FAT Rapports

No 613 | 2004

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

Interactions entre train de roulement et sol en grandes cultures

TASC: Une application informatisée pour juger et optimiser les charges infligées au sol.

Etienne Diserens et Ernst Spiess, Agroscope FAT Tänikon, Station fédérale de recherches en économie et technologie agricoles, CH-8356 Ettenhausen

TASC

TYRES/TRACKS AND SOIL COMPACTION

TASC[1] est une application Excel de la FAT, axée sur la pratique, utile pour les décisions relatives à la conception, à l'équipement et à l'emploi de grosses machines et de gros outils en grandes cultures. Un output numérique et graphique permet d'évaluer les charges infligées au sol par les pneumatiques et les chenilles, suivant les paramètres du train de roulement et les propriétés du sol. Le risque de compactage sévère potentiel est indiqué pour les zones non reprises par les outils ameublissants. Plus de dix essais au champ[2] réalisés entre 1994 et 1999 sur des sols de cohésion moyenne à élevée, ont permis de déduire les relations mathématiques (algorithmes) pour calculer la surface d'empreinte et la propagation des contraintes de charge dans le sol, à partir desquelles un modèle a été développé. Les données techniques de plus de 1000 types de pneumatiques agricoles et forestiers enregistrées, peuvent être sélectionnées et reprises dans ce modèle. Les normes internationales des pneumatiques et des jantes permettent également de calculer la charge maximale autorisée suivant le type de pneumatique, la pression de gonflage et la vitesse de la machine. TASC est donc un instrument utile pour choisir, comparer et adapter les pneumatiques les uns par rapport aux autres. L'application convient essentiellement pour les pneumatiques avec un profil «traction» ou «Farmer» sur un sol arable rassis et de cohésion moyenne à élevée, avec une semelle de labour consolidée entre 20 et 25 cm. L'objectif principal de cet outil est la prévention des sols contre le compactage sévère difficilement réversible, voire irréversible.

[1] en français: pneumatiques/chenilles et compactage du sol
[2] en collaboration avec Agroscope FAL Reckenholz, Station fédérale de recherches en agroécologie et en agriculture

Sommaire	Page
Problématique	2
TASC – L'essentiel en bref	2
Eléments de l'application	4
Restrictions et limites	8
Validation de l'application sur la base des essais	12
Conclusions	12
Bibliographie	14

Problématique

Des charges croissantes, des sols de plus en plus sollicités

Depuis le milieu des années 80, les exploitations ont de plus en plus tendance à utiliser leurs machines en commun dans une optique de rationalisation. Les performances des machines agricoles se sont considérablement développées, ce qui fait que le poids des outils, des machines et des tracteurs atteint un ordre de grandeur à peine concevable il y a quelques années encore. La récolteuse intégrale de betteraves détient le record des charges à la roue avec plus de 11 t. Les poids totaux maximaux atteignent les 60 t. Pour que de telles machines restent rentables, elles doivent fonctionner avec un taux d'utilisation élevé. Le risque est donc important de devoir circuler sur le terrain dans des conditions défavorables (humidité élevée). La protection des sols prend de plus en plus d'importance, revêt même un caractère prioritaire compte tenu des risques de compactage de la couche arable et du sous-sol. L'apport optimal en eau, en air, en éléments nutritifs et en chaleur n'est par ailleurs plus garanti.

Le compactage du sol rend difficile l'infiltration de l'eau, ce qui favorise la fréquence et la gravité des inondations. Sur terrain plat et à plus forte raison sur terrain en pente, il faut s'attendre à de l'érosion suite aux écoulements de surface. D'autre part, les modifications de la structure sous forme de compactage au niveau du sous-sol causent des dommages insidieux, souvent irréversibles, apparaissant surtout lorsque les conditions météorologiques sont extrêmes avec répercussions négatives à long terme sur la fertilité du sol et son rendement.
En Suisse, dans le domaine de la protection physique des sols, l'Ordonnance sur les atteintes portées au sol accorde la priorité au compactage du sol et à l'érosion (des directives sont en cours). Le principe de prévention est capital pour assurer la multifonctionnalité du sol à long terme et maintenir sa fertilité. Jusqu'ici, l'application de ces principes est restée difficile, car la pratique agricole manque de directives concrètes, approfondies et spécifiques aux différents cas de figure. A noter que le sol, par essence est une structure vivante hétérogène, soumise à des interactions permanentes, rendant l'approche du problème inévitablement ardue.

TASC – L'essentiel en bref

Avec les machines agricoles et les outils d'un poids élevé, la question des charges infligées au sol est capitale, notamment lorsque les sols sont très humides. Y a-t-il un risque de compactage du sol ou non? Quels avantages pour le sol avec de nouvelles techniques? Faut-il éventuellement ajourner le travail prévu?
TASC (spécifications encadré 1) est une application axée sur la pratique, utile pour la prise de décisions, convenant à tous les domaines confrontés au problème de charges infligées au sol par les trains de roulement: pratique agricole, vulgarisation, planification, enseignement, industrie des machines agricoles et des pneumatiques.
Pour un ou plusieurs cas d'application (simultanément quatre au maximum), il est possible de représenter les charges infligées au sol et le risque de compactage suivant le train de roulement, la charge, le type de pneumatiques, leurs dimensions, la pression de gonflage, le type et la consistance du sol (fig. 1). Les données relatives sont faciles et rapides à saisir. Il suffit soit d'enregistrer directement les dimensions des pneumatiques en centimètres, soit de reprendre les valeurs préenregistrées dans les tableaux de pneumatiques, par simple clic. Ces tableaux contiennent les données techniques de plus de 1000 modèles de pneumatiques de l'agriculture et de la sylviculture. Le programme exige notamment l'indication du type et de la consistance du sol. Ces informations peuvent respectivement être obtenues par un examen tactile simple et par le «test du tournevis». La consistance du sol permet de tenir compte indirectement du degré d'humidité de la couche supérieure du sol, paramètre qui ne se laisse guère mesuré par l'agriculteur. Ces «méthodes pratiques» sont décrites dans l'application. La feuille de saisie affiche déjà les informations suivantes: surface de l'empreinte, pression de contact et indication éventuelle du risque de compactage sévère. Il est également possible de consulter les paramètres suivants à titre informatif: propagation des contraintes de charge dans le sol (graphique et numérique), bulbe de pression (graphique et numérique) ainsi que la contrainte de charge en un point du sol donné (numérique). Tout risque de compactage sévère éventuel est alors indiqué dans les zones correspondantes. Indépendamment de ces informations, il est possible de calculer la charge maximale autorisée à la roue selon les normes internationales sur les pneumatiques.

Exemples de l'application:
– Contrôle des charges infligées au sol selon la dimension des pneumatiques/chenilles, la charge à la roue/à

Encadré 1

Spécifications Software – Commande		
Version	TASCV1.xls V1.0, 2004	
Système d'exploitation	à partir de Win 98 (2ed)	
Software	à partir d'Office 97, (Excel 97)	
Langues	**A**llemand, **F**rançais, **A**nglais	
Mémoire nécessaire	env. 50 MB	
Support	CD-Rom	
Prix (TVA compris, sans frais de port:)	1ère commande	Update
Enseignement, vulgarisation, service à la clientèle	CH Fr. 350.– (225 €)	150.– (95 €)
Usage privé, non lucratif	CH Fr. 120.– (75 €)	50.– (30 €)
E-mail	etienne.diserens@fat.admin.ch	
Publié par	Agroscope FAT Tänikon, CH-8356 Ettenhausen www.fat.ch, info@fat.admin.ch	
Distribué par	Agroscope FAT Tänikon, CH-8356 Ettenhausen Tél. 052 368 31 31, Fax: 052 365 11 90 E-mail: doku@fat.admin.ch	

la chenille et la pression de gonflage pour une consistance donnée de l'horizon travaillé du sol.
- Contrôle des dangers pour le sol suivant la consistance de l'horizon travaillé du sol pour une charge donnée (pneumatiques, charge à la roue, pression de gonflage).
- Evaluation du risque de compactage pour différentes charges suivant le type de sol, la consistance de l'horizon travaillé du sol et la profondeur maximale d'ameublissement.
- Contrôle des charges infligées au sol en un point donné du sol (p. ex. à l'intérieur d'une rangée de plantes ou à l'extérieur de la voie de passage).
- Choix de pneumatiques compte tenu des ses dimensions, de sa structure, de la jante, de l'indice de charge, de sa portance compte tenu de la pression de gonflage, la vitesse et la propagation des contraintes de charge dans le sol.
- Calcul de la charge maximale autorisée à la roue suivant la dimension des pneumatiques, la pression de gonflage et la vitesse du véhicule.

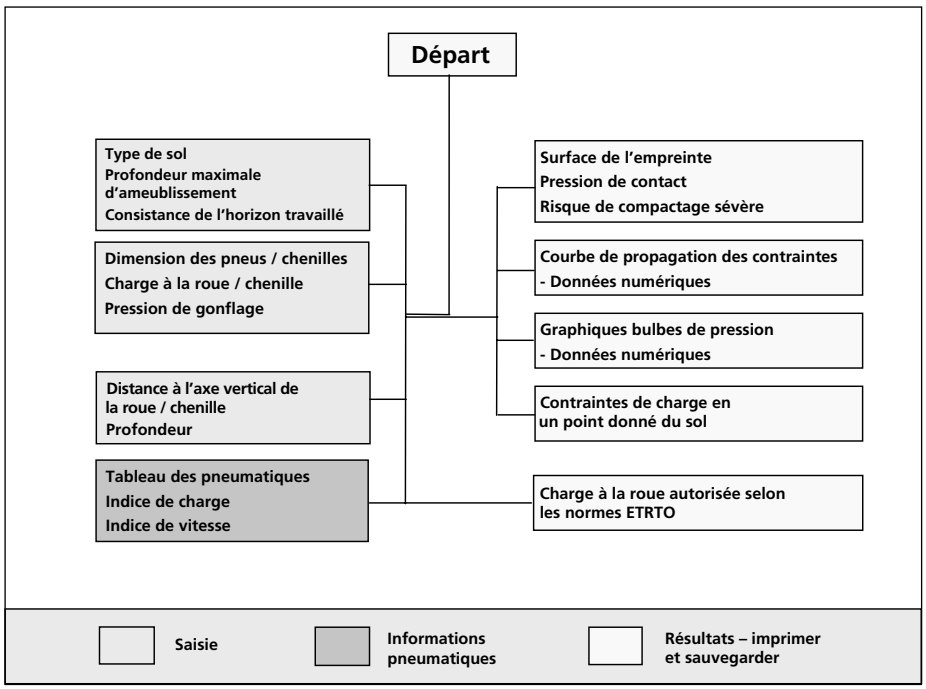


Fig. 1: Ordinogramme simplifié de l'application TASC. Comme toutes les cellules d'entrée sont remplies par défaut avec des données-types dans la feuille de saisie, toutes les feuilles de sortie peuvent être consultées directement sans saisie préalable de données.

Principes et concept: préconsolidation et propagation des contraintes de charge

L'application repose sur le concept de base de la «préconsolidation». Lorsqu'à une certaine profondeur, une contrainte de charge (F) est inférieure à la résistance du sol (R), également appelée préconsolidation, le sol ne se déforme pas, réagissant de manière plutôt élastique. Toutefois si F est supérieure à R, le sol réagit de manière plutôt plastique, des déformations sous forme de compactages sont alors à craindre (fig. 2).

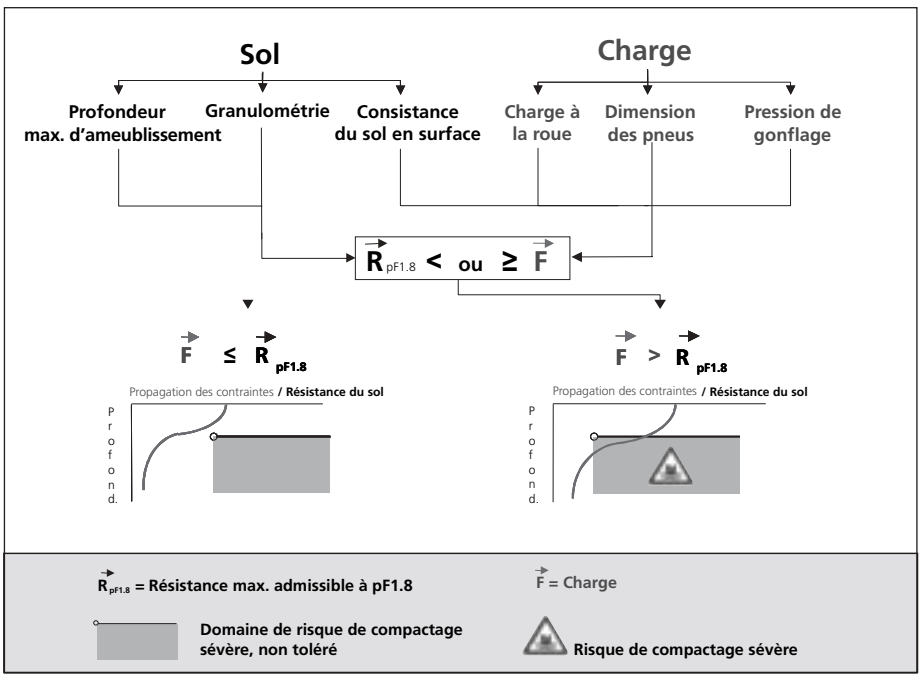


Fig. 2: Principe de base de l'application. Lorsqu'à la profondeur d'ameublissement maximale, la contrainte de charge F est supérieure à la résistance critique du sol R, il y a risque de compactage sévère.

En grandes cultures, le risque porte sur les compactages sévères, ceux qui perturbent durablement la croissance végétale, se situant à une profondeur que n'atteignent plus les outils ameublissants traditionnels.

$$DA_{eff.}\,[g/cm^3] = DA\,[g/cm^3] + 0.009\,[A\%]$$

(équation 1)

sachant que

DA_{eff} = densité apparente effective
DA = densité apparente
A = teneur en argile (gravimétrique)

Pour évaluer le degré de compactage suite à l'impact du poids des machines, la densité apparente (masse de la phase solide du sol par unité volumique) est une valeur de référence essentielle. Selon Qasem et al. (2000), la densité apparente est en corrélation étroite avec la résistance du sol (également appelée préconsolidation). Pour déterminer la résistance du sol maximale autorisée, on calcule les régressions entre la densité apparente effective (équation 1, Arbeitsgruppe Boden, 1996) et la préconsolidation pour un pF 1,8 (potentiel hydrique à la capacité au champ, pores grossiers Ø > 50 µm ressuyés) ici, à partir de trois banques de données (Lebert 1989, Qasem et al. 2000, FAL 2003) (tab. 1).

Le groupe de travail «Protection physique du sol» de la Société Suisse de Pédologie (SSP) a fixé à 1,7 g/cm³ la valeur indicative de la densité apparente effective. Cette valeur fait donc office de référence dans l'application TASC. Les valeurs maximales de stabilité sont indiquées pour chaque série de données suivant les classes granulométriques (tab. 1).

Les valeurs de préconsolidation se situent à un niveau relativement élevé pour les cinq classes granulométriques. Ainsi, lorsque l'information «risque de compactage sévère» apparaît dans l'application, les dangers pour le sol sont de ce fait élevés. A saturation (test tactile), les risques de déformations au niveau du sous-sol restent les mêmes, compte tenu de nos résultats et ceci contrairement à nos attentes initiales.

Tab. 1: Valeurs de stabilité du sol pour des sols ressuyés(*), en corrélation avec la valeur indicative de la densité apparente effective (1,7 g/cm³).

Stabilité du sol [kPa] calculée d'après les données de			TASC	
Lebert (1989)	Qasem (2000)	FAL (2003)	[kPa]	Classement selon DVWK (**)
Argile limoneux, argile (41-77% T, 22-48% U)				
70	78	– (***)	**80**	moyenne
Silt argileux, limoneux, sableux, silt (9-42% T, 52-86% U)				
108	106	71	**105**	élevée
Limon argileux, limon (21-40% T, 29-37% U)				
89	85	71	**85**	moyenne
Limon sableux, sable limoneux (11-20% T18-39% U)				
105	–	74	**105**	élevée
Sable limoneux, sable silteux, sable (1-9% T, 3-22% U)				
120	–	–	**120**	très élevée

(*) Pores grossiers (Ø ≥ 50 µm) ressuyés. Potentiel hydrique: 63 hPa
(**) DVWK pour Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (cf. DVWK, 1995)
(***) Dans la zone argileuse, les données FAL ne comportent pas de point de mesure avec une densité apparente effective égale ou supérieure à 1,7 g/cm³
– Aucune donnée de mesure dans la classe granulométrique précitée
T = Teneur en argile
U = Teneur en silt

Eléments de l'application

L'application se compose des parties suivantes: domaine de saisie et de sortie ainsi que différents tableaux de données techniques sur les pneumatiques avec fonction de calcul correspondante pour déterminer la charge à la roue autorisée selon les normes ETRTO (The European Tyre and Rim Technical Organisation, Organisation Technique Européennne du Pneumatique et de la Jante) (fig. 1).

Feuille de saisie (fig. 3): des paramètres faciles à enregistrer

Type de sol au niveau de la profondeur maximale d'ameublissement: le type de sol (granulométrie) joue un rôle lorsqu'il s'agit de définir la résistance du sol maximale autorisée. La granulométrie est répartie en cinq classes pouvant être déterminée à l'aide d'un test tactile simple lorsque les analyses font défaut (Hasinger et al. 1993) (fig. 4).

La **profondeur d'ameublissement maximale** renseigne sur la profondeur au-delà de laquelle un risque de compactage sévère est à craindre. Dans les grandes cultures, cette profondeur correspond souvent au seuil supérieur de la semelle de labour consolidée, lorsque le sol n'est pas travaillé plus profondément.

La **consistance de l'horizon travaillé du sol** est décisive pour la portance du sol. Elle influe considérablement sur la propagation des contraintes de charge

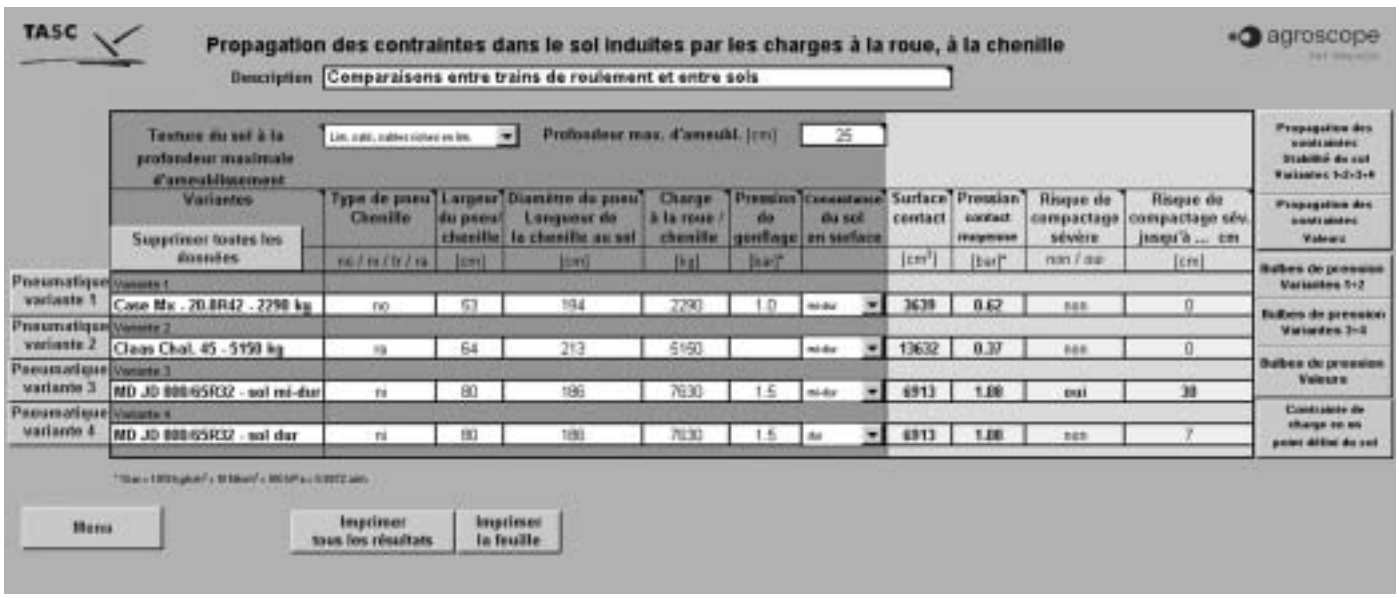


Fig. 3: Feuille de saisie. Il est possible de traiter ou comparer jusqu'à quatre variantes simultanément. Les données des pneumatiques peuvent être soit exportées de la banque de données dans la feuille de saisie, soit y être intégrées manuellement.

Encadré 2

Exemples d'application pour un limon sableux				
Les exemples suivants font référence aux figures 3, 7-13				
	1. Trains de roulement		**2. Sols**	
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Horiz. travaillé 0-25 cm	mi-compact		**mi-compact**	**compact**
Machine	**Tracteur à pneus**	**Tracteur chenilles**	Moissonneuse-batteuse	
Type	Case Mx Magnum	Claas Chal. 45	JD MD 2254	
Puissance	169 kW	178 kW	132 kW	
Pneumatiques /chenilles	20,8R42	64 x 213 cm	800/65 R32	
Poids total	7630 kg	10300 kg	19200 kg (trémie pleine)	
Charge à la roue/chenille	2290 kg	5150 kg	7630 kg	
Pression de gonflage	1,0 bar	–	1,5 bar	
Figures	7	8	9	

1. Comparaison des trains de locomotion

Sollicitation du sol pour deux types de trains de roulement: pneumatiques et à chenilles à puissance équivalente. Préalables: répartition du poids la plus régulière possible grâce à un attelage optimal des outils et une tension suffisante des chenilles. Quel est le système préférable pour le sol (fig. 7-8)?

Les **courbes de propagation des contraintes dans le sol** (fig. 11, var. 1+2) indiquent que le sol superficiel est moins sollicité par les chenilles malgré sa charge plus élevée que par les pneumatiques. Les contraintes de charge enregistrées sous les chenilles ne deviennent supérieures à celles enregistrées sous la roue qu'à partir d'une profondeur de 45 à 50 cm (45,7 cm). Pour ce sol, il n'y a, dans les deux cas, aucun risque de compactage sévère au-delà de la profondeur d'ameublissement maximale de 25 cm.

Les **graphiques des bulbes de pression** (fig. 12, var. 1+2) montrent que le sol superficiel est davantage sollicité par les pneumatiques. A relever en outre que la diminution des contraintes de charge sous la chenille est très lente, car la surface d'empreinte est particulièrement élevée.

Selon les **normes ETRTO** et d'après les indications de Good Year, les pneumatiques 20.8R42 avec une pression de 1 bar et une vitesse de 30 km/h ne doivent pas supporter une charge supérieure à 3290 kg (fig. 15). Si la pression de gonflage reste inchangée, une charge à la roue de 3075 kg est encore autorisée pour une vitesse de 40 km/h. En ce qui concerne la charge à la roue prescrite, il n'y a pas de restriction.

Récapitulatif: dans les conditions mentionnées ci-dessus, la chenille sollicite nettement moins le sol superficiel que les pneumatiques standard. Dans les deux cas, aucun risque de compactage sévère sous la profondeur d'ameublissement maximale (25 cm) n'est à craindre.

2. Comparaison des sols

Risque représenté pour le sol par une moissonneuse-batteuse à trémie pleine d'une largeur de travail de 4,8 m sur un limon sableux. Des compactages sévères sont-ils à craindre (fig. 9-10)?

Les **courbes de propagation des contraintes de charge** (fig. 11, var. 3+4) indiquent qu'un risque de compactage sévère jusqu'à 30 cm se manifeste lorsque la trémie est pleine (env. 4,8 t.) avec un sol en surface mi-compact. Le danger ne peut être évité qu'en réduisant la charge à env. 6200 kg. Lorsque le sol en surface est compact, aucun danger n'est à signaler. Pour une charge à la roue autorisée de 6,5 t avec une pression de gonflage de 1 bar, en ne remplissant la trémie qu'à moitié, le risque pour le sol dans la zone critique peut être écarté.

Lorsque le sol est mi-compact (fig. 12, var. 3+4), les **contraintes de charge** se concentrent vers le centre du pneu. Le sol est alors moins sollicité sur les bords, mais davantage en profondeur.

Récapitulatif: sur limon sableux, avec une trémie pleine, il ne faut circuler que sur un sol compact. Sur sol mi-compact, il est recommandé de ne circuler qu'avec une trémie à moitié pleine (charge à la roue 6500 kg, pression de gonflage 1 bar).

Fig. 4: Le test tactile permet de tirer directement des conclusions au champ sur la texture et l'humidité du sol.

dans le sol. Dans la pratique, «le test du tournevis» permet d'estimer facilement la consistance de l'horizon travaillé où la structure, **l'humidité** et le réseau racinaire du sol interfèrent (fig. 5, Spiess et al. 2001). La consistance du sol est répartie en trois classes «compacte», «mi-compacte» et «tendre». Avec un peu d'expérience, il est tout à fait possible d'effectuer une évaluation intermédiaire. Dans le **sous-sol** consolidé, souvent humide à très humide, nos essais au champ n'ont par contre pas permis de mettre en évidence l'influence de la **teneur en eau** sur la distribution des contraintes de charge dans le sol (Diserens et al. 2002).

Le type, la largeur et le diamètre des pneumatiques ou la largeur et la longueur des chenilles déterminent largement la surface de l'empreinte du train de roulement sur le sol. Le type de pneumatiques (pneumatiques standard, pneumatiques basse section ou Terra) avec dimensions peuvent être importés directement dans la feuille de saisie depuis les tableaux des données techniques ou alors introduits manuellement. Pour les chenilles, les données ne peuvent être enregistrées que manuellement. **La charge à la roue ou à la chenille** est décisive pour déterminer la surface de l'empreinte et la pression de contact. Pour mettre en évidence les seuils de risque, le calcul doit tenir compte de la charge à la roue/chenille maximale de la machine avec son attelage. La **pression de gonflage** est, elle aussi, en relation étroite avec la surface de l'empreinte. Plus la pression de gonflage est basse, plus la surface de l'empreinte est grande (Diserens 2002). Jusqu'à présent, les bases de l'application TASC portent essentiellement sur les profils de type Farmer et traction (fig. 6).

a) b) c)

Fig. 5: Test du tournevis pour déterminer simplement la consistance de l'horizon travaillé du sol: a) compacte (pression > 8 kg), b) mi-compacte (pression entre 5-8 kg), c) tendre (pression < 5 kg). (Photo M. Welter, Landfreund)

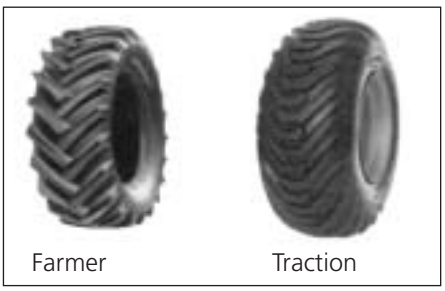


Fig. 6: Les mesures au champ pour l'application TASC ont été réalisées essentiellement avec des pneumatiques à profil Farmer ou traction. (Photo Trelleborg)

Fig. 7 + 8: Trains de roulement avec pneumatiques (petites surfaces d'empreinte) (fig.7, photo Case) et chenille (grande surface d'empreinte) (fig.8, photo P. Trachsel). La puissance du moteur de ces tracteurs est équivalente, le poids total du tracteur à chenilles est cependant nettement plus élevé.

Résultats: tabulaires et graphiques

La surface de l'empreinte est calculée à partir du type de pneumatiques, de leur dimension, de la charge à la roue et de la pression de gonflage (ces deux derniers critères uniquement pour les gros pneumatiques, diamètre > 130 cm) ainsi qu'à partir des relations mathématiques (algorithmes) pour sol arable humide rassis, normalement reconstitué après labour (Diserens 2002).

La **pression de contact** utilisée comme valeur initiale pour calculer la propagation des contraintes de charge dans le sol est une moyenne (dans l'horizon travaillé du sol, les contraintes de charge se propagent de manière très hétérogène suite p. ex. à l'effet des barrettes). La pression de contact moyenne est déterminée par la charge à la roue ou à la chenille et par la surface de l'empreinte.

Dangers pour le sol: si la contrainte de charge dépasse la résistance au sol défini à un pF1.8 au niveau de la profondeur d'ameublissement maximale, le risque de compactage est confirmé par un «oui» et la profondeur maximale de risque de compactage est éventuellement indiquée. Sinon, la réponse est négative.

Le calcul de la **propagation des contraintes de charge** repose avant tout sur les équations de sols homogènes de Fröhlich (1934). Suite à de nombreuses mesures dans la couche arable et le sous-sol, ces équations ont été adaptées à des sols de cohésion moyenne à élevée présentant une consistance variable de l'horizon travaillé. (Diserens et al. 2002, fig. 10). La figure 11 présente des exemples d'évolution de la propagation des contraintes de charge dans le sol: lorsque la

Fig. 9: Moissonneuse-batteuse, trémie pleine, charge à la roue 7630 kg. Faut-il s'attendre à des dégâts sévères de compactage? (photo Matra)

courbe de propagation des contraintes de charge coupe la droite de stabilité (au niveau de la profondeur d'ameublissement maximale), il y a risque de compactage (variante 3). Outre la représentation graphique, les contraintes de charge sont également disponibles sous forme tabulaire.

Le **«bulbe de pression»** est une représentation à deux dimensions de la propagation des contraintes de charge dans le sol (fig. 12), basée sur la formule de Boussinesq (Lang et al. 1982). Le long des lignes appelées «lignes isobares» la contrainte de charge reste constante. Ici encore, les données ont été adaptées pour des sols arables mi-lourds à lourds et de consistance variable pour l'horizon travaillé. La figure 12 montre que la contrainte avec charge maximale (variante 2) pénètre plus profondément dans le sol qu'avec la charge minimale (variante 1). Par contre, lorsque la charge est constante, mais les conditions du sol variables, les contraintes se concentrent vers le centre lorsque la consistance du sol diminue (variante 3 couche superficielle mi-compacte, variante 4 sol compact). Plus la profondeur augmente, plus la différence de contrainte de charge diminue pour une charge à la roue identique agissant sur des sols d'une consistance différente. Un tableau supplémentaire donne les valeurs des contraintes dans le sol, ceci en profondeur et de par et d'autre de l'axe de la roue.

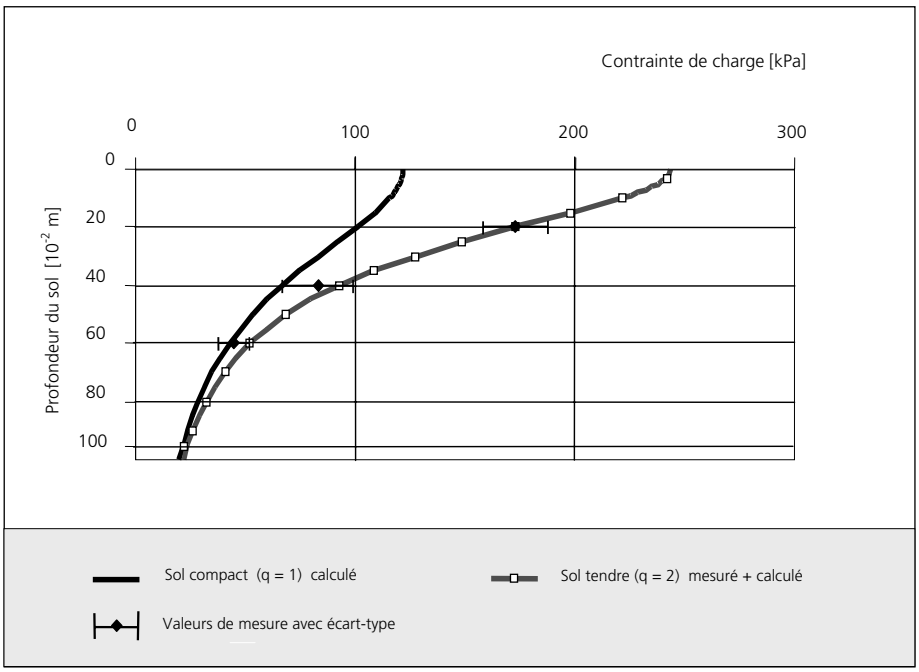


Fig. 10: Simulation: calcul de propagation des contraintes de charge avec mesures: Sol tendre, moissonneuse-batteuse, pneumatiques 800/65R32, charge à la roue 7630 kg, pression de gonflage 1,5 bar.

La **contrainte de charge** peut également être calculée en un point quelconque du sol préalablement défini (fig. 13). Pour la variante 3, le risque de compactage a ainsi été atteint à une profondeur de 25 cm, à 17,4 cm du centre de la roue. Cela signifie que la largeur maximale de la surface compactée est de 34,8 cm (2 fois 17,4 cm) à 25 cm de profondeur. Si l'on ramène à zéro la distance par rapport au centre du train de roulement, on obtient alors les valeurs de la courbe de propagation des contraintes de charge (fig. 11, variante 3). Le relevé de la contrainte de charge à l'extérieur de la voie, en bordure de la voie ou à une profondeur de plus de 110 cm peut dans certains cas être judicieux.

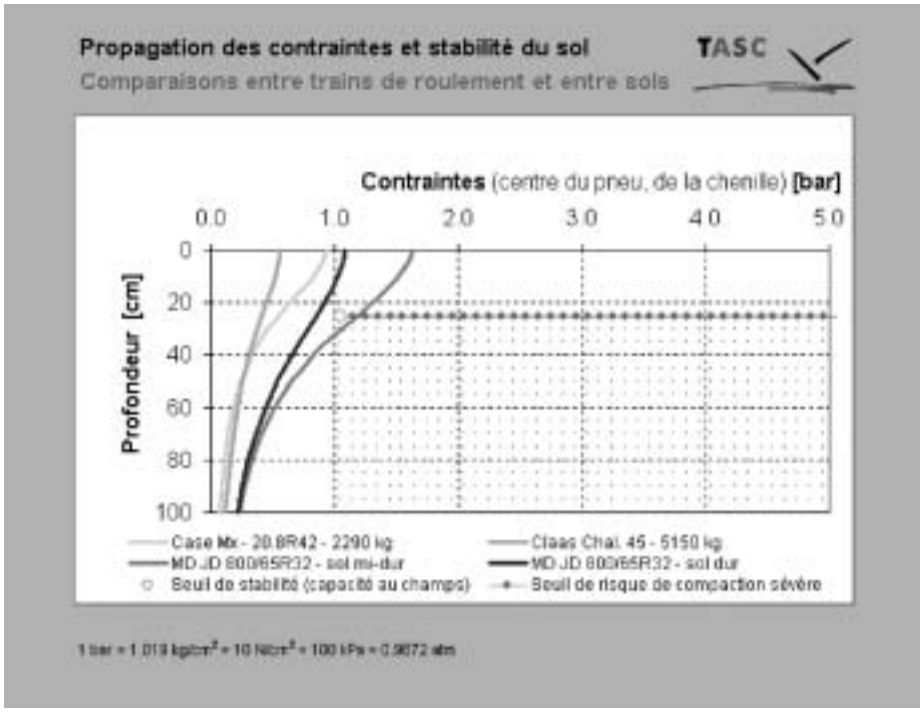
Données techniques de plus de 1000 modèles de pneumatiques

Une série de cinq feuilles réunissent au total plus de 1000 modèles de pneumatiques (état 2003), répartis en cinq classes principales (pneumatiques moteurs et pneumatiques porteurs pour remorques employés dans la sylviculture, pneumatiques directeurs, pneumatiques moteurs, pneumatiques porteurs pour remorques employés dans l'agriculture). Dans chaque classe, les pneumatiques sont répertoriés selon le diamètre des jantes (en pouce) dans un ordre croissant. Les informations relatives au type et à la dimension des pneumatiques peuvent être consultées puis importées directement dans la feuille de saisie. Indépendamment de celle-ci, il est possible de calculer la charge à la roue maximale autorisée selon les normes ETRTO à partir des feuilles des données techniques, compte tenu du type de pneumatique, de la pression de gonflage et de la vitesse du véhicule.

Outre les informations standard comme le diamètre et le type de jante, la largeur et le diamètre du pneumatique, la surface de l'empreinte, la charge et les indices de charge et de vitesse (fig. 14a), le tableau indique également la portance minimale et maximale à 30 km/h ainsi que la portance maximale autorisée à 40 km/h (fig. 14b).

La portance des pneumatiques est également importante pour la sécurité

La charge à la roue maximale autorisée varie suivant la catégorie de pneumatiques, la pression de gonflage et la vites-



(1) Tassement tolérable
(2) Tassement tolérable
(3) **Risque de compactage sévère entre 25 et 30 cm**
(4) Risque de compactage élevé jusqu'à 7 cm

Fig. 11: Propagation des contraintes de charges dans le sol. Lorsque le seuil de stabilité est dépassé par la courbe de propagation des contraintes de charge, la sollicitation est alors trop élevée, il y a risque de compactage sévère.

se du véhicule. Pour obtenir la charge maximale autorisée, il suffit de rechercher pour le modèle de pneumatique approprié sa charge maximale à 30 km/h (tenir compte de la pression de gonflage) et de la reporter dans la catégorie correspondante de la feuille «Standard ETRTO» (fig. 15), puis d'y typer la vitesse recherchée.

Restrictions et limites

Les informations données sur la propagation des contraintes de charge dans le sol, sur la sollicitation du sol et les dangers encourus reposent sur des algorithmes développés à partir de mesures en plein champ en grandes cultures. Malgré une base de données conséquente comprenant de nombreux sols de texture et de consistance différentes, comprenant de nombreux pneumatiques de dimensions, de charges et de pressions de gonflage diverses, les informations de TASC ne reflètent qu'une image plus ou moins précise de la réalité. Cette imprécision est d'autant plus évidente que le sol présente de par sa nature des caractères variables, hétérogènes dans l'espace et dans le temps. Il faut ajouter que les caractéristiques dynamiques du train de roulement et de son impact sur le sol, de la réaction du sol soumis à une contrainte de charge n'ont pu être suffisamment appréhendées; les résultats proposés doivent donc, de cas en cas, être interprétés de manière prudente voire différenciée.

Sol arables mi-lourds à lourds

Jusqu'ici, les essais ont été réalisés exclusivement sur des **sols arables, de cohésion moyenne à élevée** (limon sableux à argile limoneux avec une teneur en argile de plus de 15 % et une teneur en humus de moins de 5 %). Les sols sableux ont une faible cohésion en raison de leurs grains grossiers, il en va de même pour les sols organiques (gleys à moor, gleys à anmoor et moors) très humifères ou riches en tourbe. Pour ces sols, on peut s'attendre à des contraintes de charge supérieures. Les essais réalisés sur ces types de sols étant encore insuffisants, l'information recherchée pour ces sols doit être interprétée avec réserve. Le risque de compactage sévère établi par l'application TASC est dans ces deux cas plutôt sous-estimé. Par ailleurs, aucune validation n'a encore été effectuée pour l'heure sur prairies permanentes et sols forestiers.

Dans les relevés au champ, **les sols humides à détrempés (saturés)** étaient de règle. Des sous-sols peu humides, plutôt secs avec un potentiel hydrique supérieur à 130 hPa (pores Ø > 23 µm ressuyés) sont apparus que dans deux cas isolés. De ce fait, le seuil critique de stabilité a été fixé à un potentiel hydrique de 63 hPa (considéré comme valeur de référence pour les sols humides, ressuyés). Lorsque le sol est sec (>150 hPa), le risque de compactage est considérablement réduit.
Les terrains retenus pour nos essais avaient une faible **teneur en pierres (< 3 %).** On peut supposer que plus la pierrosité augmente, plus la portance du sol est élevée et moins ce sol est sensible au compactage. Cette influence (pierrosité > 3 %) n'est pas considérée dans l'application.

Petits pneumatiques: la pression de gonflage n'est pas encore prise en compte

Pour déterminer **la surface de l'empreinte** et la vulnérabilité des sols, la charge à la roue et la pression de gonflage ne sont prises en compte que pour les **pneumatiques d'un diamètre > 130 cm** (Diserens 2002). Pour les **petits pneumatiques** (pneumatiques directeurs, pneumatiques pour petits tracteurs et la plupart des pneumatiques pour remorques d'un diamètre ≤ 130 cm), la pression de gonflage n'intervient pas dans l'évaluation de la surface de l'empreinte et par là-même du danger pour les sols. Les mesures de l'empreinte ont été réalisées principalement avec des pneumatiques présentant un **profil de type traction** ou **Farmer.** C'est la raison pour laquelle les calculs intégrant des **pneumatiques de remorque de profils «ribbed», «A.W.» pour «Ackerwagen, pneus remorques», «flotation»** doivent être interprétés avec réserve.

Maximum trois passages, vitesse de 3 à 8 km/h

Le calcul des risques est valable pour **un passage de machine** (c.-à-d. jusqu'à trois foulages avec trois essieux). A noter que pour les lourdes machines intégrales

de récolte, la charge maximale apparaît deux à trois fois au maximum au même endroit. Par contre, les risques de compactage sévère dans les **chaintres** en bordure de parcelle après **passages multiples** ne sont pas pris en compte dans l'application.

Lors des essais au champ, la **vitesse des véhicules** est comprise entre 3 et 8 km/h. Le sol est sollicité alors par des **forces dynamiques** et se déforme instantanément. Dans cette plage, l'influence de la vitesse sur la déformation du sol est considérée comme négligeable. L'écart entre le tassement instantané et le tassement maximal (atteint en laboratoire après 24 heures de soumission à une force statique) est inférieure pour les sols à fraction grossière que pour les sols humides à fraction fine (Horn et al. 1994). Dans le cas de sols non consolidés soumis à une courte sollicitation, un sol sableux atteindra son seuil de déformation maximale plus vite qu'un sol argileux. On peut donc admettre que la vitesse joue un rôle moins important (si tant est qu'elle en joue un) pour les sols à fraction grossière que pour les sols à fraction fine.

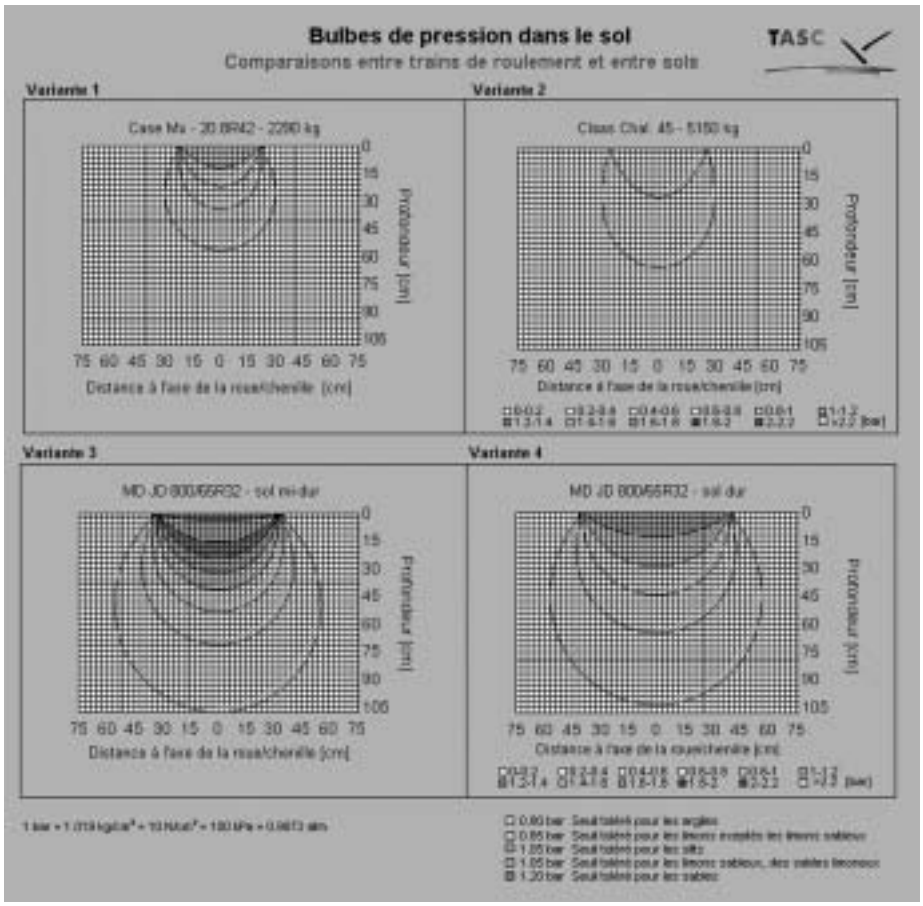
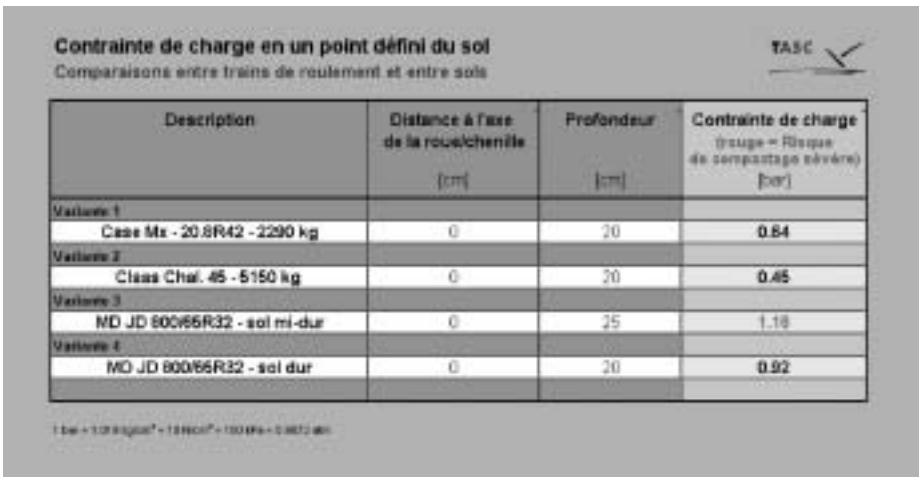


Fig. 12: Les graphiques des bulbes de pression permettent d'évaluer les risques encourus par les sols en profondeur et en largeur. L'impact de la pression est maximum au centre des pneumatiques ou des chenilles.

Les charges à la roue et à la chenille peuvent varier dans la pratique

Au champ, les charges à la roue ou à la chenille peuvent varier considérablement par rapport aux valeurs relevées à l'état statique (sans outils ni charge supplémentaire) sous l'effet de la **force de traction et du moment** ou des **déplacements du centre de gravité du véhicule.** Pour obtenir des résultats réalistes, il faut donc ajuster les valeurs en conséquence. Cela concerne notamment les tracteurs exerçant une importante **force de traction** (la charge à la roue diminue à l'avant et augmente à l'arrière), les tracteurs chargés **d'outils portés/ semi-portés lourds,** les convois avec **charges induites par le timon de la machine tirée** (la charge à la roue arrière du tracteur augmente). Les différents **chargements des trémies** des machines de récolte peuvent également entraîner des modifications considérables des charges à la roue/à la chenille. Enfin, les **terrains en pente** entraînent des fluctuations de la charge à la roue/à la chenille soit latéralement lorsque le véhicule se trouve dans le sens des courbes de niveau, soit longitudinalement, lorsqu'il se trouve dans le sens de la montée ou de la descente.



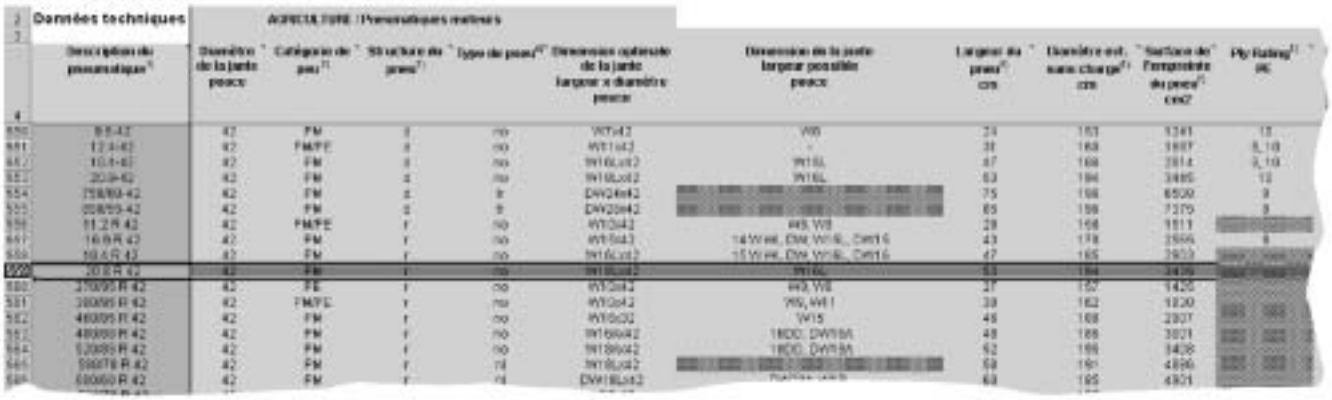
Contrainte de charge en un point défini du sol
Comparaisons entre trains de roulement et entre sols
TASC

Description	Distance à l'axe de la roue/chenille [cm]	Profondeur [cm]	Contrainte de charge (rouge = Risque de compactage sévère) [bar]
Variante 1			
Case Mx - 20.8R42 - 2290 kg	0	20	0.84
Variante 2			
Class Chal. 45 - 5150 kg	0	20	0.45
Variante 3			
MD JD 800/66R32 - sol mi-dur	0	25	1.18
Variante 4			
MD JD 800/66R32 - sol dur	0	20	0.92

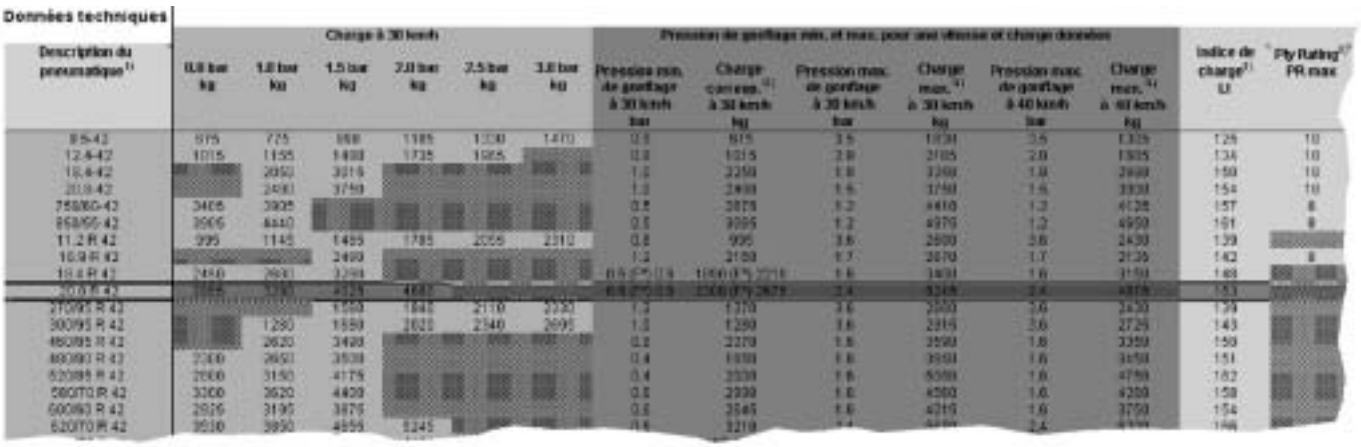
Fig. 13: Contrainte de charge en un point prédéfini du sol. Dans certains cas, il peut être intéressant de calculer la contrainte de charge à l'extérieur de la voie de passage (p. ex. dans les rangées de plantes), en bordure de voie de passage ou à une profondeur élevée (> 110 cm).

Les chenilles exigent une prudence particulière

Pour les **trains de roulement équipés de chenilles,** les **pressions de contact partielles** peuvent dévier plus ou moins de la moyenne calculée en raison du moment ou de la force de traction influencés par des paramètres techniques tels que disposition du train de roulement, distance entre chaque roue de soutien, tension des chenilles, suspension, attelage des outils au corps de traction et conditions du sol (Keller 2002). Des erreurs



a)



b)

Fig. 14: Tableau des pneumatiques moteurs utilisés dans l'agriculture (extrait). a) données standard, b) charges à la roue autorisées et pressions de gonflage.

Fig. 15: Exemples de calcul de la portance suivant la pression de gonflage et la vitesse (selon les normes ETRTO). Pour une pression de 1 bar et une vitesse de 30 km/h, le pneu moteur 20.8R42 (3ème ligne) affiche une charge maximale autorisée de 3290 kg (fig. 14b). A 40 km/h, cette charge n'est plus que de 3075 kg. Par conséquent, il est possible de rouler à 40 km/h en toute sécurité. Par contre si l'essieu arrière est soumis à une charge supplémentaire de 1,8 t (par exemple charrue réversible portée à 6 socs), une vitesse de 40 km/h ne serait plus autorisée.

lors de l'attelage des outils (p. ex. sollicitation trop importante de la roue motrice arrière) peuvent avoir des conséquences plus graves (charges ponctuelles élevées) qu'avec les tracteurs équipés de pneumatiques. Comme pour ces derniers, on calcule la pression de contact moyenne à l'aide de la surface de l'empreinte et de la charge à la chenille. L'application TASC ne peut fournir d'informations réalistes que si la charge est uniformément répartie sur les roues de soutien et les roues motrices, comme le montrent les résultats de Marsili et al. (1998) pour des sols de cohésion élevée. Sur un sol plat, ameubli, le résultat optimal est atteint lorsque la profondeur de pénétration des chenilles pendant le travail reste constante à l'avant comme à l'arrière, et que la chenille tendue repose d'une manière aussi plane que possible sur le sol (sans ondulation).

Encadré 3

Domaine d'application

L'application TASC est conçue essentiellement pour les recommandations et les directives pratiques destinées à l'emploi de machines. Il s'agit avant tout d'empêcher les compactages sévères du sous-sol. L'application est validée pour:

- Sols arables rassis de cohésion moyenne à élevée (sols riches en limon, en silt, en argile) avec une couche travaillée marquée (labour, passage du chisel) entre 20-25 cm.
- Sous-sol humide à détrempé avec un faible pourcentage de pierres.
- Un passage sur le champ avec un nombre de foulages répétés allant jusqu'à trois (trois essieux).
- Vitesses comprises entre 3 et 8 km/h.
- Pneumatiques avec barrettes marquées (profil de type Farmer, traction). La pression de gonflage n'est prise en compte pour évaluer la propagation des contraintes dans le sol que lorsque le diamètre des pneumatiques est supérieur à 130 cm.
- L'évolution des contraintes de charge est représentée de manière réaliste à partir d'une profondeur d'env. 15 cm. A des profondeurs plus faibles, la répartitions des contraintes n'est pas homogène.

Restrictions

Pour les points suivants, l'application TASC n'a pas encore fait ses preuves:

- Sols non cohérents comme les sols sableux ou les sols organiques ainsi que les prairies naturelles ou les sols forestiers.
- Sous-sols rassis secs. Le risque de compactage diminue largement dans ce cas.
- Sols avec une forte pierrosité. On peut supposer que la portance est plus élevée dans ce cas.
- Chaintres: le sol est extrêmement sollicité par le grand nombre de passages avec de lourdes charges, ce qui peut entraîner des compactages sévères importants.
- Les modifications de la charge à la roue lors de l'utilisation du véhicule (force de traction et moment ou déplacements du centre de gravité) doivent être estimées ou prises en compte lors de la saisie des données.
- Les pneumatiques de transport avec des barrettes peu marquées (pneumatiques porteurs, pneumatiques pour remorques, profil «flotation»
- L'influence de la pression de gonflage dans l'évaluation de la propagation des contraintes de charge dans le sol pour les roues d'un diamètre inférieur ou égal à 130 cm.
- Les compactages sévères préexistants ne peuvent pas être identifiés à l'aide de l'application TASC.

Le calcul des contraintes de charge reste une approximation

Le **calcul des contraintes de charge** en grandes cultures n'a vraiment de sens qu'à partir d'une profondeur d'environ 15 cm. D'une part, le passage des machines creuse des voies de passage non simulées par l'application et d'autre part, la répartition de la pression à la surface du sol reste très hétérogène en présence de crampons sur les pneumatiques et les chenilles. Pour obtenir des valeurs plausibles de contrainte de charge dans l'axe de la roue, de la chenille, on est parti du principe que plus le sol s'ameublissait, plus les contraintes de charge se concentraient autour de l'axe. C'est la raison pour laquelle les lignes isobares, formant les bulbes de pression, n'apparaissent pas aux deux côtés de la roue ou de la chenille dans les sols tendres ou mi-compacts, bien que certaines contraintes, non négligeables, puissent encore se manifester. Malgré l'adaptation du modèle de bulbe de pression de Boussinesq à des sols arables hétérogènes, cette représentation à double dimensions reste une approximation, en particuliers dans les 15 premiers centimètres.

En cas de risque de compactage sévère, il est nécessaire d'agir

L'indice d'un **risque de compactage sévère** équivaut à une déformation sérieuse probable de la structure sous la profondeur maximale d'ameublissement. Le maintien de la fertilité du sol à long terme est alors compromis. Il est recommandé de réduire les sollicitations. Les déformations du sol en profondeur ne se laissent pas observer, pour ce faire, il faudrait effectuer de nombreux prélèvements de sol avant le passage des machines.

Un **contrôle de la profondeur de l'ornière derrière la machine** (après un bref passage sur la parcelle) permet d'évaluer les risques. Une **profondeur maximale de 6–7 cm** est tolérée.

Tab. 2: Validation de l'application avec des mesures indépendantes au champ pour des sous-sols humides à détrempés(*) - Le sol est préconsolidé dans 6 cas (cas C).

Densité apparente effective	Surface		Sous-sol			Sol total	
	10-15 cm		35-40 cm	55-60 cm	total		
Valeurs indicatives g/cm³	1,7	1,6**	1,7			1,7	1,6**
Cas A: Sol sans compactage sévère avant et après ou seulement après passage							
Nombre de situations	15	6	22	20	42	57	48
Concordance en %	7	17	73	100	86	65	77
Cas B: Sol sévèrement compacté après passage							
Nombre de situations	9	11	0	0	0	9	11
Concordance en %	100	100	–	–	–	100	100
Cas C: Sol précompacté (non valable pour la validation)							
Nombre de situations	0	7	4	2	6	6	13
Concordance en %	–	100	100	100	100	100	100
Valable au total							
Nombre de situations	24	17	22	20	42	66	59
Concordance en %	**42**	**71**	**73**	**100**	**86**	**70**	**81**

* Dans 90 % des situations, potentiel hydrique < 63 hPa, pores grossiers (Ø ≥ 50 µm) en partie ressuyés

** Valeur indicative du sol superficiel 1,6 g/cm³ (après 0,1 g/cm³ de déduction selon Petelkau, 1991)

Validation de l'application sur la base des essais

Le sol est considéré comme sévèrement compacté lorsque la densité apparente effective dépasse la valeur indicative de 1,7 g/cm³, respectivement lorsque les contraintes de charge à la profondeur maximale d'ameublissement sont supérieures au seuil critique de stabilité.

On distingue trois cas:

- **Aucun risque:** il n'y a aucun risque lorsque les contraintes de charge calculées à la profondeur correspondant aux analyses de sol (en fonction du type de sol) sont égales ou inférieures au point de stabilité. Les informations de l'application TASC correspondent aux relevés effectués en plein champ lorsque la densité apparente effective après le passage des véhicules n'est pas supérieure à la valeur indicative (1,7 g/cm³), dans la mesure où le sol n'est pas déjà compacté avant et après, ou seulement après le passage des machines (cas A, tab. 2).
- **Risque:** il y a risque de compactage sévère lorsque les contraintes de charge calculées à la profondeur correspondant aux analyses de sol dépassent le point de stabilité. Les informations de l'application TASC correspondent alors aux relevés effectués en plein champ lorsque la densité apparente effective ne dépasse la valeur indicative (1,7 g/cm³) qu'après le passage des véhicules (cas B, tab. 2).
- **Sol préconsolidé:** si la densité apparente effective dépasse la valeur indicative avant comme après le passage des machines, il n'est plus possible d'évaluer les concordances entre l'application et les mesures (cas C, tab. 2). Le sol est préconsolidé. Que la sollicitation soit faible ou élevée, la structure du sol à priori reste affectée dans le court terme.

C'est sur la base d'analyses indépendantes de sol, couvrant douze sites humides à détrempés que l'application TASC est validée. L'examen de sa fiabilité regroupe 66 cas valables pour un total de 72, le sol étant surconsolidé à six reprises (tab. 2).

La concordance atteint 42 % dans la couche superficielle du sol, 73 % dans le sous-sol entre 35 et 40 cm, là où le risque de compactage sévère est le plus élevé. A une profondeur comprise entre 55 et 60 cm, la concordance atteint même 100 %. Si la valeur indicative de la densité apparente effective selon Petelkau (1991) était inférieure de 0,1 g/cm³ pour la couche superficielle qu'elle ne l'est pour le sous-sol (valeur indicative pour la couche superficielle de 1,6 au lieu de 1,7 g/cm³), la concordance serait de plus de 70 % pour la couche superficielle. Le sous-sol était en partie précompacté: des modifications structurelles proches de la valeur indicative ont été relevées entre 30 et 40 cm. Dans 90 % des cas, le potentiel hydrique du sous-sol était nettement inférieur à 63 hPa (pF1,8) correspondant à des sols humides, voire saturés. Etant donné l'humidité élevée du sol lors des relevés au champ, les recommandations de l'application TASC rendent l'utilisateur attentif avant même qu'une modification sérieuse de la structure ne survienne nécessairement.

Conclusions

Est-il possible d'évaluer les risques de compactage sévère qu'encourt le sol par le poids des machines, ceci dans un cadre pratique d'utilisation? Cette question fondamentale est restée jusque là ouverte. La valeur indicative de densité apparente effective, définie par la Société Suisse de Pédologie (SSP) il y a peu, occupe à cette fin une place prépondérante. Avec un taux de fiabilité de plus de 85 % pour le sous-sol, la présente application, basée sur de nombreuses années d'essais au champ et sur la mise en valeur de données suisses comme étrangères s'avère être une approche utile pour les sols de cohésion moyenne à élevée en grandes cultures. L'application permet en outre d'illustrer de cas en cas, le lien entre le train de roulement d'un véhicule et le sol. En matière de prévention, et de protection des sols, l'application TASC est à même d'apporter sa contribution à l'échelon de l'agriculteur.

Au cours des dernières années, les machines utilisées dans les cultures fourragères ont elles aussi enregistré une forte augmentation de leur puissance. Il n'est pas rare de voir désormais des tracteurs allant jusqu'à 150 kW, des machines de récolte et des véhicules pour l'épandage des engrais de ferme avec des charges à la roue comprises entre 5 et 6 t. Le temps des «machines légères pour la culture fourragère» est désormais révolu dans les exploitations modernes. Comme le sol des prairies n'est généralement pas ameubli, les sollicitations sont ici particulièrement importantes. L'application TASC va se développer, en se concentrant non seulement aux pneumatiques porteurs sans crampons et aux sols de grandes cultures à faible cohésion mais également aux prairies permanentes.

Encadré 4 (annexe)

Terminologie
Sol
Sable (S, s=sableux): fraction grossière du sol (Ø entre 50 et $2*10^3$ µm). Crisse sous la dent. Grains de sable apparents.
Silt (U, u=silteux): fraction fine du sol (Ø entre 2 et 50 µm), d'aspect savonneux à l'état humide et d'aspect farineux à l'état sec.
Argile (A, a=argileux): fraction la plus fine du sol (Ø < 2 µm), colle à l'état humide.
Limon (L, l=limoneux): sol comprenant 20 à 30 % d'argile et moins de 50 % de silt.
Sol léger (S, Sl,): grains de sable visibles et perceptibles, pas ou peu cohérent, à peine malléable, fendillé, friable.
Sol mi-lourd (L, Ul, Ls, U): peu de grains de sable visibles et perceptibles, crisse sous la dent, malléable, fendillé, roule sur l'épaisseur d'un crayon (Ø entre 2 et 7 mm).
Sol lourd (A, Al, La, Ua): à peine quelques grains de sable visibles et perceptibles, crisse à peine sous la dent, bien malléable, surface de frottement brillante, roule sur l'épaisseur d'un clou (Ø < 2 mm).
Granulométrie: classement du sol selon la taille des particules (cf. taille des particules pour l'argile, le silt et le sable).
Texture du sol: classement du sol selon la fraction granulométrique (argile, silt, sable).
Teneur en pierres (pierrosité): fraction grossière du sol (Ø > 2 mm).
Capacité au champ: état d'humidité du sol sans eau gravitaire. Plus la teneur en eau est élevée à la capacité au champ, plus les plantes ont d'eau à disposition sans manque d'oxygène.
Densité apparente [g/cm³] (également densité apparente sèche): masse de la phase solide du sol par unité volumique.
Densité apparente effective [g/cm³]: valeur corrigée de la densité apparente compte tenu de la teneur en argile.
Potentiel hydrique [hPa]: toutes les forces par unité de surface qui agissent contre la gravité de l'eau dans le sol (force d'adsorption, force capillaire). 1 hPa = 100 Pa = 100 N/m^2 = 10^{-3} bar
Valeur pF: logarithme négatif du potentiel hydrique. Valeur du degré de sécheresse du sol (par exemple: pF1,8 = 63 hPa, sol humide, pores grossiers Ø > 50 µm ressuyés; pF 2,5 = 316 hPa, sol sec, pores moyens et grossiers Ø > 10 µm ressuyés).
Moor: sol hydromorphe (remplis d'eau) avec un horizon de tourbe de plus de 30 cm.
Anmoor: forme d'humus avec structure temporairement «terreuse» et «boueuse» à saturation.
Gley: sol avec horizons marqués par la présence temporaire de la nappe phréatique.
Tourbe: matériel organique partiellement décomposé en raison du degré de saturation fréquemment élevé du sol.
Pression de contact moyenne [bar]: quotient de la charge à la roue par la surface de l'empreinte du pneumatique sur le sol.
Stabilité du sol: propriété mécanique du sol caractérisée par son aptitude à résister ou à se déformer de manière définitive suite à une contrainte de charge.
Résistance du sol: (cf. stablilité du sol)
Préconsolidation: (cf. stablilité du sol)
Sols cohérents: sols présentant une résistance moyenne à élevée au cisaillement, vaut pour les sols mi-lourds à lourds.
Contrainte de charge [bar]: force active à une profondeur définie du sol par unité de surface, transmise par l'eau du sol et les agrégats.
Bulbe de pression: représentation graphique à deux dimensions de la propagation des contraintes de charge (en profondeur et latéralement) par des lignes isobares (lignes de pression constante)
Algorithmes: ensemble des opérations (équations), qui conduisent à une solution définie (détermination de la surface de l'empreinte, de la propagation des contraintes de charge dans le sol).
Pneumatiques
Pneumatiques standard: hauteur/largeur des pneumatiques >= 0,8
Pneumatiques basse section: hauteur/largeur des pneumatiques 0,6 < x < 0,8
Pneumatiques Terra: hauteur/largeur des pneumatiques <= 0,6
Indice de charge (LI): l'indice de charge (LI) est une indication internationale de la charge maximale autorisée pour une vitesse donnée par le fabricant de pneumatiques, qualifiée d'indice de vitesse.
Indice de vitesse (SI): l'indice de vitesse (SI) est une indication internationale de la vitesse maximale pour laquelle un pneumatique à charge donnée (LI) est conçu.

Bibliographie

Arbeitsgruppe Boden, Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl., Hannover 1996.

Diserens E., Steinmann G., 2002: Calculation of pressure distribution in moist arable soils in eastern Switzerland: a simple model approach for the practice. Environmental Geomechanics – Monte Verità 2002. Ed. L.Vulliet, L. Laloui, B. Schrefler. EPFL Press. 413-421.

Diserens E., 2002: Détermination de la surface de l'empreinte des pneumatiques au champ à l'aide d'un modèle de calcul. Rapport FAT n° 582. 12 p.

DVWK, 1995: «Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil I: Mechanische Belastbarkeit», (Structural stability of mineral soils used for arable farming. Part I: Mechanical stability under load), Merkblätter zur Wasserwirtschaft 234.

ETRTO, 1996: Standards Manual. The European Tyres and Rim Technical Organisation.

FAL 2003. Vorbelastungsmessungen von zwölf Standorten im Ackerbaugebiet der Schweiz. (Unveröffentlicht)

Fröhlich O.K., 1934: Druckverteilung im Baugrunde, Verlag Julius Springer, Vienna, 185 S.

Hasinger G., Keller L., Marendaz E., Neyroud J.-A., Vökt U., Weisskopf P., 1993: Bodenbeurteilung im Feld. Hsg. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)

Horn R., Lebert M., 1994: Soil Compactability and Compressibility. Soil Compaction in Crop Production. Ed. B.D. Soane, C. van Ouwerkerk. Elsevier Verlag.

Keller T., Trautner A., Arvidsson J., 2002: Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows. Soil Till. Res. 68, 39-47.

Lang H.-J., Huder J., 1982: Bodenmechanik und Grundbau. Springer-Verlag. Berlin, 226 S.

Lebert M., 1989: Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden, (Evaluation and prediction of the mechanical stability of arable soils under load). Band 12. Bayreuther Bodenkundliche Berichte.

Marsili A., Servadio P., Pagliai M., Vignozzi N., 1998: Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber- and metal-tracked tractors. Soil Till. Res. 49, 185-199.

Petelkau H., 1991: Ertragliche Auswirkungen technogener Schadverdichtungen der Ackerkrume. Agrartechnik, Berlin 41, 2, S. 54-57

Qasem H., Attinger W., Berli M., Schulin R., 2000: Zusammenhänge zwischen ödometrischer Verdichtungsempfindlichkeit und morphologischer Merkmale von Böden, untersucht an ausgewählten Standorten auf den Trassee der Transitgasleitungen Däniken-Grimsel (TRG 2) und Rodersdorf-Lostorf (TRG 3). Institut für Terrestrische Ökologie der ETH Zürich.

Spiess E., Diserens E., 2001: Betteraves à sucre: technique de récolte et protection des sols. Rapport FAT n° 567. 20 p.

Des demandes concernant les sujets traités ainsi que d'autres questions de technique et de prévention agricoles doivent être adressées aux conseillers cantonaux en machinisme agricole indiqués ci-dessous. Les publications peuvent être obtenues directement à la FAT (Tänikon, CH-8356 Ettenhausen). Tél. 052 368 31 31, Fax 052 365 11 90,
E-Mail: doku@fat.admin.ch, Internet: http://www.fat.ch

FR	Berset Roger, Institut agricole, 1725 Grangeneuve	Tél. 026 305 58 49
GE	AgriGenève, 15, rue des Sablières, 1217 Meyrin	Tél. 022 939 03 10
JU		Tél. 032 420 74 20
NE	Benoît Steve, CNAV, 2053 Cernier	Tél. 032 854 05 30
TI	Müller Antonio, Office de l'Agriculture, 6501 Bellinzona	Tél. 091 814 35 53
VD	Louis-Claude Pittet, Ecole d'Agriculture, Marcelin, 1110 Morges	Tél. 021 801 14 51
	Hofer Walter, Ecole d'Agriculture, Grange-Verney, 1510 Moudon	Tél. 021 995 34 57
VS	Roduit Raymond, Ecole d'Agriculture, Châteauneuf, 1950 Sion	Tél. 027 606 77 70
SRVA	Mouchet Pierre-Alain, CP 128, 1000 Lausanne 6	Tél. 021 619 44 61
SPAA	Grange-Verney, 1510 Moudon	Tél. 021 995 34 28

Les «Rapports FAT» paraissent environ 20 fois par an. Abonnement annuel: Fr. 60.–. Commandes d'abonnements et de numéros particuliers: FAT, Tänikon, CH-8356 Ettenhausen. Tél. 052 368 31 31, Fax 052 365 11 90.
E-Mail: doku@fat.admin.ch – Internet: http://www.fat.ch
Les Rapports FAT sont également disponibles en allemand (FAT-Berichte).– ISSN 1018-502X.