

# RÉSULTATS DE 35 ANS DE CULTURE SANS LABOUR À CHANGINS


## II. ÉVOLUTION DES PROPRIÉTÉS DU SOL



# Résultats de 35 ans de culture sans labour à Changins

## II. Evolution des propriétés du sol

P. VULLILOUD<sup>1</sup>, J.-A. NEYROUD<sup>1</sup> et Edith MERCIER, Agroscope RAC Changins, CP 1012, CH-1260 Nyon 1

 E-mail: [pierre.vullioud@rac.admin.ch](mailto:pierre.vullioud@rac.admin.ch)  
Tél. (+41) 22 36 34 444.

### Résumé

Un essai visant à étudier les conséquences à long terme de différentes méthodes de culture sans labour, sur un sol argileux et sur un sol limoneux, se poursuit depuis 35 ans à Changins (VD, 430 m). Le labour (travail classique à environ 25 cm) y est comparé au chisel (travail profond à 25-30 cm), au cultivateur (travail à une profondeur moyenne de 10-15 cm) et au travail minimum (herse rotative à 7-10 cm), parfois remplacé par le semis direct. L'influence du sous-solage, d'une fertilisation azotée renforcée et de la conservation des pailles au champ a également été évaluée de manière séquentielle.

Selon les procédés de travail du sol, la répartition des éléments fertilisants P, K et Mg en profondeur est différente, cependant sans incidence sur le développement des cultures. Il n'apparaît aucune relation systématique entre les procédés de travail du sol et les valeurs  $N_{\min}$  mesurées.

Les procédés laissant des résidus de récolte près de la surface engendrent une très légère acidification du sol. Le travail minimum, le semis en bandes fraisées ou le semis direct ainsi que – dans une mesure un peu moindre – le cultivateur permettent de maintenir des taux de matière organique stables dans la couche supérieure du sol. On n'a toutefois pas observé une réelle accumulation de carbone organique dans le sol.

L'effet protecteur de la couverture du sol par les résidus végétaux peut retarder l'installation d'une culture.

La densité apparente et la porosité totale du sol n'ont pas été influencées de manière systématique par les procédés en comparaison. Cependant, la macroporosité peut tomber au-dessous du seuil critique de 10% dans les procédés non labourés.

La stabilité structurale est systématiquement meilleure en non-labour et la résistance à la pénétration plus élevée. La capacité de rétention en eau tend à être inversement proportionnelle à l'intensité du travail du sol; elle est la plus élevée en travail minimum tandis que c'est dans ce même procédé que la capacité d'infiltration des eaux pluviales est la plus faible.

La culture sans labour offre des avantages indéniables, tels que le maintien de la matière organique, la stabilité de la structure et la diminution du risque d'érosion. Il est néanmoins des situations particulières où c'est le labour qui garde l'avantage.

### Introduction

Les méthodes de culture sans labour ont été développées dans le but de simplifier le travail du sol, de réduire les coûts de production agricole et d'assurer durablement la conservation des sols. Il s'agit prioritairement de limiter le ruissellement des eaux et les risques d'érosion par des techniques de travail appropriées, laissant un maximum de résidus de récolte en surface (Tebrügge et Düring, 1999). Les techniques de

culture sans labour répondant à ces objectifs sont rassemblées dans le concept de «travail de conservation du sol» qui correspond au «*conservation tillage*» du monde anglophone. On parle aussi couramment de «pseudo-labour» ou de «techniques culturales simplifiées» lorsque le travail du sol est réalisé par tout autre engin que la charrue.

Le premier volet d'une série de publications faisant le point sur l'expérimentation conduite à Changins depuis 1969 portait sur l'évolution du rende-

ment des cultures (Vullioud et Mercier, 2004). Ce second volet, portant sur les propriétés chimiques et physiques du sol, s'appuie sur les travaux récents et sur les résultats publiés par Maillard *et al.* (1994) ainsi que Maillard *et al.* (1995) dont il constitue le prolongement.

<sup>1</sup>Avec la collaboration technique de L. Deladoey, P. Jaquier et J.-F. Parisod.

## Matériel et méthodes

### Description de l'essai

Les essais, qui se poursuivent actuellement, ont été mis en place en 1969 à Changins (VD, 430 m) sur une parcelle comprenant deux types de sol: une partie argileuse (A: 51% d'argile, 22% de silt, 27% de sable, 4,8% de matière organique) et une partie limoneuse (L: 27% d'argile, 44% de silt, 19% de sable, 2,5% de matière organique). L'essai sur sol argileux comprend trois répétitions et celui sur sol limoneux,

quatre. La rotation pratiquée est la suivante: colza d'automne - blé d'automne - maïs grain - blé d'automne; en 1993 et en 2001, les conditions climatiques particulièrement défavorables de l'automne n'ont pas permis le semis de blé d'automne après le maïs; il a fallu y substituer un blé de printemps. Les essais ont été aménagés selon un dispositif expérimental de type «strip-plot» (Gomez et Gomez, 1984) comprenant, pour les deux différents sols étudiés, quatre procédés principaux de 320 m<sup>2</sup> et deux sous-procédés de 160 m<sup>2</sup> présentés dans le tableau 1. Le travail de

préparation du lit de semences a été adapté aux conditions de l'année et a évolué au cours du temps en fonction des matériels disponibles.

Les méthodes d'analyses chimiques des sols sont décrites dans les «Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages» (Ryser *et al.*, 2001). Les méthodes d'analyses physiques sont résumées dans le tableau 2.

La pluviométrie annuelle sur le site de Changins est de 953 mm (moyenne de 30 ans), très irrégulièrement répartie tout au long de l'année.

Tableau 1. Détail des procédés expérimentaux\*

Procédés principaux	Sous-procédés
1. <b>Labour</b> 25-30 cm de profondeur de travail du sol. (≤ 25 cm depuis 1995)	1969-1973: O. <b>Référence:</b> non sous-solé. P. <b>Sous-solage:</b> avant maïs et colza, environ 60 cm de profondeur, avec boulet de drainage-taupe.
2. <b>Chisel</b> , jusqu'en 2003 25-30 cm de profondeur de travail du sol. <b>Décompacteur à ailettes</b> , dès 2004 25-30 cm de profondeur de travail du sol, complété par une <b>herse rotative</b> à axe horizontal (5-8 cm de profondeur de travail) pour la préparation simultanée du lit de semences.	1974-1991: O. <b>Référence:</b> fumure azotée selon les normes. P. <b>Fumure azotée renforcée:</b> + 30 kg N/ha.
3. <b>Cultivateur</b> à dents rigides 10-15 cm de profondeur de travail du sol; de 1969 à 1981, le travail a été réalisé avec différentes machines travaillant à une profondeur comparable.	Depuis 1992: O. <b>Référence:</b> paille de blé récoltée**. P. <b>Paille de blé hâchée**</b> , laissée sur le champ et incorporée au sol selon procédé principal.
4. <b>Travail minimum</b> 5-10 cm de profondeur de travail du sol; occasionnellement semis direct pour le blé et le colza, semis sur bandes fraisées pour le maïs.	

\*Dispositif expérimental en strip-plot.

\*\*Les résidus de récolte du colza et du maïs grain sont systématiquement hachés et laissés sur le champ.

Tableau 2. Description du mode de prélèvement des échantillons de sol et des analyses physiques effectuées

	Prélèvements et mesures au champ
- Sol non perturbé	Enfoncement vertical d'un cylindre métallique de 100 cm <sup>3</sup> .
- Agrégats	Prélèvement de terre avec une tarière ne comprimant pas le sol; émiettement à la main; séchage à l'air à température ambiante; tamisage à 2 mm de diamètre.
- Pénétrométrie	Mesure de la résistance du sol à la pénétration au moyen d'un pénétromètre enregistreur.
- Couverture du sol par des débris organiques	Détermination à l'aide d'une réglette comportant 20 orifices espacés de 10 cm, posée 5 fois par parcelle unitaire. Chaque fois qu'un résidu se trouve à l'aplomb d'un orifice, on comptabilise 1 point. Le total des 5 mesures correspond au % de couverture.
	Analyses au laboratoire
- Densité apparente (g/100 cm <sup>3</sup> )	Masse d'une unité volumique de sol en place, après séchage à 105 °C.
- Porosité totale (% vol.)	Volume d'air dans une unité volumique de sol en place, après séchage à 105°C.
- Capacité de rétention en eau (% vol.)	Volume d'eau dans une unité volumique de sol en place, soumise à une tension de 0,1 bar (pF 2 ou 100 hPa).
- Macroporosité (% vol.)	= [Porosité totale] - [Volume occupé par l'eau à pF 2].
- Instabilité des agrégats (indice S)	Une même quantité de terre tamisée est soumise à trois procédés d'humectation puis à une violente agitation mécanique. Les agrégats ayant résisté à cette attaque sont pesés, après déduction de la part de sable grossier qu'ils contiennent. Une formule permet de calculer l'ampleur de la destruction des agrégats, soit leur indice d'instabilité.
- Stabilité des agrégats (indice K)	Dans un test parallèle, on fait percoler de l'eau distillée à travers une éprouvette remplie de terre tamisée; une partie des agrégats se détruit au contact de l'eau distillée qui emporte les cations. L'indice K de stabilité mesure la vitesse d'écoulement de l'eau.

## Résultats et discussion

### Disponibilité du phosphore et du potassium

Les valeurs déterminées en 2003 sont illustrées par la figure 1. Seuls les résultats des mesures les plus récentes sont présentés, par souci de simplification d'une part, et d'autre part parce que l'on considère les résultats obtenus comme la résultante des pratiques culturales propres à chaque procédé au fil des années. D'après le barème d'appréciation actuel pour l'extrait à l'acétate d'ammonium + EDTA (Ryser *et al.*, 2001), les valeurs se situent dans les plages «médiocre» et «satisfaisant» pour le phosphore, «satisfaisant» et «riche» pour le potassium, cela pour les deux types de sol. Dans la couche supérieure du sol, les disponibilités en phosphore et en potassium sont d'autant plus élevées que l'on travaille le sol moins profondément. Ainsi, la hiérarchie des procédés est: travail minimum > cultivateur > chisel > labour. Dans la couche 10-20 cm, la tendance est inverse; toutefois, les différences ne sont statistiquement pas significatives. Lorsqu'on considère la moyenne des deux couches mesurées, seules les valeurs des indices de potassium des procédés «travail minimum» et «labour» en sol limoneux sont significativement différentes l'une de l'autre grâce à l'effet des valeurs moyennes sur le coefficient de variation.

Les résultats obtenus avec l'extraction à l'eau saturée de CO<sub>2</sub> présentent la même hiérarchie des indices de fertilité par rapport aux procédés de travail du sol, avec cependant une moins bonne différenciation des valeurs respectives.

La concentration en éléments nutritifs dans la couche supérieure est inversement proportionnelle à la profondeur de travail du sol. Le procédé «travail minimum», dans la couche supérieure, obtient des résultats semblables à ceux des prairies. Il ne présente pas d'avantage particulier ni d'inconvénient en termes de nutrition des plantes, pour autant qu'il n'y ait pas de ruissellement ou d'érosion par les eaux pluviales. Les concentrations mesurées dans la couche inférieure ne présentent pas une image symétrique par rapport à celles de la couche supérieure. On observe tout au plus une tendance vers des teneurs plus faibles au niveau du phosphore pour le procédé «travail minimum».

Les différences entre sous-procédés ne sont pas significatives, quelle que soit la méthode d'extraction. A fumure PK minérale identique sur tout l'essai, sept restitutions de paille de blé en 14 ans ne suffisent pas à élever significativement les indices de fertilité. Par ailleurs, la différenciation de fumure azotée appliquée au niveau des sous-procédés, de 1974 à 1991, aurait plutôt eu tendance à appauvrir les parcelles du sous-procédé P, à cause du surplus d'exportations de P et K par le grain. Les différences de disponibilité dans le sol à la fin de cette séquence n'étaient

pas significatives non plus.

Hargrove (1985) a observé une concentration des éléments nutritifs à la surface du sol plus élevée en semis direct que dans le sol travaillé de manière classique. Carter (1991) a aussi constaté une augmentation du phosphore extractible dans la couche 0-10 cm en travail superficiel ou en semis direct et, parallèlement, une diminution dans la couche 10-20 cm. En revanche, le travail du sol traditionnel a entraîné une augmentation de la concentration de P entre 20 et 30 cm. Ellis *et al.* (1977) ont enregistré dans la couche de 0-5 cm des concentrations en phosphore significativement plus faibles dans les parcelles labourées qu'avec le semis direct et le travail superficiel. La situation était inversée au-delà de 7,5 cm de profondeur. Ces auteurs ont également étudié l'absorption des phosphates par les plantes à partir des différentes couches de sol. Ils ont remarqué que les plantes prélevaient le phosphore proportionnellement à sa concentration dans les couches considérées.

Ces différences de disponibilité de P et K selon les couches considérées n'ont manifestement pas posé de problèmes nutritionnels pour les plantes. D'ailleurs, l'observation des cultures dans les quatre procédés ainsi qu'une comparaison régulière avec un essai de fumure PK adjacent, cultivé avec les mêmes espèces, n'a jamais donné l'impression d'un quelconque problème de nutrition lié à la distribution des éléments fertilisants dans le profil.

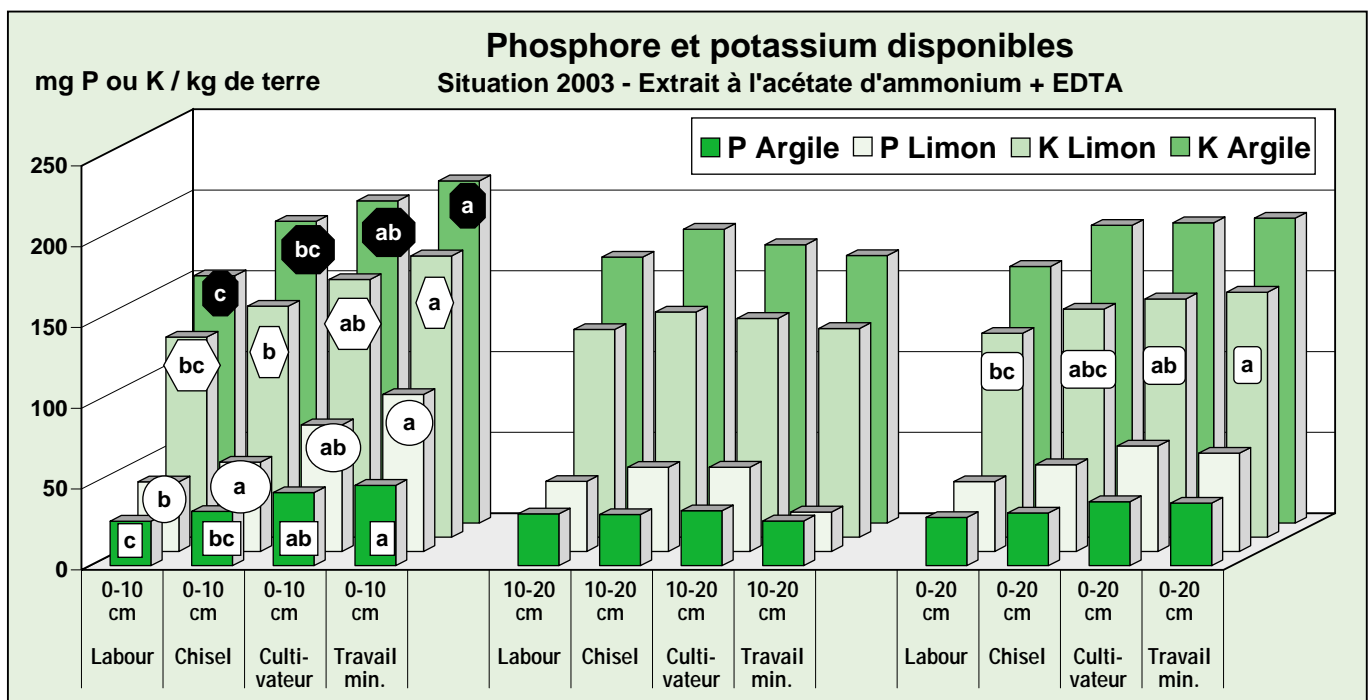


Fig. 1. Phosphore et potassium disponibles. Valeurs moyennes des deux sous-procédés. Les colonnes portant des lettres différentes sur des étiquettes de même forme sont significativement différentes à P = 0,05.

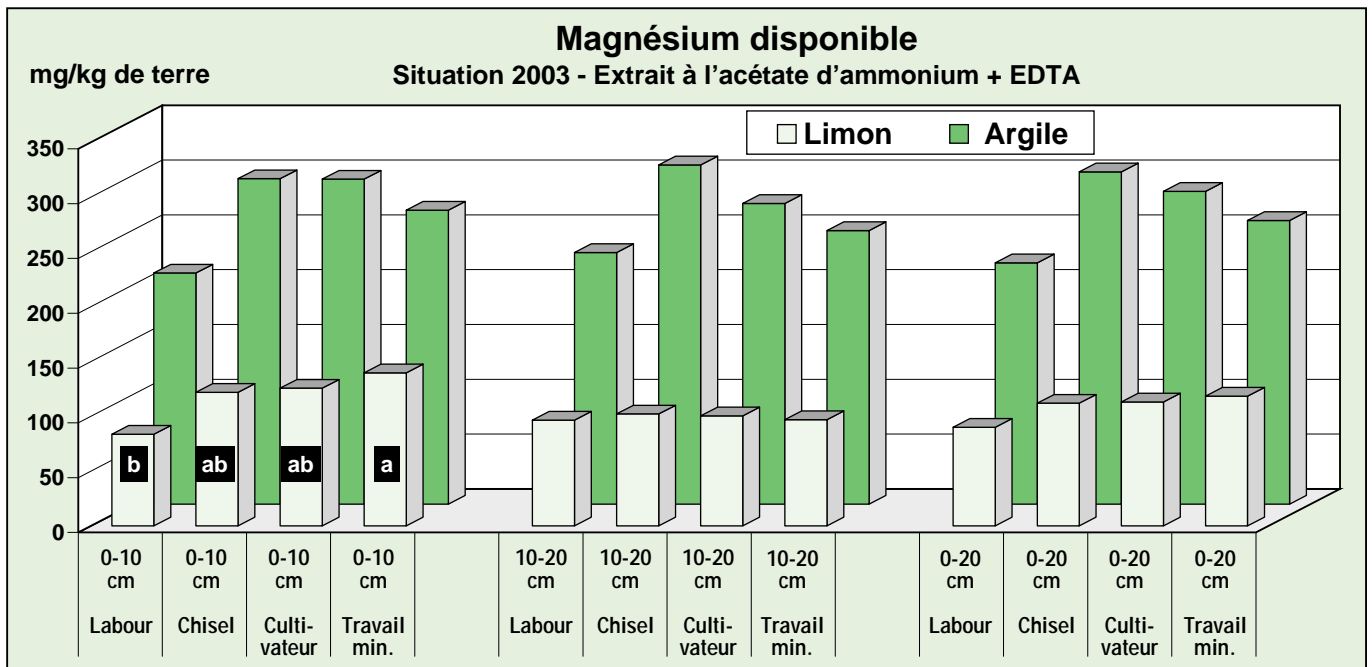


Fig. 2. Magnésium. Valeurs moyennes des deux sous-procédés. Les colonnes portant des lettres différentes sont significativement différentes à P = 0,05.

## Magnésium

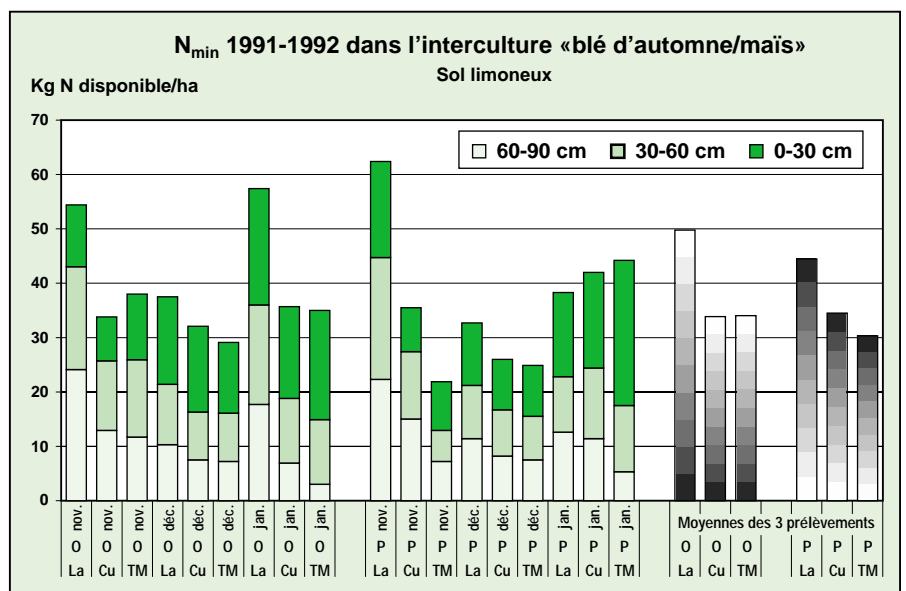
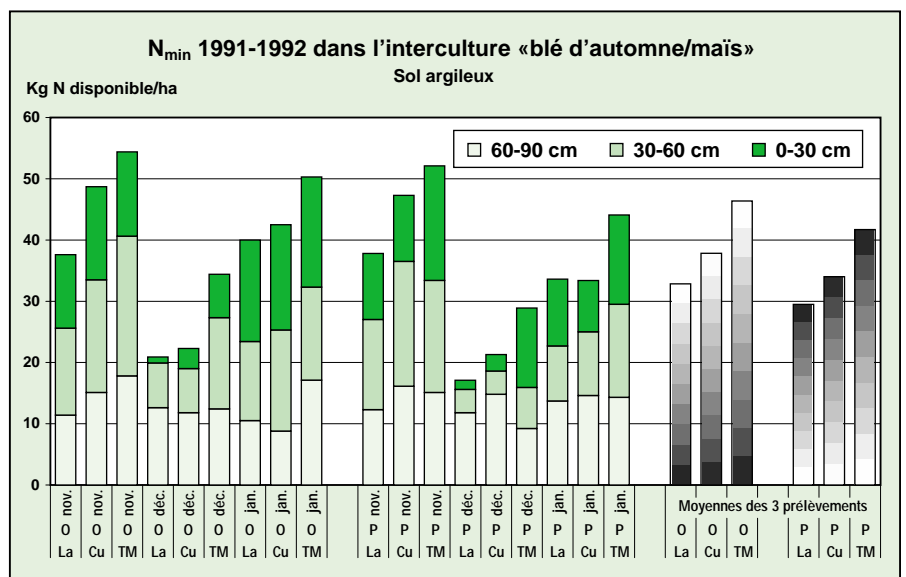
Les résultats sont présentés dans la figure 2. La hiérarchie des valeurs correspond approximativement à la même «logique» que celle qui concerne le phosphore et la potassium. Cependant, seules les valeurs se rapportant à la couche 2-10 cm en sol limoneux permettent d'identifier des différences statistiquement significatives.

## Azote

L'azote nitrique et ammoniacal disponible ( $N_{min}$ ) dans la couche de sol de 0 à 90 cm a été mesuré de manière sporadique. Deux séries de résultats ont été retenues.

Dans la première, trois séquences de prélèvements ont été échelonnées de novembre 1991 à janvier 1992, durant la jachère succédant au blé et précédant le maïs. En sol argileux, les valeurs  $N_{min}$  présentent une certaine logique par rapport aux procédés (fig. 3): les valeurs les plus basses se trouvent dans

Fig. 3 et 4. Azote minéral (nitrique et ammoniacal) disponible dans la couche 0-90 cm, mesuré successivement au cours de trois mois d'hiver. Les différences ne sont pas statistiquement significatives. La = labour, Cu = cultivateur, TM = Travail minimum. O et P: description dans le tableau 1.



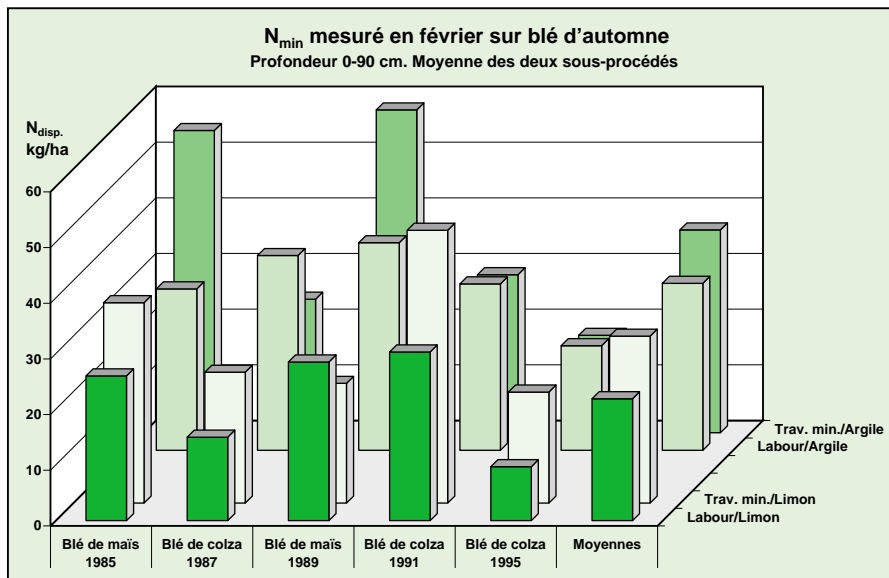


Fig. 5. Azote minéral (nitrique et ammoniacal) disponible dans la couche 0-90 cm, mesuré en février, avant le premier épandage d'azote sur le blé. Les différences ne sont pas significatives.

le labour et les plus élevées en travail minimum. En revanche, en sol limoneux, les valeurs obtenues (fig. 4) ne présentent pas cette même concordance, les tendances sont plutôt contradictoires. L'incorporation des pailles de blé (sous-procédé P) n'a pas entraîné des baisses significatives des teneurs en  $N_{min}$ . Dans la seconde série de mesures, il s'agit de prélèvements effectués sur cinq blés en sortie d'hiver, c'est-à-dire en février, avant le premier apport d'azote (fig. 5). Bien que les contrôles aient été limités aux deux procédés «extrêmes» (labour et travail minimum), on n'en dégage aucune systématique, hormis une petite tendance (statistiquement non significative) à des teneurs légèrement plus élevées dans le procédé «travail minimum».

Ces résultats sont différents de ceux de Grevers et Bomke (1986) pour qui les concentrations en azote nitrique se sont révélées légèrement supérieures pour le labour que pour le chisel. Cependant, la concentration en ammonium n'a pas été influencée, selon ces deux auteurs, cela étant lié au fait que le labour améliore l'aération et la température du sol, favorisant ainsi la nitrification.

L'expérience montre que si la mesure traditionnelle du  $N_{min}$  selon Ryser *et al.* (2001) fournit une relativement bonne indication instantanée sur la disponibilité de l'azote dans le sol, elle ne convient pas à l'évaluation des flux d'azote, ce que confirment Neyroud et Chauvin (2000). Elle peut même conduire à des conclusions erronées. Sur la base de mesures effectuées avec des lysimètres installés en plein champ, Anken *et al.* (2004) ont démontré que

les pertes d'azote par lixiviation n'étaient pas significativement différentes entre labour et semis direct mais que leur cinétique pouvait être décalée dans le temps. Cette constatation concorde avec l'absence d'interaction entre fumure azotée et procédés de travail du sol dans notre essai. Les mesures de teneur en protéines sur le grain récolté ne révèlent pas de différences significatives. De plus, les valeurs d'exportation d'azote par le grain sont dépendantes essentiellement de la production de grain, elle-même fonction des conditions de croissance des plantes dans les différents procédés, apparemment sans relation avec la nutrition azotée puisque les résultats n'ont révélé aucune interaction entre les procédés de travail du sol et les sous-procédés où deux ni-

veaux de fumure azotée ont été appliqués pendant 18 ans.

## Acidité du sol (pH)

L'état des variantes de l'essai en 2003 est illustré par la figure 6.

En sol limoneux, les valeurs se situent entre 6,9 et 7,3; les différences ne sont pas significatives et aucune altération des valeurs de pH n'est observée depuis la publication de Maillard *et al.* (1994). Dans le sol argileux, en revanche, on constate un effet significatif du travail minimum dans lequel le pH est de 0,4 unité inférieur à la référence labourée dans la couche 2-10 cm; bien que les différences ne soient pas significatives, le procédé «cultivateur» présente un pH inférieur de 0,2 unité à celui du labour. Dans la couche 10-20 cm, en sol argileux, les différences ne sont pas significatives mais les tendances vont dans le même sens qu'en surface: labour  $\equiv$  chisel > cultivateur > travail minimum. Ces différences de pH, moins prononcées que celles mentionnées par Maillard *et al.* (1994), sont à mettre en relation avec les teneurs en matière organique (fig. 7): en réduisant l'intensité et la profondeur du travail du sol, on maintient plus de matière organique dans la couche supérieure, ce qui tend à faire baisser le pH. Un pH de 6,0 n'est pas alarmant dans ce type de sol mais mérite néanmoins qu'on lui accorde quelque attention; au-dessous de ce seuil, des mesures correctives devraient être envisagées.

Dans les sous-procédés, on ne constate pas encore de différences significatives. Il est vrai qu'il n'y a eu que sept récoltes de blé depuis la différenciation des sous-procédés en «paille récoltée»/«paille laissée sur le champ».

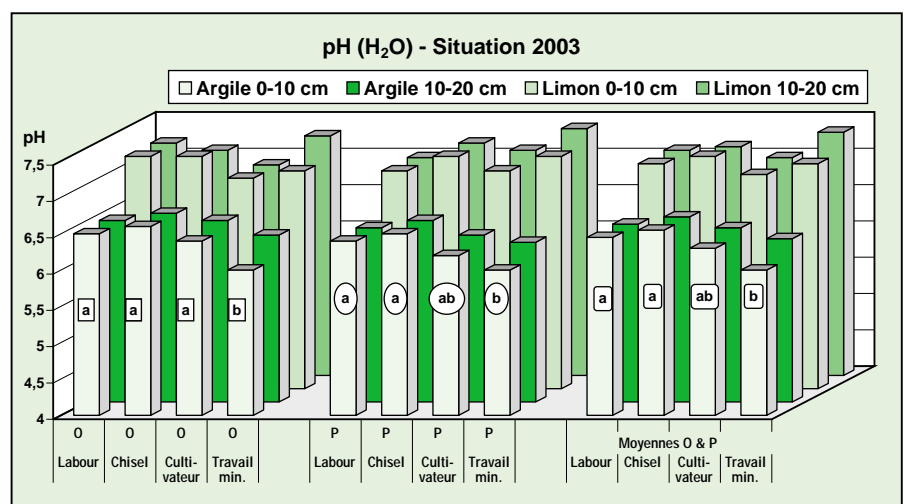


Fig. 6. Acidité du sol: mesures de pH. Les colonnes portant des lettres différentes sur des étiquettes de même forme sont significativement différentes à  $P = 0,05$ . O et P: description dans le tableau 1.

## Matière organique (MO)

Les figures 7 et 8 présentent l'évolution de la matière organique dans les différents procédés à des profondeurs de prélèvement de 0-10 cm et 10-20 cm. L'analyse de l'année 1969 est à considérer avec prudence car c'est une moyenne des procédés sur 0-20 cm.

De 0 à 10 cm, on constate dans les deux types de sol que le travail minimum est le plus favorable à la conservation de la matière organique. Des différences statistiquement significatives ont même pu être mises en évidence dans le sol limoneux. Bien que les tendances s'inscrivent dans la même logique, les différences enregistrées dans le sol argileux ne sont pas assurées statistiquement. Le procédé «cultivateur» suit de près le procédé «travail minimum». La charrue, en exerçant un effet de dilution de la MO dans le profil et en stimulant la minéralisation de cette MO sur une couche plus profonde, entraîne un appauvrissement progressif du sol. Cependant, après 30 ans d'application systématique du procédé labour, cette régression de la MO semble évoluer vers une stabilisation des teneurs. Le chisel se révèle moins défavorable que la charrue mais contribue néanmoins à la dilution de la MO dans le profil.

Dans la couche de 10 à 20 cm, on a observé une diminution de teneur en matière organique dans tous les procédés des deux types de sol. En considérant la situation en 2003, on constate que le procédé «cultivateur» est le plus favorable dans cette couche. Le chisel est moins bon, particulièrement en sol limoneux. Le travail minimum est au même niveau que le labour en sol limoneux et il est quasiment équivalent au chisel et au cultivateur en sol argileux. En sol limoneux, labour, travail minimum et chisel affichent les plus mauvais scores. Toutefois, seul le cultivateur a influencé de manière significative la conservation de la matière organique par rapport au labour et au travail minimum.

Dans les sous-procédés, les analyses faites en 1993, 1996 et 2003 révèlent un léger avantage en faveur du sous-procédé «pailles laissées sur le champ». Après sept récoltes de paille de blé et 18 ans de différenciation de la fumure azotée, les différences restent modestes et statistiquement non significatives; elles sont néanmoins «logiques» en ce sens que le sous-procédé P est systématiquement supérieur au sous-procédé O. Un essai de fumure conduit à Changins depuis 1963 confirme ces observations (Vulliod *et al.*, 2004).

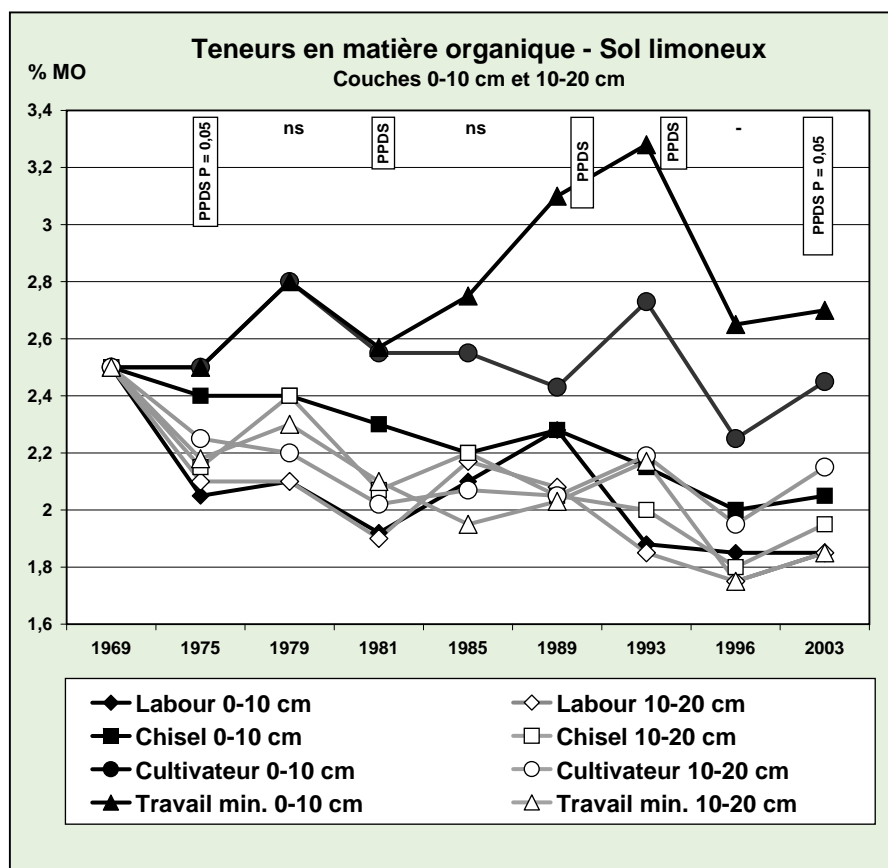
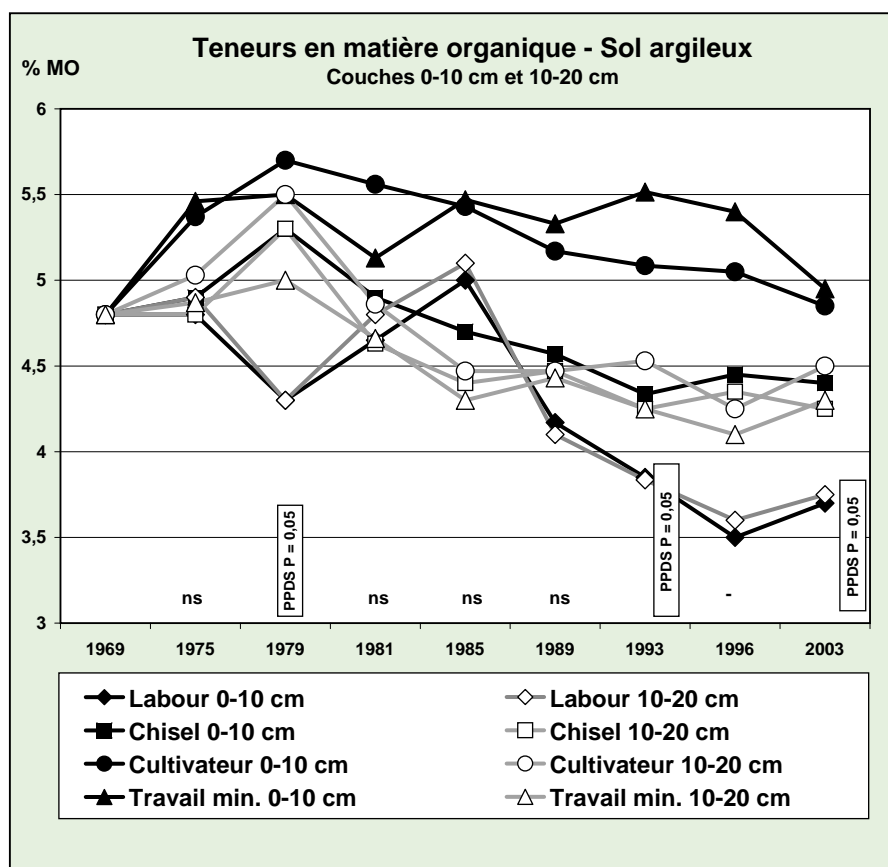


Fig. 7 et 8. Teneurs en matière organique. Les différences significatives sont indiquées par les barres verticales; ns = non significatif; en 1996, analyses effectuées sur un échantillon moyen des trois répétitions en sol argileux, des quatre répétitions en sol limoneux. Les valeurs de 1969 résultent d'un échantillon moyen prélevé sur l'ensemble de l'unité pédologique concernée, respectivement argileuse et limoneuse.

L'évolution temporelle des taux de matière organique dans notre essai montre qu'il est possible, par des moyens appropriés (travail du sol, restitutions organiques), de ralentir voire stopper la baisse du taux. Il est cependant plus difficile d'expliquer la raison de cette lente baisse, dans le procédé labour en particulier, qui caractérise la période 1969-1996 (fig. 7 et 8). L'explication la plus plausible est à chercher dans le mode d'exploitation des terres avant 1969: la rotation des cultures était plus variée, avec des prairies temporaires, les apports d'engrais de ferme (très bons précurseurs d'humus) étaient réguliers et les moyens de traction ne permettaient guère de labourer profondément. Avec moins de restitutions organiques, il est impossible de maintenir le taux initial de matière organique dans le sol (Neyroud *et al.*, 1997).

Ellis *et al.* (1977) ont observé que le teneur en MO était moindre avec le labour qu'avec la moyenne des procédés sans labour (semis direct et cultivateur) pour la couche de sol de 0-5 cm et l'inverse à plus de 7,5 cm après 5 ans. Ces différences n'étaient toutefois pas significatives. En 1983, Dick a relevé une différence significative dans la

couche supérieure du sol (0-15 cm sol lourd et 0-7,5 cm sol mi-lourd) en termes de concentration en carbone (MO = C × 1,72), en faveur du semis direct par rapport à un labour à 25 cm après 18 ans de pratique. Par contre, dans la couche inférieure, il a obtenu une teneur réduite dans le sol lourd et aucune différence significative dans le mi-lourd. Plus récemment, Arshad *et al.* (1999) rapportent qu'après ajustement du taux de carbone organique à la densité du sol, ils n'ont plus observé de différences attribuables au travail du sol. Ces auteurs mentionnent que plusieurs études faites en régions tempérées montraient des augmentations importantes du carbone avec le semis direct, spécialement près de la surface, alors que peu ou pas de changements ont été notés dans des régions plus froides en Amérique du Nord. Tebrügge et Düring (1999) ont, quant à eux, relevé une accumulation évidente de carbone dans la couche supérieure du sol avec le semis direct. Deux revues de littérature récentes font état des avantages relatifs du travail de conservation du sol sur l'économie du carbone. Dans les conditions chaudes et humides du sud-est des Etats-Unis, Franzluebbers (2005) mentionne une capacité d'accumula-

tion de 420 ± 460 kg de C/ha/an, pouvant atteindre 530 ± 450 kg en insérant des cultures protectrices. Il mentionne que l'intensité des cultures (fumure azotée) joue un rôle aussi important que la réduction du travail du sol. Dans les conditions du nord-ouest des Etats-Unis et de l'ouest du Canada, Liebig *et al.* (2005) mentionnent des accumulations de carbone de 270 ± 190 kg/ha/an par le travail de conservation du sol. Ces quantités supplémentaires de carbone stockées dans le sol sont néanmoins modestes en regard des quelque 50 000 kg de carbone organique contenus dans les vingt premiers centimètres de la couche arable.

Sans prétendre stocker du carbone supplémentaire dans nos terres, nous pouvons estimer, sur la base de nos résultats d'essais, que le maintien du niveau de carbone, donc de la matière organique, est possible par une gestion adéquate du sol, tant dans la façon de le travailler que dans la manière de gérer la matière organique. Cette stratégie de maintien constitue déjà une bonne contribution à la conservation durable de la fertilité du sol et à une réduction de l'enrichissement de l'atmosphère en CO<sub>2</sub>, gaz à effet de serre.

**Tableau 3. Couverture du sol par les résidus végétaux (%).** Les valeurs supérieures au seuil de 30%<sup>1</sup> de couverture figurent en gras.

Sol argileux										
Année / Culture	1996 Maïs		1997 Blé		1998 Colza		2000 Maïs		2004 Maïs	
Sous-traitement	O	P	O	P	O	P	O	P	O	P
Labour	1	0	3	3	0	0	0	0	0	0
Chisel <sup>2</sup>	13	28	<b>34</b>	<b>31</b>	19	25	21	28	18	17
Cultivateur	11	20	<b>47</b>	<b>42</b>	15	18	23	19	16	12
Travail minimum	<b>31<sup>3</sup></b>	<b>50<sup>3</sup></b>	<b>53</b>	<b>51</b>	27	<b>39</b>	<b>38<sup>3, 4</sup></b>	<b>42<sup>3, 5</sup></b>	24 <sup>8</sup>	<b>32<sup>9</sup></b>
PPDS entre procédés (P0,05/P0,01)	25/37	25/37	24/36	24/36	9/14	9/14	9/13	9/13	14/21	14/21
PPDS entre sous-procédés (P0,05/P0,01)	ns		ns		5/7		ns		ns	
Sol limoneux										
Année / Culture	1996 Maïs		1997 Blé		1998 Colza		2000 Maïs		2004 Maïs	
Sous-traitement	O	P	O	P	O	P	O	P	O	P
Labour	1	0	2	1	0	0	0	0	1	2
Chisel (2)	11	23	<b>46</b>	<b>39</b>	13	22	17	21	20	23
Cultivateur	10	17	<b>44</b>	<b>41</b>	13	18	12	25	17	21
Travail minimum	26 <sup>3</sup>	<b>42<sup>3</sup></b>	<b>50</b>	<b>44</b>	22	21	<b>42<sup>3, 6</sup></b>	<b>44<sup>3, 7</sup></b>	25 <sup>10</sup>	<b>30<sup>11</sup></b>
PPDS entre procédés (P0,05/P0,01)	15/21	15/21	9/12	9/12	8/ns	8/ns	11/15	11/15	8/11	8/11
PPDS entre sous-procédés (P0,05/P0,01)	12/16		ns		6/ns		ns		5/ns	

<sup>1</sup>Valeur de seuil généralement admise dans le concept de «travail de conservation du sol».

<sup>2</sup>Décompacteur + herse rotative en 2004.

<sup>3</sup>Moyenne «bandes fraîsées» / «sol non travaillé».

<sup>4</sup>Sur les bandes fraîsées: 10%; entre les rangs: **57%**.

<sup>5</sup>Sur les bandes fraîsées: 21%; entre les rangs: **62%**.

<sup>6</sup>Sur les bandes fraîsées: 15%; entre les rangs: **68%**.

<sup>7</sup>Sur les bandes fraîsées: 14%; entre les rangs: **73%**.

<sup>8</sup>Sur les bandes fraîsées; entre les rangs: **48%**.

<sup>9</sup>Sur les bandes fraîsées; entre les rangs: **79%**.

<sup>10</sup>Sur les bandes fraîsées; entre les rangs: **42%**.

<sup>11</sup>Sur les bandes fraîsées; entre les rangs: **77%**.



## Couverture du sol par les résidus végétaux et les mottes

Le maintien de résidus organiques bruts (résidus de récolte, engrais de ferme, engrais verts, etc.) à la surface du sol ou dans les premiers centimètres contribue de manière importante à le protéger contre les effets destructeurs de la pluie sur les agrégats. La destruction des agrégats provoque le colmatage de la couche de surface puis le croûtage qui favorisent le ruissellement et l'érosion. Il est généralement admis que le seuil à partir duquel on peut parler de travail de conservation du sol est une couverture d'au moins 30%. Les résultats rapportés dans le tableau 3 montrent que ce seuil de 30% n'est pas atteint par le pseudo-labour dans toutes les situations. Le semis direct, non pratiqué à ce moment-là, aurait certainement permis de dépasser ce seuil. Toutefois, la couverture du sol n'est pas le seul facteur de protection contre les risques de ruissellement et d'érosion: la capacité du sol à absorber les eaux pluviales ainsi que la «rugosité» du lit de semences (diamètre moyen pondéré des mottes, DMP) jouent aussi un rôle important. Le travail effectué par Hugon (2004) sur la partie limoneuse de l'essai met en évidence des différences de DMP significatives entre les procédés de travail du sol ainsi qu'entre les sous-procédés (fig. 9). L'humidité de la terre au moment de la préparation du lit de semences peut cependant engendrer des différences plus importantes que les machines elles-mêmes et peut aussi modifier la hiérarchie des résultats selon les procédés. Ainsi, le lit de semences après labour se révèle souvent plus grossier que celui du procédé «cultivateur», contrairement à ce qu'indique la figure 9.

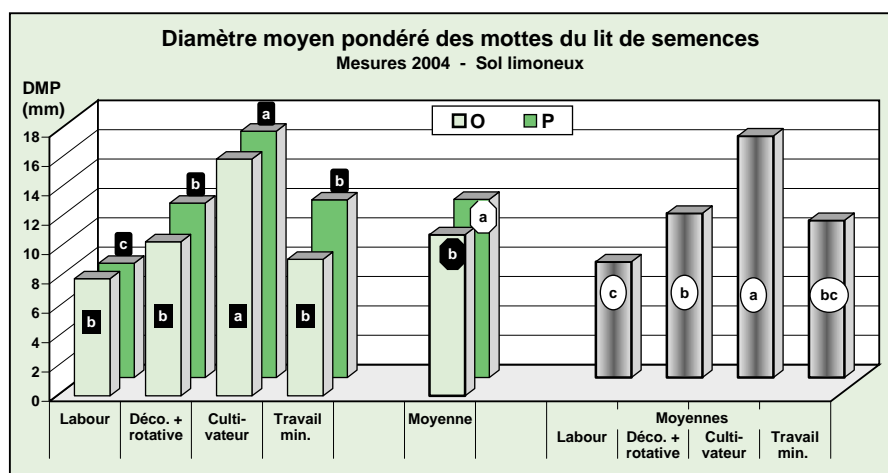


Fig. 9. Diamètre moyen pondéré des mottes du lit de semences dans le sol limoneux. Mesures effectuées en 2004 selon la méthode décrite par Anken *et al.* (1996). Les mottes sont séparées en sept fractions: < 2,5 mm, 2,5-5 mm, 5-10 mm, 10-20 mm, 20-40 mm, 40-80 mm, > 80 mm. Les sous-procédés O et P sont décrits dans le tableau 1. Les colonnes portant des lettres différentes sur des étiquettes de même forme sont significativement différentes à  $P = 0,05$ .

Les résidus de culture, laissés au champ par un travail du sol réduit, peuvent augmenter la résistance du sol à la compaction (Ball *et al.*, 1990).

### Densité apparente du sol

Selon les résultats de la campagne de mesures réalisée en 2000 (tabl. 4), la densité apparente est plus élevée dans la couche 10-20 cm que dans la couche 0-10 cm, dans les deux types de sol et quel que soit le procédé.

Dans le sol argileux, on ne détecte pas de différences significatives entre les procédés, ni dans la couche supérieure ni dans la couche inférieure. Selon toute vraisemblance, les facultés de gonflement/rétraction de l'argile sous l'action de l'humectation/dessèchement masquent les effets des différents travaux du sol.

Dans le sol limoneux, on observe des différences significatives entre procédés dans la couche 10-20 cm, de même lorsqu'on prend en compte la moyenne des deux couches (0-20 cm): la densité apparente est la plus élevée sous «travail minimum» et la plus faible sous «cultivateur»; les deux autres procédés occupent une position intermédiaire, sans différences statistiquement assurées. Dans la couche 0-10 cm, les différences ne sont pas significatives; on constate cependant une tendance vers des valeurs plus élevées en travail minimum. A une densité apparente élevée correspond généralement une meilleure portance du sol, observable et particulièrement appréciée lors du semis et de la récolte.

La littérature mentionne différents résultats relatifs à la densité apparente. Par exemple, Horne (1992) a relevé une augmentation significative de la

Tableau 4. Densité apparente du sol ( $g/cm^3$ ).

Sol	Sol argileux				Sol argileux		
	O / 0-10 cm	P / 0-10 cm	O / 10-20 cm	P / 10-20 cm	O / 0-20 cm	P / 0-20 cm	(O+P)/2
Labour	1,19	1,26	1,32	1,31	1,26	1,29	1,27
Chisel	1,21	1,19	1,25	1,28	1,23	1,24	1,23
Cultivateur	1,17	1,10	1,28	1,30	1,23	1,20	1,21
Travail minimum	1,13	1,06	1,25	1,24	1,19	1,15	1,17
PPDS entre procédés P0,05/P0,01	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Sol	Sol limoneux				Sol limoneux		
	O / 0-10 cm	P / 0-10 cm	O / 10-20 cm	P / 10-20 cm	O / 0-20 cm	P / 0-20 cm	(O+P)/2
Labour	1,35	1,41	1,53	1,55	1,44	1,48	1,46
Chisel	1,38	1,34	1,56	1,56	1,47	1,45	1,46
Cultivateur	1,30	1,29	1,53	1,53	1,42	1,41	1,41
Travail minimum	1,40	1,40	1,57	1,63	1,49	1,52	1,50
PPDS entre procédés P0,05/P0,01	ns	ns	ns	0,07	ns	0,06 / 0,09	0,06 / 0,09

densité apparente pour le semis direct par rapport au labour et travail minimum. Arshad *et al.* (1999) mentionnent que la densité apparente des sols qu'ils ont étudiés n'a pas fondamentalement changé avec le semis direct puisqu'il y a eu une redistribution des classes de pores, soit une augmentation de la proportion de micropores et une réduction des macropores. Dans leur situation, la densité apparente a plutôt été influencée par le type de sol et sa profondeur. Voorhees et Lindstrom (1984) ont observé qu'après 4 ans de semis direct, la densité apparente d'un sol devenait équivalente – voire inférieure – à celle des parcelles soumises à un travail de sol traditionnel.

Une augmentation de la densité apparente, accompagnée d'une diminution de la porosité du sol, telle qu'on peut l'observer en travail minimum ou en semis direct, peut avoir des effets négatifs sur le développement des racines et sur le rendement, particulièrement si la circulation de l'eau est entravée.

## Porosité

La porosité totale du sol comprend une fraction de pores grossiers  $\geq 30 \mu\text{m}$  (macroporosité) généralement occupés par de l'air et une fraction de pores plus fins (méso- et microporosité) occupée la plupart du temps par de l'eau. Tant le volume total de pores que les proportions des différentes fractions influencent la relation entre la plante et le sol.

Dans le sol argileux (fig.10), aucune différence significative n'a été mise en évidence, ni entre les procédés ni entre les sous-procédés. Comme mentionné au sujet de la densité apparente, le comportement physique naturel de l'argile peut masquer l'effet des procédés appliqués. Cependant, les valeurs sont globalement un peu plus faibles dans la couche 10-20 cm que dans la couche 0-10 cm:  $-3,6\%$  pour la porosité totale et  $-5,3\%$  pour la macroporosité.

En sol limoneux (fig.11), seule la macroporosité dans le procédé «travail minimum» est significativement inférieure à celle des trois autres procédés. Les différences moyennes entre les deux couches sont un peu plus marquées qu'en sol argileux, soit  $-6,7\%$  pour la porosité totale et  $-7,7\%$  pour la macroporosité. Cette différence peut s'expliquer par le tassement «naturel» du sol limoneux par rapport au comportement «réactif» du sol argileux.

Dans une comparaison tout à fait globale entre le sol argileux et le sol limoneux, tous procédés confondus, on constate qu'en porosité totale, le sol argileux est  $5\%$  (couche 0-10 cm) et

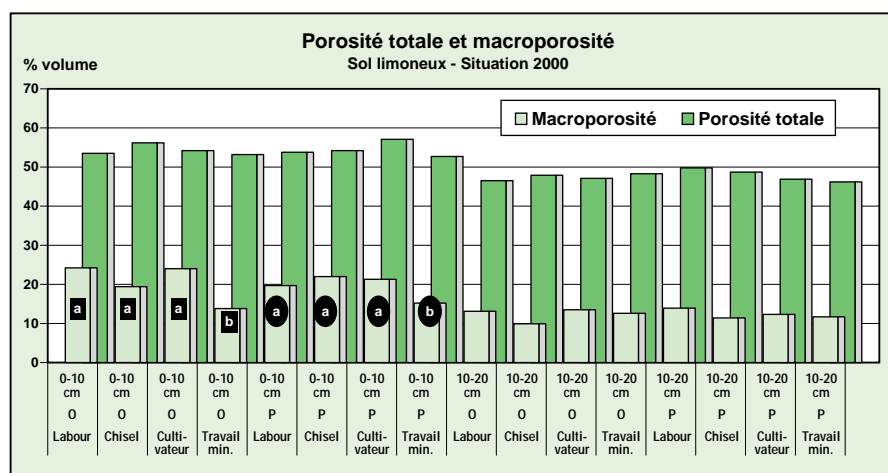
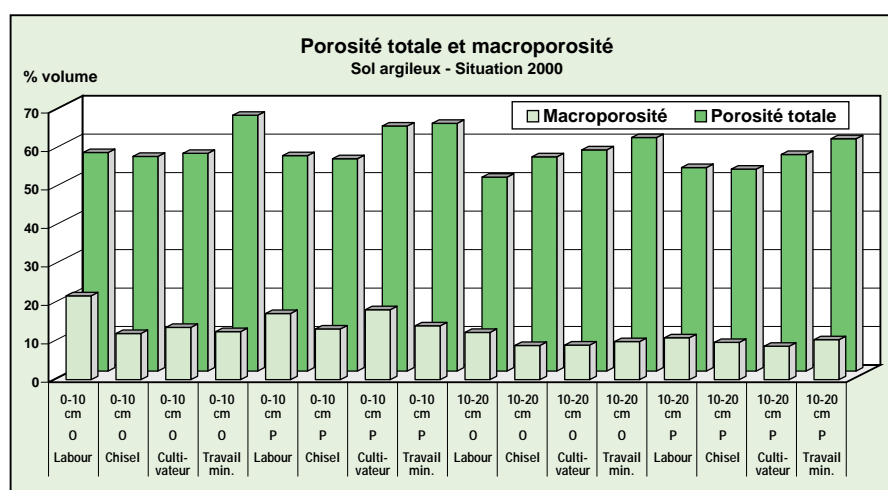


Fig. 10 et 11. Porosité totale et macroporosité mesurées sur des échantillons de sol non perturbés. Les sous-procédés O et P sont décrits dans le tableau 1. Les colonnes portant des lettres différentes sur des étiquettes de même forme sont significativement différentes à  $P = 0,05$ .

$8,1\%$  (couche 10-20 cm) plus élevé que le limoneux, tandis qu'au niveau de la macroporosité, le sol argileux est  $4,6\%$  (couche 0-10 cm) et  $2,3\%$  (couche 10-20 cm) inférieur au limoneux.

Selon Carter (1991), une macroporosité inférieure à  $10\%$  cause fréquemment des problèmes d'aération et d'échanges gazeux en conditions humides, même si elle est adéquate pour la perméabilité. Ce seuil, qui est aussi admis en Suisse, a souvent été franchi dans notre essai, en particulier dans la couche 10-20 cm – sauf dans le procédé «labour»!

## Stabilité des agrégats

La stabilité structurale des agrégats peut être évaluée par l'indice d'instabilité S et l'indice de stabilité K. L'indice S se base sur des propriétés mécaniques et hydrodynamiques du sol. Il est inversement proportionnel à la stabilité des agrégats. L'indice de stabilité K, quant à lui, tient compte du comportement physico-chimique du sol; plus il est élevé, plus le sol est stable. Il est important de noter que la stabilité structu-

rale varie au cours de l'année et qu'une bonne stabilité structurale ne correspond pas nécessairement à une bonne structure. Par exemple, un sol venant d'être travaillé peut présenter une bonne structure, mais il est en même temps très instable; une prairie pâturée en conditions humides peut présenter une mauvaise structure tout en étant stable. Les sols limoneux sont naturellement constitués d'agrégats moins stables que les sols argileux.

En faisant le point sur les vingt premières années de notre essai, Maillard *et al.* (1995) ont déjà mis en évidence une hiérarchie des valeurs de stabilité dans laquelle travail minimum > cultivateur > chisel > labour.

Les résultats de la dernière campagne d'analyses, réalisée en 2000 en fin de végétation d'une culture de maïs, sont illustrés par les figures 12 et 13. La plus faible instabilité S et la meilleure stabilité K du sol argileux par rapport au sol limoneux apparaissent clairement.

Dans le sol argileux, les différences d'indices S et K ne sont pas significatives dans la couche 0-10 cm. Dans la

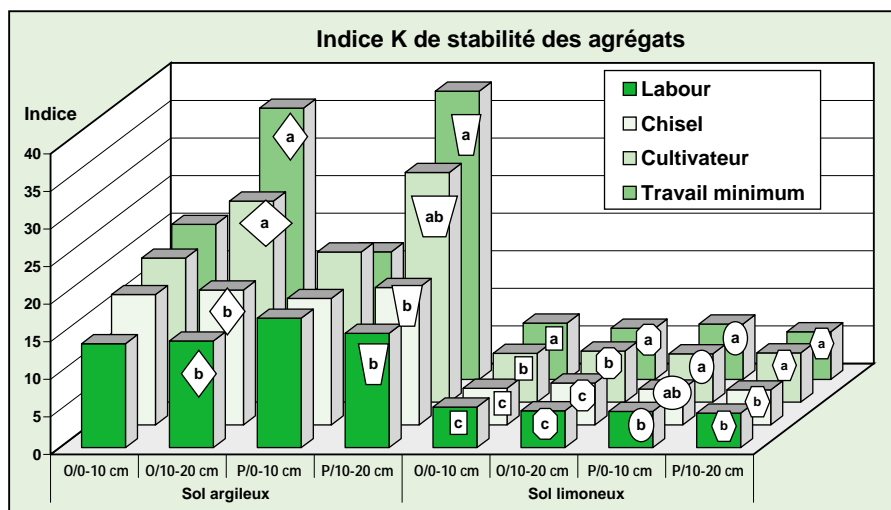
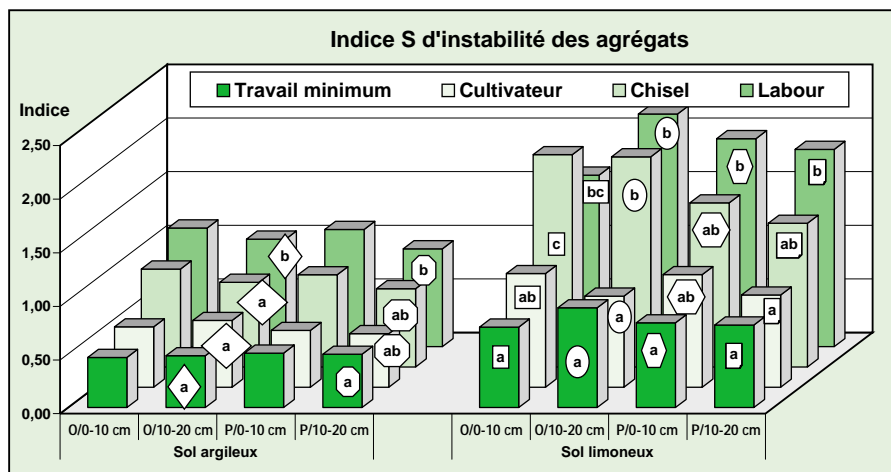


Fig. 12 et 13. Indice d'instabilité et indice de stabilité des agrégats. Les sous-procédés O et P sont décrits dans le tableau 1. Les colonnes portant des lettres différentes sur des étiquettes de même forme sont significativement différentes à  $P = 0,05$ .

couche 10-20 cm, les deux indices sont significativement plus favorables, en termes de stabilité, pour le travail minimum que pour le labour. Les deux autres procédés occupent une position intermédiaire, le cultivateur étant mieux placé que le chisel. Il n'y a pas de différences significatives entre les sous-procédés dans les couches 0-10 cm et 10-20 cm. La restitution des pailles de blé n'a pas encore influencé la stabilité des agrégats.

Dans le sol limoneux, on note des différences significatives entre les procédés, dans la couche 0-10 cm comme dans la couche 10-20 cm. Pour l'indice d'instabilité S, les valeurs les plus favorables sont de nouveau celles du travail minimum et les moins favorables sont celles du labour ou celles du chisel. Le procédé «cultivateur» occupe une place proche du procédé «travail minimum». Les mêmes constatations s'appliquent aux indices de stabilité K, qui s'ordonnent comme suit: travail minimum  $\geq$  cultivateur  $>$  chisel  $\geq$  labour. Il n'y a pas de différences significatives

entre les sous-procédés. Cependant, on observe une tendance vers des indices plus favorables dans le sous-procédé P (pailles de blé laissées sur le champ) que dans le sous-procédé O. Il faudra probablement encore plusieurs années d'application de ces sous-procédés pour vérifier si cette tendance évolue vers des différences significatives.

Une augmentation de la stabilité structurale a aussi été observée par Carter (1991) pour des agrégats de 1 à 9 mm après trois ans de travail du sol superficiel et de semis direct par rapport au travail traditionnel. Tebbrügge et Düring (1999) ont noté que la stabilité des agrégats augmente nettement lorsqu'on passe du labour classique au semis direct, le travail du sol simplifié occupant une position intermédiaire, malgré les fluctuations de cette stabilité dans le temps. Ces auteurs ont également observé que l'augmentation de la proportion d'argile dans le sol amenuisait les différences de stabilité des agrégats entre les traitements. Comme l'ont mentionné Maillard *et al.* (1995), les

teneurs plus élevées en matière organique dans les couches supérieures du sol pour les procédés avec travail du sol réduit contribuent partiellement à leur meilleure stabilité structurale. De leur côté, Arshad *et al.* (1999) ont émis l'hypothèse que le carbone organique serait mieux protégé de la décomposition dans les macro-agrégats sous un travail du sol réduit, les rendant ainsi plus stables.

## Résistance du sol à la pénétration

Malgré la difficulté de la mesure, particulièrement dans des sols peu homogènes et contenant des pierres, la pénétrométrie peut fournir des informations intéressantes sur la résistance du sol – qui présente aussi un certain parallélisme avec sa portance – et sur la continuité ou non-continuité de cette résistance en fonction de la profondeur. Une semelle sous le lit de semences ou une semelle de labour sont les deux principaux exemples de discontinuités.

Les résultats des mesures réalisées en 2000, en culture de maïs, sont reproduits dans les figures 14 et 15. Aucune différence significative n'ayant été détectée au niveau des sous-procédés, ce sont leurs valeurs moyennes qui sont reproduites dans le graphique. Tous procédés confondus, la résistance maximale à vaincre pour atteindre 42 cm de profondeur est nettement plus élevée en sol argileux qu'en sol limoneux. La différence est de 10 à 20  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .

En sol argileux, le procédé «labour» présente une inversion, ou une discontinuité, à une profondeur de 24,5 cm, correspondant au fond de la couche labourée. Dans le procédé «chisel», cette discontinuité se situe à 17,5 cm. Cependant, les courbes «labour» et «chisel» sont assez semblables. Les courbes «cultivateur» et «travail minimum» ne révèlent pas de discontinuité et elles sont assez proches l'une de l'autre, tout en étant bien distinctes des deux premières.

En sol limoneux, dans le procédé «labour», l'inversion principale se situe aussi au niveau du fond de la couche labourée, soit à 24,5 cm. Une autre discontinuité est observable à 10,5 cm; ce niveau est quelques centimètres au-dessous du lit de semences. Le procédé «chisel» présente deux discontinuités, comme le labour, aussi à 10,5 cm, sous le lit de semences, mais l'autre est à 28 cm, au fond de la couche ameublée directement ou indirectement par le chisel. Le procédé «cultivateur» présente un profil assez linéaire, sans discontinuité marquée. Le procédé «travail minimum» présente un profil quasiment

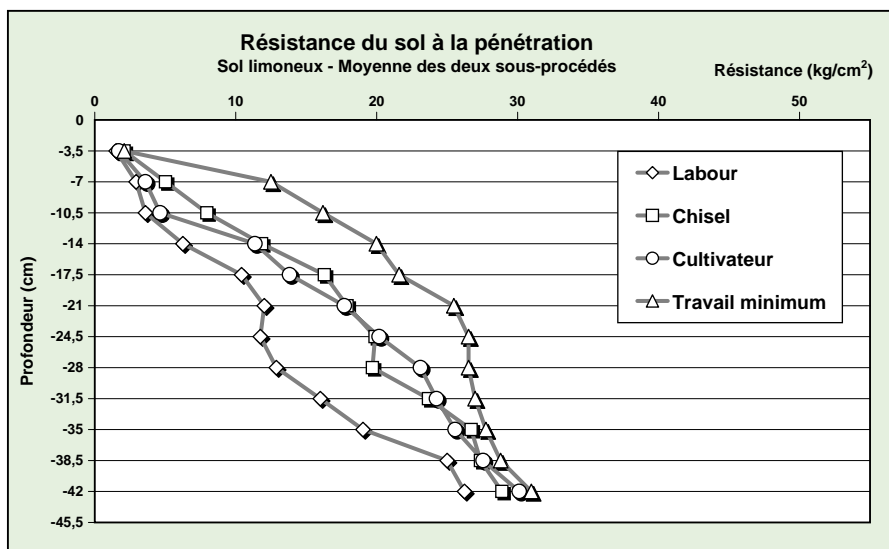
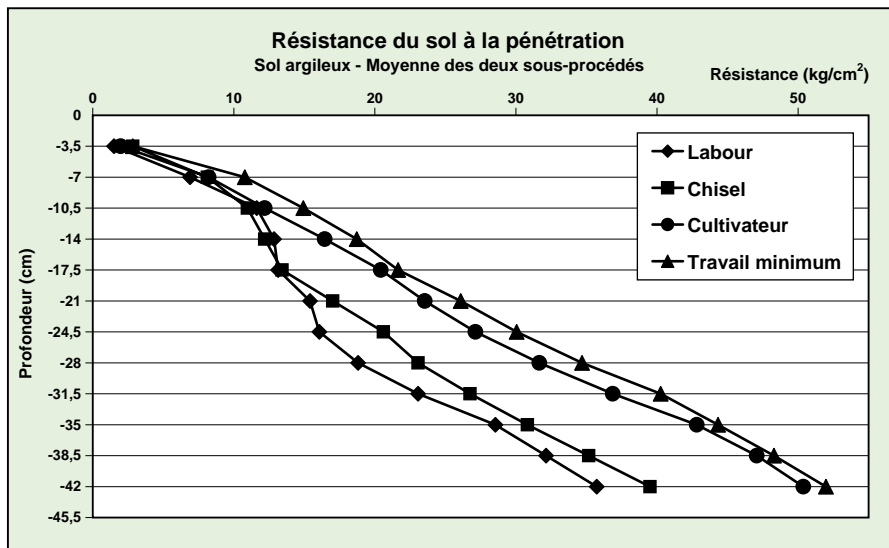


Fig. 14 et 15. Résistance du sol à la pénétration verticale d'une tige métallique. La structure des résultats numériques ne permet pas d'analyse statistique.

symétrique à celui du labour par rapport à la « médiane » que forment « chisel » et « cultivateur », avec cependant une inversion à 28 cm, qui est en principe sans rapport avec les travaux du sol. Les procédés « chisel » et « cultivateur » présentent un profil différent en sol limoneux qu'en sol argileux: ils suivent un profil quasiment identique, positionné en médiane par rapport aux deux autres.

Les profils assez linéaires observés en sol argileux correspondent à un sol plutôt plastique qui a sa propre dynamique de structure, tandis que les profils plus discontinus du sol limoneux, plutôt passif de nature, correspondent plus nettement aux effets attendus des travaux du sol.

### Propriétés hydriques

La capacité de rétention en eau et la perméabilité à l'eau sont deux éléments importants pour un sol. La littérature mentionne généralement que la culture sans labour améliore la capacité de rétention en eau du sol. Maillard *et al.* (1995) ont déjà fait mention de résultats favorables au non-labour. Arshad *et al.* (1999) ont également observé une meilleure rétention de l'eau pour le semis direct que pour le labour. Les résultats de l'analyse de situation faite en 2000 sont illustrés par les figures 16 et 17.

Pour la capacité de rétention en eau (fig.16), le classement des procédés est clairement travail minimum > cultivateur > chisel > labour en sol argileux. En sol limoneux, les différences sont faibles, on remarque tout au plus un petit avantage du travail minimum par rapport aux trois autres procédés dans la couche 0-10 cm. Les différences en-

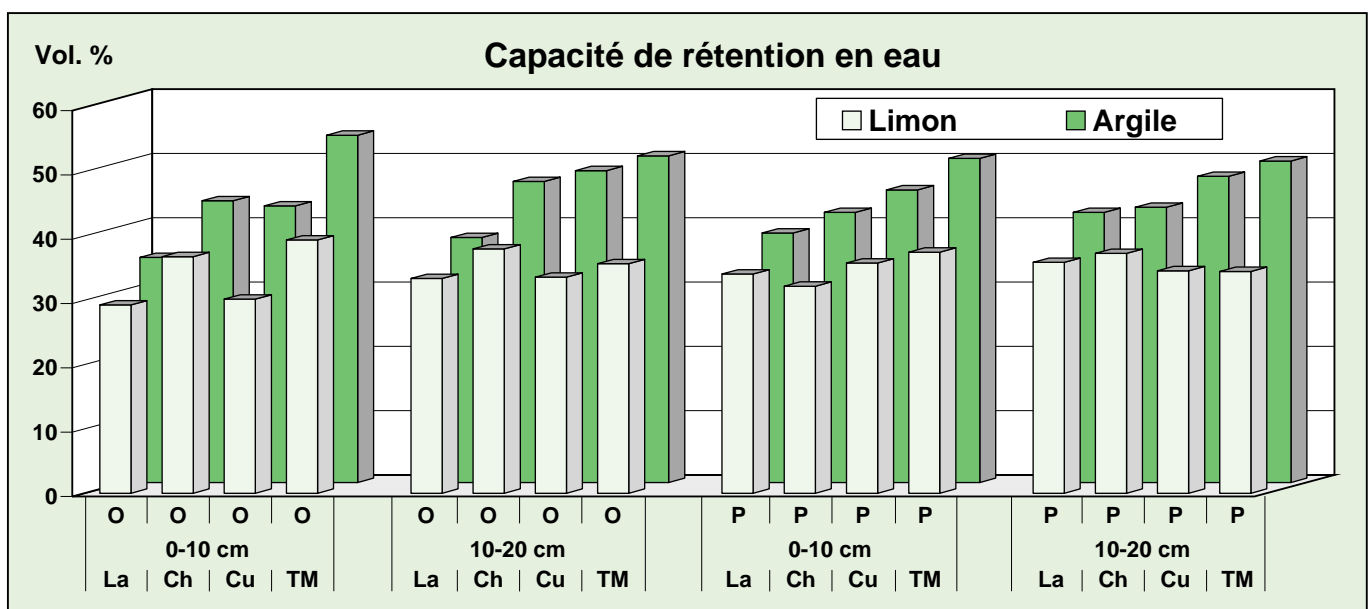


Fig. 16. Capacité de rétention en eau. Elle correspond à la quantité d'eau qu'un sol est capable de retenir lorsque, après avoir été saturé, les pores grossiers sont vidés. Les sous-procédés O et P sont décrits dans le tableau 1.

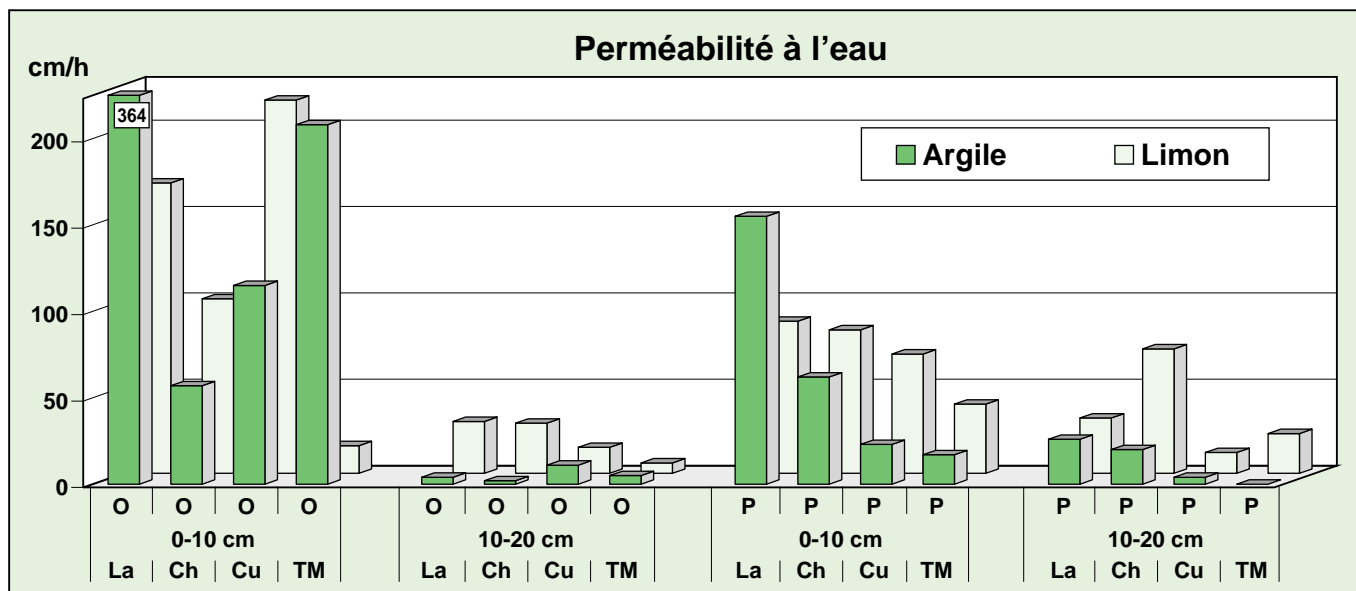


Fig. 17. La perméabilité à l'eau reflète la capacité d'un sol à absorber les eaux pluviales. Les sous-procédés O et P sont décrits dans le tableau 1.

tre les deux sous-procédés ne sont pas significatives, ce qui signifie que la restitution des pailles de blé n'a pas encore exercé d'effet mesurable.

L'avantage de la culture sans labour en matière de capacité de rétention en eau confère aux cultures une meilleure résistance à un déficit hydrique. Cet avantage peut devenir un inconvénient, notamment au printemps où la terre se ressuie et se réchauffe plus lentement qu'avec le labour, ainsi qu'en périodes où le sol doit absorber de grandes quantités de pluie (plus de 100 mm certains mois!). Cet inconvénient est partiellement compensé par la meilleure stabilité structurale et la meilleure portance du sol, mais cela ne suffit pas toujours.

Concernant la perméabilité à l'eau (fig.17), la hiérarchie des procédés de travail du sol est à l'inverse de celle de la capacité de rétention (fig.16). Ce second inconvénient de la culture sans labour s'ajoute à celui qui est mentionné plus haut. Anken *et al.* (1997) ont fait les mêmes constats et concluent même que, en sol peu perméable, c'est encore le labour qui donne les meilleurs résultats.

### Remerciements

Plusieurs collaborateurs de la Station, en plus de ceux qui sont mentionnés dans l'article, ont contribué de près ou de loin à la bonne marche de cette expérimentation. Il y en a parmi eux qui ont pris leur retraite depuis plusieurs années ou qui ont changé d'activité professionnelle. Nous les remercions tous de leur précieuse collaboration, passée ou encore présente. Un merci particulier à Thomas Anken et ses collaborateurs de la FAT pour la mise à disposition du matériel de prélèvement et de calibrage des mottes.

### Bibliographie

- Anken T., Hilfiker T., Sandri R. & Sartori L., 1996. Préparation du lit de semences. Un lit de semences fin implique d'importantes dépenses d'énergie, permet une bonne levée mais ne garantit pas de meilleurs rendements pour le blé d'automne. *Rapports FAT* **484**, 1-9.
- Anken T., Heusser J., Weisskopf P., Zihlmann U., Forrer H.-R., Högger C., Scherrer Caroline, Mozafar A. & Sturny W. G., 1997. Systèmes de travail du sol: Le semis direct impose des contraintes élevées. *Rapports FAT* **501**, 1-16.
- Anken T., Stamp P., Richner W. & Walther U., 2004. Pflanzenentwicklung, Stickstoffdynamik und Nitratauswaschung gepflügter und direktgesäter Parzellen. *Schriftenreihe der FAL* **63**, 1-101.
- Arshad M. A., Franzluebbens A. J. & Azooz R. H., 1999. Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in Northwestern Canada. *Soil & Tillage Research* **53**, 41-47.
- Ball B. C., Bickerton D. C. & Robertson E. A. G., 1990. Straw incorporation and tillage for winter barley: Soil structural effects. *Soil & Tillage Research* **15**, 309-327.
- Carter M. R., 1991. Evaluation of shallow tillage for spring cereals on a fine sandy loam. 2. Soil physical, chemical and biological properties. *Soil & Tillage Research* **21**, 37-52.
- Dick W. A., 1983. Organic Carbon, Nitrogen, and Phosphorus concentration and pH in soil profiles as affected by tillage intensity. *Soil Science Society of America Journal* **47**, 102-107.
- Ellis F. B., Elliott J. G., Barnes B. T. & Howse K. R., 1977. Comparison of direct drilling, reduced cultivation and ploughing on the growth of cereals. 2. Spring barley on a sandy loam soil: soil physical conditions and root growth. *J. agric. Sci., Camb.* **89**, 631-642.
- Franzluebbens A. J., 2005. Soil organic carbon sequestration and agricultural greenhouse gas emissions in the southern USA. *Soil & Tillage Research* **83** (1), 120-147.
- Gomez K. A. & Gomez A. A., 1984. Statistical procedures for agricultural research. John Wiley & Sons, New-York, 680 p.
- Hargrove W. L., 1985. Influence of soil tillage on nutrient uptake and yield of corn. *Agronomy Journal* **77**, 763-768.
- Grevers M. C. J. & Bomke A. A., 1986. Tillage practices on a northern clay soil: Effects of sod breaking methods on crop production and soils physical properties. *Canadian Journal of Soil Science* **66**, 385-395.
- Horne D. J., Ross C. W. & Hughes K. A., 1992. Ten years of a maize/oats rotation under three tillage systems on a silt loam in New Zealand. 1. A comparison of some soil properties. *Soil & Tillage Research* **22**, 131-143.
- Hugon F., 2004. Approche globale du non-labour. Mémoire de fin d'études (non publié), ISARA Lyon.
- Liebig M. A., Morgan J. A., Reeder J. D., Ellert B. H., Gollany H. T. & Schuman G. E., 2005. Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agricultural practices in Northwest USA and Western Canada. *Soil & Tillage Research* **83** (1), 25-52.
- Maillard A., Vez A. & Ryser J.-P., 1994. Résultats d'un essai de culture sans labour depuis plus de 20 ans à Changins: II. Propriétés chimiques du sol. *Revue suisse Agric.* **26** (3), 133-139.
- Maillard A., Neyroud J.-A. & Vez A., 1995. Résultats d'un essai de culture sans labour depuis plus de 20 ans à Changins: III. Propriétés physiques du sol. *Revue suisse Agric.* **27** (1), 5-10.
- Neyroud J.-A., Supcik P. & Magnollay F., 1997. La part du sol dans la production intégrée. 1: Gestion de la matière organique et bilan humique. *Revue suisse Agric.* **29** (1), 45-51.
- Neyroud J.-A. & Chauvin B., 2000. Mesures de  $N_{min}$  pour la gestion de la fumure azotée et l'appréciation du risque de perte par lixiviation au niveau parcellaire. Exemples choisis. *Revue suisse Agric.* **32** (4), 153-158.
- Ryser J.-P., Walther U. & Flisch R., 2001. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbagères. *Revue suisse Agric.* **33** (3), 1-80.
- Tebbrügge F. & Düring R.-A., 1999. Reducing tillage intensity – a review of results from a long-term study in Germany. *Soil & Tillage Research* **53**, 15-28.
- Voorhees W. B. & Linstrom M. J., 1984. Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **48**, 152-156.
- Vullioud P. & Mercier Edith, 2004. Résultats de 34 ans de culture sans labour à Changins: I. Evolution des rendements. *Revue suisse Agric.* **36** (5), 201-212.
- Vullioud P., Mercier Edith & Ryser J.-P., 2004. Bilan de 40 ans d'un essai portant sur différentes fumures organiques (Changins 1963-2003). *Revue suisse Agric.* **36** (2), 43-51.

## Conclusions

- ❑ Les nombreuses mesures effectuées sur le sol révèlent la nature hétérogène de ce substrat. Cela explique les difficultés à mettre en évidence des différences significatives entre les procédés et sous-procédés en comparaison ou à prouver qu'il n'y a pas de différences.
- ❑ Selon les procédés de travail du sol, la répartition des éléments fertilisants P, K et Mg en profondeur est différente, cependant sans incidence sur le développement des cultures.
- ❑ Il n'apparaît aucune relation systématique entre les procédés de travail du sol et les valeurs  $N_{\min}$  mesurées. Par conséquent, une éventuelle économie d'azote par le non-labour est due principalement à la diminution des pertes par ruissellement et par érosion.
- ❑ Les procédés laissant des résidus de récolte près de la surface engendrent une très légère acidification du sol due à leur accumulation locale et à la concentration des précurseurs humiques.
- ❑ En 30 ans d'essai, avec des pratiques culturales qui ne garantissent plus l'équilibre du bilan humique, par rapport aux pratiques antérieures, on observe une diminution graduelle des teneurs en matière organique. Toutefois, un nouvel équilibre s'installe, à des taux différents selon les procédés de travail du sol.
- ❑ Les systèmes de culture ménageant le sol – le travail minimum, le semis en bandes fraisées ou le semis direct ainsi que, dans une mesure un peu moindre, le cultivateur – permettent de maintenir des taux de matière organique stables, en tout cas dans la couche supérieure du sol.
- ❑ Conserver le taux de matière organique contribue au maintien de la stabilité de la structure du sol et de sa capacité de rétention en eau. Cela conserve aussi un maximum de carbone organique dans le champ et évite qu'il aille, sous forme de  $CO_2$ , enrichir l'atmosphère en gaz à effet de serre. En revanche, prétendre accumuler du carbone organique dans le sol ne semble pas réaliste dans nos conditions pédo-climatiques.
- ❑ Le maintien de résidus végétaux près de la surface protège l'intégrité des agrégats et diminue ainsi les risques de battance, de ruissellement et d'érosion.
- ❑ Le chisel est un outil de décompactage efficace, utile en sol limoneux plus particulièrement. Il a toutefois l'inconvénient d'incorporer les résidus de récolte trop profondément. Sur la base d'expériences positives réalisées à Changins avec un décompacteur à ailettes suivi d'une herse rotative à axe horizontal, cette combinaison de machines remplace le chisel depuis 2004. Ainsi, l'ameublissement souhaité en profondeur est réalisé sans bousculer les couches de sol, ce qui permet de maintenir un maximum de résidus organiques près de la surface.
- ❑ L'effet protecteur de la couverture du sol par les résidus végétaux est parfois un inconvénient: il ralentit le ressuyage du sol, ce qui peut retarder l'installation d'une culture de printemps, le maïs dans l'exemple de notre essai, ou du blé d'automne après la récolte du maïs. Selon l'humidité de la couche supérieure du sol au moment de la préparation du lit de semences, le rapport mottes/terre fine est parfois défavorable à un bon contact de la graine avec le sol; il peut s'ensuivre une mauvaise levée et une mauvaise installation de la culture.
- ❑ En sol argileux, c'est généralement le labour qui fournit le lit de semences le plus «mottu» (grossier), tandis que le travail minimum ainsi que la combinaison décompacteur + herse rotative fournissent les plus fins; le chisel et le cultivateur occupent une position médiane. En terre limoneuse, c'est souvent le labour qui fournit le lit de semences le plus fin, suivi du travail minimum et de la combinaison décompacteur + herse rotative; le cultivateur et le chisel ont tendance quant à eux à générer des mottes. Ce classement n'est pas une règle absolue; elle souffre de nombreuses exceptions selon les conditions climatiques durant la période de réalisation des travaux.
- ❑ La densité apparente du sol n'a pas été influencée de manière systématique par les différents procédés.
- ❑ La porosité totale est peu influencée par les procédés de travail du sol. Cependant, la macroporosité a tendance à tomber au-dessous du seuil critique de 10% dans la couche 10-20 cm des procédés non labourés du sol argileux. En sol limoneux, la macroporosité dans la couche 0-10 cm du procédé «travail minimum» est significativement inférieure à celle du chisel, du cultivateur et du labour.
- ❑ La stabilité structurale est systématiquement meilleure en sol argileux qu'en sol limoneux; c'est une donnée naturelle. Dans les deux types de sol, la stabilité est d'autant plus favorable que le sol est travaillé moins intensivement. Le classement est travail minimum  $\geq$  cultivateur  $>$  chisel  $\geq$  labour.
- ❑ Les mesures au pénétromètre montrent une résistance supérieure du sol argileux par rapport au sol limoneux. La résistance est systématiquement la plus forte dans le procédé «travail minimum»; elle peut correspondre à un moindre développement des cultures, en particulier en périodes d'excédents hydriques. La plus faible résistance est mesurée sous «labour» mais elle est caractérisée par des discontinuités liées à l'action des machines utilisées; ces discontinuités peuvent se traduire par un mauvais développement des racines pivotantes du colza en particulier.
- ❑ La capacité de rétention en eau tend à être inversement proportionnelle à l'intensité du travail du sol: travail minimum  $>$  cultivateur  $>$  chisel  $>$  labour. Cet avantage du non-labour est apprécié quand les cultures doivent surmonter une période de déficits hydriques.
- ❑ La perméabilité du sol à l'eau est en quelque sorte le miroir de la capacité de rétention: labour  $>$  chisel  $>$  cultivateur  $>$  travail minimum. L'avantage de la culture sans labour en situation de déficit hydrique se transforme en handicap lorsque le sol doit absorber de fortes quantités d'eau pluviale.
- ❑ En considérant de manière globale et sur le long terme l'effet des techniques de travail sur les paramètres physiques et chimiques du sol, la culture sans labour réunit un certain nombre d'avantages indéniables tels que le maintien de la matière organique, la stabilité de la structure et la diminution du risque d'érosion. Il est néanmoins des situations particulières où c'est le labour qui garde l'avantage. L'expérience acquise parallèlement à l'essai de longue durée qui est l'objet de cet article montre qu'une mise en œuvre pragmatique du non-labour ou du labour, selon les situations et les opportunités, permet une gestion efficace et durable du sol.

## Summary

### Results of a 35-year ploughless tillage experiment at Changins (1970-2004). Part II: Physical and chemical soil properties

A tillage experiment was set up in 1969 at Changins to investigate the long-term effects of different ploughless tillage treatments. A crop rotation of winter wheat, winter oil seed rape, winter wheat and maize was grown on a clay humic soil and on a loamy soil. Three ploughless techniques were compared with conventional mouldboard ploughing: deep cultivation with a chisel plough (25-30 cm depth), shallow cultivation with a cultivator (10-15 cm) and minimum tillage with a rotary harrow (5-7 cm depth); instead of the minimum tillage, direct drilling (wheat and rape) and strip tillage (maize) were occasionally performed. In addition to the main treatments, the effect of subsoiling, reinforced nitrogen fertilization and straw incorporation have been observed sequentially.

The repartition of available P, K and Mg in the soil depth showed some differences depending on the tillage system but without any influence on crop development. No systematic differences did occur between the mineral nitrogen level in the soil and the tillage treatments.

Cropping methods leaving crop residues on the soil surface bring a slightly lower pH value to the soil.

Conservation tillage – especially minimum tillage, direct sowing, strip tillage and to some extent tine tillage – enables a lasting preservation of the organic matter level in the upper soil layer. Organic carbon sequestration in the climatic and pedological conditions of our trial seems not to be realistic. The protecting effect of a crop residues layer on the surface may inhibit the soil drying and thus delay the installation of the new crop.

Soil bulk density and total porosity have not been influenced systematically by the tillage treatments. However macroporosity may drop under the critical level of 10% in the ploughless treatments.

The stability of the soil aggregates is systematically better in ploughless systems and soil resistance to penetration is higher.

Water storage capacity is in inverse proportion to tillage intensity: the highest capacity characterises the minimum tillage which shows the poorest drainage capacity for rainwater. In a global evaluation on the long term effects of some tillage techniques on soil chemical and physical properties, ploughless tillage shows undeniable advantages. The most important are conservation of organic matter, improvement of soil stability and reduction of erosion risks. Nevertheless in some particular conditions the plough keeps the advantage. Experiences collected from other trials have shown that a pragmatic application of ploughless or plough depending on the local conditions and opportunities leads to an efficient and durable soil management.

**Key words:** conservation tillage, subsoiling, N-fertilisation, straw management, organic matter, porosity, aggregate stability, PKMg availability.

## Zusammenfassung

### 35 Jahre pflugloser Anbau in Changins (1970-2004). Teil II: Chemische und physikalische Bodenparameter

Um die Langzeitwirkung des pfluglosen Anbaus zu untersuchen werden seit nun 35 Jahren verschiedene Anbauverfahren ohne Pflug auf einem Tonboden und auf einem Schluffboden in Changins (VD, 430 m ü.M.) mit dem traditionellen Pflug verglichen. Das Pflügen (ca. 25 cm tief) ist das Referenzverfahren; der Tiefgrubber lockert den Boden 25-30 cm tief und der Schälgrubber 10 bis 15 cm tief; die minimale Bodenbearbeitung (Rotoregge 7-10 cm tief) wurde gelegentlich durch die Direktsaat ersetzt. Zusätzlich wurde der Einfluss der Maulwurfsdrainage, einer verstärkten Stickstoffdüngung und der Weizenstroheinarbeitung untersucht.

In Abhängigkeit der Bodenbearbeitungsverfahren sind die Gehalte an verfügbarem P, K und Mg verschiedentlich in der Tiefe verteilt, zwar ohne Einfluss auf die Entwicklung der Kulturen. Keine systematischen Beziehungen zwischen den Verfahren und den gemessenen  $N_{min}$ -Werten sind festgestellt worden.

Die Verfahren, welche höhere Humusgehalte in der oberen Bodenschicht aufweisen, zeigen einen leicht tieferen pH-Wert.

Die bodenschonenden Verfahren – insbesondere die minimale Bodenbearbeitung, die Streifenbandsaat, die Direktsaat und in einem etwas bescheideneren Ausmass der Schälgrubber – ermöglichen die Erhaltung des Humusgehalts in der oberen Bodenschicht. Eine echte Speicherung des organischen Kohlenstoffs scheint unter den Boden- und Umweltbedingungen des Versuches kaum möglich.

Die Schutzwirkung der Ernterückstände an der Bodenoberfläche kann das Abtrocknen hemmen und dadurch die Neubestellung verzögern.

Das Raumgewicht sowie das Gesamtporenvolumen des Bodens zeigten keine systematische Beziehung mit den verschiedenen Bearbeitungsverfahren. Das Grobporenvolumen kann jedoch bei den pfluglosen Verfahren unter dem kritischen Wert von 10% liegen.

Die Krümelstabilität ist systematisch besser bei den Verfahren ohne Pflug und der Eindringwiderstand ist auch höher.

Die Wasser-Speicherungskapazität des Bodens ist umgekehrt proportional zur Bearbeitungsintensität: sie ist am höchsten bei der minimalen Bodenbearbeitung, wobei dieses Verfahren auch das schwächste Wasser-Eindringungsvermögen für Regenwasser aufweist.

Aus einer Gesamtbetrachtung der Langzeitauswirkungen von verschiedenen Bearbeitungsmethoden auf chemische und physikalische Bodenparameter geht hervor, dass der pfluglose Anbau mehrere unleugbare Vorteile beinhaltet. Die wichtigeren betreffen die Erhaltung der organischen Substanz, die Verbesserung der Krümelstabilität und die Verminderung des Erosionsrisikos. Es gibt jedoch Sonderfälle, wo der Pflug sich als vorteilhaft erweist. Die parallel zu diesem Versuch gesammelten Erfahrungen haben gezeigt, dass ein pragmatischer Wechsel von Pflug und Pfluglos, je nach örtlichen Bedingungen und Opportunität, eine effiziente und dauerhafte Bodenbewirtschaftung ermöglicht.