1992. Effect of seeding depth and soil crusting on grass germination and establishment. *Forage Focus* 5:8.

Kitur, B.K., M.S. Smith, R.L. Blevins et W.W. Frye. 1984. Rate of 15N-depleted ammonium nitrate applied to no-tillage and conventional tillage corn. *Agronomy Journal* 76:240-242.

Klepper, B., E. Rasmussen et W. Rickman. 1983. Fertilizer placement for cereal root access. *Journal of Soil and Water Conservation* 38: 250-252.

Kolp, B.J., D.G. Miller, G.A Pratt et S. Hwang. 1967. Relation of coleoptile structure to coleoptile strength and seedling emergence under compacted soil conditions in six varieties of winter wheat. *Crop Science* 7:413-417.

Langille, J.E. et F.S. Warren. 1964. Influence of seeding on establishment and persistance of species and yield of forage mixture. *Canadian Journal of Plant Science* 44:78-84.

Lawton, K. et J.F. Davis. 1960. Influence of fertilizer analysis and placement on the emergence, growth, and nutrient absorption by wheat seedlings in a greenhouse. *Agronomy Journal* 52:326-328.

Lawton, K. et J.A. Vomocil. 1954. The dissolution and migration of phosphorus from granular superphosphate in some Michigan soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 18:26-32.

Lindstrom, M.J., R.I. Papendick et F.E. Koehler. 1976. A model to predict winter wheat emergence as affected by soil temperature, water potential, and depth of planting. *Agronomy Journal* 68:137-141.

Lindwall, C.W. et D.C. Erbach. 1983. Planter effects on soil properties and crop emergence. ASAE Paper No 83-1519. St-Joseph, MI: ASAE.

Mannering, J.V., D.L. Shertz et B.A. Julian. 1987. Overview of conservation tillage. Dans *Effects of Conservation Tillage on Ground Water Quality-Nitrates and Pesticides*, eds. T.J. Logan, J.M. Davidson, J.M. Baker et M.R. Overcash, 3-17. Chelsea, MI:Lewis Publishers Inc.

Mayer, A.M. et A. Poljakoff-Mayber. 1982. *The Germination of Seeds*, 3ème éd. New York, NY:Pergamon Press.

McCalla, T.M. et J.C. Russel. 1943. Nitrate production as affected by grain-crop residues on the surface of the soil. Research Bulletin 131. Nebraska Agricultural Experiment Station, Lincoln, NE.

McConnell, S.G., D.H. Sander et G.A. Peterson. 1986. Effect of fertilizer placement depth on winter wheat yield. *Soil Science Society of America Journal* 50:148-153.

McGinnies, W.J. 1960. Effects of moisture stress and temperature on germination of six range grasses. *Agronomy Journal* 52:159-162.

McGinnies, W.J. 1973. Effects of date of planting on the establishment of three range grasses. *Agronomy Journal* 65:120-123.

Mengel, D.B., D.W. Nelson et D.M. Huber. 1982. Placement of nitrogen fertilizers for no-till and conventional till corn. *Agronomy Journal* 74:515-518.

Moldenhauer, W.M., W.G. Lovely, N.P. Swanson et H.D. Currence. 1971. Effect of row grades and tillage systems on soil and water losses. *Journal of Soil and Water Conservation* 26:193-195.

Monreal, C., W.B. McGill et M. Nyborg. 1986. Spatial heterogeneity of substrates: effect on hydrolyse, immobilisation and nitrification of urea N. *Canadian Journal of Soil Science* 66:499-511.

Moody, J.E., J.N. Jones, Jr. et J.H. Lillard. 1963. Influence of straw mulch on soil moisture, soil temperature and the growth of corn. *Soil Science Society of America Proceedings* 27:700-703.

Morisson, J.E. 1989. Factors affecting plant establishment with a no-tillage planter opener. *Applied Engineering in Agriculture* 5:316-318.

Mueller-Warrant, G.W. et D.W. Koch. 1980. Establishment of alfalfa by conventional and minimum-tillage seeding techniques in a quackgrass dominant sward. *Agronomy Journal* 72:884-889.

Murphy, L. 1983. Fertilizer placement: a primer. *Journal of Soil and Water Conservation* 38: 246-249.

Murphy, R.P. et A.C. Arny. 1939. The emergence of grass and legume seedlings planted at different depths in five soil types. *Journal of American Society of Agronomy* 26:17-28.

Naylor, R.E. et A.F. Abdalla. 1982. Variation in germination behaviour. *Seed Science and Technology* 10:67-76.

Niping L. et J.H. Edwards. 1986. Injection of chemical amendment into subsoil: growth and nutrient uptake by wheat. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 17:1055-1069.

Noori-Fard, F. et F.E. Bolton. 1981. The effect of water injection and starter fertilizer on stand establishment and components of yield. Columbia Basin Agricultural Research, Special Report 623. Agricultural Experiment Station, Oregon State University, Corvallis, OR en collaboration avec USDA, Corvallis, OR.

Olson, R.A., A.F. Dreier, G.W. Lowery et A.D. Flowerday. 1956. Availability of phosphate carriers to small grains and subsequent clover in relation to: 1. Nature of soil and method of placement. *Agronomy Journal* 48:106-109.

PAMI. 1987. Haybuster 107 no-till grain drill. Evaluation Report 487. Prairie Agricultural Machinery Institute, Humboldt, SK.

Pearson, C.H. et M.B. Kirkham. 1980. Osmotic potential of wheat grown with fertilizer placed in strips or broadcasted. *Fertilizer Research* 1:227-234.

Penman, H.L. 1940. Gas and vapour movement in the soil. I. The diffusion of vapours through porous solids. *The Journal of Agricultural Science* 30:437-462.

Peterson, G.A., D.H. Sander, P.H. Grabouski et M.L. Hooker. 1981. A new look at row and broadcast phosphate recommendations for winter wheat. *Agronomy Journal* 73:13-17.

Prummel, J. 1956. Placement of fertilizers. Congrès de la Science du sol, 6ème, Paris. IV, 25:167-171. London, UK: International Society of Soil Science.

Randall, G.W. et R.G. Hoeft. 1988. Placement methods for improved efficiency of P and K fertilizers: a review. *Journal of Production Agriculture* 1:70-79.

Rasmussen, P.E., D.E. Wilkins et R.W. Rickman. 1980. Effect of starter fertilizer solutions on wheat emergence, stands, and fall growth. Colombia Basin Agricultural Research, Special report 571. Agricultural Experiment Station, Oregon State University, Corvallis, OR en collaboration avec USDA, Corvallis, OR.

Rice, C.W. et M.S. Smith. 1984. Short-term immobilization of fertilizer nitrogen at the surface of no-till and plowed soils. *Soil Science Society of America Journal* 48:295-297.

Rudd, C.L. et N.J. Barrows. 1973. The effectiveness of several methods of applying superphosphate on yield response by wheat. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 13:430-433.

Russell, E.W. 1973. *Soil Conditions and Plant Growth*, 10ème ed. London, UK: Longman.

Russell, R.S. et F.B. Ellis. 1968. Estimation of the distribution of plant roots in soil. *Nature* 217:582-583.

Schmid, A.R. et O.E. Rud. 1952. Seeding methods and your crops. *Minnesota Farm and Home Science* 9:3-10.

Schneider, E.C. et S.C. Gupta. 1985. Corn emergence as influenced by soil temperature, matrix potential, and aggre-

gate size distribution. *Soil Science Society of America Journal* 49:415-422.

School of Agriculture - Aberdeen. 1980. Ryegrass establishment in direct drillings. Dans *Research Investigation and Field Trials 1979-1980*, 79-80. Aberdeen, Scotland: The College.

Sepaskhah, A.R. et E. Raessi Ardekani. 1978. Effect of soil matrix potential and seeding depth on emergence of barley. *Agronomy Journal* 70:728-731.

Shiel, R.S., S. Holburn et M.A. Adey. 1987. The influence of aggregate size and drainage potential on germination of barley seeds in flooded soil. *Plant and Soil* 101:115-121.

Smith, D. 1981. Seedling establishment of legumes and grasses. Dans *Forage Management in the North*, 3ème ed., 15-29. Dubuque, IA: Kendall/Hunt.

Stout, B.A., W.F. Buchele et F.W. Snyder. 1961. Effect of soil compaction on seedling emergence under simulated field conditions. *Agricultural Engineering* 12:68-71, 87.

Sund, J.M., G.P. Barrington et J.M. Scholl. 1966. Methods and depth of sowing forage grasses and legumes. Dans *Proceedings of the 10th International Grassland Congress (Finland)* 56:319-322. Leipzig, Finland.

Taylor, T.H., E.M. Smith et W.C. Templeton, Jr. 1969. Use of minimum tillage and herbicide for establishing legumes in Kentucky bluegrass (*Poa Pratensis* L.) swards. *Agronomy Journal* 61:761-766.

Tesar, M.B., K. Lawton et B. Kawin. 1954. Comparison of band seeding and other methods of seeding legumes. *Agronomy Journal* 46:189-194.

Tessier, S., G.M. Hyde, R.I. Papendick et K.E. Saxton. 1991a. No-till effects on seed zone properties and wheat emergence. *Transactions of the ASAE* 34:733-739

Tessier, S., K.E. Saxton, G.M. Hyde et R.I. Papendick. 1988. Measurement of the physical properties of the soil seed environment. CSAE Paper No. 88-215. Saskatoon, SK: CSAE.

Tessier, S., K.E. Saxton, G.M. Hyde et R.I. Papendick. 1990. Seed row compaction and crust meter. *Transactions of the ASAE* 33:91-94.

Tessier, S., K.E. Saxton, R.I. Papendick et G.M. Hyde. 1991b. Zero-tillage furrow opener effects on seed environment and wheat emergence. *Soil and Tillage Research* 21:347-360.

Thibaudeau, S. 1990. Effets de pratiques culturales réduites sur l'humidité et la température du sol, ainsi que sur la croissance du maïs-grain cultivé sur deux types de sol. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec, QC.

Toews, W.H. et R.J. Soper. 1978. Effects of nitrogen source, method of seed placement and soil type on seedling emergence and barley crop yield. *Canadian Journal of Soil Science* 58:311-320.

Tomar, J.S. et R.J. Soper. 1981. Rate of tagged urea N in the field with different methods of N and organic matter placement. *Agronomy Journal* 73:991-995.

Townsend, S.E. et W.J. McGinnies. 1972. Establishment of nine forage legumes. *Agronomy Journal* 64:699-702.

Treidl R. A. 1978. Manuel de la météorologie agricole et forestière. Pêche et environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, Ottawa, ON.

Triplett, G.B., Jr et M.B. Tesar. 1960. Effects of compaction, depth of planting, and soil moisture tension on seedling emergence of alfalfa. *Agronomy Journal* 52:681-684.

Unger, P.W. 1984. Tillage effects on surface soil physical conditions and sorghum emergence. *Soil Science Society of America Journal* 48:1423-1432.

USDA. 1989. The second RCA appraisal, soil, water, and related ressources on non-federal land in the United States: analysis of conditions and trends. Washington, DC: Government Printing Office.

Van Doren, D.M. et R.R. Allmaras. 1978. Effect of residue management practices on soil physical environment, microclimate, and plant growth. Dans *Crop Residue Management System*, ed. W.R. Oschwald, 43-48. ASA Special Publication 31. Madison, WI: ASA, CSSA et SSSA.

Van Wijk, W.R., W.E. Larson et W.C. Burrows. 1959. Soil temperature and early growth of corn from mulched and unmulched soil. *Soil Science Society of America Proceedings* 23:424-428.

Wanjura, D.F. et D.R. Buxton. 1972. Hypocotyl and radicle elongation of cotton as affected by soil environment. *Agronomy Journal* 64:431-434.

Ward, J. et C.F. Shaykewich. 1972. Water absorption by wheat seeds as influenced by hydraulic properties of soil. *Canadian Journal of Soil Science* 52:99-105.

Wilkins, D.E., B.L. Klepper et P.E. Rasmussen. 1988. Management of grain stubble for conservation tillage systems. *Soil and Tillage Research* 12:25-35.

Wilson, A.M., D.E. Wondercheck et C.J. Goebel. 1974. Responses of range grass seeds to winter environments. *Journal of Range Management* 27:120-122.

Wischmeier, W.H. et D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation on planting. Agriculture Handbook No 237. Washington, DC: USDA.

Wolf, D.D. et K.L. Edmisten. 1989. Late season alfalfa planting: conventional vs no-till methods. *Crop Science* 29:170-175.

Young, J.A., B.L. Kay, H. George et R.A. Evans. 1980. Germination of three species of Atriplex. *Agronomy Journal* 72:705-709.