1997 no 492

Rapports FAT

Station fédérale de recherches en économie et technologie agricoles (FAT) CH-8356 Tänikon TG Tél. 052-368 31 31
Fax 052-365 11 90

Augmentation du poids des machines en grandes cultures?

Le passage de la force de traction de 45 kW à plus de 80 kW n'exerce pas d'influence significative sur le sol et le rendement

Etienne Diserens, Station fédérale de recherches en économie et technologie agricoles (FAT), CH-8356 Tänikon

L'agriculteur n'est plus sans ignorer le problème de tassement du sol dû au poids des machines. Leur nombre dépassant les deux tonnes de charge à la roue est en constante progression. Le poids des machines et l'intensité de passages sur le champs jouent un rôle prépondérant dans l'évaluation des risques de tassement. A l'étude: l'impact de ces deux facteurs sur la structure et la fertilité du sol. Au terme d'un essai longue durée effectué à Tänikon, les nuisances engendrées par une mécanisation lourde (80 kW) par rapport à une mécanisation légère (50 kW) n'étaient que faiblement plus marquées pour le sol et les rendements. Ces différences ne portent pas à conséquence pour l'agriculteur. Parmi les machines engagées, celles associées à la culture de betterave occasionnent les plus lourdes charges au sol.

Deux indicateurs ici proposés ont permis une évaluation quantitative des charges infligées au sol: la charge pondérée au sol permettant d'évaluer les sollicitations de charge dans l'horizon de surface et la contrainte de charge maximale à 20 cm de profondeur permettant d'évaluer le risque de compactage au niveau de la semelle de labour.

Sommaire

Essai	2
Charge potentielle en surface	2
Altérations du sous-sol	4
Rendements	6
Conclusions	7
Bibliographie	8

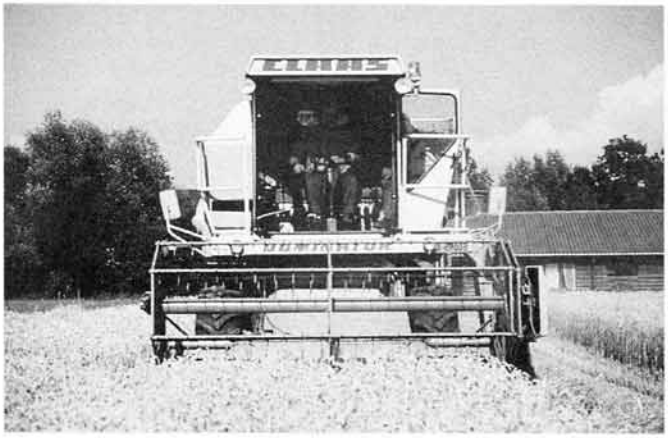

Fig. 1. Machines légères avec beaucoup de passages ...

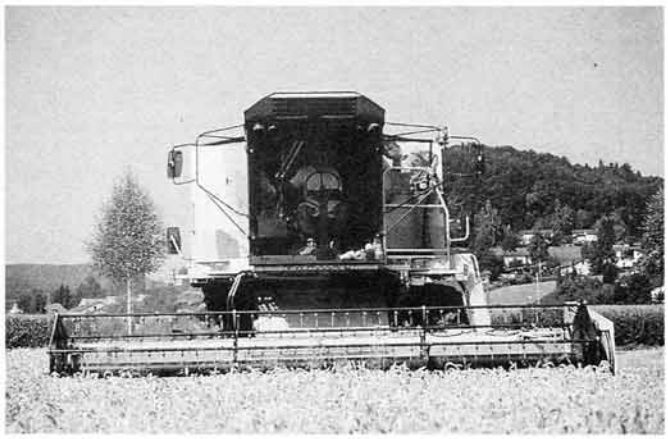

Fig. 2. ... ou machines lourdes avec peu de passages.

Tableau 1. Type de mécanisation

Travail	Mécanisation "légère"		Mécanisation "lourde"	
	Tracteur	Outil de travail	Tracteur	Outil de travail
1. Mécanisation distincte entre procédés léger et lourd				
Travail au cultivateur *	48 kW	Chisel avec émotteur 2,45 m	70 kW	Chisel avec émotteur 2,45 m
Déchaumage	48 kW	Herse à bêches roulantes 2,75 m	81 kW	Herse à bêches roulantes 2,75 m
Labour	48 kW	Charrue bisoc	81 kW	Charrue trisoc
Hersage*	48 kW	Vibroculteur 2,8 m	81 kW	Vibroculteur 4,2 m
Hersage*	48 kW	Herse rotative à axe horizontal 3 m	81 kW	Herse rotative à axe horizontal 3 m
Epandage du lisier	48 kW	Citerne à pression 4 m^3	74 kW	Citerne à pression 4 m^3, tandem
Epandage du fumier	30 kW	Epandeur à fumier 3,2 m^3	48 kW	Epandeur à fumier 4,2 m^3
Moisson (battage)	74 kW	Largeur de coupe 3 m	96-151 kW	Largeur de coupe 4-5 m
Récolte du maïs	48 kW	Hacheuse portée 1 ligne	70-81 kW	Hacheuse portée 2 lignes
Récolte de la betterave à sucre	48 kW	Arracheuse-chargeuse tractée 1 rang		Arracheuse 6 rangs, 3 phases**
			70 kW	Autochargeuse tractée
2. Mécanisation identique entre procédés "léger" et "lourd"				
Décompactage	77 kW	Paraplow 1,7 m		
Hersage	48-50 kW	Vibroculteur 2,8 m		
Roulage	48 kW	Rouleau plombeur 5,2 m		
Engrais de synthèse*	39-50 kW	Distributeur d'engrais pneumatique 12 m		
Protection phytosanitaire	30-50 kW	Pulvérisateur 12 m		
Semis	35-50 kW	Céréales, colza 3 et 4 m		
Récolte de paille	48-50 kW	Presse à balles rondes et HD		

* Tracteur avec roues jumelées, parfois également pour le travail au cultivateur, l'épandage d'engrais
** Décolleteuse à betteraves et arracheuse séparées, automotrices

Description de l'essai et du site

En 1984, un essai longue durée a été mis en place sur une parcelle de la FAT. A une variante «contôle» composée de machines légères nécessitant un nombre élevé de passages s'est opposée une variante comprenant des machines lourdes, travaillant large permettant un nombre réduit de passages (Kramer 1991). L'essai en plein champs cherchant à simuler au plus près les conditions de la pratique a couvert une surface de 2,4 ha (14 parcelles, 24 m × 74 m, soit 7 parcelles par procédés) jusqu'en automne 1990 puis une surface de 1,4 ha (8 parcelles) jusqu'en automne 1996. Toutes les machines engagées dans l'essai sont largement employées dans la pratique (tab. 1). La puissance comme le poids des machines des deux procédés (léger et lourd) se placent dans un rapport de 2:3 (50 kW:80 kW, citernes à lisier 4 m^3:6 m^3).

Le sol contenant plus de 30% de silt et plus de 30% d'argile est un limon argileux (tab. 2). Si l'on considère la densité apparente, un tassement sensible à 20 cm de profondeur est perceptible (tab. 3). Pour un limon argileux, ces valeurs n'atteignent pas de seuils alarmants. En raison de sa texture fine d'une part et de l'importance des précipitations d'autre part, 1166 mm en moyenne (tab. 4), le sol reste peu perméable humide voire détrempé. Dans ces conditions, le sol ne pouvait être travaillé que rarement dans des conditions de sol décentes (fig.3).

Tableau 2. Texture du sol – Prélèvement juin 1984

Profondeur [cm]	Sable [%]	Silt [%]	Argile [%]
0-45	31	34	35

Tableau 3. Densité apparente et volume total des pores Prélèvement: septembre 1995. Valeurs moyennes des deux variantes

Profondeur [cm]	Densité apparente [g/cm3]	Volume total des pores [%]
5-10	1,30	50,9
20-25	1,40	48,0
35-40	1,38	49,0

Charge potentielle en surface

La charge pondérée au sol: un indicateur de charge potentielle

Comment peut-on quantifier voire évaluer les dommages causés au sol par plusieurs véhicules utilisés sur une parcelle? – en calculant la charge pondérée au sol. Cette charge d'abord calculée dans les voies de passage est ensuite pondérée, tenant alors compte de la largeur totale de travail. L'unité s'exprime en bar. Cet indicateur varie en fonction de la charge à la

Tableau 4. Somme des précipitations annuelles pour la période 1985–1995 – ( ) année correspondante

Valeur moyenne [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
1166	985 (1985)	1428 (1995)

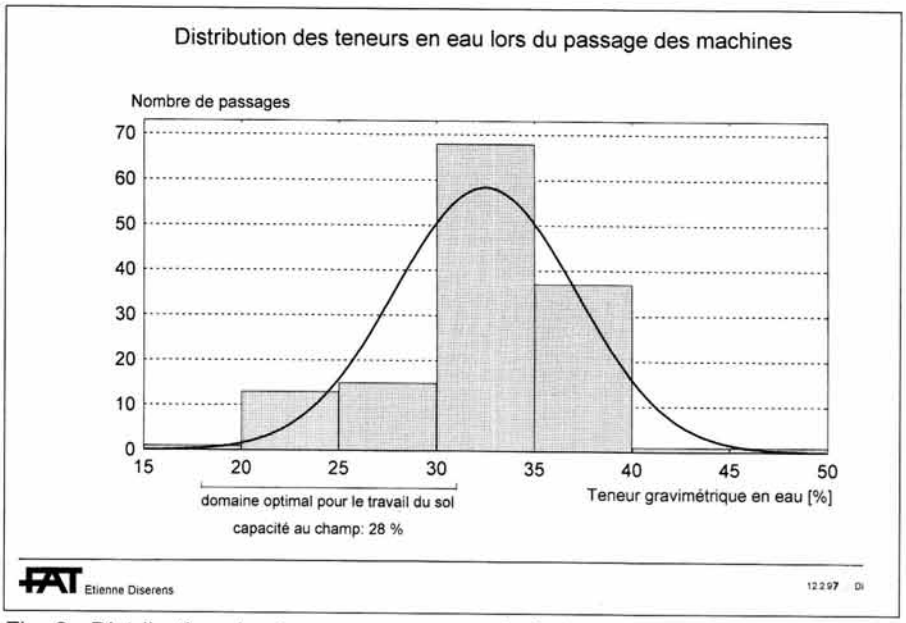

Fig. 3. Distribution des teneurs en eau gravimétrique lors des interventions sur la parcelle. Durée de deux cycles d'assolement 1985–1996.

roue, de la dimension du pneumatique, de la largeur de travail, du nombre de passages, du degré de tassement du sol et de son humidité. Cette valeur pondérée cherche à quantifier le risque potentiel de dégradation encouru par la structure du sol en surface. Si les paramètres du sol restent constants, il est alors possible d'évaluer et de comparer les risques de nuisance entre machines.

Les indications complémentaires de calcul figurent sous la rubrique «charge pondérée au sol» (voir encadré).

Définitions

Densité apparente [g/cm³]: rapport de la masse du sol sec par rapport au volume correspondant de sol non perturbé.

Teneur en eau gravimétrique [%]: rapport de la masse d'eau par rapport à la masse de sol sec corres-pondant.

Teneur en eau volumétrique [%]: rapport du volume de l'eau au volume correspondant de sol humide.

Potentiel hydrique [mbar]: capacité du sol à retenir ou restituer de l'eau selon son degré de saturation. Potentiel < 0 le sol agit comme un vacuum, l'eau se déplace par capillarité; potentiel > 0 le sol agit comme médium à travers lequel l'eau se déplace par gravitation.

Pression interstitielle [mbar]: force transmise par l'eau du sol.

Courbe de désorption: fonction donnant l'évolution de la tension de l'eau du sol en fonction de la teneur en eau (volumétrique). Information de base sur le régime hydrique du sol.

Capacité au champ: humidité du sol lorsque les pores grossiers sont vides (diamètre des pores > 10 mm, tension de l'eau dans le sol comprise entre –80 et –120 mbar)

Consolidation: déformation d'un sol saturé à la suite d'une augmentation de la densité apparente.

Tassement: déformation d'un sol non saturé à la suite d'une augmentation de la densité apparente.

Charge pondérée au sol (C_{pond})

$$C_{pond} = \frac{2 \times \text{largeur des pneus}}{\text{largeur de travail}} \times \text{contrainte max}_{20cm} \times \text{facteur (1)}$$

La formule (1) est basée sur les hypothèses suivantes:

- La profondeur choisie pour le calcul de la contrainte de charge dans le sol est de 20 cm (profondeur de la couche arable). C'est la profondeur critique de la semelle de labour, en dessous de laquelle on ne peut que très difficilement ameublir le sol.
- Pour faciliter l'évaluation de la portance, les sols ont été divisés en trois catégories: sol ameubli, sol partiellement rassis, sol rassis.
- Pour chaque catégorie de sol, le degré d'humidité a été divisé en deux sous-catégories: sol plutôt sec, sol plutôt humide.
- Lorsque les passages sont multiples, on utilise un facteur F distinct pour chaque essieu. La roue dont la contrainte de charge est la plus élevée est calculée normalement (facteur = 1); la roue dont la contrainte de charge vient en deuxième position est multipliée par le facteur 0,5; la roue dont la contrainte de charge vient en troisième position est multipliée par le facteur 0,25 etc. ...

Le degré de tassement du sol et son humidité peuvent être pris en compte grâce à une variable (de 2 à 5) figurant comme exposant dans la formule de Smith (1985) pour le calcul de la contrainte de charge. Un nombre suffisant de valeurs mesurées sur le terrain faisant défaut, l'état du sol et le facteur F sont saisis de manière empirique.

Pour évaluer les dommages causés par la machine, on additionne les valeurs de chaque essieu (2) (voir aussi exemple fig. 4 et tab. 5). Pour les nuisances à l'échelle de la culture, les valeurs de chaque machine sont sommées (fig. 5). Comme les racines influencent la structure du sol, ce seul indice pour les comparaisons de cultures à morphologie racinaire éloignée est insuffisant.

$$C_{pond\ (moissonneuse\text{-}batteuse)} = \frac{2 \times 47}{300} \times 1.10 \times 1.0 + \frac{2 \times 31}{300} \times 0.73 \times 0.5 = 0.42$$

Dommages causés au sol: faibles différences entre la mécanisation «légère» et «lourde»

La charge pondérée est en général plus importante pour les machines lourdes (fig. 5). Les différences n'en restent pas moins faibles. A trois reprises, la charge au sol due aux machines lourdes est restée la même ou a baissé légèrement (1985, 1988 et 1991). En 1985, les résultats s'expliquent par l'emploi d'un tracteur de 63 kW (4,5 t) lors du labour (charrue trisoc) remplacé ultérieurement par un tracteur de 81 kW (5,3 t); par la suite le sol présentait un degré d'humidité optimal au moment de la récolte en 1988 et les pneus de la moisonneuse-batteuse 5 m étaient mieux dimensionnés aux moissons de 1991.

Colza et betteraves à sucre: des charges pondérées au sol des plus élevées

En comparant les cultures, le colza, en raison de la fréquence des apports d'engrais et des traitements, et les betteraves à sucre, en raison du poids des récolteuses et de la grande surface sollicitée par les pneus, obtiennent des valeurs proches voire dépassant 2,5 bar. Pour le colza, les valeurs plus élevées en 1986 qu'en 1992 s'expliquent par les apports de fumier. Pour la betterave à sucre, plus de 50% de la charge au sol (plus de 1,0 bar) revient exclusivement aux travaux de récolte alors effectués dans des conditions particulièrement défavorables (automne 1989).
La culture du maïs ne se traduit pas par une charge au sol extrêmement élevée. Ce n'est que pour la récolte, en 1987 et en 1993, que la charge au sol des deux procédés était plus conséquente (comprise entre 0,6 et 0,7 bar). Elle était due à une largeur de travail relativement faible associée à une importante surface sollicitée par les pneus (55%) et aux mauvaises conditions du sol. Dans l'assolement retenu, les céréales ménagent le plus le sol. Les valeurs au niveau des cultures sont comprises entre 1,6 et 1,7 bar. Suite à un travail du sol intensif avec de fréquents passages pour la fertilisation, les valeurs du blé (1990) sont relativement élevées de même que le seigle en automne 1990 avec l'utilisation d'un décompacteur (paraplow).

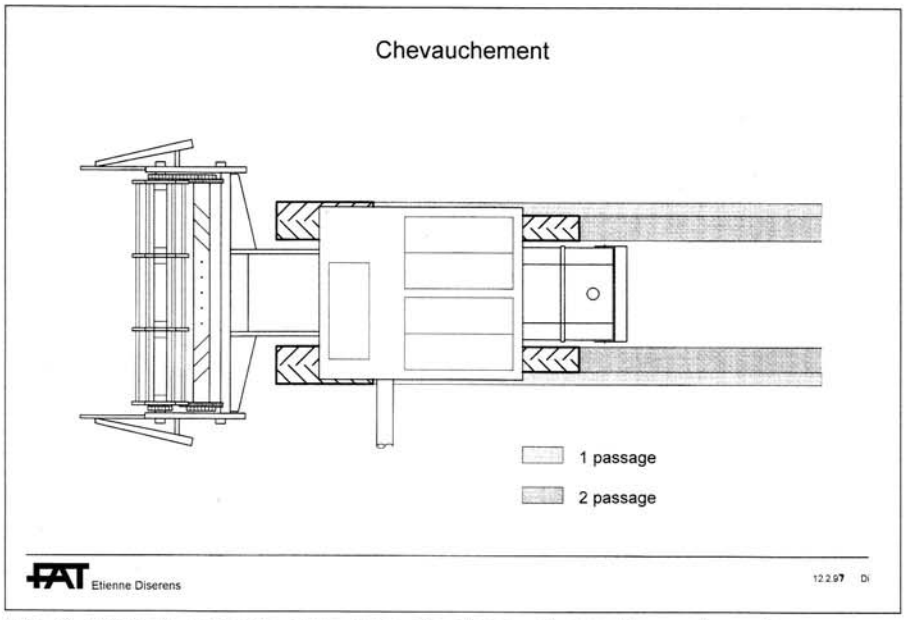

Fig. 4. Voie de passage avec zone de chevauchement pour la moissonneuse-batteuse (largeur de la barre de coupe: 3 m).

Tableau 5. Données pour le calcul de la charge pondérée exemple: Claas Dom. 3 m, sol rassis et sec – moisson 1994

		Roue avant	Roue arrière
Pneumatique		18,4 - 30	12,5/80 - 18
Largeur du pneu	[cm]	47	31
Surface de contact au sol	[cm^2]	2015	811
Charge à la roue	[kg]	3600	1500
Pression de contact	[bar]	1,79	1,85
Contrainte de charge à 20 cm	[bar]	1,10	0,73
Charge pondérée par essieu	[bar]	0,34	0,08
Charge pondérée totale	[bar]	**0,34 + 0,08 = 0,42**	

Altération du sous-sol

La pression maximale à 20 cm de profondeur: indicateur de risque de tassement au niveau de la semelle de labour

Dans la zone critique de la semelle de labour, à 20 cm de profondeur, deux facteurs influencent la pression exercée sur le sol: la charge des roues et la pression de contact. Cette dernière représente la pression maximale lorsque les machines sont à moitié chargées pour des raisons de représentativité. Ici, les procédés «léger» et «lourd» n'affichent aucune différence significative (tab. 6).
La pression la plus élevée, soit 1,6 bar, a été atteinte lors de la récolte des betteraves à sucre avec une chargeuse de 12 t, (procédé «lourd»). La surface sollicitée par les pneus s'élevait alors à 44%. Avec les moisonneuses-batteuses, les valeurs oscillaient entre 1,0 et 1,6 bar. A partir de 1988, les contraintes de charges étaient même plus faibles avec la moissonneuse-batteuse équipée d'une barre de coupe de 5 m qu'avec celle équipée d'une barre de 3 m (tab. 6); cette différence est due de toute évidence aux pneus trop étroits de la moissonneuse-batteuse 3 m (18,4–30, charge à la roue avant 3600 kg). Dans la culture de maïs, (tab. 1), les valeurs les plus élevées, comprises entre 1,0 et 1,1 bar, ont été atteintes lors du labour et des traitements (pneus étroits sur les voies de passage). Avec ces valeurs élevées, les dégâts causés à la structure du sol restent

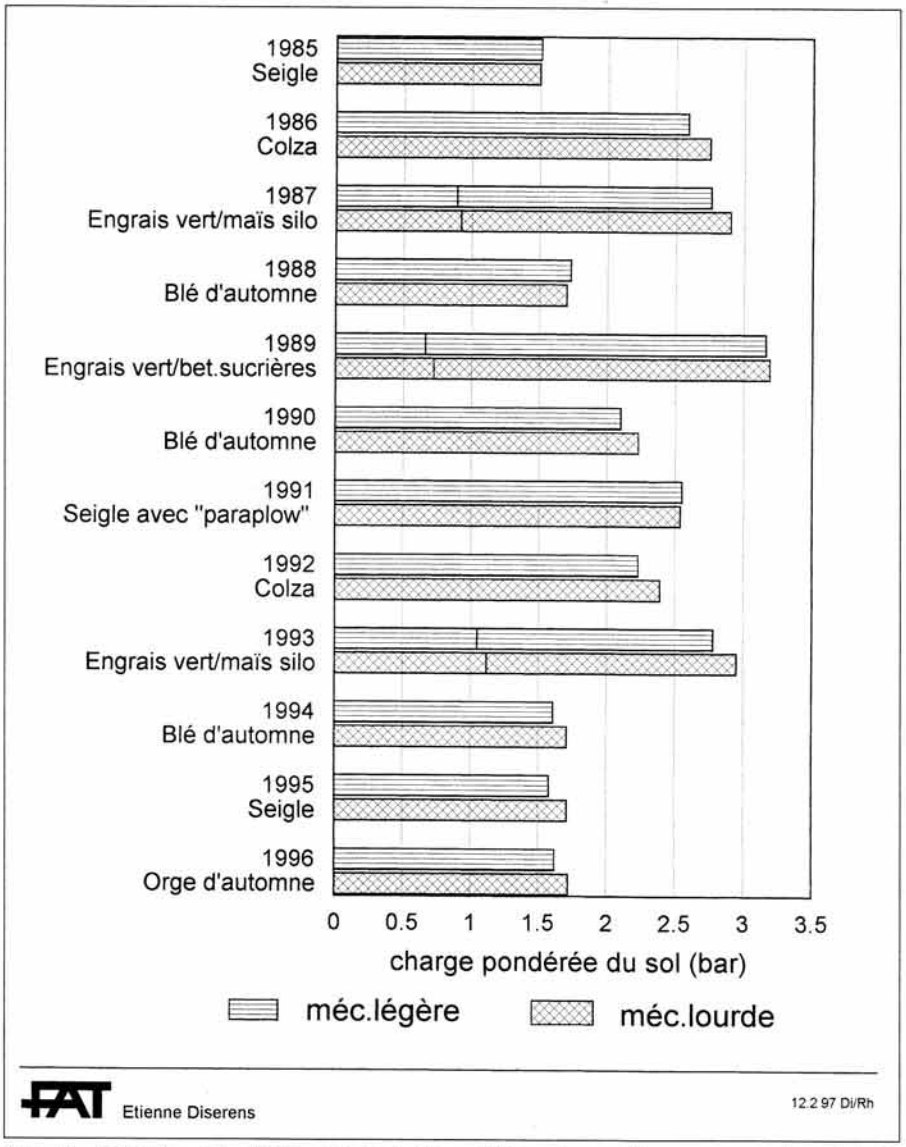

Fig. 5. Charge pondérée au sol des différentes cultures pour la période 1985–1986.

inévitables: lissage dans les voies de passage et tassement du sol en surface. Notons qu'aucune récolteuse automotrice n'a été retenue dans le parc à machines pour le maïs.
Durant la onzième année d'essai, les densités apparentes et le volume des pores ont été relevés (tab. 7). On a remarqué des densités légèrement plus importantes pour la variante lourde jusqu'à 25 cm de profondeur. Lorsque le sol est plus compact dans la semelle de labour, les différences ne sont plus significatives. Les relevés du volume des pores évoluent de la même manière mais ne sont pas statistiquement significatifs. L'effet d'une charge à la roue élevée (plus de 4 t pour les machines lourdes) n'apparaît pas au niveau du sous-sol. Au-delà de 25 cm de profondeur, aucune différence n'est perceptible. La migration de particules argileuses de la surface vers le sous-sol, le poids intrinsèque du sol et l'effet de tassement répétitif des machines (roue de sillon) année après année contribuent à consolider le sous-sol et à le rendre plus portant.

Disponibilité de l'eau dans la semelle de labour: pas de différence significative entre la mécanisation lourde et la mécanisation légère

En août 1995, on a mesuré la tension de l'eau dans le sol et la quantité d'eau extraite à l'aide de lysimètres (fig. 6). Malgré l'absence de pluie, la semelle de labour est restée saturée (le potentiel hydrique = 0) pour les deux variantes. Sous les voies de passage, en raison de l'ascension capillaire facilitée en milieu compacté, le sol s'est desséché plus vite que hors des voies.
Si les pores grossiers disparaissent suite au tassement, les quantités d'eau qu'ils renferment diminuent également, le volume d'eau extrait sous les voies de passages est donc plus réduit qu'en milieu non foulé. Si dans les traces de passage, les quantités d'eau obtenues avec la variante «lourde» sont légèrement supérieures, aucune différence n'apparaît hors des voies (fig. 6).
La figure 7 présente la courbe de désorption au niveau de la semelle de labour (25–30 cm). La zone des pores grossiers (où l'eau s'écoule facilement) est semblable pour les deux variantes. Dans le secteur inférieur avec des pores de taille moyenne de 80 à 160 mbar (l'eau aisément disponible pour les plantes), on constate une faible différence au profit de la variante légère. Si l'on compare ces résultats avec l'évolution de l'extraction de l'eau en dehors des voies de passage (fig. 6), la différence est pratiquement négligeable dans cette frange de succion. A cette profondeur, aucun tassement apparaissant sous forme de baisse du volume des pores grossiers suite aux passages d'engins agricoles «lourds» n'est constaté. Dans la zone argileuse, fréquemment saturée au niveau de la semelle de labour, le poids des machines est porté non seulement par les agrégats terreux mais aussi par l'eau de rétention (haute pression interstitielle) (Horn et al., 1990).

Infiltration d'eau: valeurs équilibrées

La conductivité hydraulique à saturation k_s (s pour saturation), indicateur de la mobilité de l'eau dans le sol, a été mesurée en laboratoire. Elle dépend uniquement des caractéristiques du sol (texture, géométrie des agrégats, structure).
Le tableau 8 présente les différentes valeurs. Si le terrain ne comporte ni galeries de vers de terre, ni fissures, ni fentes, ni espaces lacunaires contenant des matières organiques peu ou pas décomposées, les valeurs du sol restent très faibles entre 25 et 30 cm de profondeur. A cette profondeur, le sol est considéré comme pratiquement imperméable.

Tableau 6. Pression maximale à 20 cm de profondeur pour la période 1985–1996

Année	Culture	Travail "léger" / "lourd"	Humidité du sol*	Pression [bar] "léger"	Pression [bar] "lourd"	Surface foulée [%] "léger"	Surface foulée [%] "lourd"
1985	Seigle	Battage / id	CC	**0,99**	**0,99**	31,3	31,3
1986	Colza	Battage / id	CC-S	1,39	**1,57**	33,8	27,4
1986	Engrais vert	Epandage de lisier / id	S	**0,78**	0,73	17,1	21,5
1987	Maïs ensilage	Traitement / labour	S	0,98	**1,07**	4,7	41,0
1988	Blé	Battage / id	S	**1,37**	1,27	31,3	27,1
1988	Engrais vert	Epandage de lisier / id	S	0,63	**0,64**	17,1	19,6
1989	Betterave à sucre	Récolte / id	S	1,10	**1,63**	71,1	**44,4**
1990	Blé	Battage / id	Sc	**1,11**	0,97	31,3	34,2
1991	Seigle	Battage / id	CC-S	**1,37**	1,27	31,3	27,1
1992	Colza	Battage / id	S	**1,36**	1,13	31,3	34,2
1992	Engrais vert	Semis / Fumure	Sc	**0,71**	**0,71**	5,8	5,8
1993	Maïs ensilage	Traitement / id	CC-S	**1,04**	**1,04**	4,0	4,0
1994	Blé	Battage / id	Sc	**1,10**	0,95	31,3	34,2
1995	Seigle	Battage / id	CC	**1,10**	0,95	31,3	34,2
1996	Orge	Battage / id	S	**1,36**	1,10	31,3	34,2

* Sc = sec; CC = capacité au champ (sol ressuyé); S = saturation

Rendements

Rendements irréguliers, influence somme toute négative d'une mécanisation plus lourde

La variante lourde présente des rendements inférieurs à huit reprises (dont quatre avec une différence significative). A quatre fois, les différences se sont avérées au désavantage de la variante légère. Le maïs est la seule culture qui n'a pas souffert des contraintes de charges plus élevées. Les cultures dans leur ensemble n'ont pas réagi de manière marquée sur le site de Tänikon suite à une augmentation de charge.

La figure 9 donne les rendements en fonction de la charge pondérée au sol. La charge au sol calculée pour les travaux de récolte est imputée à la culture suivante. Ceci explique les valeurs relatives élevées pour le blé d'automne après la betterave (1990) et après le maïs ensilage (1994). Sur onze périodes, les deux paramètres évoluent six fois en sens opposé comme présumé (1985–6, 1986–7, 1991–2, 1993–4, 1994–5, 1995–6). A lui seul, l'indicateur pondéré de charge est insuffisant pour expliquer les fluctuations de rendements.

Autres facteurs qui influencent le potentiel de rendement

Au cours de l'essai, les rendements pour chaque culture ont tendance à baisser, à l'exeption du maïs ensilage (fig. 8). Compte tenu de l'humidité du sol au moment du passage des machines (fig. 3), on peut supposer que le passage sur un sol dont l'état est fréquemment défavorable ne peut que menacer à moyen terme la structure du limon argileux qui le compose avec de négatives répercussions sur le rendement.

De 1993 à 1995, une prairie temporaire occupa une partie de parcelle attribuée précédemment à la variante «lourde». Au printemps 1995, on a semé de l'orge sur cette parcelle comme sur les autres de l'essai. Après trois ans de prairie artificielle, le rendement en grains fut nettement plus élevé, bien que prélevé en variante «lourde» (tab. 9).

Tableau 7. Densité apparente et volume total des pores – Prélèvement: septembre 1985

Profondeur [cm]	Densité apparente [g/cm^3] "léger"	Densité apparente [g/cm^3] "lourd"	Signification	Volume total des pores [%] "léger"	Volume total des pores [%] "lourd"	Signification
10-15	1,28	1,35	s.*	51,90	48,53	n.s.*
20-25	1,36	1,43	s.	48,93	47,10	n.s.
25-30	1,37	1,40	n.s.	49,23	48,13	n.s.
30-35	1,38	1,39	n.s.	48,90	48,47	n.s.
40-45	1,40	1,37	n.s.	48,17	48,53	n.s.

* s. = différence significative, n.s. = différence non significative

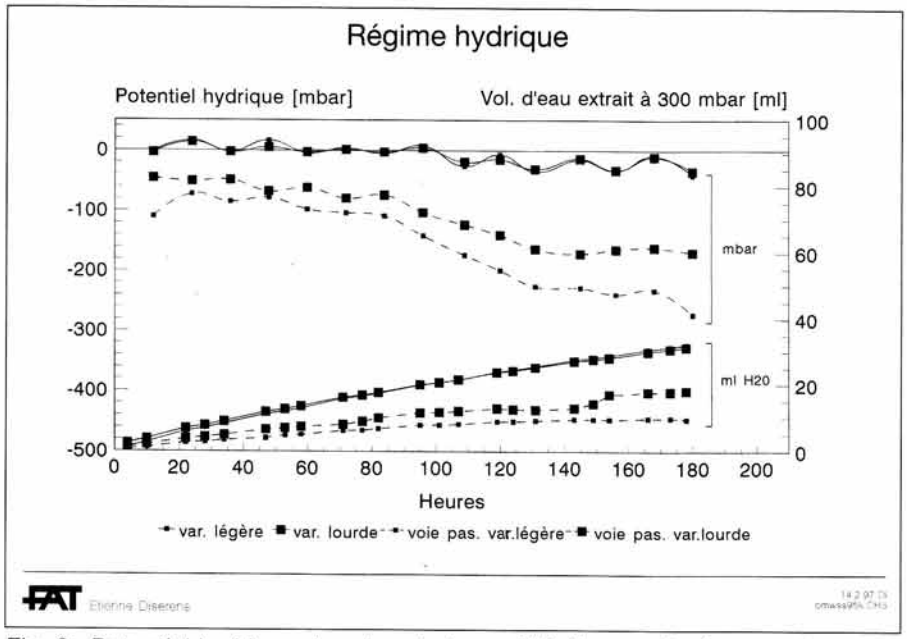

Fig. 6. Potentiel hydrique dans le sol et quantité d'eau prélevée par vide partiel dans la semelle de labour (25–30 cm). Période de relevés: 15–22.8.1996, précipitations: 3,4 mm.

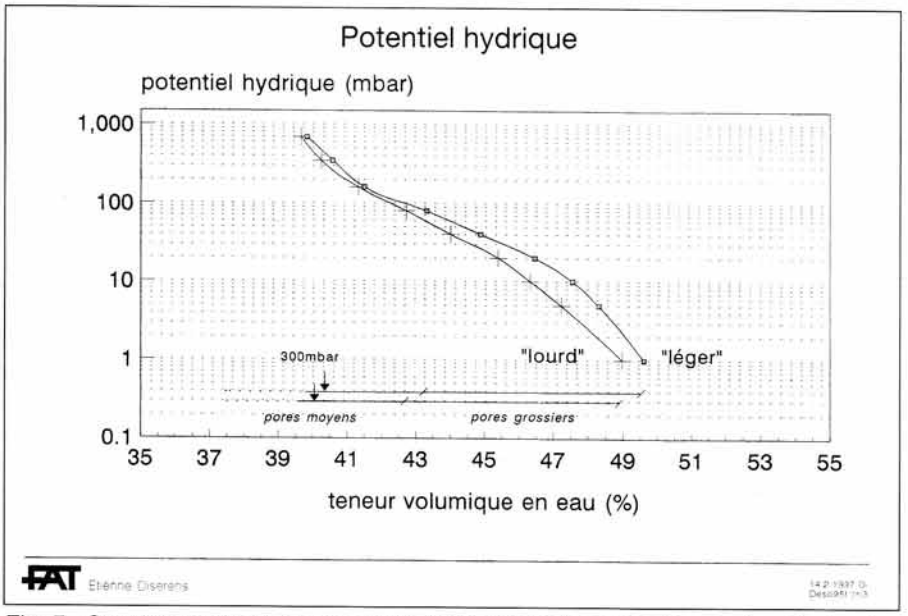

Fig. 7. Courbe de désorption sans la distribution des pores fins, sol prélevé entre 25 et 30 cm de profondeur. Pores grossiers 0 à 80 mbar: écoulement facile de l'eau, pores moyens de 80 à 690 mbar: eau facilement disponible pour la plante, de 690 à 15 000 mbar: eau difficilement utilisable; pores fins > 15 000 mbar: eau inutilisable par les plantes.

Tableau 8. Perméabilité de l'eau à une profondeur de 25–30 cm (valeurs k_s, infiltration en cm par jour)

Sol examiné	Variante "légère"	0,25	
	Variante "lourde"	0,21	n.s.*
Classe de drainage	très perméable	100 et plus	
	perméable	10-100	
	peu perméable	1-10	
	"imperméable"	1 et moins	

* n.s. = différence non significative

Conclusions

L'essai entrepris à Tänikon ne permit pas de déceler des différences significatives entre les deux classes de machines «légère» (35 à 50 kW) et «lourde» (65 à 80 kW), ni au niveau du sol et de sa structure, ni au niveau des rendements.

Couche supérieure du sol
La couche supérieure n'a été qu'à peine plus sollicitée par le passage des machines lourdes. Les rendements ont été légèrement inférieurs, bien que l'on n'ait pu établir de corrélation étroite entre les contraintes pondérées au sol et les rendements. Les machines engagées ont foulé uniformément un sol humide, peu portant en surface portant préjudice à sa structure et à sa fertilité.

Sous-sol
En raison de la forte teneur en argile et de l'humidité persistante proche du seuil de saturation (pression interstitielle élevée) aucun tassement du sous-sol à partir de 25 cm suite à une augmentation de charge des machines n'a été constaté sur la parcelle de Tänikon.

Structure et fertilité du sol
Pour maintenir une structure favorable à la croissance des racines (terre grumeleuse, agrégats ameublis), un assolement équilibré avec prairie temporaire est une mesure de première importance.

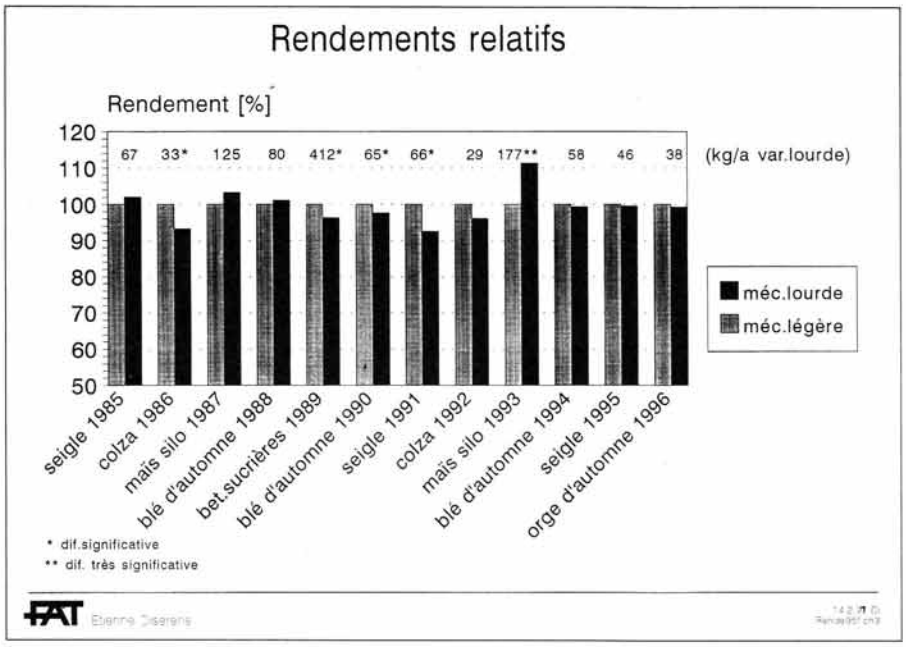

Fig. 8. Rendements relatifs pour la période 1985–1996 (variante «légère» = 100%).
** différence significative, ** différence très significative.*

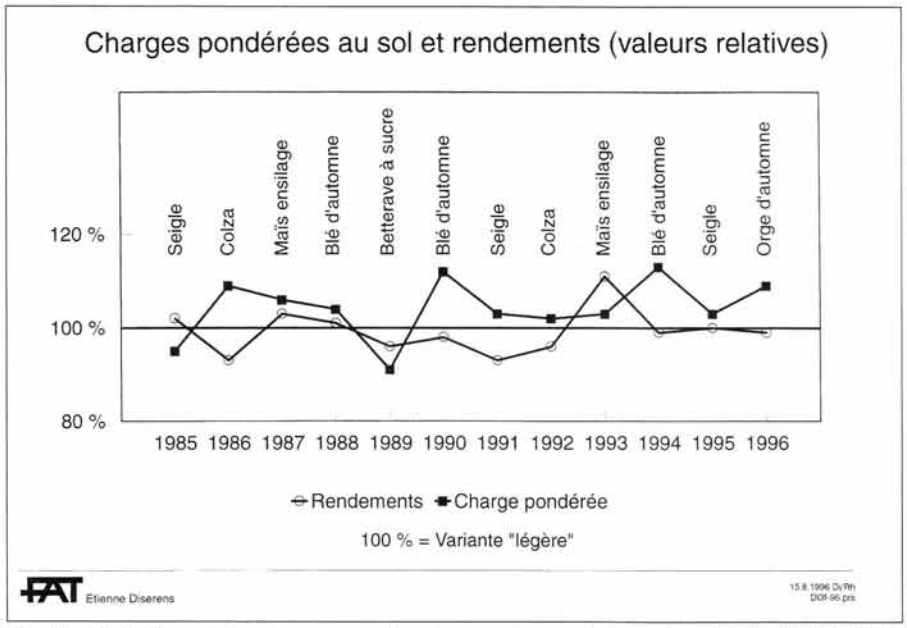

Fig. 9. Evolution de la charge au sol et des rendements pour la période 1985–1996 pour la variante «lourde». Valeurs relatives (100% = variante «légère»).

Tableau 9. Rendement de l'orge après la rompue

Variante	C_{pond}*	Rendement		Poids à l'hectolitre		Précédent cultural
	bar	q/ha	%	kg/hl	%	1993-1995
"légère"	1,62	38,7	100,0	66,8	100,0	1 x maïs, 2 x céréales
"lourde"	1,72	38,4	99,2	66,5	99,6	1 x maïs, 2 x céréales
"lourde"	**1,72**	**54,4**	**140,6**	**67,1**	**100,5**	**3 x prairie temporaire**

* Charge pondérée du sol

Bibliographie

Horn R., Hartge K. H., 1990. Methoden und Konzepte der Bodenphysik. Teil A: Mechanische Eigenschaften von Bodenprofilen und Bodenstruktureinheiten, séminaire de formation continue de la Société allemande de pédologie à Kandersteg du 4 au 7 avril 1989, Zurich, 10/1990

Kramer E., 1991. Mécanisation performante: un danger pour nos sols? Rapport FAT 412. Station fédérale de recherches en économie et technologie agricoles (FAT)

Smith D. O., 1985. Compaction by wheels: a numerical model for agricultural soils. Journal of Soils Sciences, 36, 621–632.

Traduction: ABConseil SA, Orbe