

Design et évaluation d'un système d'attelage déporté pour charrue portée

N. RAVONISON¹, S. TESSIER², C. LAGUË¹, N.B. McLAUGHLIN³ et C. PLOUFFE¹

¹Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Québec, QC, Canada G1K 7P4; ²Manitoba Agriculture, Winnipeg, MB, Canada R3T 5S6; and ³Eastern Cereal and Oilseed Research Center, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, ON, Canada K1A 0C6. Reçu le 2 décembre 1996; accepte le 20 avril 1998.

Ravonison, N., Tessier, S., Laguë, C., McLaughlin, N.B. et Plouffe, C. 1998. **Design et évaluation d'un système d'attelage déporté pour charrue portée.** Can. Agric. Eng. 40:097-103. La technique conventionnelle de labour avec une charrue portée présente l'inconvénient d'accélérer la formation de la semelle de labour. Une alternative qui consiste à labourer hors-raie, c'est-à-dire en ne maintenant aucune des roues du tracteur dans la raie, devrait permettre de réduire la gravité de ce problème. L'adoption de cette technique avec une charrue portée nécessite une certaine modification du système d'attelage de la charrue au tracteur. On a alors conçu un système d'attelage, qui inséré entre le tracteur et la charrue, permet un déport latéral de 500 à 900 mm par rapport à la position normale de la charrue vis-à-vis du tracteur. Avec cette position déportée, le tracteur peut circuler entièrement hors-raie. Des essais expérimentaux sur de l'argile Sainte-Rosalie ont été effectués dans le but d'évaluer certains paramètres liés à la performance de la charrue équipée d'un tel système. Ces essais ont permis de constater que l'utilisation de l'attelage déporté n'a causé aucune dépense énergétique supplémentaire. Avec ou sans attelage, l'effort de tirage spécifique, le glissement et la consommation en carburant demeurent respectivement autour de 100 kN/m², 6 % et 23 L/h. La stabilité générale de la charrue n'a pas été affectée significativement par l'utilisation du système. Par contre, l'utilisation du système d'attelage déporté a augmenté la charge verticale appliquée par la charrue sur l'essieu arrière du tracteur de l'ordre de 6 kN, et en plus elle a rendu plus délicat le réglage de la profondeur de labour.

The common plowing technique with a mounted moldboard plow can often generate a plow pan. Plowing with all of the tractor wheels out of the plow furrow should decrease the occurrence of this problem. A hitching device to be inserted between the tractor and the plow was designed to allow the implement to be offset laterally by 500 to 900 mm from its usual location with respect to the tractor. Field trials were carried out to check some performance parameters using this new hitch. Energy requirements for this new hitch were the same as for the conventional hitch. Specific pull, slipping and fuel consumption remained at 100 kN/m², 6 % and 23 L/h respectively. The general stability of the moldboard plow was not affected by the use of the system. However, the use of the shifted hitching system increased the vertical load applied to the rear axle by 6 kN and made it more difficult to adjust the plowing depth.

INTRODUCTION

Le labour avec une charrue à versoir est une technique de travail primaire de préparation du lit de semence couramment utilisée qui vise deux objectifs principaux : l'ameublissement du sol et l'enfouissement des mauvaises herbes. Cependant, le labour répété présente des effets néfastes sur la structure du sol, notamment en causant la formation d'une couche de sol compacte d'une cinquantaine de millimètre d'épaisseur,

localisée à une profondeur correspondant à peu près à la profondeur de labour. Ce phénomène, mieux connu sous le nom de semelle de labour, a été identifié depuis longtemps (Chaplin et al. 1986) et il est plus accentué sur un champ labouré avec une charrue portée. Sa présence cause une certaine réduction de la perméabilité du sol à l'eau et à l'air tout en rendant plus difficile le développement en profondeur des racines, ce qui peut entraîner des pertes de rendement (Håkansson et al. 1988; Raghavan et McKyes 1990).

Cependant, malgré ses effets néfastes sur la structure du sol, un très grand nombre d'agriculteurs, un peu partout dans le monde, continuent de pratiquer le labour, dont la plupart avec une charrue portée. L'interaction entre les différents effets du labour constitue un phénomène très complexe et dans la plupart des cas, surtout à moyen terme, les agriculteurs privilégient les effets bénéfiques du labour par rapport à ses effets néfastes. Les récentes études comparatives sur le rendement obtenu en labourant par rapport à celui obtenu en procédant par travail minimum ne permettaient pas de conclure en faveur du travail minimum (Caneill et Boidet 1991; Logan et al. 1991).

Gaultney et al. (1982) ont lié le phénomène de semelle de labour à l'action du soc sur le sol. Selon eux, le soc compacte le sol de deux façons : par l'application de contraintes verticales dues au poids de la charrue et du sol et de contraintes de cisaillement causées par le frottement du soc sur le sol. Barnes et Maddus (1991), en mesurant la résistance à la pénétration du sol à différents endroits d'un champ fraîchement travaillé, ont constaté que le compactage est le plus intense là où les roues du tracteur ont circulé.

Un grand nombre d'agriculteurs au Québec et ailleurs dans les pays industrialisés utilisent des charrues portées munies de trois à cinq versoirs. La technique conventionnelle de labour avec une charrue portée consiste à rouler avec les deux roues du tracteur situées d'un même côté dans la raie ouverte par le passage précédent de la charrue. Cette technique présente cependant l'inconvénient d'entraîner un compactage intensif du sol dans le fond de la raie, donc la formation d'une semelle de labour. Après avoir été lissé par le soc, le sol est compacté par le passage des roues du tracteur.

Une alternative à cette pratique consiste à labourer hors-raie, c'est-à-dire en ne maintenant aucune des roues du tracteur dans la raie ouverte. Le rôle joué par les roues du tracteur roulant dans la raie est de bénéficier de l'appui de la muraille verticale de la raie pour guider l'avancement du tracteur. En

privant le tracteur des effets stabilisateurs de la muraille, le labour hors-raie rend plus difficile la conduite du tracteur, ce qui exige une plus grande concentration de la part de l'opérateur avec des risques de fatigue et de baisse du niveau de qualité de labour (Barthélémy et al. 1992).

Le labour hors-raie est une pratique courante avec les charrues traînées munies de 6 à 12 versoirs. L'utilisation de ce type de charrue nécessite un tracteur de grande puissance et est généralement limitée aux grandes fermes. La majorité des agriculteurs utilisent des tracteurs d'une puissance allant de 80 à 100 kW qui ne peuvent opérer que des charrues portées ou semi-portées.

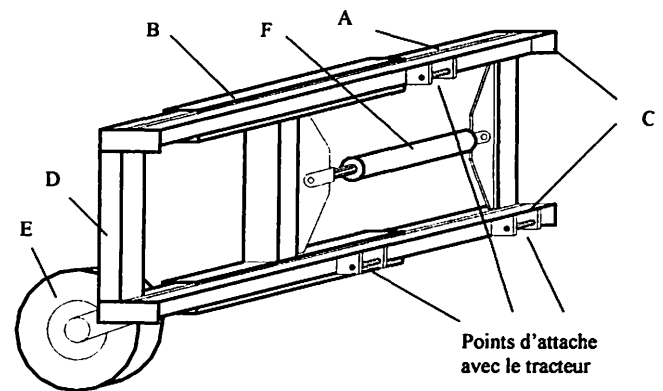
Pour labourer hors-raie avec une charrue portée, il faut en premier lieu apporter une modification au design de l'attelage de la charrue pour déporter la charrue par rapport au tracteur, rendant ainsi possible la conduite avec aucune des roues dans la raie. Pour faciliter l'adoption de cette technique par les agriculteurs, il est plus intéressant de créer un système mécanique qu'on insère entre le tracteur et la charrue pour obtenir cette position déportée. Au lieu de changer complètement de charrue, ils n'auront qu'à faire l'acquisition de ce système d'attelage ce qui sera beaucoup plus économique. L'autre grand avantage d'un tel système est la possibilité de passer facilement du labour hors-raie au labour conventionnel avec la même charrue.

Lors de la conception du système, il faut également chercher à résoudre les problèmes liés à la conduite du tracteur travaillant hors-raie. Différents systèmes d'aide à la conduite du tracteur ont été développés afin de maintenir sa trajectoire parallèle à l'orientation de la raie ouverte (Julian 1971 ; Warner et Harries 1972; Hilton et Chestney 1973) et ainsi, faciliter la tâche du conducteur. Mis à part leur coût généralement élevé, ces différents systèmes présentent pour la plupart, l'inconvénient de présenter un temps de réaction assez long à cause de leur grande inertie. Différents systèmes de guidage permettent de corriger l'alignement des outils sans intervenir sur la conduite du tracteur (Suggs et al. 1972). À cause de l'importance de la force requise pour déplacer latéralement une charrue, l'idée d'adapter un tel dispositif à une charrue n'est pas applicable pratiquement. Une solution alternative consiste à utiliser la muraille verticale de la raie ouverte pour diriger la charrue en y montant une roue latérale à l'avant pour guider la charrue de la même façon que l'on guide le tracteur en labour conventionnel. C'est ce dernier concept qui a été utilisé pour le design du système d'attelage déporté.

Le principal objectif de ce travail était ainsi de concevoir et d'évaluer un système d'attelage permettant de labourer hors-raie avec une charrue portée. L'évaluation a consisté à comparer le comportement de la charrue équipée du système d'attelage déporté à celui d'une charrue conventionnelle en considérant les trois critères suivants : les aspects énergétiques, la stabilité du tracteur et la stabilité de la charrue.

SYSTÈME D'ATTELAGE DÉPORTÉ

Le système d'attelage déporté est représenté à la Fig. 1. Le système est fixé à l'attelage trois points arrière du tracteur via deux cornières (C). Chacune des cornières est soudée à ses extrémités à deux tubes carrés (A) sur lesquels des tubes (B)



- A: Tubes carrés de 101,6 x 101,6 mm, de 2 m de longueur et de 7,9 mm d'épaisseur
- B: Tubes carrés de 127 x 127 mm, de 1 m de longueur et de 9,5 mm d'épaisseur
- C: Cornières de 101,6 x 101,6 mm, de 2 m de longueur et de 19,1 mm d'épaisseur
- D: Tubes carrés de 101,6 x 101,6 mm, de 0,6 m de longueur et de 7,9 mm d'épaisseur
- E: Roue pour le guidage de l'avancement du système d'attelage déporté
- F: Vérin hydraulique permettant de faire varier le déport latéral de 500 à 900 mm

Fig. 1. Représentation schématique du système d'attelage déporté.

peuvent coulisser. Les attaches destinées à la charrue sont fixées sur les tubes B et sont du type "attache rapide", ce qui présente l'avantage d'un attelage plus compact et plus pratique pour l'utilisateur. Ce système d'attelage déporté ne déplace la charrue vers l'arrière que de 300 mm par rapport à sa position avec un attelage conventionnel. Le dispositif est dimensionné pour les attelages de catégorie II, mais il s'adapte également avec la plupart des attelages de catégorie III (ASAE 1995).

Le vérin hydraulique (F) qui est branché sur le tracteur et qui peut être contrôlé par son opérateur permet de faire varier le déport latéral de 500 à 900 mm. Cela permet d'accommoder différentes largeurs de pneumatiques ainsi que de largeurs de voies des tracteurs, tout en conservant une distance minimale de 100 mm entre la face extérieure du pneu arrière droit et le bord de la raie ouverte. Le guidage de la charrue est assuré par la roue (E) qui est fixée au tube inférieur (B). Elle conserve toujours la même position par rapport au premier versoir, soit 406 mm, quel que soit le déport de la charrue et demeure appuyée à la muraille pendant le labour en y transmettant une partie de la poussée latérale. Cette roue pivote librement autour de l'axe horizontal qui la supporte et ne transmet ainsi aucune force verticale entre la charrue et le sol. Ainsi, elle ne risque pas de compacter le fond de la raie et elle peut surmonter les obstacles, tels les cailloux, sans déstabiliser la charrue, en roulant par dessus. Le système d'attelage déporté est fabriqué en acier standard (limite d'élasticité de 300 MPa) et pèse environ 3,7 kN.

ÉVALUATION DU SYSTÈME

Plan expérimental

Les deux traitements (attelage déporté et attelage conventionnel) ont utilisé la même charrue. Pour chaque traitement, trois profondeurs de labour cibles furent essayées. Chaque profondeur de labour cible correspondait à une position déterminée de la roue de réglage de la profondeur de labour située à l'arrière de la charrue : le réglage P1 correspondait à une profondeur de labour cible de 100 mm, P2 à 150 mm et P3 à 200 mm. Il s'agissait donc d'une expérience factorielle comportant six combinaisons de traitements. Le plan expérimental présentait quatre blocs à l'intérieur desquels les six combinaisons étaient réparties de façon aléatoire. Chaque parcelle de 25 m de long comportait 10 m de zone tampon où l'opérateur plaçait la charrue en position et accélérail jusqu'à l'obtention d'une vitesse de rotation du moteur de 2000 tours par minute et d'une vitesse cible de 6 km/h. À la sortie de cette zone tampon, les différents paramètres liés au labour atteignaient leur état stable et la prise de données se réalisait sur le deuxième tronçon de 15 m de longueur.

Description du site

L'expérience eut lieu le 14 octobre 1995 à L'Ange-Gardien (Québec) sur une argile de la série Sainte-Rosalie (Lajoie 1962) en prairie de luzerne avec des tiges allant jusqu'à 400 mm. Les essais granulométriques effectués sur des échantillons provenant de ce champ ont donné les résultats suivants : 55% d'argile, 23% de sable et 3,78% de matière organique. La teneur en eau et la masse volumique apparente ont été mesurées à l'aide d'une sonde à neutrons (modèle 3411, Troxler International Ltd., P.O. Box 12057, Research Triangle Park, NC) sur chaque parcelle à tous les 50 mm, jusqu'à une profondeur de 250 mm. La masse volumique apparente sèche a été calculée à partir des coefficients de calibration obtenus par Culley et McGovern (1990). La teneur en eau et la densité apparente sèche à différentes profondeurs n'ont pas varié significativement entre les différentes parcelles. La teneur en eau moyenne sur les premiers 250 mm d'épaisseur était de 0,33 m³/m³ (écart-type de 0,06 m³/m³) et la masse volumique apparente sèche atteignait 1,1 Mg/m³ (écart-type de 0,2 Mg/m³).

Description des équipements

Une charrue portée à quatre versoirs (modèle MZ, Kverneland Inc. 1200, rue Rocheleau Drummondville, QC, J2C 5Y3) a été utilisée pour l'expérience. Les versoirs de type hélicoïdal (modèle 053264), avaient une largeur de travail de 406 mm. Les traitements "attelage déporté" ont été obtenus en installant l'attelage déporté entre la charrue et le tracteur pour avoir un déport latéral de 900 mm.

Un tracteur instrumenté de 97 kW (McLaughlin et al. 1993) a été utilisé pour opérer la charrue et enregistrer les données. Ce tracteur est équipé de nombreux capteurs mesurant les différents couples et forces exercés sur l'attelage trois points et sur le système de transmission de puissance du tracteur. En combinant les données fournies par ces capteurs aux données relatives à la géométrie de l'attelage trois points, on peut calculer les trois composantes principales de la force exercée par la charrue sur le tracteur. Ces données étaient mesurées à une fréquence de 100 Hz. La vitesse réelle d'avancement était

mesurée par deux radars et était comparée à la vitesse de rotation des roues motrices afin de calculer le glissement du tracteur. Le tracteur était également doté d'un débitmètre afin de mesurer sa consommation en carburant.

En ce qui concerne la profondeur de labour, un capteur de position linéaire avec un déplacement maximal de 250 mm a été utilisé (Plouffe et al. 1995b). Il était fixé entre l'age et un bras muni à son bout d'un patin qui était maintenu appuyé au sol par un ressort pour suivre le relief du sol. La calibration de ce capteur a consisté à prendre des mesures pour différentes profondeurs de labour et de comparer les valeurs ainsi lues aux valeurs mesurées. Cette calibration a été effectuée avant le début de l'expérience dans une section inutilisée du champ où la couverture végétale est similaire à celle des parcelles.

Avant de changer de traitement (profondeur de labour ou configuration de la charrue), des valeurs à vide des forces mesurées par les différents capteurs furent prises avec la charrue détachée. Les valeurs ainsi obtenues, appelées valeurs zéros, ont été utilisées pour corriger les valeurs prises durant le labour.

Critères d'évaluation

Les critères considérés pour évaluer la performance du système d'attelage déporté étaient : les aspects énergétiques, la stabilité du tracteur et la stabilité de la charrue. Les paramètres utilisés pour estimer l'éventuelle variation du besoin énergétique causée par l'utilisation de l'attelage déporté étaient : 1) l'effort de tirage spécifique défini comme le rapport de la force longitudinale requise à la surface transversale travaillée (produit de la largeur à la profondeur de labour et au nombre de versoirs) ; 2) le glissement qui est le rapport de la vitesse d'avancement réelle à la vitesse d'avancement théorique calculée à partir de la vitesse de rotation des roues motrices ; et 3) la consommation en carburant.

Le critère de stabilité du tracteur fut la stabilité verticale. L'application d'une charge verticale trop élevée à l'arrière du tracteur peut entraîner une perte de contrôle du tracteur durant le labour due au poids trop faible qui s'exerce sur l'essieu avant. Le paramètre à utiliser pour évaluer ce critère est donc l'importance de la force verticale appliquée par la charrue sur l'essieu arrière du tracteur.

En ce qui concerne la charrue, il faut considérer la stabilité latérale et l'uniformité de la profondeur de labour. La stabilité latérale est assurée par l'absence de déviation latérale importante de la trajectoire de la charrue par rapport au tracteur. L'uniformité de la profondeur de labour est évaluée par le coefficient de variation des données de profondeur de labour enregistrées pour chaque parcelle.

Analyse des données

Les moyennes des données enregistrées sur les parcelles pour chaque paramètre ont fait l'objet d'analyses des variances pour évaluer les différences entre les traitements ainsi que les éventuelles interactions. Ces analyses ont été très souvent complétées par des tests de comparaison multiple des moyennes par la méthode de Duncan (Steel et Torrie 1980). Des analyses de régression ont également été effectuées pour évaluer la relation de certains paramètres avec la profondeur de labour et quelquefois, l'analyse de covariance a été utilisée pour dissocier l'influence de deux ou plusieurs paramètres sur une variable. Le

seuil de signification a été fixé à 0,1 lors de l'interprétation des résultats pour tenir compte des erreurs expérimentales non contrôlées.

RÉSULTATS et DISCUSSIONS

Aspects énergétiques

La composante longitudinale de la force résultante exercée par le sol sur chaque versoir correspond à l'effort de tirage nécessaire pour faire progresser le versoir dans le sol. L'effort de tirage total exercé par le tracteur correspond à la somme de ces forces pour l'ensemble des versoirs.

Les analyses de variances effectuées sur les données d'effort de tirage spécifique et sur le glissement ont permis de conclure que le mode d'attelage de la charrue n'a aucun effet significatif sur ces paramètres. L'effort de tirage spécifique est élevé quand le labour est peu profond (220 kN/m² pour 40 mm de profondeur de labour) et il diminue avec la profondeur de labour jusqu'à ce que cette dernière atteigne 130 mm environ. L'effort de tirage spécifique demeure par la suite stable à environ 100 kN/m² pour des profondeurs de labour supérieures à 130 mm (Fig. 2). Le glissement, quant à lui, demeure toujours à environ 6 %, peu importe le mode d'attelage utilisé. L'analyse de covariance effectuée sur la consommation en carburant, avec la profondeur réelle de labour comme covariable, a confirmé ces résultats : la consommation horaire demeure la même (23 l/h en roulant à 6 km/h) avec ou sans l'attelage déporté. Ces valeurs sont très proches de celles obtenues par Plouffe et al. (1995a) avec une charrue en position conventionnelle travaillant sur une argile de la série de Sainte-Rosalie.

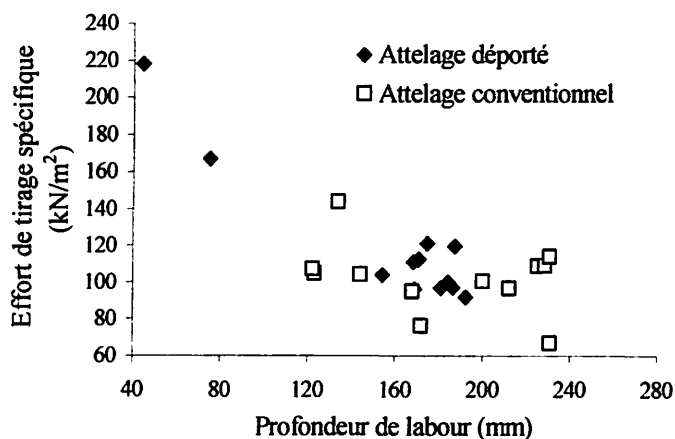


Fig. 2. Efforts de tirage spécifiques obtenus avec une charrue à quatre versoirs hélicoïdaux espacés de 406 mm utilisant un attelage conventionnel et un système d'attelage déporté sur une prairie d'argile Sainte-Rosalie.

Ces résultats étaient prévisibles puisque l'effort de tirage spécifique ne dépend pas de la position de la charrue par rapport au tracteur. On s'attendait cependant à certaines différences en ce qui concerne le glissement, du fait que l'adhérence de la roue motrice dans la raie pouvait être différente de celle à la surface comme l'ont observé Gee-Clough et al. (1977).

Stabilité verticale du tracteur

La composante verticale de l'effort de tirage dépend généralement du poids de la charrue et de la composante verticale de la réaction du sol exercée sur chaque versoir ainsi que sur la roue de profondeur. Elle ne doit pas excéder une certaine limite sinon on peut perdre le contrôle du tracteur par manque d'adhérence des roues directrices. La stabilité verticale du tracteur a donc été évaluée en fonction de l'importance de la charge verticale. L'examen des variations de l'effort vertical en fonction de la profondeur de labour (Fig. 3) a permis de constater que l'utilisation de l'attelage déporté a entraîné un accroissement de l'effort vertical de l'ordre de 6 kN lors du labour.

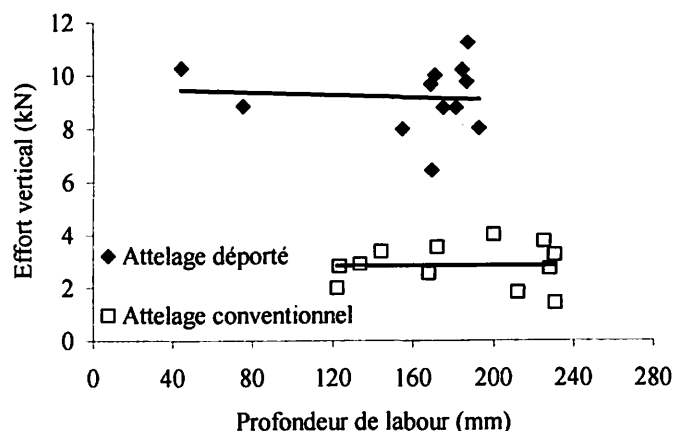


Fig. 3. Forces verticales appliquées par la charrue sur l'essieu arrière du tracteur obtenus avec une charrue à quatre versoirs hélicoïdaux espacés de 406 mm utilisant un attelage conventionnel et un système d'attelage déporté sur une prairie d'argile Sainte-Rosalie.

Cet accroissement de l'effort vertical est dû à la fois au poids propre de l'attelage déporté et à l'élévation de l'inclinaison de la ligne de traction virtuelle de l'ordre de 3° liée à l'utilisation de ce système (Fig. 4). Le point d'application de la résultante des forces sur les bras d'attelage trois points du tracteur est le centre instantané de rotation du système d'attelage, appelé le point d'attelage virtuel. Le tracteur tire la charrue le long d'une ligne de traction virtuelle passant par le point d'attelage virtuel O et le point d'application G de la résultante de toutes les forces qui s'exercent sur la charrue (Fig. 5). La charge verticale appliquée sur l'essieu arrière du tracteur augmente alors avec l'inclinaison de la ligne de traction virtuelle (Bainier et al. 1955).

L'élévation de l'inclinaison de la ligne de traction virtuelle est liée à un léger défaut sur le design du système d'attelage déporté. En effet, les points d'attache des deux bras inférieurs du système d'attelage trois points du tracteur sur l'attelage déporté se trouvent à 72 mm sous le niveau des points d'attache destinés à la barre transversale de l'attelage de la charrue. Ainsi, pour atteindre la même profondeur de labour, les bras inférieurs de l'attelage trois points du tracteur doivent s'incliner davantage ce qui fait déplacer le point d'attelage virtuel d'environ 1 m vers l'arrière, entraînant une élévation de l'inclinaison de la ligne de traction de l'ordre de 3°.

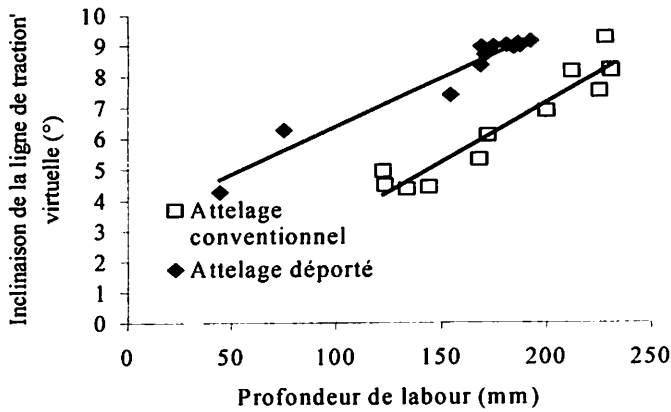
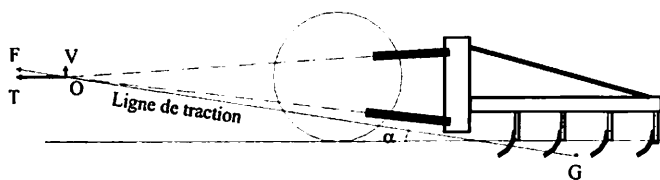


Fig. 4. Comparaison de l'inclinaison de la ligne de traction obtenue avec l'attelage déporté et l'attelage conventionnel.

Ce supplément de charge n'avait cependant pas de conséquence significative sur le déroulement des essais. Aucune amélioration notable de la traction (le glissement est resté le même avec ou sans l'attelage déporté) ni de problème particulier de conduite dû à un éventuel manque d'adhérence des roues directrices n'ont été constatés. Cela est dû au fait que le tracteur instrumenté était suffisamment lourd. Son poids normal d'environ 70 kN fut majoré par le poids d'une nouvelle cabine logeant les instruments de mesure et d'acquisition de données. Avec un tracteur plus standard pour opérer une charrue à quatre versoirs et dont le poids serait beaucoup moindre, on pourrait s'attendre à un problème de conduite par manque d'adhérence des roues directrices. L'utilisation de contrepoids à l'avant du tracteur pourrait alors s'avérer nécessaire.



- O: Point d'attelage virtuel
- G: Point d'application de la force résultante sur la charrue
- OG: Ligne de traction virtuelle
- T: Effort de tirage
- V: Composante verticale de l'effort de tirage

Fig. 5. Vue sur un plan vertical parallèle à l'avancement, montrant le point d'attelage virtuel et la ligne de traction.

Stabilité latérale de la charrue

En général, la composante latérale de la force résultante exercée par le sol sur chaque versoir est équilibrée par la réaction de la muraille verticale de la raie ouverte sur le contre-sep. La charrue ne doit ainsi exercer aucune force latérale sur le tracteur sauf lorsqu'elle est instable. Cette poussée latérale

entraîne le déplacement des deux bras inférieurs de l'attelage trois points du tracteur, jusqu'à ce que l'un d'eux touche le châssis du tracteur. A ce moment, le capteur de force latérale installé sur ce bras enregistre une force positive.

Les Figs. 6 et 7 représentent les variations des forces lues sur les capteurs de force latérale obtenues avec deux traitements utilisant l'attelage déporté. En comportement stable et après la phase d'enfoncement de la charrue dans le sol, les capteurs ont seulement enregistré des forces négatives (figure 6). Aucun des bras n'a touché le châssis et les forces négatives lues sont causées simplement par la flexion des bras due aux forces de traction qui s'y exerçaient.

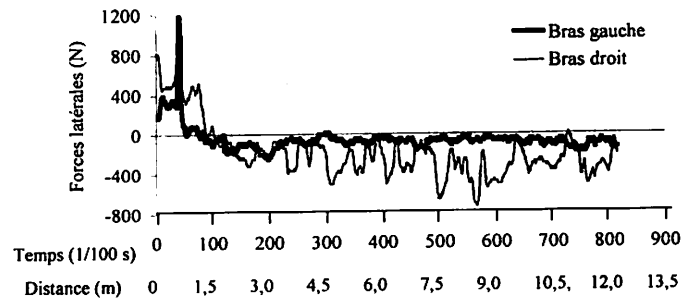


Fig. 6. Évolution temporelle de forces mesurées par les capteurs de force latérale sur les deux bras inférieurs du système d'attelage trois points du tracteur pour une charrue au comportement stable (obtenue avec une charrue équipée du système d'attelage déporté).

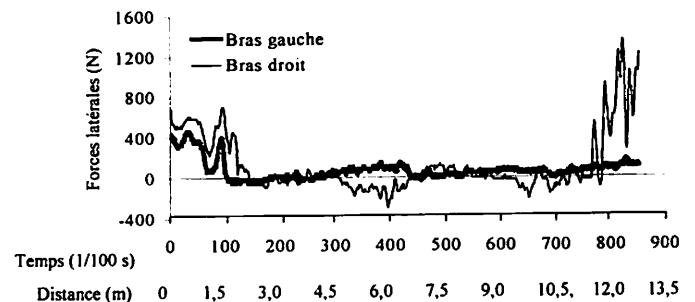


Fig. 7. Évolution temporelle de forces mesurées par les capteurs de force latérale sur les deux bras inférieurs du système d'attelage trois points du tracteur pour une charrue au comportement instable (obtenue avec une charrue équipée du système d'attelage déporté).

La Fig. 7 représente le cas typique d'une charrue avec un comportement instable. Les deux premières secondes correspondent à la phase de la mise en terre de la charrue. Les valeurs positives lues sur le bras gauche ont été causées par une force de compression sur ce bras. Lorsque la profondeur de labour désirée a été atteinte, le bras droit a effleuré à plusieurs reprises le châssis du tracteur. Cette phase a duré environ sept secondes et après ce bras s'est appuyé fortement sur le châssis, ce qui est démontré par les valeurs positives élevées enregistrées après un temps de sept secondes. En examinant les

Tableau I. Profondeur de labour pour les deux attelages.

Profondeur cible (mm)	Attelage déporté			Attelage conventionnel		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Moyenne (mm) ⁽¹⁾	111c	179b	182b	131c	188b	229a
CV ₁ (%) ⁽²⁾	55	6	4	8	11	1
CV ₂ (%) ⁽³⁾	25	8	8	12	10	6

(1) Valeur moyenne sur les quatre blocs de la profondeur de labour (les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à 10% de probabilité).

(2) Coefficient de variation de la profondeur de labour entre les différents blocs.

(3) Valeur moyenne sur les quatre blocs des coefficients de variation de la profondeur de labour à l'intérieur de chaque parcella.

valeurs des autres paramètres enregistrés pendant ce même essai, on a constaté que la charrue atteignait seulement une profondeur de travail d'environ 40 mm. L'appui de la muraille verticale au contre-sep n'était alors pas suffisant et la poussée latérale du sol sur la charrue a engendré un couple horaire que la charrue a transmis au tracteur sous forme de compression sur le bras gauche et de traction sur le bras droit de l'attelage du tracteur.

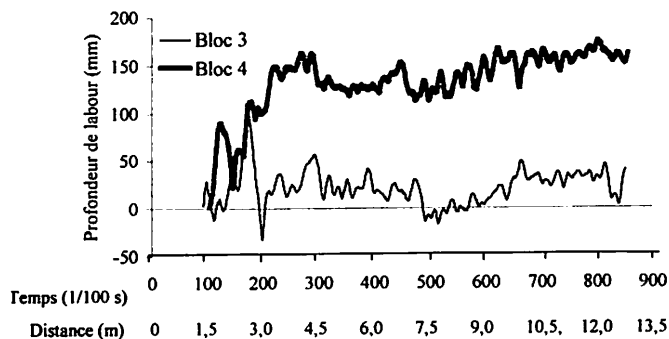


Fig. 8. Évolution temporelle des profondeurs de labour obtenues avec le même traitement (charrue équipée de l'attelage déporté avec le réglage P1 de la profondeur de labour) sur deux blocs différents. Les valeurs négatives indiquent que la charrue sortait du sol.

Le cas d'instabilité latérale fut observé une seule fois avec la charrue en position conventionnelle et également une seule fois avec la charrue déportée. Cela a permis de conclure que l'utilisation de l'attelage déporté ne nuit pas à la stabilité latérale de la charrue.

Uniformité de la profondeur de labour

Il fut difficile de régler la charrue en labourant hors-raie (tableau I). Au réglage P1, le coefficient de variation de la profondeur de labour entre les différents blocs est de 55% soit de 45 à 170 mm. Aussi, la charrue déportée n'a apparemment pas réagi à l'ajustement de la profondeur cible entre P2 et P3,

tandis qu'avec la charrue conventionnelle, le passage de P2 à P3 a entraîné un accroissement de la profondeur de labour de l'ordre de 40 mm.

La variation de la profondeur de labour au cours d'un passage est du même ordre de grandeur avec ou sans l'attelage déporté. L'utilisation de l'attelage déporté n'affecte donc pas l'uniformité de la profondeur de labour.

Ainsi, le problème d'ajustement de profondeur avec l'attelage déporté se produisait au moment où l'on enfonce la charrue dans le sol. L'évolution de la profondeur de labour avec le temps après l'enfoncement de la charrue dans le sol pour le traitement charrue déportée, profondeur P1 et bloc 3 a indiqué que la charrue ne s'enfonçait normalement dans le sol que pendant les deux premières secondes (Fig. 8). Après, la charrue sortait du sol pour s'enfoncer de nouveau mais seulement à très faible profondeur. Au cours du labour, la charrue demeurait à cette profondeur différente de celle du réglage.

Parce que la masse volumique apparente et la teneur en eau du sol n'ont pas varié entre les différentes parcelles, ce problème est lié à l'utilisation de l'attelage déporté. En effet, la force qui fait enfoncer la charrue dans le sol est la résultante de toutes les forces verticales qui sont le poids de la charrue, la réaction verticale du sol sur les versoirs et la roue de profondeur et le support vertical apporté par le tracteur. Avec l'attelage déporté, le tracteur prend une force verticale supplémentaire de 1 à 2 kN à cause de la ligne de traction virtuelle qui est plus inclinée. Ce fait peut ainsi expliquer la difficulté de la charrue à atteindre sa profondeur cible quand on a travaillé avec l'attelage déporté car la force résultante verticale pour l'enfoncer dans le sol n'était pas toujours suffisante.

CONCLUSION

Cette étude a montré que l'utilisation d'un système mécanique simple permettant un déport latéral de la position de la charrue par rapport au tracteur rend possible le labour hors-raie afin de minimiser la formation de la semelle de labour. Les observations recueillies durant et après le labour n'ont pas permis de constater de difficultés particulières en ce qui concerne la conduite générale du tracteur avec un tel système d'attelage. L'utilisation de l'attelage déporté n'a entraîné aucun accroissement significatif sur l'effort de tirage spécifique (de l'ordre de 100 kN/m² avec ou sans l'attelage déporté) sur la consommation en carburant et donc, sur la dépense énergétique. L'importante inclinaison de la ligne de traction, à cause de la charrue qui a été déplacée vers l'extérieur par rapport au tracteur, n'a pas affecté la stabilité latérale de la charrue. Cependant, le poids élevé de l'attelage ainsi qu'un léger défaut sur son design a causé une charge supplémentaire sur l'essieu arrière du tracteur, ce qui pourrait demander l'usage de contrepoids avant pour limiter la perte de contrôle du tracteur et le manque d'adhérence des roues directrices. L'utilisation de l'attelage déporté a également rendu plus difficile le réglage de la profondeur de labour mais non son uniformité. Ce concept d'attelage déporté a donc rendu possible le labour hors-raie avec une charrue portée. Il reste cependant à améliorer le prototype en l'allégeant le plus possible.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le Programme Canadien des Bourses pour la Francophonie (PCBF) pour le financement de ce projet de recherche, Monsieur Jean-Marie Mineault pour la location du champ sur lequel les essais ont été effectués et messieurs Camil Rouleau, Louis Jalbert et Jean-François Bechtold pour la fabrication de l'attelage déporté et pour l'aide qu'ils ont apportée durant les essais.

RÉFÉRENCES

- ASAE. 1995. ASAE Standards 1995. S217.11 - Three-point free-link attachment for hitching implements to agricultural wheel tractors. Dans *ASAE Standards 1995*, 87-89. St. Joseph, MI: ASAE.
- Bainier, R., R.A. Kepner et E.L. Barger. 1955. *Principles of Farm Machinery*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.
- Barnes, D.L. et L.D. Maddus. 1991. Tillage system effects on soil physical properties. Communication de l'ASAE No. 91-2627. St-Joseph, MI: ASAE.
- Barthélémy, P., D. Boisgontier et P. Lajoux. 1992. Choisir les outils de travail du sol. ITCF Céréaliéristes de France, 75116 Paris.
- Caneill, J. et J.M. Bodet. 1991. Simplification du travail du sol et rendement des cultures. Les colloques n° 65. Institut National de la Recherche Agronomique, 75338 Paris.
- Chaplin, J., M. Lueders et D. Rugg. 1986. A study of compaction and crop yields in loamy sand soil after seven years of reduced tillage. *Transactions of the ASAE* 29(2): 389-392.
- Culley, J.L.B. et M.A. McGovern. 1990. Single and dual probe nuclear instruments for determining water contents and bulk densities of a clay loam soil. *Soil & Tillage Research* 16:245-256.
- Gaultney, L., G.W. Krutz, G.C. Steinhardt et J.B. Liljedahl. 1982. Effects of subsoil compaction on corn yields. *Transactions of the ASAE* 25: 563-569.
- Gee-Clough, D., M. McAllister et D.W. Evernden. 1977. Tractive performance of tractor drive tyres. *Journal of Agricultural Engineering Research* 22: 397-404.
- Håkansson, I., W.B. Voorhes et H. Riley. 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil & Tillage Research* 11:239-282.
- Hilton, D.J. et A.W. Chestney. 1973. Low-cost self-steering devices for out-of-furrow ploughing. *The Agricultural Engineer* 28(3):102-106.
- Julian, A.P. 1971. Design and performance of a steering control system for agricultural tractors. *Journal of Agricultural Engineering Research* 16(3):324-336.
- Lajoie, P.G. 1962. Études pédologiques des comtés de Gatineau et de Pontiac, Québec. Ministère de l'agriculture du Canada, Ottawa, ON.
- Logan, T.J., R. Lal et W.A. Dick. 1991. Tillage systems and soil properties in North America. *Soil & Tillage Research* 20:241-270.
- McLaughlin, N.B., L.C. Heslop, D.J. Buckley, G.R. St. Amour, B.A. Compton, A.M. Jones et P. Van Bodegom. 1993. A general purpose tractor instrumentation and data logging system. *Transactions of the ASAE* 36(2):265-273.
- Plouffe, C., N.B. McLaughlin, S. Tessier et C. Laguë. 1995a. Energy requirement and depth stability of two different moldboard plow bottoms in a heavy clay soil. *Canadian Agricultural Engineering* 37(4):279-285.
- Plouffe, C., S. Tessier, N.B. McLaughlin et C. Laguë. 1995b. Plowing performance with two helical plow bottoms at shallow operating depths. *Transaction of the ASAE* 38(6):1677-1683.
- Raghavan, G.S.V. et E. McKyes. 1990. Interactions entre façons culturales, cultures et tassement du sol, en vue de la conservation du sol et d'un rendement optimum. 15^e Colloque de génie rural. Université Laval, Québec, QC.
- Suggs, C.W., B.K. Huang et P.E. Davis. 1972. Automatic steering of field machines. Communication de l'ASAE No. 72-122, St. Joseph, MI:ASAE.
- Steel, R.G.D. et J.H. Torrie. 1980. *Principles and Procedures of Statistics: a Biometrical Approach*, 2nd edition. New York, NY: McGraw-Hill.
- Warner, M.G. et G.O. Harries. 1972. An ultrasonic guidance system for driverless tractors. *Journal of Agricultural Engineering Research* 17:1-9.